



**UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA
CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS SOCIALES Y HUMANIDADES
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS SOCIO URBANOS
CENTRO DE ESTUDIOS ESTRATÉGICOS PARA EL DESARROLLO
DOCTORADO EN GEOGRAFÍA Y ORDENACIÓN TERRITORIAL**



Doctorado en Geografía y Ordenación Territorial

Tesis

**Servicio ecosistémico de regulación de inundaciones en la microcuenca
“El Guayabo”, Jalisco, México.**

Que presenta para obtener el grado de
Doctor en Geografía y Ordenación Territorial
el estudiante:

M.C. Hugo de Alba Martínez

DIRECTORA DE TESIS:

Dra. Bertha Márquez Azúa

Centro de Estudios Estratégicos para el Desarrollo
Universidad de Guadalajara, México

**GUADALAJARA, JALISCO, ESTADOS UNIDOS MEXICANOS,
2019.**

A mis hijas Emilia y María

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer a mi esposa Ana Brisa Aguinaga Enríquez por todo su apoyo y paciencia estos cuatro años, especialmente durante el último.

A mi directora de tesis, la Dra. Bertha Márquez Azúa, por su invaluable ayuda en la realización de esta investigación.

Al Dr. Heriberto Cruz Solís, Dr. Juan Alfredo Hernández Guerrero y la Dra. María de Lourdes Romo Aguilar, por su dedicación en la lectura de los borradores, así como por sus importantes comentarios y aportaciones.

Deseo expresar mi profundo agradecimiento al Dr. David Rizo Decelis por la minuciosa revisión de este trabajo, así como por sus valiosos consejos y comentarios, los cuales derivaron en su mejora sustancial.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo para la realización de este doctorado.

Al ITESO por permitirme entrar el Programa de Superación de Nivel Académico, sin el cual no me hubiese sido posible realizar este doctorado. En particular a Gisel Hernández Chávez, Dra. Catalina Morfín López, Christopher Estrada Barahona, Dra. Elvia Castro Félix y Jorge de Obeso Noriega.

Al personal del Centro de Investigación Aplicada en Ciencias de la Tierra e Ingeniería (CAESER) de la Universidad de Memphis, donde realicé una estancia de investigación, particularmente al Dr. Brian Waldron, al Dr. Scott Schoefnacker, Luz Gray y en especial al Dr. Claudio Meier, por su extraordinaria asesoría en temas de hidrología.

A mis compadres Nate y Zinnia Ron-Ferguson por su inestimable amistad y quienes fueron la mejor compañía durante la realización mi estancia en Memphis.

Quiero expresar mi gratitud a todos los profesores del doctorado por transmitirme su amplio conocimiento. A mis compañeros de quienes aprendí muchas cosas. Asimismo, quiero agradecer al personal del doctorado: al Dr. Francisco Jalomo Aguirre, Paulina Delgadillo Gutiérrez y Antonio Mena Silva.

A mis colegas del ITESO, la Maestra Lydia Hernández Rivera por su invaluable amistad y apoyo; a Javier Clausen Silva por las valiosas conversaciones “de pasillo”; Dr. Fernando Hernández Ramírez, por permitirme instalar un pluviómetro en su casa; a Daniel

de Obeso Partida, Álvaro Ochoa López, Dr. Juan Jorge Hermsillo Villalobos, Dr. Alejandro Flores Estrella, Dr. David Ochoa González, Dr. Carlos Gonzalez Figueredo, Raúl García Huerta, César Real Diez Martínez, Nicolás Hernández Gil, Cristóbal Camarena Bernard, Gabriela Ochoa Covarrubias, Gil Ochoa González, Juan Gabriel Morales Padilla y Rodolfo Chávez Ortega.

A mis estudiantes de PAP, por su valiosísimo esfuerzo y apoyo en el trabajo de campo y procesamiento de datos: Rodrigo Villalpando Vizcaino, María Antonia Bravo Ramón, Juan Ignacio Orozco Seifert, Jesús Salas Betancourt, Salvatore Basso Barba, David Terán Dagnino, Mariana Maciel Ramos, Ana Sofía Avelar Luna, Jessica Soto Balvanera, Ana Inés Hernández López, Leonardo Mendoza Corvera, Juan Pablo Jiménez, Paulina Reyes García, Álvaro Monroy Morales, Mariana Osuna Maciel y Daniela Irazoqui Ruelas.

A todos aquellos que me proporcionaron datos e información, sin la cual no hubiese sido posible la realización de este trabajo, particularmente a Alejandro Barba Blanco de *Casas y Terrenos*, a Rafael Chávez García Silva de IMEPLAN, al Dr. Javier Vergara Blanco, al personal de *COMUNA Ingeniería*: Carlos Aguirre Paczka, Margarita Castrillo de la Peña y Aurelio Campos Hoepfner.

Al Dr. Arturo Balderas Torres, Ricardo Ontiveros Enríquez, Sandra Valdés Valdés y Pedro Alcocer Santos por su apoyo en este estudio.

A Álvaro Barriga Carranza y Omar Tinajero López del *Café Punto Trópico* por proveer el mejor de los espacios para trabajar en esta tesis.

Finalmente, quiero agradecer a mis padres Luis Alonso de Alba Bessonier y Blanca Inés Martínez Ramos por todo su amor y apoyo a lo largo de mi vida.

Resumen

El concepto de servicios ecosistémicos (SE) se refiere a los beneficios que los seres humanos reciben de la naturaleza. Entre los diferentes tipos de SE, se encuentran aquellos que proveen una mitigación a peligros por fenómenos naturales. Por ejemplo, el servicio ecosistémico de regulación de inundaciones que ocurre cuando los ecosistemas, como los forestales y agrícolas, retienen el agua en eventos de precipitación, evitando daños por inundación en poblaciones aguas abajo.

Las inundaciones son uno de los desastres por fenómenos naturales más recurrentes y devastadores en el mundo, causan grandes pérdidas humanas, económicas y ambientales. Se contempla que, en muchas partes del mundo, el riesgo por inundación aumentará en el futuro, como consecuencia de los procesos de urbanización, el aumento de antropización en zonas potencialmente inundables y debido al cambio climático.

El área de estudio comprende la microcuenca “El Guayabo” (76 km²) y se localiza en la parte alta de la cuenca “El Ahogado”, en los municipios Tlajomulco de Zúñiga y San Pedro Tlaquepaque de la Zona Metropolitana de Guadalajara, México. El Guayabo se encuentra entre aquellas con mayor riesgo de inundación.

Este trabajo tiene como objetivo evaluar el servicio ecosistémico de regulación de inundaciones dentro del área de estudio, con base en la capacidad de reducción del riesgo a eventos extremos de lluvia. Para lograr esto se llevaron a cabo las siguientes acciones: (1) Se elaboró una caracterización del área de estudio, a una escala de microcuenca, donde se incluyeron los aspectos relevantes al SE de regulación de inundaciones del medio físico (abióticos y bióticos) y del medio antrópico, así mismo una revisión de los instrumentos normativos que intervienen en la ordenación territorial; (2) Se efectuó el análisis de las bases de datos de las estaciones meteorológicas cercanas a la microcuenca, se obtuvieron las precipitaciones máximas diarias para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, utilizando los métodos de Gumbel y California; (3) A través de un sistema de información geográfica (SIG), se establecieron escenarios de cobertura y uso del suelo, utilizando ortofotografía de alta resolución e información vectorial de la zona, para los años de 1993, 1999, 2011 y un escenario proyectado futuro; (4) Se utilizó el modelo hidrológico TR-20 para simular los caudales y volúmenes máximos esperados para los seis periodos de retorno,

en los diferentes escenarios de cobertura y uso del suelo, posteriormente se obtuvieron las superficies de inundación en función de caudal, (5) Con base en número de curva de escorrentía (CN), se analizó y comparó la capacidad de mitigación potencial de la escorrentía (MPE) entre los escenarios de 2011 y proyectado, y; (6) Se generó un índice de riesgo espacialmente explícito que combina los resultados del modelado hidrológico con variables socio-demográficas para cuantificar en función de éste, el servicio ecosistémico de regulación de inundaciones.

Los resultados revelan una pérdida de superficie de cobertura agrícola, del 38% en 2011 al 16% en el escenario proyectado. Por el contrario, para el mismo periodo, se observó un aumento en las coberturas urbanas, del 24% al 51%. Las coberturas forestales y agrícolas tienen una mayor MPE que las superficies urbanas. El índice de riesgo permitió identificar y evaluar cuantitativamente aquellas zonas que proveen un servicio ecosistémico de regulación de inundaciones, así como las zonas donde habrá una mayor demanda de éste. El cambio a coberturas del suelo menos permeables, particularmente en la parte media-alta, aumentará significativamente la escorrentía, volumen y caudal máximo que impactará aguas abajo. Aunado a esto, debido a la urbanización proyectada en la parte baja, aumentará la exposición, y por tanto el riesgo por inundación.

La metodología propuesta en este estudio, fue apropiada para evaluar escenarios donde exista degradación de los SE, pero también puede ser útil para evaluar donde, a partir de políticas territoriales, se busque incrementar el servicio de regulación de inundaciones. Este trabajo de investigación sienta las bases técnicas para evaluar e implementar medidas de protección en zonas prioritarias que mitiguen la escorrentía en eventos extremos de lluvia.

Abstract

The concept of ecosystem services (ES) refers to the benefits that human beings receive from nature. Among the different types of ES, there are those that provide mitigation to hazards due to natural phenomena. For example, the ecosystem service of flood regulation that occurs when ecosystems, such as forests and agricultural lands, retain water in precipitation events, preventing flood damage in downstream populations.

Floods are one of the most recurrent and devastating natural disasters in the world, causing great human, economic and environmental losses. It is envisaged that, in many parts of the world, flood risk will increase in the future, as a result of the urbanization processes, the increase of anthropization in potentially flooding areas and due to climate change.

The study area is defined by “El Guayabo” watershed (76 km²), located in the upper part of the "El Ahogado" basin, in the municipalities of Tlajomulco de Zúñiga and San Pedro Tlaquepaque in the Metropolitan Zone of Guadalajara, Mexico. El Guayabo is among those with the highest risk of flooding.

The purpose of this work is to evaluate the flood regulation ecosystem service within the study area, based on the capacity to reduce the risk to extreme rain events. To achieve the latter, the following actions were taken: (1) A characterization of the study area was elaborated, at a watershed scale, where the ES relevant aspects of the physical environment flood regulation (abiotic and biotic) and the anthropic environment were included, as well as a review of the regulations which intervene in territorial planning; (2) An analysis of the meteorological stations near the micro-basin databases was carried out, the maximum daily precipitations for the return periods of 2, 5, 10, 25, 50 and 100 years were obtained, using the methods of Gumbel and California; (3) Through a geographic information system (GIS), land cover and land use scenarios were established, using high resolution orthophotography and vector information of the area, for the years of 1993, 1999, 2011 and a projected future scenario; (4) The hydrological model TR-20 was used to simulate the peak discharge and volumes expected for the six return periods in the different scenarios of coverage and land use. Later, the flood extents were obtained according to the peak discharges, (5) Based on the runoff curve number (CN), the potential runoff mitigation capacity (MPE) between the 2011 and projected scenario was analyzed and compared, and; (6) A spatially explicit risk

index was generated that combines the results of hydrological modeling with socio-demographic variables to quantify the ecosystem service of flood regulation.

The results reveal a loss of agricultural coverage area, from 38% in 2011 to 16% in the projected scenario. On the contrary, for the same period, an increase in urban coverage was observed, from 24% to 51%. Forest and agricultural cover have a higher MPE than urban surfaces. The risk index made it possible to identify and quantitatively assess those areas that provide an ecosystem service for flood regulation, as well as areas where the ES will have a greater demand. The change to less permeable soil cover, particularly in the upper-middle part, will significantly increase the runoff, volume and peak discharge that will impact downstream. In addition to this, due to the urbanization projected in the lower part, the exposure will increase, and therefore the flood risk.

The methodology proposed in this study was appropriate to evaluate scenarios where ES degradation exists. In addition, it can also be useful to evaluate where, based on territorial policies, the flood regulation service should be increased. This research work provides the technical basis for evaluating and implementing protection measures in priority areas, which mitigate runoff in extreme rain events.

Résumé

Le concept de services écosystémiques (SE) est relatif aux bénéfices que les êtres humains reçoivent de la nature. Entre les différents genres de SE, se trouvent ceux qui procurent un soulagement aux dangers qui sont occasionnés par des phénomènes naturelles. Par exemple, le service écosystémique de régulations d'inondations qui arrive quand les écosystèmes, comme ceux des forêts et agricoles, retiennent l'eau en cas de précipitations, empêchent dégâts par inondations aux villes qui se trouvent en aval.

Les inondations sont un des désastres par phénomènes naturelles les plus récurrents et plus dévastateurs du monde, ils causent des grandes pertes humaines, économiques et de l'environnement. Il se contemple que, dans beaucoup des parties du monde, au futur, le risque par inondation augmentera, comme une conséquence des procès d'urbanisation, de l'augmentation d'établissements humaines dans des zones qui sont potentiellement en risque de souffrir inondations et à cause du changement climatique.

La zone d'étude qui comprend le micro bassin versant El Guayabo (76 km²) se trouve dans la partie haute du bassin versant "El Ahogado", dans les communes de Tlajomulco de Zúñiga et de San Pedro Tlaquepaque de la Zone Métropolitaine de Guadalajara, México. El Guayabo se trouve entre celles avec le plus de risque d'inondation.

Ce travail a comme objectif l'évaluation du service écosystémique de régulation d'inondations dans la zone d'étude, avec la base de capacité de réduction de risque en cas de pluie extrême. Pour réussir ça, les suivantes actions sont prissent : (1) une représentation de la zone d'étude a été faite, à une échelle de micro bassin versant, ou les aspects d'importance ont été inclus au SE de régulation d'inondations du milieu physique (abiotiques et biotiques) et du milieu anthropique, de même une révision des instruments normatifs qu'interviennent dans le classement territorial ; (2) un analyse des bases de données des stations météorologiques prochaines au micro bassin versant a été fait, les précipitations maximum obtenues par jour pour les périodes de retour de 2, 5, 10, 25, 50 et 100 ans, en utilisant les méthodes Gumbel et Californie; (3) À travers d'un système d'information géographique (SIG), des scènes de couverture et utilisation du sol ont été établi, avec l' utilisation d'orthophotographie de haute résolution et information vectorielle de la zone, pour les années de 1993, 1999, 2011 et une scène future projetée; (4) Un modèle hydrologique TR-20 a été

utilisé pour simuler les débits et volumes pics attendues pour les six périodes de retour, dans les différents scènes de couverture et d'utilisation du sol, subséquemment les surfaces d'inondation en fonction du débit ont été obtenus, (5) Avec la base du numéro de courbe d'écoulement (CN), la capacité de mitigation potentielle d'écoulement (MPE) a été analysé et comparé entre les scènes de 2011 et le projeté, et (6) Un index de risque spatialement explicite qui combine les résultats du modelage hydrologique avec les variables sociodémographiques a été créé pour calculer, en fonction de celui-ci , le service écosystémique de régulation d'inondations.

Les résultats donnent une perte de la superficie de couverture agricole de 38% en 2011 à 16% dans la scène projetée. Au contraire, pour la même période, une augmentation des couverture urbaines a été observé, de 24% au % 51%. Les couvertures des forêts et agricoles ont une plus grande MPE que les couvertures urbaines. L'index de risque a permis d'identifier et évaluer d'une façon quantitative les zones qui fournissent un service écosystémique de régulation d'inondations, ainsi que les zones où il y aura une plus grande demande de celui-ci. Le change à couvertures du sol moins perméables, particulièrement dans la partie mi- haut, augmentera de façon significative l'écoulement, le volume et le bassin versant maximum qui aura un impact en aval. Associé à ça, à cause de l'urbanisation projeté dans la partie bas, l'exposition augmentera, et en conséquence le risque par inondation.

La méthodologie proposée dans cet étude a été la correcte pour évaluer les scènes où il existe une dégradation des SE, mais aussi ça peut être utile pour évaluer où, à partir des politiques territoriaux, on cherche augmenter le service de régulation d'inondations. Ce travail d'investigation établit les bases techniques pour évaluer et mettre en œuvre les mesures de protection dans les zones prioritaires qui atténuent les écoulements en cas de pluie extrême.

Índice general

1. Introducción.....	27
1.1 <i>Objetivos</i>	31
2. Marco teórico y estado del arte.....	33
2.1 <i>Desarrollo sustentable</i>	33
2.2 <i>Estado del Arte de los servicios ecosistémicos</i>	39
2.3 <i>Servicios ecosistémicos de regulación de inundaciones</i>	43
2.4 <i>Cartografía de servicios ecosistémicos</i>	43
2.4.1 <i>Herramientas geoespaciales para evaluación de los servicios ecosistémicos</i>	45
2.5 <i>Análisis de riesgo de inundaciones</i>	50
2.5.1 <i>Determinantes del riesgo</i>	51
2.5.2 <i>Uso de los sistemas de información geográfica para el análisis de riesgos</i>	53
2.5.3 <i>Elección del concepto de riesgo y sus componentes</i>	54
2.5.4 <i>Construcción del índice de riesgo de inundación</i>	56
3. Metodología.....	58
3.1 <i>Trabajo de campo</i>	58
3.2 <i>Trabajo de gabinete</i>	58
3.2.1 <i>Revisión de antecedentes</i>	58
3.2.2 <i>Análisis espacial y herramientas de geoprocésamiento</i>	59
3.2.3 <i>Caracterización climática</i>	60
3.2.4 <i>Análisis estadístico de los datos de precipitación</i>	64
3.2.5 <i>Caracterización morfométrica de la microcuenca “El Guayabo”</i>	67
3.2.6 <i>Hidrometría</i>	71
3.2.7 <i>Modelado hidrológico</i>	71
3.2.8 <i>Aplicación del TR-20</i>	84
3.2.9 <i>Comparativa con otros métodos hidrológicos</i>	92
3.2.10 <i>Determinación de las áreas de inundación en función del caudal</i>	92
3.2.11 <i>Determinación del índice de riesgo</i>	94
4. Caracterización del área de estudio.....	99

4.1	<i>Características generales</i>	99
4.2	<i>El medio físico</i>	101
4.2.1	Características climáticas	101
4.2.2	Geología	102
4.2.3	Edafología: tipos de suelo, textura y espesor	105
4.2.4	Hidrografía de la microcuenca	108
4.3	<i>Medio biótico</i>	113
4.3.1	Tipos de vegetación	113
4.3.2	Flora.....	117
4.3.3	Fauna	118
4.4	<i>Medio antrópico</i>	120
4.4.1	Demografía y contexto socioeconómico	120
4.4.2	Contexto Territorial del Bosque la Primavera.....	125
4.4.3	Contexto de la ordenación territorial	126
5.	Resultados y discusión	133
5.1	<i>Análisis de los datos de precipitación</i>	133
5.1.1	Determinación de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia.....	138
5.1.2	Resultados de precipitaciones máximas diarias.....	139
5.2	<i>Modelado hidrológico</i>	142
5.2.1	Grupo de suelo hidrológico	142
5.3	<i>Escenarios de cobertura y uso del suelo</i>	143
5.4	<i>Número de curva</i>	147
5.4.1	Tiempos de concentración resultantes para la microcuenca “El Guayabo”.	154
5.5	<i>Modelado de TR-20</i>	154
5.5.1	Comparación del TR-20 con otros métodos	154
5.5.2	Resultados del TR-20	156
5.6	<i>Inundación del cauce principal</i>	165
5.7	<i>Evaluación del servicio ecosistémico de regulación de inundaciones</i>	166
5.7.1	Área inundada.....	170
5.7.2	Valoración de la tierra	172

5.7.3	Análisis de riesgo	174
5.7.1	Identificación de zonas de provisión y demanda.....	182
6.	Conclusiones	184
7.	Referencias.....	187
Anexo 1.	Resultados de campo para las mediciones de infiltración.....	205
Anexo 2.	Rutina para calcular el área inundada dado un caudal en <i>Python</i>	206
Anexo 3.	Rutina para estandarización de variables directamente en los atributos de la información vectorial en <i>Python</i>.....	208
Anexo 4.	Resultados de la prueba de rangos múltiples.	216

Índice de figuras

Figura 1. La visión dominante del desarrollo sustentable. Fuente: Modificado de Eichler (1999)	35
Figura 2. Estudios sobre servicios ecosistémicos entre 1998 y 2011. Fuente: Modificado de Egoh et al. (2012)	44
Figura 3. Reconciliación de dos definiciones importantes de riesgo incorporando el término exposición. Tomado de Klijn et al. (2015)	53
Figura 4. Lagunas de información detectadas en las bases de dato meteorológica para la variable de precipitación para el periodo 1990-2010. Fuente: Tomado del reporte del Proyecto de Aplicación profesional elaborado por Villalpando-Vizcaino et al. (2016)	62
Figura 5. Distribuciones de lluvia en 24 horas, las abscisas representan las horas del día y las ordenadas la porción de precipitación total. Fuente: Elaboración propia con datos del USDA (1986).....	74
Figura 6. Solución para la ecuación de escorrentía. Fuente: Modificado de USDA (1986).	76
Figura 7. Cuadrantes auxiliares en el control de calidad sobrepuestos sobre la ortofoto correspondiente al año 2011 y búfer de 500 metros de la microcuenca. Fuente: Elaboración propia con datos del IIEG (2011).....	86
Figura 8. Ubicación general de “El Guayabo”. Fuente: elaboración propia con datos del INEGI y CEA (2011).....	99
Figura 9. Mapa hipsométrico de la microcuenca “El Guayabo”. Fuente: elaboración propia con datos del INEGI y CEA (2011)	100
Figura 10. Geología del área de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos de CETENAL (1975b)	104
Figura 11. Corte mostrando un perfil de jal en el Bosque La Primavera. Fuente: Fotografía tomada por David Rizo.....	104
Figura 12. Perfil estratigráfico de un sondeo en La Primavera. Fuente: Rosas-Elguera et al. (1997)	105
Figura 13. Edafología. Fuente: Elaboración propia con datos de CETENAL (1975a)	106

Figura 14. Situación geográfica la cuenca del Ahogado. Fuente: Elaboración propia con datos de CEA (2011) e INEGI.	108
Figura 15. Hidrología superficial de la microcuenca “El Guayabo”. Elaboración: fuente propia con base en las cartas topográficas de INEGI, clave F13D65e y F13D65f, escala 1: 20,000.	109
Figura 16. Perfil longitudinal del cauce principal de El Guayabo. Fuente: elaboración propia a partir de datos de INEGI.	111
Figura 17. Estaciones hidrométricas cercanas al área de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI.	112
Figura 18. Tipos de vegetación y coberturas del suelo, de acuerdo Serie VI de Uso del Suelo y Vegetación. Fuente: elaboración propia con datos de INEGI.	114
Figura 19. Bosque de Encino-Pino. Fuente: Fotografía tomada por el autor.	116
Figura 20. <i>Hexalectris brevicaulis</i> (L.O. Williams), una orquídea saprófita, vista en la parte alta de la microcuenca. Fuente: Fotografía tomada por el autor.	117
Figura 21. <i>Mammillaria jaliscana</i> vista en la zona del arroyo de La Culebra. Fuente: Fotografía tomada por el autor.	118
Figura 22. Puma (<i>Felis concolor</i>) captado con cámara trampa cerca del parteaguas norte de la microcuenca “El Guayabo”. Fuente: ITESO-Anillo Primavera (2017)	119
Figura 23. Venado cola blanca (<i>Odocoileus virginianus</i>), en la parte alta de la microcuenca. Fuente: Fuente: ITESO-Anillo Primavera (2017)	120
Figura 24. Ejemplo de la uurbanización dentro de la microcuenca en el límite de la ANP La Primavera. Fuente: Fotografía tomada por el autor.	121
Figura 25. Grado de marginación a nivel de área geoestadística básica (AGEB). Fuente: elaboración propia con datos de CONAPO (2012).	122
Figura 26. Precio de la tierra. Fuente: Elaboración propia con datos de Casas y Terrenos (2018).	123
Figura 27. Dragado y desazolve de la presa El Guayabo. Fuente: Informador (2017).	124
Figura 28. UGAS en la microcuenca “El Guayabo”. Fuente: elaboración propia con datos del OET de Gobierno de Tlajomulco de Zúñiga (2010) y OET del Gobierno del Estado de Jalisco (2006).....	128

Figura 29. Zonificación primaria del POTMet en la microcuenca “El Guayabo”. Fuente: elaboración propia con datos de IMEPLAN (2017a).	130
Figura 30. Zonificación secundaria del POTMet. Fuente: elaboración propia con datos de IMEPLAN (2017a).	130
Figura 31. Usos generales de la zonificación primaria vigente la microcuenca “El Guayabo”. Fuente: elaboración.	131
Figura 32. Zonas con conflicto entre conservación propuesta por el POTMet y el uso general del suelo del plan parcial proyectado. Fuente: Elaboración propia con datos de IMEPLAN (2017a).	132
Figura 33. Diagrama de caja y bigotes de las estaciones meteorológicas. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ERIC III.	134
Figura 34. Gráfico de medias e intervalos de confianza 95.0%. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ERIC III.	134
Figura 35. Curvas IDF para la microcuenca “El Guayabo” obtenidas mediante la ecuación de Bell. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ERIC III.	139
Figura 36. Ajuste para obtener la precipitación en función del periodo de retorno. Fuente: Elaboración propia.	141
Figura 37. Precipitaciones extremas (mm) por periodo de retorno (años). Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ERIC III.	142
Figura 38. Mapa resultante de los grupos hidrológicos del suelo. Fuente: elaboración propia a partir de datos de INEGI y CEA (2011)	143
Figura 39. Escenario de uso del suelo en 1993. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de IMEPLAN.	144
Figura 40. Escenario de uso del suelo en 1999. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de IMEPLAN.	144
Figura 41. Escenario de uso del suelo en 2011. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de IMEPLAN.	145
Figura 42. Escenario de uso del suelo proyectado. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de IMEPLAN.	145
Figura 43. Superficie por uso del suelo para los escenarios a modeladar. Fuente: elaboración propia derivado datos obtenidos de IMEPLAN.	147

Figura 44. Reporte del WMS del número de curva ponderado para el escenario de 1993. Fuente: elaboración propia.	148
Figura 45. Reporte del WMS del número de curva ponderado para el escenario de 1999. Fuente: elaboración propia.	149
Figura 46. Reporte del WMS del número de curva ponderado para el escenario de 2010. Fuente: elaboración propia.	150
Figura 47. Reporte del WMS del número de curva ponderado para el escenario proyectado. Fuente: elaboración propia.	151
Figura 48. Números de curva del escenario 1993. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IMEPLAN, INEGI y CEA (2011).	152
Figura 49. Números de curva del escenario 1999. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IMEPLAN, INEGI y CEA (2011).	152
Figura 50. Número de curva del escenario 2011. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IMEPLAN, INEGI y CEA (2011).	153
Figura 51. Número de curva del escenario proyectado. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IMEPLAN, INEGI y CEA (2011).	153
Figura 52. Hidrogramas resultantes del escenario 1993 para los periodos de retorno analizados. Fuente: elaboración propia con WMS.	157
Figura 53. Hidrogramas resultantes del escenario 1999 para los periodos de retorno analizados. Fuente: elaboración propia con WMS.	158
Figura 54. Hidrogramas resultantes del escenario 2011 para los periodos de retorno analizados. Fuente: elaboración propia con WMS.	158
Figura 55. Hidrogramas resultantes del escenario proyectado para los periodos de retorno analizados. Fuente: elaboración propia con WMS.	159
Figura 56. Impacto en los caudales máximos por periodo de retorno. Fuente: elaboración propia.	161
Figura 57. Hidrograma de los distintos escenarios para el periodo de retorno de 2 años. Fuente: elaboración propia.	162
Figura 58. Hidrograma de los distintos escenarios para el periodo de retorno de 5 años. Fuente: elaboración propia.	162

Figura 59. Hidrograma de los distintos escenarios para el periodo de retorno de 10 años. Fuente: elaboración propia.	163
Figura 60. Hidrograma de los distintos escenarios para el periodo de retorno de 25 años. Fuente: elaboración propia.	163
Figura 61. Hidrograma de los distintos escenarios para el periodo de retorno de 50 años. Fuente: elaboración propia.	164
Figura 62. Hidrograma de los distintos escenarios para el periodo de retorno de 100 años. Fuente: elaboración propia.	164
Figura 63. Superficie de inundación en función del caudal. Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI y CEA (2011)	165
Figura 64. Inundación en la parte media y baja de la microcuenca “El Guayabo”. Fuente: elaboración propia con datos de INEGI y CEA (2011).....	166
Figura 65. Solución de la Ecuación 27 para las precipitaciones correspondientes a un periodo de retorno dado. Fuente: elaboración propia.	166
Figura 66. Permanencia y cambios en las coberturas y usos del suelo entre el escenario proyectado y 2011. Fuente: elaboración propia con datos de IMEPLAN, INEGI y CEA (2011).	167
Figura 67. MPE del Escenario 2011 para una precipitación con un periodo de retorno de 25 años. Fuente: elaboración propia con datos IMEPLAN, INEGI y CEA (2011).	168
Figura 68. MPE del Escenario Proyectado para una precipitación con un periodo de retorno de 25 años. Fuente: elaboración propia con datos de IMEPLAN, INEGI y CEA (2011).	168
Figura 69. MPE del Escenario 2011 para una precipitación con un periodo de retorno de 50 años. Fuente: elaboración propia con datos de IMEPLAN, INEGI y CEA (2011)....	169
Figura 70. MPE del Escenario Proyectado para una precipitación con un periodo de retorno de 50 años. Fuente: elaboración propia con datos de IMEPLAN, INEGI y CEA (2011).	169
Figura 71. Cambio porcentual en la mitigación potencial entre el escenario de 2011 y proyectado, para una precipitación con periodo de retorno de 50 años. Fuente: elaboración propia con datos IMEPLAN, INEGI y CEA (2011).....	170

Figura 72. Superficie afectada por inundación en función del caudal. Fuente: elaboración propia.....	171
Figura 73. Comparativa del área inundada y caudal de los escenarios 2011 y Proyectado para un periodo de retorno de 50 años. Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos de IMEPLAN.....	172
Figura 74. Valor de la resultante de la técnica de estadísticas zonales con la capa de uso general del suelo acotada al polígono de inundación con periodo de retorno de 1,000 años. Fuente: elaboración propia con datos de IMEPLAN, Casas y Terrenos (2018) y CEA (2011).	174
Figura 75. Superficie inundada en el Escenario 2011 por probabilidad de ocurrencia. Fuente: elaboración propia a partir de datos de CEA (2011).	175
Figura 76. Superficie inundada en el Escenario Proyectado por probabilidad de ocurrencia. Fuente: elaboración propia a partir de datos de CEA (2011).	175
Figura 77. Superficie inundada por periodo de retorno para los escenarios analizados. Fuente: elaboración propia.	176
Figura 78. Gráfico de sedimentación de los eigenvalores de los componentes principales. Fuente: elaboración propia.	177
Figura 79. Diagrama de dispersión y magnitud y dirección de las variables originales. Fuente: elaboración propia.	178
Figura 80. Mapa comparativo entre el índice de marginación de CONAPO (2010) y el índice de vulnerabilidad del Escenario 2010. Fuente: elaboración propia con datos del INEGI, CONAPO y CEA.....	179
Figura 81. Riesgo de inundación para el Escenario 2011. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IMEPLAN, INEGI y CEA (2011).....	180
Figura 82. Riesgo de inundación para el Escenario Proyectado. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IMEPLAN, INEGI y CEA (2011).	181
Figura 83. Comparativo por escenario de cambio en la superficie por categoría de riesgo. Fuente: elaboración propia	182
Figura 84. Zonas de provisión que dejarán de existir en el Escenario Proyectado e impacto en el riesgo de inundación. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IMEPLAN, INEGI y CEA (2011).....	182

Índice de cuadros

Cuadro 1. Listado de servicios ecosistémicos importantes. Fuente: Modificado de Kandziora et al. (2013).....	40
Cuadro 2. Características de modelos espacialmente explícitos para cartografiar y evaluar SE. Fuente: Modificado de Nemeč & Raudsepp-Hearne (2013)	47
Cuadro 3. Estaciones meteorológicas cercanas a la microcuenca “El Guayabo”. Fuente: Elaboración propia con datos del ERIC III.	61
Cuadro 4. Precipitación anual, expresada en mm, de las estaciones meteorológicas seleccionadas. Fuente: Elaborado con datos del ERIC III.	65
Cuadro 5. Variables morfométricas por obtener para la microcuenca “El Guayabo”. Fuente: elaboración propia	67
Cuadro 6. Escorrentía para un CN determinado. Fuente: Modificado de USDA (1986).....	77
Cuadro 7. Rango de tasa de infiltración por grupo hidrológico del suelo. Elaboración propia con base en USDA (1986).....	78
Cuadro 8. CN para áreas urbanas. Fuente: Modificado de Chow, Maidment, & Mays (1988)	79
Cuadro 9. Características de la ortofotografía utilizada. Fuente: Elaboración propia.....	86
Cuadro 10. Resumen del muestreo de tasa de infiltración. Fuente: Jiménez-González et al. (2018)	87
Cuadro 11. Posibles asignaciones con base en clase textural. Fuente: Modificado de Hernández-Jimenez (2014) basado en NRCS (2007) e INEGI (2015).	88
Cuadro 12. Asignación de los suelos grupos hidrológicos utilizados en el modelado hidrológico. Fuente: elaboración propia.....	89
Cuadro 13. Tabla de decisión para asignación del CN con base en las coberturas y uso general del suelo y la el grupo hidrológico del suelo. Fuente: Elaboración propia con base en USDA (1986) y Bedient, Huber, & Vieux (2013).....	89
Cuadro 14. Precipitaciones a distintos periodos de retorno. Fuente: CEA (2011).....	92
Cuadro 15. Métodos por comparar. Fuente: elaboración propia.	92
Cuadro 16. Variables utilizadas para la determinación del índice de vulnerabilidad. Fuente: elaboración propia.	96

Cuadro 17. Normales meteorológicas para la microcuenca “El Guayabo”. Fuente: Elaboración propia.....	102
Cuadro 18. Parámetros morfométricos de la cuenca del Guayabo. Fuente: Elaboración propia	110
Cuadro 19. Tipos de vegetación o coberturas del suelo presentes en la microcuenca “El Guayabo”. Fuente: Elaboración propia.	114
Cuadro 20. Resumen estadístico de los datos de precipitación anual por estación. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ERIC III.	133
Cuadro 21. Tabla ANOVA. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ERIC III....	135
Cuadro 22. Prueba de rangos múltiples "El Guayabo". Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ERIC III.....	135
Cuadro 23. Homogeneidad de grupos para las estaciones meteorológicas. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ERIC III.	136
Cuadro 24. Prueba de Bartlett. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ERIC III.	136
Cuadro 25. Análisis de varianza por prueba de Bartlett. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ERIC III.	137
Cuadro 26. Altura de precipitación (mm) para la microcuenca “El Guayabo” de acuerdo con la ecuación de Bell. Fuente: Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ERIC III.	138
Cuadro 27. Cálculos auxiliares para el procesamiento estadístico de la serie de.....	139
Cuadro 28. Comparativa de las precipitaciones diarias máximas. Fuente: Elaboración propia.	141
Cuadro 29. Áreas y porcentaje de los usos generales en los escenarios modelados. Fuente: elaboración propia.	146
Cuadro 30. Número de curva ponderado para cada escenario. Fuente: Elaboración propia.	151
Cuadro 31. Tiempos de concentración resultantes para los escenarios modelados. Fuente: elaboración propia.	154
Cuadro 32. Resultado de los distintos métodos de descarga máxima expresada en m ³ /s para distintos periodos de retorno. Fuente: elaboración propia con datos de CEA (2011)	155

Cuadro 33. Diferencias porcentuales de los caudales máximos entre el TR-20 y los métodos utilizados por la CEA (2011). Fuente: elaboración propia con datos de CEA (2011).	155
Cuadro 34. Comparativa de volúmenes de esorrentía expresados en m ³ por periodo de retorno. Fuente: elaboración propia con datos de CEA (2011).	156
Cuadro 35. Diferencias porcentuales entre los volúmenes entre el TR-20 y los métodos utilizados por la CEA. Fuente: elaboración propia con datos de CEA (2011).	156
Cuadro 36. Resultados del TR-20 para descarga máxima obtenidos a través del WMS. Fuente: elaboración propia.	159
Cuadro 37. Resultados del TR-20 para volumen escurrido obtenidos a través del WMS. Fuente: elaboración propia.	160
Cuadro 38. Descargas máximas, convertidos a unidades del Sistema Internacional. Fuente: elaboración propia.	160
Cuadro 39. Volumen escurrido convertido a unidades del Sistema Internacional. Fuente: elaboración propia.	160
Cuadro 40. Ajustes lineales para los caudales resultantes para cada periodo de retorno analizado por escenario simulado. Elaboración: fuente propia.	161
Cuadro 41. Estadísticos descriptivos del valor de la tierra dentro del polígono para un polígono de inundación correspondiente a un periodo de retorno de 1,000 años. Fuente: elaboración propia.	173
Cuadro 42. Valor medio de la tierra por uso general del suelo correspondiente al polígono de inundación correspondiente a un periodo de retorno de 1,000 años. Fuente: elaboración propia.	173
Cuadro 43. Superficie inundada por periodo de retorno para los escenarios analizados. Fuente: elaboración propia.	175
Cuadro 44. Componentes principales resultantes, eigenvalor y varianza explicada. Fuente: elaboración propia.	176
Cuadro 45. Pesos de las variables originales en los dos primeros componentes. Fuente: elaboración propia.	177
Cuadro 46. Valoración para obtener categorías de vulnerabilidad de acuerdo con el método de optimización <i>Natural Breaks</i> . Fuente: elaboración propia.	179

Cuadro 47. Valoración para obtener categorías de riesgo de acuerdo con el método de optimización <i>Natural Breaks</i> . Fuente: elaboración propia.....	180
Cuadro 48. Superficie por categoría de riesgo para cada escenario. Fuente: elaboración propia.....	181

Acrónimos

ACP	-	Análisis de Componentes Principales
AGEB	-	Área Geoestadística Básica
ANOVA	-	Análisis de varianza
ANP	-	Área Natural Protegida
BANDAS	-	Banco Nacional de Aguas Superficiales
BLP	-	Bosque La Primavera
CEA	-	Comisión Estatal del Agua
CEDHJ	-	Comisión Estatal de Derechos Humanos de Jalisco
CETENAL	-	Comisión de Estudios del Territorio Nacional
CN	-	Número de Curva
CONAGUA	-	Comisión Nacional del Agua
CONANP	-	Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas
CONAPO	-	Consejo Nacional de Población
CVTM	-	Cinturón Volcánico Transmexicano
DETENAL	-	Dirección de Estudios del Territorio Nacional
ERIC III	-	Extractor Rápido de Información Climatológica III
ESRI	-	Environmental Systems Research Institute
FAO	-	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GPS	-	Sistemas de Posicionamiento Global
HUA	-	Hidrograma Unitario Adimensional
IDW	-	Inverso de la Distancia Ponderada
IISD	-	Instituto Internacional para el Desarrollo Sustentable
IMEPLAN	-	Instituto Metropolitano de Planeación del Área Metropolitana de Guadalajara
IMTA	-	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
INEGI	-	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IPCC	-	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
ITESO	-	Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente
IUCN	-	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza
JRC	-	Centro Común de Investigación de la Unión Europea
LGAH	-	Ley General de Asentamientos Humanos
LGEEPA	-	Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
MDE	-	Modelo Digital de Elevación
MEA	-	Evaluación de los Ecosistemas del Milenio
MPE	-	Mitigación Potencial de la Escorrentía
NRCS	-	Servicio de Conservación de Recursos Naturales de Estados Unidos de América
OET	-	Ordenamiento Ecológico Territorial
OETL	-	Ordenamiento Ecológico Territorial Local
OPD	-	Organismo Público Descentralizado

OTM	- Órgano Técnico Mixto
POFA	- Polígono de Fragilidad Ambiental
POTMet	- Plan de Ordenamiento Territorial del Área Metropolitana de Guadalajara
SCS	- Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos de América
SE	- Servicios ecosistémicos
SEMARNAT	- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIG	- Sistema de Información Geográfica
SLP	- Sierra La Primavera
SMO	- Sierra Madre Occidental
TIN	- Red triangular irregular
TR-20	- Technical Release No. 20
UDG	- Universidad de Guadalajara
UGA	- Unidad de gestión ambiental
UNEP	- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (ONU Medio Ambiente)
UNESCO	- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
USDA	- Departamento de Agricultura de Estados Unidos de América
USV	- Uso del Suelo y Vegetación
WMS	- Watershed Modeling System
ZMG	- Zona Metropolitana de Guadalajara

1. Introducción

La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA) fue realizada entre 2001 y 2005 para evaluar las consecuencias que tienen los cambios en los ecosistemas¹ hacia el bienestar de la humanidad, así como establecer las bases científicas para la realización de acciones necesarias para la conservación y el uso sustentable de los recursos. El MEA definió los servicios ecosistémicos (SE) como “aquellos beneficios que reciben los seres humanos de los ecosistemas”, asimismo se identificaron una gran variedad de servicios ecosistémicos para el bienestar de la humanidad (Tisdell, 2005). Estos servicios fueron clasificados en cuatro categorías: servicios de provisión, servicios de regulación, servicios culturales y servicios de apoyo. Entre los SE denominados como servicios provisión se encuentran la disponibilidad de agua dulce, alimentos y fibras; servicios reguladores (como control de microclimas y plagas y protección a peligros naturales); servicios culturales (como beneficios espirituales, paisajísticos y recreacionales) y; servicios de apoyo (como los ciclos de los nutrientes para a la manutención de la vida en el planeta) -Kandziora, Burkhard, & Muller, 2013; MEA, 2005a-.

Las dinámicas del uso del suelo tienen implicaciones directas en la disponibilidad de SE (Bouiadjra, Zerey, & Benabdeli, 2011). El desconocimiento y la falta de evaluación de los SE provistos por un área, la hace susceptible a transformarse en un uso de suelo inapropiado. La razón principal por la que los SE han sido subestimados, se debe a que ni los beneficiarios (población e infraestructura locales), ni los proveedores (zonas forestales, áreas de cultivo, áreas verdes) son fácilmente identificados. A pesar de la variedad de estudios realizados sobre SE, son pocos los que evalúan la relación entre los procesos de los ecosistemas y el beneficio directo a la población (Jujnovsky, González-Martínez, Cantoral-Uriza, & Almeida-Lenero, 2012). Por ello es necesario identificar, localizar y evaluar los SE en la toma de decisiones sobre el paisaje local, particularmente donde exista el conflicto entre desarrollo y conservación y por tanto, obtener información suficiente y precisa sobre los SE, su oferta y demanda a nivel local (Hauck et al., 2013). Sin embargo, actualmente no existe

¹ Ecosistema o sistema ecológico se define como “un complejo dinámico de comunidades de plantas, animales y microorganismos y su ambiente abiótico, todo interactuando como una unidad funcional”(MEA, 2005a, p. v).

claridad en cómo los SE y sus cambios deben ser medidos y evaluados. Ello representa un gran reto para incorporación de los SE en la toma de decisiones, la planeación y el ordenamiento territorial.

La urbanización, descrita como el incremento en la densidad de población humana, en conjunto con el aumento en el consumo per cápita de recursos naturales y una modificación extensiva del paisaje natural (McDonnell & Picket, 1990), es un fenómeno global que ha provocado graves problemas ambientales (Lyu, Zhang, Xu, & Li, 2018). Un proceso de urbanización desordenado puede impactar severamente las funciones de los ecosistemas que proveen servicios, afectando la calidad de vida de las personas (Wan et al., 2015). De acuerdo al Censo Nacional de Población y Vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), México cuenta con 112 millones de habitantes (INEGI, 2010a), de las cuales, el 77.8% habitaba en zonas urbanas (INEGI, 2010b). La Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) es la segunda metrópoli más grande del país, después de la Zona Metropolitana del Valle de México², concentra 4.98 millones de habitantes (IIEG, 2017).

El área de estudio corresponde a la microcuenca “El Guayabo”, la cual tiene una extensión aproximada de 76 km² y se sitúa en la parte alta de la cuenca El Ahogado, en los municipios de Tlaquepaque y Tlajomulco de Zúñiga dentro ZMG, en el Estado de Jalisco, México. Tlajomulco de Zúñiga es uno de los municipios con mayor crecimiento poblacional del país, con una explosiva expansión demográfica en las últimas décadas: entre 2005 a 2010, se incrementó la población con 293,007 nuevos habitantes. Una proporción de esta población vive en la microcuenca del Guayabo, ya que alrededor de 92,000 personas residen en siete localidades urbanas y 37 localidades rurales dentro de la microcuenca (INEGI, 2010a) .

La expansión urbana, agrícola e industrial ha transformado y seguirá transformando el paisaje dentro del área de estudio, lo que deteriora a los ecosistemas que proveen servicios a la población local. El crecimiento de la superficie urbana y el cambio del uso del suelo resultantes de la expansión de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) ha impactado a la microcuenca “El Guayabo” disminuyendo la permeabilidad del suelo y alterando la

² También conocida como Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

relación precipitación-infiltración-escorrentía³ dentro de dicho sector. Esto que provoca impactos en el funcionamiento hidrológico y, por tanto, aumenta la vulnerabilidad por inundación de los asentamientos humanos e infraestructura locales.

El Guayabo se encuentra en una zona donde lo urbano y lo agrícola se entremezclan. Por un lado, están los crecientes desarrollos que albergan la vivienda de clase media y media alta, cuyos residentes se desplazan todos los días hacia el interior de la Zona Metropolitana de Guadalajara. Por otro lado, están los terrenos de uso agrícola expuestos a la especulación inmobiliaria, consecuente de la creciente demanda de vivienda, que en el futuro terminarán convirtiéndose en fraccionamientos habitacionales. Sin embargo, a pesar de esta expansión, la actividad económica principal sigue siendo la agricultura. La zona rural-urbana es de alta complejidad. En la parte alta de la microcuenca se encuentra el Área Natural de Protección a la Flora y a la Fauna “La Primavera”, cuyo tipo de vegetación dominante es el bosque de encino-pino, mientras que fuera del polígono objeto de protección se ha caracterizado por la aparición de desarrollos habitacionales de clase alta y media alta. La inercia de la expansión de la zona metropolitana ha convertido terrenos agrícolas en desarrollos habitacionales. En estas zonas de transición también existen asentamientos irregulares, cercanos a los cauces de los arroyos donde habitan personas de bajo nivel socioeconómico.

En 2012, la Comisión Estatal del Agua del Estado de Jalisco (CEA) señaló que El Guayabo se encuentra dentro de las seis subcuencas más pobladas y de mayor riesgo por inundación entre las trece que conforman la cuenca El Ahogado, identificando a más de tres mil pobladores, en más de setecientas viviendas como afectados potenciales (CEA, 2012). Sin embargo, dada la alta tasa de crecimiento dentro del municipio, se espera que la población en riesgo vaya en aumento.

La cobertura del suelo en la microcuenca “El Guayabo” corresponde al 26% de superficie forestal (Bosque de Encino, Bosque de Encino-Pino y Selva Baja Caducifolia), 39% de superficie agrícola, 29% de superficie urbana, 6% de pastizal inducido y 1% de cuerpo de agua (INEGI, 2017). La existencia de estas coberturas permite estudiar y contrastar

³ Escorrentía es el término utilizado en geomorfología para caracterizar el agua de precipitación pluvial o deshielo, que fluye por gravedad.

las respuestas hidrológicas entre éstas y así analizar la influencia que tienen en la estimación del riesgo de inundación. Los factores que influyen en la generación de escorrentía son: (1) Factores climáticos: duración e intensidad de la precipitación, las condiciones meteorológicas previas a una tormenta; (2) Factores de la cuenca: tamaño, pendiente del terreno, morfología, tipo de suelo y cobertura y uso del suelo. De dichos factores, con la excepción a los cambios en la cobertura y uso del suelo, el resto son prácticamente independientes de las acciones humanas, por tanto, la única incidencia que tiene la acción humana sobre la generación de caudales de escurrimiento, son los cambios de la cobertura y uso del suelo. Por lo tanto, es de particular interés la superficie de la microcuenca correspondiente a superficies con cobertura vegetal (agrícolas y forestales). La vegetación tiene una influencia significativa en el escurrimiento (Mills & Fey, 2004), se ha demostrado que para suelos en las mismas condiciones, la infiltración es mayor en zonas forestales y pastizales, y menor para zonas cultivadas; y menor aún para barbechos y suelos desnudos; y prácticamente impermeables las coberturas de suelo urbanas (Greve, 2012; Shaver, et al., 2007; Youpeng et al., 2010). Los sistemas de las raíces perforan el suelo, manteniéndolo menos compactado. La materia orgánica promueve la aglomeración del suelo, mejorando la permeabilidad. La vegetación intercepta una porción de la precipitación en su follaje, también provee fricción y obstrucción al flujo reduciendo la velocidad del agua proveyendo mayor tiempo para infiltración.

La presencia del área natural protegida (ANP) Bosque La Primavera en la parte del área de estudio es de especial interés respecto a otras microcuencas urbanizadas, debido a que es una zona forestal que provee el servicio ecosistémico de regulación de inundación y, dado su estatus de protección, es una zona que no cambiará su uso a través del tiempo. Asimismo, la existencia de los tres tipos de coberturas del suelo (urbana, agrícola y forestal) hacen que la microcuenca “El Guayabo” cuente con los elementos necesarios para analizar y contrastar las respuestas hidrológicas que tienen los ecosistemas forestales y agrícolas y así estudiar cómo éstos reducen el riesgo de inundación en las microcuencas urbanizadas.

La pregunta de investigación planteada es: “¿Cómo los ecosistemas forestales y agrícolas impactan en el riesgo de inundación en una microcuenca urbanizada?”. La metodología del estudio utilizada es un modelo explicativo basado en análisis secundario y mediciones en campo.

Se empleó un modelado hidrológico, espacialmente explícito, para obtener los caudales máximos producidos por precipitaciones con distintos periodos de retorno, para distintos escenarios de uso de suelo. Posteriormente, se utilizaron dichos valores para calcular las superficies inundadas. Se construyó un índice de riesgo que combina los resultados del modelado hidrológico con variables socio-demográficas. Dicho índice permitió evaluar, cuantitativamente, aquellas áreas que proveen el servicio ecosistémico de regulación de inundaciones. Particularmente, la capacidad de almacenamiento de agua en el sistema (amortiguadora), la reducción del peligro derivado por la inundación, así como la localización de los beneficiarios del servicio.

1.1 Objetivos

El objetivo general que pretende esta tesis doctoral es evaluar el servicio ecosistémico de regulación de inundaciones provisto en la microcuenca “El Guayabo”, con base en la capacidad de reducción del riesgo a eventos extremos de lluvia. A partir de dicha finalidad se enlistan los objetivos particulares:

1. Realizar una caracterización del área de estudio, a una escala de microcuenca, que incluya aspectos del medio físico, como lo son los abióticos y bióticos, y; aspectos del medio antropogénico, así como una revisión los instrumentos que intervienen en la ordenación territorial.
2. Determinar los eventos de precipitación diaria máxima para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.
3. Elaboración de distintos escenarios de cobertura y uso del suelo.
4. Elaboración de un modelado hidrológico para simular los caudales y volúmenes máximos esperados para los eventos extremos de lluvia en los distintos escenarios de cobertura y uso del suelo.
5. Generación de cartografía digital, a partir de la información disponible.
6. Evaluación de las zonas de provisión y demanda del servicio ecosistémico de regulación de inundaciones, con un enfoque hacia la asistencia en toma de decisiones

en el ordenamiento territorial para la prevención de la degradación de los ecosistemas que proveen el servicio y garantizan su provisión futura.

2. Marco teórico y estado del arte

2.1 Desarrollo sustentable

Las teorías del desarrollo emergen como una especialidad de la ciencia económica, con el fin de dar una explicación a la interrogante sobre las condiciones de desigualdad social y económica existentes entre las naciones, particularmente en los países con ingreso per cápita más bajo, donde su contexto histórico se enmarcó en los inicios de la posguerra y la independencia de las colonias europeas en Asia y África (Gutiérrez-Garza & González-Gaudiano, 2010).

Los primeros teóricos, a través de instrumentos económicos, proponen que las políticas para proteger el medio ambiente también podrían promover la innovación y obtener una ganancia. Por ejemplo, Arthur Pigou (1920) en su obra “La economía del bienestar”, señaló desigualdad que existe entre los costos y beneficios privados marginales con los costos y beneficios sociales marginales, creando el concepto de lo que hoy se conoce como “externalidad” (Gutiérrez-Garza & González-Gaudiano, 2010). La teoría económica moderna sobre el tratamiento eficiente de las externalidades negativas se remonta al artículo de Coase (1960) quien plantea que el problema creado por las externalidades se percibe como la consecuencia de dos o más actores que compiten por el mismo recurso escaso, y no como los costos que imponen al responsable de la contaminación.

El surgimiento del discurso sobre el desarrollo sustentable está estrechamente relacionado con la erosión de concepto prevaleciente de "desarrollo" y una concepción estrecha de la modernización económica como modelos prevalecientes para la gestión de la transformación social (Becker & Jahn, 1999). El concepto de desarrollo sustentable aparece por la necesidad de una acción acordada entre las naciones para impulsar un modelo de desarrollo mundial, compatible con la conservación de la calidad del medio ambiente y la equidad social (Gutiérrez-Garza & González-Gaudiano, 2010). Por ejemplo, en la Conferencia Intergubernamental para el Uso Racional y la Conservación de la Biosfera (UNESCO), celebrada en 1968, se encontraron las primeras discusiones sobre el concepto de un desarrollo ecológicamente sustentable. En 1972, durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano celebrada en Estocolmo, fue la primera vez que se hizo

énfasis en la necesidad de preservar los hábitats naturales para producir una mejora sostenida de las condiciones de vida para todos, y la necesidad de cooperación internacional para lograrlo. En 1980, la Estrategia Mundial de Conservación, llevada a cabo por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, por sus siglas en inglés), en la sección “Desarrollo sustentable” identifica los principales agentes de la destrucción del hábitat: la pobreza, la presión demográfica, la inequidad social y los regímenes comerciales (IISD, 2012).

Aunque el concepto de sustentabilidad ya se había formulado antes (Gutiérrez-Garza & González-Gaudiano, 2010), en 1987, la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo publica el reporte “Nuestro futuro común”⁴, en un esfuerzo para ligar el desarrollo económico con una estabilidad ambiental y entrelazar los problemas sociales, económicos, culturales y ambientales y soluciones globales. Eso popularizó el término "desarrollo sustentable": “*Un desarrollo que satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de que las generaciones futuras puedan satisfacer las suyas*” (Asamblea General de las Naciones Unidas, 1987, p.43). De acuerdo con esta definición, la meta del desarrollo sustentable sería entonces una estabilidad económica y ecológica a largo plazo, la cual es factible únicamente a través de articulación (y reconciliación) de tres dimensiones: la económica, la ambiental y la social. La Figura 1 engloba la visión dominante del desarrollo sustentable, propuesta por Robinson & Tinker (1995), donde los tres sistemas son iguales entre sí (simbolizados como tres círculos de un mismo tamaño), interconectados, con traslape y auto-organizables, donde cada uno de ellos tiene una importancia equivalente.

⁴ También conocido como “Informe Bruntland”.

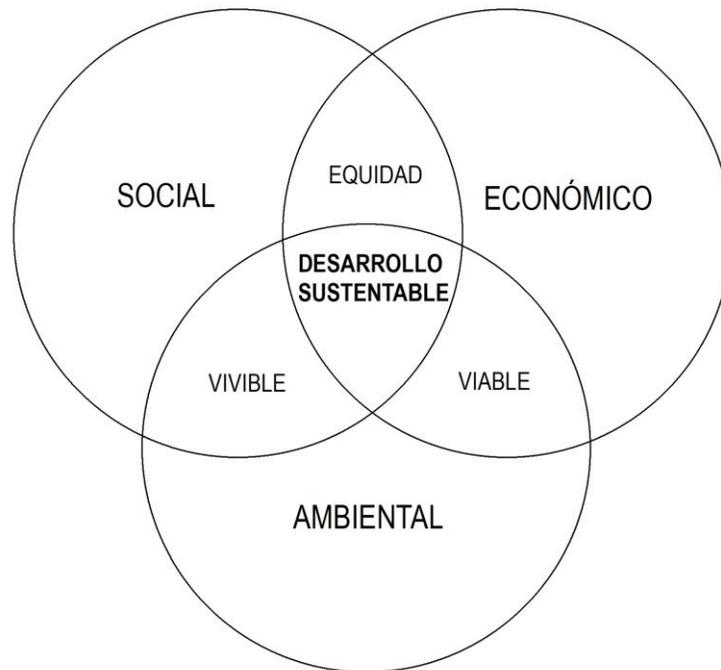


Figura 1. La visión dominante del desarrollo sustentable. Fuente: Modificado de Eichler (1999)

Según Robinson & Tinker (1997, pp.71-72), a medida que se avanzaba hacia el siglo XXI, las instituciones humanas, desde las locales hasta las globales, se enfrentaban a una serie de desafíos ecológicos, económicos y sociales: *“Ecológicamente, está quedando claro que gran parte de nuestra industria, la agricultura y el uso de recursos naturales renovables y no renovables no son sustentables. Muchas pesquerías importantes colapsaron o están en rápido declive. Los bosques primarios están desapareciendo; suelos fértiles se están perdiendo por la erosión, salinización y desertificación. La calidad del aire está alcanzando niveles amenazantes para la salud en muchas áreas urbanas. La biodiversidad, la materia prima del proceso evolutivo y de la biotecnología, está siendo severamente amenazada. Los impactos humanos en la atmósfera, a través del calentamiento global y el daño a la capa de ozono, han comenzado a alterar uno de los sistemas de soporte de vida planetario más básicos. Económicamente, estamos siendo testigos de la desaparición casi completa de las economías de planificación centralizada. Las tendencias poderosas hacia el uso de las fuerzas del mercado y las políticas de mercado son evidentes en todo el mundo. La integración económica global está impulsada por la liberalización del comercio y el*

surgimiento de un mercado mundial de capital, caracterizado por flujos financieros que disminuyen los flujos de bienes y servicios comercializados. Los niveles de pobreza absoluta y la disparidad de ingresos están aumentando. Por lo tanto, las condiciones económicas actuales son insostenibles para una gran y creciente proporción de la población mundial, tanto en los países desarrollados como en los países en desarrollo y las estructuras sociales están bajo un estrés sin precedentes. Socialmente, en muchas sociedades industriales orientadas al mercado crece desconfianza, alienación e incluso desagrado por el sistema de gobierno. Esto se combina con una capacidad decreciente para abordar las cuestiones sociales básicas.”

El desarrollo sustentable promueve la visión de que la economía, el medio ambiente y la sociedad están inevitablemente vinculados entre sí. Sin embargo, precisamente esta vinculación ha hecho que, paradójicamente, el concepto sea confuso y productivo a la vez (Gutiérrez-Garza & González-Gaudiano, 2010). Existen argumentos, tanto para separar como para integrar los tres pilares de la sustentabilidad en su evaluación: una base para tratar el pilar ecológico como algo separado es que las actividades humanas, sociales y económicas deben operar dentro de los límites ecológicos. Sin embargo, a pesar de que los seres humanos dependen inevitablemente de las condiciones de la biósfera, éstos desempeñan un papel muy importante en la manipulación de esas condiciones, por lo tanto, todos los sistemas (incluidos los socioecológicos) debe ser considerados y hacerse perdurar (Söderman, Kopperoinenk, Shemeikka, & Yli-Pelkonen, 2012).

Paehlke (1999) argumentó que las principales contribuciones de "Nuestro futuro común" fueron: (1) el intento explícito de un análisis integrado de asuntos económicos, ambientales y sociales, y (2) evidencia de que la restricción económica, en algunos contextos al menos, podría aumentar, más que reducir, el daño ambiental.

Posterior a la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo en Río, 1992 (también conocida como “Cumbre de la Tierra”), el "desarrollo sustentable" se ha convertido en un concepto clave, internacionalmente aceptado, para un discurso político comprometido con la calidad de vida, la conservación de los recursos naturales y el sentido de obligación para las generaciones futuras. En lugar de un concepto bien definido, el desarrollo sustentable podría caracterizarse como un campo discursivo controvertido que permite articular las diferencias políticas y económicas entre el Norte y el

Sur, e introduce en las cuestiones ambientales una preocupación por la justicia social y la participación política (Becker & Jahn, 1999).

Aunque la sustentabilidad está asociada, de manera más prominente, con fenómenos de crisis ecológicas, como el cambio climático, la deforestación, la degradación del suelo o la pérdida de biodiversidad. Sin embargo, en realidad describe un campo que se basa en definiciones de problemas orientadas a la sociedad (Becker & Jahn, 1999). Entonces, cuando se habla de sustentabilidad, la principal preocupación no es la conservación del medio ambiente natural. Por el contrario, la sustentabilidad aborda la cuestión de cómo las sociedades pueden configurar sus modos de cambio, de tal manera que garanticen las condiciones previas del desarrollo para las generaciones futuras. Desde este punto de vista, la sustentabilidad se refiere a la viabilidad de las relaciones socialmente formadas entre la sociedad y la naturaleza a lo largo del tiempo. Por lo tanto, la sustentabilidad está estrechamente vinculada con problemas supuestamente "internos" de la estructura social, como la justicia social, la equidad de género y la participación política (Becker & Jahn, 1999).

La idea de conservar recursos para generaciones futuras es tal vez la gran característica que distinguió la política de desarrollo sustentable de otras políticas ambientales tradicionales. Ciertamente, este concepto de "justicia intergeneracional" es otra dificultad que presenta el concepto de desarrollo sustentable, dada la complejidad en determinar cuáles serán las necesidades básicas que las generaciones por venir deberán satisfacer y su manera de hacerlo. La justicia intergeneracional es una condición ligada tanto a la equidad social como a la conservación del medio ambiente en el momento actual (Gutiérrez-Garza & González-Gaudiano, 2010). Más aún, además de mantener la integridad de los ecosistemas del planeta, un requisito de la sustentabilidad para futuras generaciones es también vital para mantener las necesidades de generaciones presentes. Siguiendo este discurso, las Naciones Unidas iniciaron, en 2001, la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA por sus siglas en inglés) para valorar las consecuencias de los cambios en los ecosistemas para el bienestar humano y así, la base científica con miras a la acción necesaria para mejorar la conservación y el uso sustentable de esos sistemas y su contribución al bienestar humano (MEA, 2005). Costanza et al. (1997) definieron los servicios ecosistémicos

como aquellos beneficios que reciben los seres humanos de los ecosistemas⁵, concepto que se ratificó en el MEA. Los resultados de esta evaluación dejaron en claro que mientras algunas demandas, como la provisión de alimento y agua limpia se incrementan, las acciones humanas están al mismo tiempo disminuyendo la capacidad de muchos ecosistemas para satisfacer estas demandas (MEA, 2003). El surgimiento del concepto de servicios ecosistémicos significó un cambio en el paradigma de la visión romántica de conservación solamente por conservar, hacia una preservación para la satisfacción de las demandas de necesarias para la supervivencia de la humanidad.

De acuerdo con Farley (2012), el debate sobre la sustentabilidad se centra en si los servicios de los ecosistemas son esenciales o no para el bienestar. Si los SE son esenciales, el análisis marginal y la valoración monetaria son herramientas inapropiadas. El debate sobre la justicia se centra en quién tiene derecho a los servicios del ecosistema, y la estructura del ecosistema que los genera. Las respuestas a estas preguntas tienen profundas implicaciones para la elección de instituciones económicas adecuadas. El debate sobre la eficiencia se refiere tanto a los objetivos de la actividad económica como a los mecanismos más adecuados para alcanzar esos objetivos. Los economistas convencionales persiguen la “eficiencia de Pareto”⁶ y la maximización del valor monetario, que se logra integrando los servicios ecosistémicos en el marco del mercado. Los economistas ecológicos y muchos otros persiguen el objetivo menos rigurosamente definido de lograr la mejor calidad de vida posible compatible con la conservación de ecosistemas sanos y resilientes, lograda mediante la adaptación de las instituciones económicas a las características físicas de los servicios ecosistémicos. Farley (2012, pp.40), concluye que *“el concepto de servicios ecosistémicos es una herramienta valiosa para el análisis económico, y no debe descartarse debido a desacuerdos con las suposiciones de los economistas sobre la sostenibilidad, la justicia y la eficiencia”*.

⁶ Estado donde los recursos no se pueden reasignar para hacer que una persona esté en mejor situación sin hacer que al menos una persona empeore situación (Masnata, 1973).

De entre las Ciencias Sociales, se podría esperar que la Geografía esté especialmente equipada para cerrar la brecha entre el estudio los procesos naturales y sociales. A diferencia de otras disciplinas, la Geografía adoptó una perspectiva "horizontal", que no se limita a investigar un fenómeno desde una perspectiva particular, sino que se dirige al estudio de la relación entre elementos heterogéneos (Becker & Jahn, 1999).

2.2 Estado del Arte de los servicios ecosistémicos

Por casi dos décadas, se han estudiado los servicios ecosistémicos (SE) con enfoques teóricos, conceptuales y empíricos. Los primeros estudios se enfocaron hacia desarrollar una clasificación de las tipologías de los SE y hacia una caracterización de la provisión potencial (Daily, 1997; Tisdell, 2005). Entre éstos también se encuentran los primeros esfuerzos por cartografiar el valor económico de los ecosistemas. Por ejemplo, Costanza et al. (1997) realizaron un mapa global del valor económico de los ecosistemas basado en una valoración económica, así como de información de cobertura y uso del suelo a una escala global.

La MEA considerada un hito en el estudio de los SE, fue una enorme tarea llevada a cabo por las Naciones Unidas, realizada entre 2001 y 2005 para evaluar las consecuencias que tienen los cambios en los ecosistemas hacia el bienestar de la humanidad, así como establecer las bases científicas para la realización de acciones necesarias para la conservación y el uso sustentable de los recursos. Los SE se definen como aquellos beneficios que reciben los seres humanos de los ecosistemas (Costanza et al., 1997; MEA, 2005). En la MEA se identificaron una gran variedad de servicios ecosistémicos para el bienestar de la humanidad (Bergkamp & Cross, 2006). Estos servicios fueron clasificados en cuatro categorías: (1) Servicios de provisión; (2) Servicios de regulación; (3) Servicios culturales y; (4) Servicios de apoyo.

Entre los SE denominados servicios de provisión, se encuentran la disponibilidad de agua dulce, alimentos y fibras; servicios reguladores, como control de microclimas y plagas; servicios culturales, como beneficios espirituales, paisajísticos y recreacionales, y; servicios de apoyo, como los ciclos de los nutrientes para a la manutención de la vida en el planeta (MEA, 2003) -ver Cuadro 1-. Muchos de estos servicios ecosistémicos están relacionados con el agua y se conocen como servicios ecosistémicos hidrológicos, algunos de estos

servicios incluyen provisión de agua de calidad adecuada, recarga de agua subterránea (Jujnovsky et al., 2012), agua para riego, energía hidroeléctrica, pesca, recreación y regulación de inundaciones (Jujnovsky, González-Martínez, Cantoral-Uriza, & Almeida-Lenero, 2012).

Cuadro 1. Listado de servicios ecosistémicos importantes. Fuente: Modificado de Kandziora et al. (2013)

Servicios de provisión	Descripción
Cultivos	Cultivo de plantas comestibles y su cosecha en campos agrícolas y jardines que se utilizan para la nutrición humana.
Biomasa para energía	Plantas utilizadas para la conversión de energía (por ejemplo, caña de azúcar, maíz, etc.).
Forraje	Cultivo y recolección de forrajes para animales domésticos.
Ganado (doméstico)	Producción y utilización de animales domésticos para nutrición y uso de productos relacionados (lácteos, lanas, etc.).
Fibra	Cultivo y cosecha de fibra natural (por ejemplo, algodón, sisal de yute, seda, celulosa) para elaboración, de paños, telas, papel, etc.
Madera	Madera utilizada para fines de construcción.
Combustible de madera	Madera utilizada para la conversión de energía o producción de calor.
Pescado, marisco y algas comestibles.	Captura de pescado, mariscos o algas para comida.
Acuicultura	Crianza y recolección de pescado, mariscos o algas de granjas acuícolas marinas y terrestres.
Alimentación silvestre, semi-doméstica, ganadera y de recursos ornamentales.	Recolección de bayas, hongos, plantas (comestibles), caza de animales salvajes, captura de peces en la pesca recreativa, crianza de animales semi-domésticos y recolección de ornamentos naturales (por ejemplo, conchas, hojas y ramas, etc., con fines ornamentales o religiosos).
Bioquímicos y medicina	Productos naturales utilizados como bioquímicos, medicamentos y / o cosméticos.
Agua dulce	Agua dulce utilizada (por ejemplo, para beber, uso doméstico, uso industrial, riego).

Servicios de regulación	Descripción
Regulación del clima global	Captación y almacenamiento a largo plazo de gases de efecto invernadero.
Regulación del clima local	Regulación de los componentes del clima local como el viento, la precipitación, la temperatura o la radiación debido a las propiedades del ecosistema y los procesos de control.
Regulación de la calidad del aire	Captura, adsorción y filtración de partículas de aire, polvo, productos químicos y gases debido a procesos eco-químicos.
Purificación de agua	Control de composiciones químicas en aguas, por ejemplo, sedimentos, pesticidas, microbios y patógenos causantes de enfermedades.
Regulación de nutrientes	Reciclaje, metabolización y almacenamiento de nutrientes, por ejemplo, nitrógeno, fósforo y potasio
Regulación de la erosión	Retención de suelos y prevención de la erosión de suelos y deslizamientos.
Protección contra peligros naturales	Protección y mitigación de inundaciones, tormentas, incendios y deslizamiento de tierras.
Polinización	Asistencia de reproducción de plantas.
Plagas y control de enfermedades	Control de plagas y enfermedades debido a las variaciones genéticas de plantas y animales que los hacen menos propensos a las enfermedades y por las acciones de los depredadores y parásitos.
Servicios culturales	Descripción
Recreación y turismo.	Oportunidades para actividades al aire libre y turismo en el medio ambiente o el paisaje, incluidas formas de deportes, ocio y actividades al aire libre.
Jardinería estética, amenidad e inspiración.	Cualidades visuales de los ecosistemas y complejos de ecosistemas que influyen en el bienestar humano, proporcionando una fuente de inspiración para el arte, el folclore, los símbolos nacionales, la arquitectura, la publicidad y la tecnología.
Sistemas de conocimiento	El potencial para la educación ambiental, es decir, fuera del contexto de las escuelas formales, y el conocimiento

	en términos del conocimiento tradicional y la experiencia especializada que surge de vivir en un entorno particular.
Experiencia religiosa y espiritual.	Beneficios espirituales o emocionales que las personas asocian a los entornos o paisajes locales debido a la experiencia religiosa y / o espiritual.
Patrimonio cultural y diversidad cultural.	Beneficios que los humanos obtienen del mantenimiento de paisajes (culturales) y formas de uso de la tierra (patrimonio cultural) históricamente importantes.
Herencia natural y diversidad natural.	El valor de existencia de la naturaleza y las especies en sí, más allá de los beneficios económicos o humanos, el apoyo a los valores de legado y existencia.

La mayor parte de la comunidad científica coincide con la definición de SE, provista por la MEA (Balvanera et al., 2012; Chen et al., 2003; Fitter et al., 2010; Jujnovsky et al., 2012; Burkhard et al 2010; Nedkov & Burkhard, 2012; Egoh et al., 2012; Maes et al., 2011). Sin embargo, el término servicios ambientales (SA) también es utilizado comúnmente para referirse a los beneficios que obtienen los seres humanos de los ecosistemas. Derissen & Latacz-Lohmann (2013) en su revisión de los términos encontraron que la definición de SA aún no ha alcanzado un acuerdo consistente; mientras que algunas instituciones o autores utilizan como sinónimos ambos términos (SE y SA), otros definen a los SE como una subcategoría de los SA y viceversa. Incluso, a veces son diferenciados en función de la escala espacial. La Organización de Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), propone una definición de SA en la que especifican que los servicios ambientales son los beneficios que la sociedad adquiere de los ecosistemas a través de un manejo específico realizado por las personas (FAO, 2008), Derissen & Latacz-Lohmann la ampliaron para atender la naturaleza del servicio, sin distinción a que éstos sean producidos intencionalmente (por ejemplo, a través de esquemas de contratación ambientales) o no (con sólo cultivar la tierra).

Debido a la variabilidad en las condiciones ambientales y la influencia humana sobre los ecosistemas, la provisión de los SE no está homogéneamente distribuida en el espacio, aunado a esta heterogeneidad de la provisión, las variación en las condiciones

socioeconómicas hace que la demanda sea también dependiente de su localización (Martínez-Harms & Balvanera, 2012).

La falta de evaluación de los SE provistos por un espacio geográfico, puede resultar en la transformación a uso del suelo inadecuado. Por esta razón, es necesario analizarlos adecuadamente, incluyendo su provisión y sus beneficiarios. Asimismo, los conflictos entre los distintos intereses intersectoriales durante el proceso de ordenación del territorio derivan en decisiones y prácticas de gestión territorial poco sustentables. La integración del concepto de servicios ecosistémicos a la ordenación del territorio y toma de decisiones, facilita la comunicación en los diferentes sectores y los tomadores de decisiones (Hauck et al., 2013) y ayudan en la elaboración de políticas y buena gestión territorial.

La toma de decisiones o la elaboración de políticas en los servicios ecosistémicos debe basarse en la información disponible, el estatus de las tendencias y la distribución de la provisión del servicio. En este sentido, hay una creciente demanda de mapas confiables sobre la provisión y demanda de los servicios ecosistémicos (Schulp et al., 2014).

2.3 Servicios ecosistémicos de regulación de inundaciones

Los llamados servicios de regulación son aquellos “beneficios que se obtienen de la regulación de procesos de los ecosistemas” (MEA, 2005a, pp.40). De entre los SE de regulación se encuentran aquellos que ejercen protección a peligros a través de la reducción de impactos derivados de fenómenos naturales en los asentamientos humanos o su entorno (Fitter et al., 2010). El servicio ecosistémico de regulación de inundación se refiere a la influencia que los ecosistemas tienen sobre el tiempo y la magnitud de la escorrentía, las inundaciones y la recarga de acuíferos, particularmente en términos de potencial de almacenamiento de agua del ecosistema (Maes et al., 2011).

2.4 Cartografía de servicios ecosistémicos

La cartografía de zonas clave del suministro de los SE es esencial para el desarrollo de estrategias que garanticen su provisión futura (Martínez-Harms & Balvanera, 2012). Dado el rápido crecimiento de esta línea de investigación, recientes estudios han utilizado el análisis espacial para cuantificar factores ecológicos que contribuyen a la provisión de ciertos

servicios (Bagstad et al., 2014), siendo pocos los casos que se han enfocado en representar en mapas factores relacionados con su demanda (Bagstad et al., 2014; Jujnovsky et al., 2012; Serna-Chavez et al., 2014). En este sentido y desde la perspectiva espacial, la provisión potencial ha sido explorada más rigurosamente que la provisión real y su variación a lo largo del paisaje, demanda y beneficiarios. Sin embargo, el modelado y análisis espacial de los SE ha empezado a enfocarse más hacia la demanda y hacia los flujos espaciales de los ecosistemas hasta los beneficiarios (Verhagen et al., 2015).

Para poder entender el papel que representa la variación espacial en la oferta y demanda de los SE, muchos estudios utilizan observaciones y modelos para crear mapas de SE (Verhagen et al., 2015). Egoth et al. (2012), realizaron una revisión de los estudios relacionados con mapas de SE, donde se identificaron 67 estudios que utilizaban diversos indicadores para estimar servicios biofísicos de provisión: asignación de valor monetario a los servicios biofísicos, entendimiento de las compensaciones-costos, identificación de prioridades o entendimiento de riesgos futuros a través de análisis de tendencia. De acuerdo con esta revisión, únicamente 6% de los estudios encontrados fueron realizados antes del 2005 (año en que se llevó a cabo la segunda MEA) y, en su mayoría, solamente abordaban valoración económica, con miras a entender los costos y beneficios de ciertas acciones. El 96% restante, se publicaron después del 2005 (Ver Figura 2).

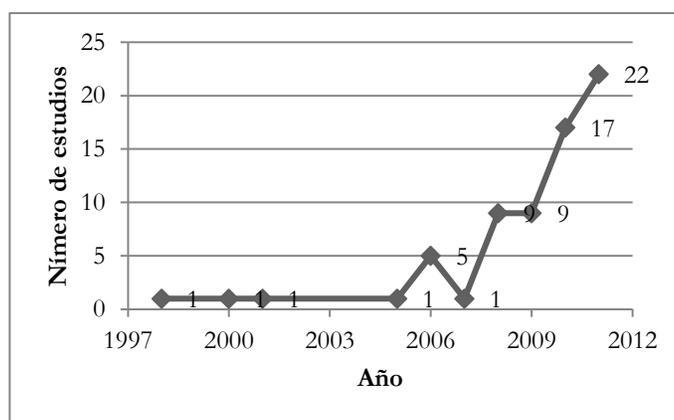


Figura 2. Estudios sobre servicios ecosistémicos entre 1998 y 2011. Fuente: Modificado de Egoth et al. (2012)

Martínez-Harms & Balvanera (2012) llevaron a cabo una revisión de la literatura publicada entre 1995 y 2011 acerca de los diferentes enfoques utilizados para cartografiar los SE,

utilizando un marco analítico basado en cinco criterios para analizar y comparar los enfoques metodológicos requeridos para modelar: (1) tipo de SE; (2) disponibilidad de datos; (3) tipo de dato; (4) escala espacial y; (5) método utilizado para modelar el SE. De acuerdo con la revisión, Martínez-Harms & Balvanera (2012) encontraron que los servicios de regulación son los más cartografiados, seguidos por los de provisión, los culturales y los servicios de apoyo; los datos secundarios son más frecuentemente utilizados para cartografiar SE que los datos primarios, siendo los datos biofísicos (datos de ocupación del suelo) y fuentes mixtas, los datos más comúnmente empleados; la mayoría de los estudios se llevaron a cabo a una escala geográfica regional o nacional; el método más común para modelar los SE fue el desarrollo de modelos basados en relaciones causales conocidas entre variables ambientales. Crossman et al. (2013), analizaron las revisiones realizadas por Reyers et al. (2013) y Egoh et al., (2012) efectuando una nueva revisión, que incluye literatura no incorporada o de posterior publicación, y propusieron una guía con listado de verificación de la información necesaria para realizar un modelado o cartografía de SE, como una aproximación para mitigar la inconsistencia entre los métodos para cuantificar y elaborar mapas de SE. A pesar del creciente interés en estudios científicos sobre los SE, aún no existe claridad en cómo los SE y sus cambios deberían ser medidos (Nemec & Raudsepp-Hearne, 2013).

2.4.1 Herramientas geospaciales para evaluación de los servicios ecosistémicos

Debido a que los ecosistemas son heterogéneos y la provisión de sus servicios varía a lo largo del territorio, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) provén una herramienta poderosa para visualizar y analizar el suministro de SE dentro del paisaje (Nemec & Raudsepp-Hearne, 2013). Por ello, el uso de los SIG ha jugado un rol importante en la evaluación de los SE. Andrew et al. (2014) hicieron una revisión de las capacidades de técnicas modernas de teledetección para describir biodiversidad, condición de la vegetación, procesos ecológicos, propiedades del suelo y variables hidrológicas, y cómo estas técnicas pueden contribuir en la evaluación de los SE, y encontraron que las herramientas de teledetección han proporcionado un fuerte apoyo científico para el modelado de SE en el espacio y el tiempo, mediante la identificación de los procesos ecológicos y los componentes de la biodiversidad.

De Araujo Barbosa et al. (2015) hicieron una revisión extensiva de la literatura que, directa o indirectamente, hace referencia a los servicios ecosistémicos, publicada entre 1960 y 2013; encontraron 211 artículos que hacen referencia directa al uso teledetección (en inglés “*remote sensing*”), concluyeron que los datos de cobertura del suelo son los datos obtenidos por teledetección más utilizados en los estudios para evaluar y valorar SE, y que estos datos eran utilizados como “*proxies*”⁷ para el modelado espacialmente explícito de los SE. El resultado es altamente dependiente de la escala de entrada y produce resultados poco precisos cuando se compara con datos primarios. La importancia de entender cómo las evaluaciones de los SE y valoraciones monetarias varían con los cambios en la escala espacial, especialmente si los estudios de valoración hacen uso de sensores con distintas resoluciones espaciales; la efectiva cartografía de la gama completa de los SE excede las capacidades del uso de las herramientas de teledetección exclusivamente, por tanto, para superar ésta y otras limitaciones es necesario la combinación de datos obtenidos por teledetección con información de otras fuentes. McKenzie et al. (2011) identifican como oportunidad de investigación “ciencia de la escala” en la cartografía de los SE.

Los modelos científicos llevan de lo abstracto hacia argumentos conceptuales sobre de la importancia de una cuantificación específica del nivel, valor o distribución espacial de los beneficios de los SE y, por tanto, permiten que dicha información pueda ser considerada en la toma de decisiones y aplicación de políticas (Martínez-Harms & Balvanera, 2012). Existe una necesidad imperante de desarrollar herramientas y métodos para profundizar la comprensión de los procesos socio-ecológicos detrás de la oferta de SE con el fin de mejorar la capacidad de representar, en mapas, los SE para la toma de decisiones (Martínez-Harms & Balvanera, 2012). En este sentido, es necesario que dichos modelos científicos exploren más rigurosamente la provisión real (en lugar de la potencial), su variación a lo largo del paisaje, demanda de sus beneficiarios y sus posibles conflictos intersectoriales y *trade-offs*⁸

⁷ Se entiende proxy (plural: proxies) como el valor sustituto o aproximado que se utiliza para representar información no disponible o que no es directamente medible.

⁸ Disyuntiva que implica la pérdida de una cualidad o aspecto de algo a cambio de la obtención de otra cualidad o aspecto.

entre SE. Las herramientas, modelado y análisis espacial se han empezado a enfocar más hacia la demanda y hacia los flujos espaciales de los ecosistemas hasta los beneficiarios (McKenzie et al., 2011). Los modelos están tratando de incorporar tanto la provisión, valor y beneficios de los SE en su diseño con el objetivo de auxiliar decisiones complejas en torno al manejo territorial (Verhagen et al., 2015).

Los SE pueden cartografiarse utilizando una diversidad de métodos, cuya su aplicabilidad está restringida por la disponibilidad de datos, alcance del estudio y limitaciones de tiempo (Verhagen et al., 2015). Los sistemas de soporte para la toma de decisiones buscan desarrollar pensamiento estratégico acerca del paisaje, biodiversidad, geodiversidad y cambio de cobertura del suelo en un marco de SE (Carter, et al., 2012). Nemeč & Raudsepp-Hearne (2013) valoraron estas herramientas para la evaluación de SE resaltando debilidades y fortalezas en diferentes contextos de uso (Cuadro 2).

Cuadro 2. Características de modelos espacialmente explícitos para cartografiar y evaluar SE. Fuente: Modificado de Nemeč & Raudsepp-Hearne (2013)

Herramienta	Tipo de modelo	Acceso	Escala aplicable ^a
InVEST	Función de producción	Abierto	Paisajes a cuenca
ARIES	Transferencia de beneficios	Abierto	Paisajes a cuenca
ESValue	Priorización	Propietario	Nivel de sitio a paisajes
EcoAIM	Priorización	Abierto	Nivel de sitio a paisajes
EcoMetrix	Transferencia de beneficios	Propietario	Nivel de sitio
NAIS	Transferencia de beneficios	Propietario	Nivel de sitio a cuenca
SolvES	Priorización	Abierto	Paisajes

^a Paisajes se refiere a una amplia gama de escalas espaciales tales, como estados o distritos forestales, y son usualmente mayores a una cuenca (100 a 10,000 km²).

En términos de modelado, existen básicamente dos tipos de herramientas de soporte para la toma de decisiones concernientes a SE: (1) los que usan aproximaciones semi-empíricas para representar los procesos subyacentes hasta cierto punto y; (2) aquellos con enfoques basados en el conocimiento de expertos (Carter et al., 2012). A pesar de que el número de este tipo de herramientas ha crecido en años recientes, no existen suficientes estudios comparativos cuantitativos para éstos. Entre los primeros estudios se encuentra el trabajo de Bagstad et al.,

(2013), quienes realizaron un estudio comparativo entre InVest y ARIES, las dos principales herramientas de código abierto para modelado espacialmente explícito; se evaluaron los SE que ambas herramientas pudiesen modelar (carbono, servicios hidrológicos y cuencas visuales), a pesar de que ambos utilizan diferentes aproximaciones, sus hallazgos demostraron similitud en términos de ganancias y pérdidas, así como las conclusiones para los escenarios estudiados.

Entre los resultados del MEA (2005a), se demostró la existencia de una degradación global de los ecosistemas y dependencia de la humanidad para su supervivencia (Balvanera & Cotler, 2007). Sin embargo, debido a la complejidad resultante de la variedad de factores socioeconómicos, aún no existe una comprensión total entre dicha dependencia (Jujnovsky et al., 2012). Esta falta de conocimiento conlleva a la toma de decisiones inadecuadas en términos del manejo territorial y degradación de los ecosistemas que proveen servicios (Nemec & Raudsepp-Hearne, 2013). Asimismo, los conflictos entre los intereses de diferentes sectores de la población durante el proceso de ordenación del territorio derivan, generalmente, en decisiones y prácticas de manejo territorial poco sustentables. La integración del concepto de SE a la ordenación del territorio y toma de decisiones facilita la comunicación en los diferentes sectores y tomadores de decisiones (Hauck et al., 2013). La meta final de la evaluación de los SE es, por lo general, estimar valores marginales de los SE para informar las decisiones donde los compromisos a la provisión del servicio afectarán el bienestar humano, por tanto, los modelos están tratando de incorporar en su diseño ambos, provisión y beneficios asociados y valor de los SE para los humanos (Nemec & Raudsepp-Hearne, 2013).

McKenzie et al. (2011) identificaron numerosas características de modelos de SE que son relevantes en el contexto de política común, entre las que destacan que los modelos espacialmente explícitos contienen un atractivo visual para la comunicación y la promoción de los SE; permiten determinar hacia dónde dirigir inversión, políticas e instrumentos económicos (tales como pagos por servicios ecosistémicos); determinar la localización de traslapes entre SE y biodiversidad o beneficiarios y; los mapas de alta resolución permiten dirigir respuestas de política y normatividad en contextos específicos contexto.

Verhagen et al., (2015) identificaron las principales razones para realizar una cartografía de SE: (1) elaboración de un inventario del estado actual de los SE como auxiliar

en el desarrollo de estrategias para mantener de servicios ecosistémicos claves provisión y demanda; (2) al contar con cartografía de la provisión y demanda de un SE, se pueden analizar las zonas donde la demanda sobrepase la provisión y así desarrollar estrategias no solo de conservación, sino para incrementar la provisión del SE (p.ej. demanda de servicios de regulación); (3) elaborar un análisis de *trade-offs* entre SE (p.ej. servicios de provisión vs biodiversidad o provisión vs regulación) y; (4) determinar los cambios y efectos futuros que tendrán en la provisión y demanda de un SE debido al manejo territorial, cambios de uso o cobertura del suelo o cambio climático.

En 2011, PEER (por sus siglas en inglés) reconoce las ventajas y desafíos que juegan los mapas como auxiliares en la planificación y generación de políticas a una escala regional: Ventajas (Maes, Paracchini, & Zulian, 2011):

“Los mapas son útiles en la identificación y acotamiento del problema: ayudan a identificar conflictos y sinergias e indican las áreas donde los SE o la biodiversidad se encuentran amenazados. Los mapas son heurísticamente útiles para iniciar discusiones acerca de las soluciones y para la visualización de alternativas (simulaciones). [...]”

“Los mapas se pueden utilizar como una base científica en la toma de decisiones para la identificación de las posibles implementaciones políticas, mejorar la focalización de éstas, y la demostración y evaluación de los beneficios de las implementaciones de políticas en relación con los costos [...]”

“Los mapas que ya se utilizan ampliamente y representan instrumentos indispensables en la planificación de actividades sub-nacionales, por ejemplo, para las zonas de protección de la biodiversidad y que muestran las relaciones, especialmente para los posibles conflictos entre los diferentes usos de la tierra [...]. “

“Los mapas tienen un valor pedagógico, explicando la importancia de la biodiversidad y SE al público.”

Desafíos identificados:

“Algunos SE (p.ej. culturales y de regulación) no se pueden representar fácilmente en mapas. [...]”

“Las escalas espaciales y temporales de mapas de SE y las escalas requeridas en la toma de decisiones no son necesariamente idénticas [...]”

“La elaboración de mapas con una alta resolución es costoso, e incluso mapas con detalles de alta frecuencia espacial son objeto de controversia desde el nivel local como inexacta.”

“Las bases de datos existentes para mapas, conocimiento científico, y el trabajo de modelado podrían ser demasiado dispersos y heterogéneos para que sirvan como base para toma de decisiones [...].”

“Identificar áreas problemáticas en un mapa puede resultar en la estigmatización de las regiones que parecen proporcionar sólo unos pocos SE o puede indicar zonas de alto potencial, derivando en un aumento de la explotación.”

En 2011, la Comisión Europea (EC) a través del JRC (*Joint Research Centre*) lanzó una evaluación de los servicios ecosistémicos de provisión, enfocada a la creación de un Atlas de Servicios Ecosistémicos (Maes, Hauck, et al., 2011). En este mismo año, también se lanza a través del JRC la evaluación espacial de servicios ecosistémicos de Europa. Asimismo, el concepto de SE se integró en las políticas de biodiversidad a un nivel global (CBD, 2010; Fitter et al., 2010) y europeo (EC, 2011). Particularmente, la estrategia de biodiversidad 2020⁹ integra el uso sustentable de los servicios ecosistémicos, siendo las economías humanas las acciones de sostén y así contribuir con los objetivos de Europa para el 2020 (Santillan, Marqueso, Makinano-Santillan, & Serviano, 2016). A pesar del creciente interés político y científico en los SE, la implementación efectiva en la planeación territorial sigue siendo limitada (Albert, Hauck, Buhr, & von Haaren, 2014).

2.5 Análisis de riesgo de inundaciones

El desarrollo es un proceso de construcción social y debe orientarse hacia la realización humana (UNEP, 2004); razón por la cual, el análisis y la gestión del riesgo se reconoce como uno de los retos claves para el desarrollo. Entre los elementos claves para una exitosa gestión del riesgo se identifica la protección de los ecosistemas que proveen servicios (Atkinson et al., 2012).

Las inundaciones se encuentran entre los desastres por fenómenos naturales más recurrentes y devastadores, impactando en vidas humanas y causando grandes pérdidas económicas y ambientales en todo el mundo (Ouma & Tateishi, 2014). Se prevé que el riesgo por inundación aumentará en el futuro en muchas partes del mundo debido al aumento en la intensidad y frecuencia de las inundaciones como consecuencia del cambio climático

⁹ <http://www.cbd.int/sp/targets/>

(Santillan et al., 2016) así como por el resultado de los procesos de urbanización y el aumento de asentamientos humanos en zonas potencialmente inundables.

El entendimiento de las inundaciones y sus riesgos asociados, incluyendo el desarrollo e implementación de medidas de adaptación, que vuelvo cada vez más importantes (Santillan et al., 2016). En este sentido, la teledetección y SIG se han convertido en herramientas geoespaciales muy eficientes para la evaluación de las inundaciones y su riesgo. Tradicionalmente, se ha visto al riesgo únicamente como la probabilidad de que un evento peligroso suceda. Sin embargo, el análisis integral de riesgo debe incorporar la interacción entre la naturaleza del evento y las características de la población o área en riesgo (Ouma & Tateishi, 2014), por ende, se requiere un mejor entendimiento y conocimiento de la vulnerabilidad (García Lemus, 2004).

2.5.1 Determinantes del riesgo

El Panel Intergubernamental de Expertos ante el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) y la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR, por su siglas en inglés) coinciden en que el paradigma moderno del riesgo asociado a peligros naturales y catástrofes, comprende los conceptos peligro, vulnerabilidad y exposición (Baecher, 2009). Sin embargo, es muy común encontrar que tanto en la literatura como en diversas instituciones y dependencias gubernamentales se utilizan distintas definiciones que comprenden conceptos diferentes (p.ej., el término “consecuencias”). Más aún, no existe consenso en cómo deben combinarse sus elementos en una expresión matemática para proveer una medida escalar del riesgo (Baecher, 2009).

El primer paso para poder alcanzar un adecuado manejo integral del riesgo es acordar su definición. Para este propósito FLOODsite¹⁰ hizo una extensiva revisión de literatura sobre el concepto de riesgo y se encontró que existen muchas definiciones y diferentes

¹⁰ El Proyecto FLOODsite es parte del sexto programa marco de la Unión Europea y comprende un extenso programa de investigación y desarrollo dedicado al análisis y gestión del riesgo de inundación. Cuenta con un equipo de investigación de más de 200 personas, procedentes de 37 organizaciones diferentes, de 13 países diferentes, y que abordan unas 35 tareas distintas de trabajo.

nociones, y que sus componentes llegan a ser conceptualizados ambiguamente (FLOODsite, 2009).

Con base en diversas definiciones de riesgo en la literatura reciente, FLOODsite recomienda definir el riesgo de inundación de la siguiente manera (Klijn et al., 2015):

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad (de inundación)} \times \text{Consecuencias (de la inundación)} \quad \text{Ecuación 1}$$

Esta definición es muy utilizada entre científicos ambientales e ingenieros, quienes usualmente realizan un esfuerzo en la reducción de la probabilidad de la inundación utilizando medidas de protección, típicamente son obras de infraestructura con resistencia basada en términos probabilísticos (FLOODsite, 2009).

La Ecuación 2 también muy utilizada en la literatura reciente, es preferida entre científicos sociales y, particularmente, planificadores territoriales, quienes suelen considerar el peligro como algo dado, y como manera de mitigación o adaptación buscan influenciar en la planificación espacial y el comportamiento de la gente (Klijn et al., 2015).

$$\text{Riesgo} = \text{Peligro (de inundación)} \times \text{Vulnerabilidad (de la sociedad ó del área)} \quad \text{Ecuación 2}$$

La Ecuación 2, al multiplicar la probabilidad de una falla en la medida de defensa con sus consecuencias, obtiene un estimado cuantitativo donde la vulnerabilidad del área y la extensión y profundidad de la inundación se combinan en una cifra para expresar consecuencias, por lo tanto, utilizan el símbolo de multiplicación como operador indicativo (Klijn et al., 2015). En contraste, en Ecuación 2, la extensión y profundidad de la inundación y su la probabilidad de ocurrencia, están comprendidas dentro del concepto de peligro (definido como un fenómeno potencialmente dañino). Entonces los daños solamente pueden ocurrir en una sociedad o área vulnerable, por lo tanto, el operador indicativo recomendado es el símbolo de superposición.

La principal diferencia entre estas dos definiciones reside dónde las características de la inundación son incorporadas. Para el caso de las características de la inundación (extensión y profundidad) están incorporadas en gran parte en el término “consecuencias”, mientras que en Ecuación 2, estas características (así como su probabilidad) se encuentran directamente

incluidas y de manera obvia en el término “peligro”. Klijn et al. (2015) sugieren la inclusión del término “exposición”, refiriéndose a la “cuantificación de los receptores que pueden ser influenciados por una inundación” (p. ej., número de personas, y número y tipo de propiedades) y al incluirlo explícitamente como un elemento por separado en los constituyentes del riesgo, ambas definiciones pueden ser reconciliadas (ver Figura 3).

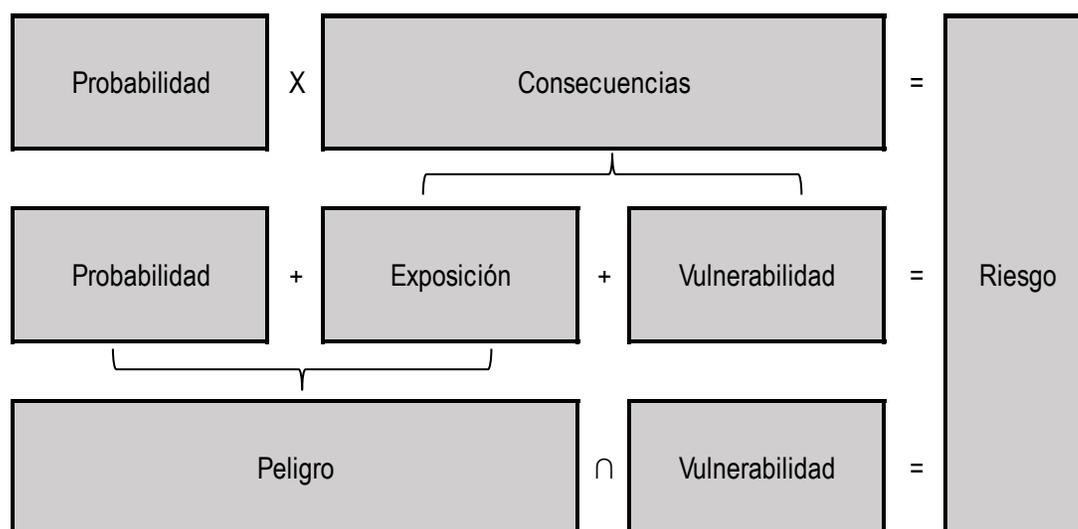


Figura 3. Reconciliación de dos definiciones importantes de riesgo incorporando el término exposición. Tomado de Klijn et al. (2015)

En concordancia con esta nueva y reconciliada conceptualización de riesgo, el IPCC y UNISDR también incluyen el término “exposición”, sin embargo, la diferencia principal radica que en, el término “peligro” se define como “la posibilidad de cierto fenómeno potencialmente dañino” (Peggion, Bernardini, & Masera, 2008).

2.5.2 Uso de los sistemas de información geográfica para el análisis de riesgos

La evaluación de riesgos es un proceso complejo que apunta hacia la valoración de diferentes aspectos que pueden desequilibrar un sistema para proporcionar los medios para entender las causas y consecuencias de dichos riesgos (Peggion et al., 2008). Un principio fundamental para la evaluación de riesgos es reconocer que éstos son dependientes de su localización. Por tanto, las técnicas geoespaciales que proveen los SIG pueden ser de suma utilidad para la

identificación, análisis, cuantificación y evaluación de los riesgos. Existen en la literatura numerosos ejemplos de casos exitosos en que los SIG se han utilizado para la evaluación de riesgos (c.f. Brahmi, Hatira, & Rabia, 2010; Ebert, Kerle, & Stein, 2008; Evans, Gunn, & Williams, 2007; Fedeski & Gwilliam, 2007; Grêt-Regamey et al., 2014; Grineski et al., 2012; Jiang, Wang, Lung, Guo, & Li, 2012; Santini, Caccamo, Laurenti, Noce, & Valentini, 2010; Stein, Staritsky, Bouma, & Van Groenigen, 1995; Youpeng et al., 2010)

Actualmente, el uso de los SIG para el modelado de las inundaciones y su delimitación espacial está muy avanzado y existen numerosos modelos matemáticos para calcular sus características, como “profundidad, velocidad y extensión” (Atkinson et al., 2012), así como maneras de modelar en términos espaciales, la exposición y vulnerabilidad donde el riesgo se desarrolla. Una de las salidas principales del análisis con SIG son los mapas de riesgo, que se entienden como la expresión geoespacial de los resultados de las evaluaciones basadas en los componentes del riesgo (Krishnamurthy & Krishnamurthy, 2012; Ouma & Tateishi, 2014).

2.5.3 Elección del concepto de riesgo y sus componentes

De las definiciones de riesgo revisadas anteriormente, se recomienda la Ecuación 3 como base para la construcción de un índice de riesgo espacialmente explícito, apto para evaluar el SE de regulación de inundación en una microcuenca urbana. La Ecuación 3, es la Ecuación 2 modificada en el operador indicativo al de superposición.

$$\text{Riesgo} = \text{Peligro (de inundación)} \cap \text{Vulnerabilidad (de la sociedad ó del área)} \quad \text{Ecuación 3}$$

La Ecuación 3, al utilizar el operador de superposición, conceptualiza el riesgo como a coincidencia espacial entre el peligro y la vulnerabilidad, haciendo a los SIG la herramienta idónea para su evaluación. En los siguientes apartados se hacen propuestas para la elaboración, en términos geoespaciales, de ambos componentes de la Ecuación 3.

2.5.3.1 Peligro

Los mapas de peligro de inundación constituyen las bases para el desarrollo de planes de gestión del riesgo (Krishnamurthy & Krishnamurthy, 2012; Ouma & Tateishi, 2014). Para generar mapas que sirvan al propósito de evaluar servicios ecosistémicos de regulación de inundación, es necesario que el modelo hidrológico a utilizar en la investigación sea aplicable a cuencas pequeñas con procesos predominantes de escorrentía superficial en eventos de inundación, así como la posibilidad de estimar la influencia de la cobertura del suelo, ésta, especialmente importante para la evaluación del servicio ecosistémico de regulación de inundaciones. Asimismo, el modelo hidrológico debe de ser capaz de simular procesos físicos de intercepción, infiltración, escorrentía y erosión en cuencas que se caracterizan generalmente por procesos de flujo superficial, como la extensión, profundidad y velocidad del agua, en el espacio.

Ouma & Tateishi (2014) realizaron una revisión del estado del arte en modelado de cuencas y sus aplicaciones, así como de sus principales componentes y datos de entradas. De este trabajo, se recomienda elegir uno, de entre los modelos descritos como apropiados para modelado urbano de cuencas, modelo de inundación e impactos del cambio del uso y cobertura del suelo.

2.5.3.2 Vulnerabilidad

La vulnerabilidad es el componente más crucial del riesgo debido a que determina si la exposición al peligro constituye un riesgo que potencialmente puede convertirse en desastre (Anderson, 1985). La evaluación de la vulnerabilidad del territorio a inundación en sus diversos componentes y escalas, permite definir mejor las acciones que se llevarán a cabo en los diferentes momentos de la gestión de riesgos (Moulin & Faytre, 2017). Desde hace varias décadas, se han realizado propuestas para definir las diferentes tipologías de la vulnerabilidad (Krishnamurthy & Krishnamurthy, 2012). Sin embargo, dado que el objetivo es generar un índice de riesgo capaz de reflejar la provisión del SE, se exhorta utilizar únicamente aquellos tipos de vulnerabilidad competentes a dicho fin. Se recomienda utilizar únicamente vulnerabilidad social, vulnerabilidad física y vulnerabilidad material, conceptos que se describen a continuación:

La vulnerabilidad social se refiere a las características de una persona (o grupo) que les imposibilita a soportar peligros, ésta es inherentemente compleja (Ebert et al., 2008) y puede definirse de manera diferente, dependiendo la escala de análisis.

La vulnerabilidad física se define como las propiedades de estructuras físicas que determinan su daño potencial en caso de desastre -p. ej., tipo de material, calidad de la construcción, etc. (Anderson, 1985)-.

La vulnerabilidad material es reducida cuando los recursos para satisfacer necesidades físicas básicas humanas son suficientes para el consumo presente y para sustentar una comunidad durante un periodo no productivo que puede haber sido causado por un evento de crisis (Anderson, 1985).

La vulnerabilidad no es un fenómeno observable, por tanto, se necesario estimarla a partir de variables espaciales, *proxies*¹¹, físicas y sociales. Se recomienda el uso de datos de censos nacionales agregados a una unidad geoestadística apropiada para su manejo en los SIG. Algunos ejemplos de variables *proxies* que se han utilizado exitosamente son: población debajo de la línea de pobreza, jefatura de hogares femeninos, nivel educativo, edad, densidad de población, densidad de viviendas, distancia a hospitales, refugio y carreteras federales - cf. (Grineski et al., (2010), Cançado et al., (2008) y Krishnamurthy & Krishnamurthy, (2012)-. Es importante que las variables elegidas cuenten con suficientes datos para modelar diferentes escenarios y evaluar el cambio espaciotemporal del SE de regulación de inundaciones.

2.5.4 Construcción del índice de riesgo de inundación

No existe consenso en cómo deben combinarse o ponderarse los componentes del riesgo, ni en cómo debe hacerse la estratificación para calcular los niveles de riesgo. Diferentes autores utilizan diferentes métodos. Por ejemplo, Krishnamurthy & Krishnamurthy (2012) utilizan el criterio de expertos; Grineski et al. (2010) usan una regresión espacial; (Irvem & Topaloglu, 2012; Nandi Arpita¹, Mandal, Wilson, & Smith, 2016; Rahmati, Zeinivand, & Besharat, 2016; Wang, Li, Tang, & Zeng, 2011) utilizan análisis de componentes principales

¹¹ Indicadores sustitutos.

para la generación del índice y el análisis “clúster” para la estratificación de los niveles del riesgo; el uso del análisis multicriterio ha sido también muy utilizado para evaluar el riesgo de inundación (Baecher, 2009). Las matrices de riesgo han sido muy utilizadas, principalmente por agencias federales o instituciones encargadas de protección civil, para identificar los riesgos y jerarquizar alternativas de remediación (Krzanowski & Marriott, 1995).

Los métodos multivariados son una buena opción dado que tratan múltiples variables simultáneamente (USDA, 1986). No obstante, el método a elegir debe ser aquel que permita que sea comparable entre distintos escenarios.

3. Metodología

El enfoque metodológico empleado en este estudio corresponde a un modelo explicativo basado en análisis secundario y mediciones en campo. Se construyó, mediante un SIG, un índice de riesgo de inundación, que combina los resultados de un modelado hidrológico con variables socio-demográficas. Dicho índice se utilizó para evaluar, en diferentes escenarios de cobertura y usos del suelo, las capacidades locales para suministrar el servicio ecosistémico de regulación de inundación en eventos extremos de precipitación pluvial, así como las zonas de demanda en el área de estudio. En las siguientes secciones se describen los datos, herramientas y acciones empleados en este estudio.

3.1 Trabajo de campo

Se realizaron diversos recorridos en el área de estudio entre de 2014 y 2018, con apoyo de académicos y estudiantes del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO). Las principales actividades del trabajo de campo fueron visitas de reconocimiento, toma de fotografías, levantamiento de puntos con GPS modelo etrex 10 de la marca GARMIN, campañas de muestreo de tasas de infiltración de agua en el suelo, verificación y contraste de la información recabada (espacial y no espacial) de las diversas fuentes utilizadas.

3.2 Trabajo de gabinete

3.2.1 Revisión de antecedentes

Se realizó una revisión comprehensiva de numerosos y diversos trabajos relacionados con el objeto de estudio de esta tesis doctoral. A través de los acervos físicos y los servicios electrónicos de las bibliotecas de la Universidad de Guadalajara y del ITESO, se consultaron diversas fuentes de información, como libros, tesis y publicaciones periódicas. Destacan por su gran utilidad en este trabajo, las bases de datos electrónicas de publicaciones de revistas científicas con prestigio internacional y de alto impacto.

Se consultaron también fuentes oficiales de los ámbitos federal, estatal y municipal. Entre las principales fuentes de información consultadas se encuentran el Instituto Nacional

de Estadística y Geografía (INEGI), la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial del Jalisco (SEMADET), la Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP), la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), la Comisión Estatal del Agua (CEA), el Instituto de Información Estadística y Geográfica (IIEG), el Instituto Metropolitano de Planeación del Área Metropolitana de Guadalajara (IMEPLAN), Gobierno Municipal de Tlajomulco de Zúñiga, Gobierno Municipal de San Pedro Tlaquepaque y el Organismo Público Descentralizado (OPD) del Bosque La Primavera.

3.2.2 Análisis espacial y herramientas de geoprocésamiento.

Entre los datos obtenidos de las fuentes mencionadas en el apartado anterior, se encuentran aquellos datos espacialmente explícitos, también llamados datos geoespaciales, o simplemente datos espaciales¹². Dichos datos espaciales describen la distribución en el espacio geográfico de objetos, rasgos o fenómenos, así como sus atributos, observados o medidos en un momento. Pueden provenir de fuentes tales como mapas, teledetección, GPS, levantamientos de topografía y muestreos (Zhu, 2016).

La principal utilidad de los datos espaciales es que pueden trabajarse dentro de un SIG para su análisis. Por esta razón, se hizo una integración de la información geoespacial disponible a un SIG, principalmente se utilizaron los paquetes informáticos especializados ArcGIS 10.x¹³ y QGIS 2.18¹⁴. El análisis espacial, permitió el estudio de los datos asociados con su localización, para describir y analizar la distribución de características o patrones espaciales en el área de estudio. El análisis espacial tomó un rol crítico en esta investigación, puesto que permitió el análisis cuantitativo y cualitativo a través de las herramientas de geoprocésamiento, como el análisis de proximidad, superposición, geoestadísticos, entre

¹² En este trabajo se utilizan como sinónimo dato geoespacial o dato espacial, aunque típicamente un dato espacial es aquel que está referenciado a un marco multidimensional, que no es necesariamente la superficie terrestre.

¹³ Software comercial desarrollado por *Environmental Systems Research Institute* (ESRI).

¹⁴ Sistema de Información Geográfica de código libre.

otros. Asimismo, se utilizaron técnicas de percepción remota con imágenes aéreas y satelitales para clasificación y estudio del territorio. La percepción remota es una herramienta muy importante en el desarrollo de esta investigación ya que proporcionó información histórica detallada sobre la condición y uso del territorio. Además, la percepción remota es un método eficiente y de bajo costo para cartografiar rasgos o fenómenos de interés dentro el área de estudio. Además, las imágenes históricas (ortofotografía de INEGI e IIEG) fueron utilizadas para hacer análisis retrospectivos sobre cómo y cuánto el área de estudio ha cambiado a lo largo del tiempo. Esta información fue combinada con otra información geoespacial que permitió realizar análisis espaciales complejos que generaron nueva información geoespacial cuantitativa o cualitativa. En este trabajo se elaboraron más de 55 mapas temáticos.

3.2.3 Caracterización climática

Para realizar la caracterización climática del área de estudio, se utilizaron los datos contenidos en la carta climatológica, escala 1:250,000 del INEGI, que se basa en la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1964 (García, 1964).

3.2.3.1 Trabajo con las bases de datos de precipitación y temperatura

Se hizo una revisión de los datos meteorológicos contenidos en la base de datos “Extractor Rápido de Información Climática III” (ERIC III) del Instituto de Tecnología del Agua (IMTA, 2013) cercanas a la microcuenca (Cuadro 3), éstos datos provienen principalmente de las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) que depende, al igual que el IMTA, de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). El ERIC III contiene únicamente datos diarios. Se extrajeron y adecuaron más de dos y medio millones datos para su manipulación en una hoja de cálculo.

Cuadro 3. Estaciones meteorológicas cercanas a la microcuenca “El Guayabo”. Fuente: Elaboración propia con datos del ERIC III.

Clave	Nombre	Longitud	Latitud	Altitud
14002	ACATLAN DE JUAREZ	-103.591	20.421	1370
14057	EL SALTO	-103.178	20.519	1508
14066	GUADALAJARA (DGE)	-103.346	20.676	1550
14072	HUERTA VIEJA	-103.242	20.426	1550
14113	PRESA HURTADO	-103.632	20.439	1400
14115	PUENTE ARCEDIANO (CFE)	-103.286	20.735	1015
14121	GUADALAJARA (SMN)	-103.383	20.7	1567
14132	TLAQUEPAQUE	-103.311	20.638	1540
14169	ZAPOPAN	-103.392	20.72	1560
14173	ATEQUIZA NORMAL RURAL	-103.135	20.396	1521
14278	EMPALME DE ORENDAIN (FFC)	-103.633	20.733	1460
14279	GUADALAJARA (FFCC)	-103.353	20.656	1549
14292	ESCUELA DE AGRICULTURA	-103.417	20.7	1600
14294	TLAJOMULCO DE ZUÑIGA	-103.447	20.473	1560
14295	UNIVERSIDAD AUTONOMA DE	-103.417	20.717	1570
14329	LA EXPERIENCIA	-103.286	20.67	1550
14356	LA CAÑADA	-103.442	20.422	1625
14362	SAN LUCAS EVANGELISTA	-103.317	20.403	1560
14380	SAN LUIS	-103.564	20.463	1560
14386	TONALA	-103.241	20.624	1660

De las estaciones meteorológicas mostradas en el Cuadro 3, se seleccionaron aquellas que se encontraban a una distancia menor a 20 km. Con el fin de detectar lagunas en las bases de datos, se llevó a cabo una revisión de las bases meteorológicas para las variables de precipitación y temperatura diarias. La Figura 4 muestra el análisis de la variable de precipitación del periodo 1990-2010, donde se visualiza con un diferente color, dependiendo al porcentaje de datos contenidos en un año.

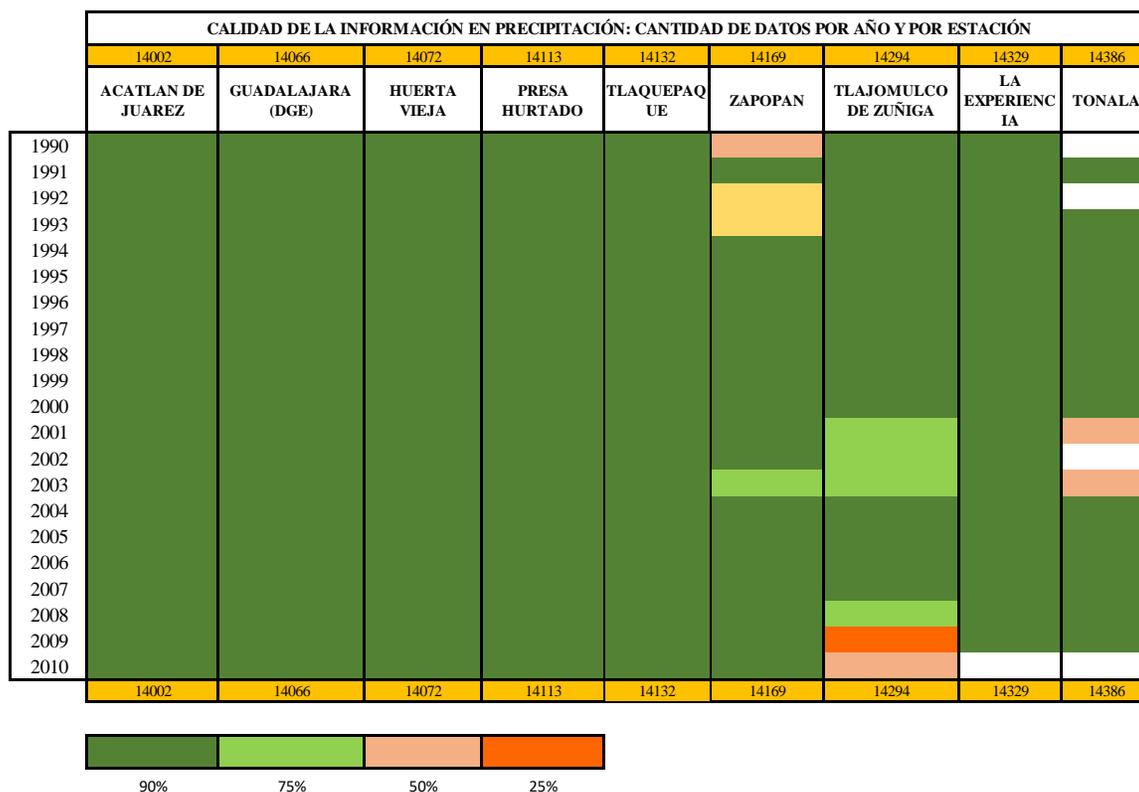


Figura 4. Lagunas de información detectadas en las bases de dato meteorológica para la variable de precipitación para el periodo 1990-2010. Fuente: Tomado del reporte del Proyecto de Aplicación profesional elaborado por Villalpando-Vizcaino et al. (2016)

Tomando como base la información de las nueve estaciones meteorológicas mencionadas, se definió un horizonte temporal de 30 años (1980 a 2010) y se procedió a rellenar los huecos con medias móviles (Padilla & Delgado, 2013) . Posteriormente, se interpolaron, a través de un SIG por el método inverso de la distancia ponderada (IDW por sus siglas en inglés) -ver Ecuación 4-, los valores correspondientes a la microcuenca “El Guayabo” para las variables de precipitación y temperatura.

$$P_i = \frac{\sum_{j=1}^G \frac{P_j}{D_{ij}^n}}{\sum_{j=1}^G \frac{1}{D_{ij}^n}} \tag{Ecuación 4}$$

Donde:

P_i = valor estimado en el punto i

P_j = valor conocido al punto j

D_{ij} = distancia entre los puntos i y j

n es la potencia especificada que controla el grado de influencia local.

Mediante de un algoritmo computacional realizado en Excel¹⁵, utilizando la base de datos corregida y la Ecuación 4, se obtuvieron las normales climatológicas para el centroide de la microcuenca (con coordenada -103.47, 20.55).

Se utilizó el método de Thornthwaite (1948) -Ecuación 5-, para el cálculo evapotranspiración potencial para la microcuenca. Para esto se utilizaron los datos mensuales de las estaciones seleccionadas, previamente adecuados a través de un algoritmo computacional.

$$ETP_i = K_i e_i \quad \text{Ecuación 5}$$

$$e_i = 16 \left(\frac{10t_i}{I} \right)^a \quad \text{Ecuación 6}$$

El valor de evapotranspiración mensual sin corregir e_i de la Ecuación 6, está dado por una temperatura media t_i , por el valor del índice de calor I , dado por la siguiente expresión:

$$I = \sum_{i=1}^{12} i_i \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

$$i_i = \text{corresponde al índice de calor mensual } i_i = \left(\frac{t_i}{5} \right)^{1.515};$$
$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.7 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 4.92 \times 10^{-1}$$

¹⁵ Aplicación de hojas de cálculo desarrollada por la empresa Microsoft

El factor de corrección $K_i = \frac{N_i}{12}$ para los valores diarios; y $K_i = \left(\frac{D_i}{30}\right) \left(\frac{N_j}{30}\right)$ para datos mensuales. Donde D_i , corresponde al número de días del mes i , y N_j como el número máximo de horas de sol en el día j , definido en la siguiente ecuación:

$$N_i = \frac{2}{5} w \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

w es el ángulo horario en grados, definido como $w = \arccos(-\tan(\phi) \tan(d))$;

ϕ = la latitud, en grados

d = la declinación, en grados: $d = 23.45 \text{ sen } [0.9863(284 + n)]$

n = el día del año iniciado en 1 de enero.

3.2.4 Análisis estadístico de los datos de precipitación

Se realizaron análisis estadísticos para las series de datos de precipitación anual, correspondientes al periodo 1980-2010, de las estaciones seleccionadas y el centroide de la microcuenca. Dichos análisis consistieron en la obtención de los estadísticos descriptivos: media; desviación estándar, coeficiente de variación, mínimo, máximo, rango, asimetría estandarizada y curtosis. Para la apreciación visual de la distribución del conjunto de datos se elaboró un gráfico de caja y bigotes. Asimismo, se construyeron otras pruebas estadísticas y gráficas para la comparación de las muestras; tales como la *prueba F* en la tabla de ANOVA, para probar si hay diferencias significativas entre las medias, y; pruebas de rango múltiple para conocer qué medias son significativamente diferentes de las otras.

Cuadro 4. Precipitación anual, expresada en mm, de las estaciones meteorológicas seleccionadas. Fuente:

Elaborado con datos del ERIC III.

Fecha	ACATLÁN DE JUAREZ	GUADALAJARA (DGE)	HUERTA VIEJA	PRESA HURTADO	TLAQUEPAQUE	ZAPOPAN	TLAJOMULCO DE ZÚÑIGA	LA EXPERIENCIA	TONALÁ	GUAYABO
1980	808	1131	987	928	823	1086	788	855	822	875
1981	744	866	911	805	925	1056	788	965	822	846
1982	824	1034	930	856	934	910	788	788	822	851
1983	929	1034	803	1042	765	837	788	924	822	855
1984	725	1086	943	896	905	887	794	820	822	851
1985	702	958	812	790	850	883	680	837	822	772
1986	733	1055	859	751	969	854	892	988	822	888
1987	870	966	761	905	802	1084	795	828	822	852
1988	774	703	917	949	687	811	955	682	822	852
1989	621	615	795	611	674	882	615	817	822	674
1990	973	1105	1109	1008	1272	1015	961	871	822	1006
1991	687	857	1099	702	831	939	806	834	722	816
1992	1049	1116	1359	1170	1365	1353	1078	1167	822	1139
1993	669	821	1019	702	962	851	590	897	571	720
1994	634	907	740	795	1194	978	867	948	697	875
1995	540	886	995	741	842	962	741	798	368	759
1996	809	949	1008	884	1065	906	778	959	573	853
1997	789	1146	775	776	881	1187	754	1018	849	865
1998	634	1101	719	832	1066	1122	615	960	873	802
1999	721	830	766	929	947	917	772	951	789	824
2000	730	874	794	838	870	980	409	853	774	667
2001	765	1046	720	845	902	953	700	741	807	798
2002	842	1016	976	1300	1042	1091	844	892	822	940
2003	756	992	894	916	1365	1259	926	1057	1120	1002
2004	883	1567	967	998	1575	1378	880	1512	1354	1128
2005	653	942	632	692	800	844	750	942	810	778
2006	859	1095	877	913	1305	886	791	894	1068	915
2007	690	1054	1043	880	944	968	801	1158	899	886
2008	844	1108	1444	898	1159	1278	899	1122	984	1012
2009	765	706	881	696	865	882	791	830	718	791
2010	992	1234	1301	1026	1205	1232	788	930	822	974

3.2.4.1 Determinación de curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia

Con los datos obtenidos de precipitación máxima en 24 horas para la microcuenca, se estimaron curvas de intensidad, duración y frecuencia, utilizando la fórmula de Bell. La expresión estima las alturas de precipitación para cierta duración entre 5 y 120 minutos a un periodo de retorno entre 2 y 100 años. La fórmula de Bell es la siguiente:

$$P_t^{Tr} = (0.35 \ln Tr + 0.76)(0.54t^{0.25} - 0.50)P_2^{60} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde P_t^{Tr} es la precipitación en mm para una duración de t en minutos y periodo de retorno de Tr en años; P_2^{60} es la precipitación en mm para una duración de 60 minutos y periodo de retorno de 2 años; t es la duración de la lluvia entre 5 y 120 minutos, en minutos y Tr es el periodo de retorno en años.

Para el cálculo de P_2^{60} se utilizó la ecuación propuesta por D.M Hershfield (Hernández-Guerrero, 2006).

$$P_2^{60} = 0.60(P_2^{1440}) \quad \text{Ecuación 10}$$

3.2.4.2 Determinación de precipitación máxima diaria a distintos periodos de retorno

Para el cálculo de precipitación máxima en 24 horas con los periodos de retorno correspondientes a 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años se utilizaron dos métodos: California y Gumbel descritos en las siguientes secciones.

El método de California es uno de los métodos más simples para el cálculo del periodo de retorno, donde el periodo de retronó se conceptualiza como el cociente entre el valor más alto en los registros sobre el número de registros (Ecuación 11).

$$T_e = \frac{n}{m} \quad \text{Ecuación 11}$$

La distribución de Gumbel es un método estadístico comúnmente utilizado para calcular la probabilidad de eventos extremos (Raad, 2009). Se alimentaron los datos precipitación al

paquete estadístico EasyFit¹⁶ para el cálculo de la precipitación correspondiente a los periodos de retorno, de acuerdo con la distribución de Gumbel. Posteriormente, se ajustaron por un factor de 1.13.

Se realizó una comparación con los resultados obtenidos, contra las precipitaciones máximas diarias obtenidas del trabajo de la CEA (2011) correspondientes a la microcuenca “El Guayabo” (ver sección de resultados).

3.2.5 Caracterización morfométrica de la microcuenca “El Guayabo”

La descripción de las variables morfométricas de una cuenca hidrográfica es muy importante para su análisis, puesto que aporta una aproximación de cómo éstas la influencia en el comportamiento hidrológico. El Cuadro 5 muestra las variables a obtener.

Cuadro 5. Variables morfométricas por obtener para la microcuenca “El Guayabo”. Fuente: elaboración propia

Variables morfométricas
Área de la cuenca
Perímetro de la cuenca
Factor de forma
Coficiente de compacidad de Gravelius
Densidad drenaje
Altitud mínima de la cuenca
Altitud media de la cuenca
Altitud máxima de la cuenca
Relación elongación
Longitud directa del río principal
Longitud del cauce principal
Relación de elongación
Pendiente media de la cuenca
Perfil longitudinal
Orden de corriente

¹⁶ EasyFit es un *software* desarrollado por *MathWave Technologies* para el ajuste de distribuciones matemáticas, fue diseñado para facilitar el análisis de datos probabilísticos para una mejor selección de modelos. Permite seleccionar fácil y rápidamente la distribución de probabilidad que mejor se ajuste a una serie de datos.

A continuación, se describen la metodología para la obtención de los variables morfométricas del Cuadro 5.

3.2.5.1 Área y perímetro

El área de una cuenca es la superficie delimitada por el parteaguas, y refleja la zona de captación de agua. Según los parámetros establecidos de acuerdo con Campos-Aranda, (2010), se considera que una cuenca es muy pequeña si su área es menor a 25 km², “pequeña” si su área se encuentra entre los 25 a los 250 km² de superficie, “intermedia-pequeña” cuando oscila entre 250 y 500 km², “intermedia-grande” si está entre 500 y 2,500 km², “grande” cuando va de 2,500 y 5,000 km² y muy grande si supera 1 5,000 km². El perímetro de una cuenca se refiere a la longitud del contorno del área de la cuenca, o parteaguas. El área y perímetro de la cuenca de El Guayabo se determinaron con herramientas específicas de SIG a partir del archivo vectorial de la microcuenca obtenido de la Comisión Estatal del Agua de Jalisco (CEA, 2011).

3.2.5.2 Forma de la cuenca

La forma de la cuenca se puede determinar mediante el factor forma (F), que se expresa como la relación entre el área de la cuenca y su la longitud de la cuenca elevada al cuadrado (Ecuación 12). Si el factor forma muestra valores cercanos a 1, entonces se puede considerar que la cuenca presenta una forma más redondeada; y valores más bajos indican una cuenca más alargada. Mientras la cuenca presente una forma más redondeada (valores más cercanos a la unidad), tendrá una mayor posibilidad de producir crecientes con mayores caudales.

$$F = \frac{A}{L^2}$$

Ecuación 12

3.2.5.3 Coeficiente de compacidad (Gravelius)

El coeficiente de compacidad, también llamado coeficiente de Gravelius (Kc), es el cociente entre el perímetro de la cuenca (P) y la circunferencia de un círculo cuya área (A) sea de igual tamaño al área de la cuenca analizada. Los valores cercanos a la unidad indican una forma

circular, mientras que valores mayores indicarán una forma más asimétrica. Se utilizó la Ecuación 13 para obtener el coeficiente de compacidad:

$$Kc = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \frac{P}{\sqrt{A}} = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{Ecuación 13}$$

3.2.5.4 Densidad de drenaje

La densidad de drenaje es la relación entre la longitud de todos los canales de agua de la cuenca y la extensión superficial de la misma. Dicho índice es útil para determinar el nivel de desarrollo que presenta la red de drenaje de la cuenca. Valores menores a 5 km/km² indican un nivel de desarrollo bajo de la red de drenaje, valores entre 5 y 13 km/km² indican un nivel medio de desarrollo y valores superiores a 13.7 km/km² indican un nivel alto (Campos-Aranda, 2010).

La densidad de drenaje se obtuvo calculando, en el SIG, la longitud total de los escurrimientos dentro de la microcuenca, contenidos en la cartografía 1: 50,000 de la carta topográfica F13D65 de INEGI. A partir de estos datos obtenidos se calculó la densidad de drenaje D_d mediante la siguiente ecuación:

$$D_d = \frac{L_{tot}}{A} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde D_d es la densidad de drenaje (km/km²), L_{tot} es la sumatoria de la longitud de la red hídrica (km) y A es el área de la cuenca (km²).

3.2.5.5 Altitud mínima, media y máxima de la microcuenca

La altitud máxima y mínima de la microcuenca se obtuvieron a partir del modelo digital elevación (MDE) derivado a partir de las curvas de nivel de la cartografía escala 1:20,000 de INEGI (cartas F13D65E y F13D65F). El valor de altitud media se determinó utilizando la función de estadísticas zonales dentro del SIG, utilizando como entradas el MDE y el archivo vectorial que corresponde a la microcuenca.

3.2.5.6 Longitud directa del cauce

La longitud directa del cauce (L_d) corresponde a la determinada por la distancia en línea recta entre el punto de salida de la cuenca y el punto del perímetro más alejado de éste. La determinación de L_d se realizó a través del SIG.

3.2.5.7 Longitud del cauce principal

La longitud del cauce principal (L_m) es la longitud que recorre el río entre el punto de descarga y el punto situado a mayor distancia topográfica. El cálculo de L_m se realizó a través del SIG.

3.2.5.8 Relación de elongación

La relación de elongación se refiere al cociente entre el diámetro de un círculo con área igual a la de la cuenca y la longitud directa del cauce principal de la cuenca (Ver Ecuación 15).

$$Re = \frac{D}{L_d} \quad \text{Ecuación 15}$$

Este coeficiente se encuentra siempre entre 0.60 y 1.00 y se relaciona con el relieve de la cuenca, donde valores cercanos a 0.60 indican fuerte relieve y pendientes pronunciadas y valores cercanos a la unidad indican relieves someros sin pendientes pronunciadas.

3.2.5.9 Pendiente media de la cuenca

La pendiente media de una cuenca es un factor determinante para a conocer el proceso de degradación que tiene la cuenca hidrográfica estudiada, dado que la erosión de una cuenca se encuentra relacionada con el grado de la pendiente, donde, a mayor pendiente de la cuenca, menor será el tiempo que tardará el caudal de escorrentía en drenar hasta la salida de la cuenca. La pendiente media de la cuenca se obtuvo a través del SIG.

3.2.5.10 Perfil longitudinal

El perfil longitudinal se obtuvo a través del SIG, utilizando como insumo principal MDE derivado cartografía 1: 20,000 de INEGI.

3.2.5.11 Orden de corriente

El orden de las corrientes es un indicador de la ramificación de la red hidrológica, tomando como base los órdenes de cauces que convergen al cauce principal (Campos-Aranda, 1998).

De acuerdo a la metodología propuesta por Strahler (1952), se determina de primer orden aquellas corrientes a las que no confluyen ninguna corriente secundaria, de segundo orden es donde desembocan dos corrientes de primer orden. Se clasifica corriente de tercer orden aquella en la que desembocan corrientes de segundo orden y así sucesivamente, donde dos corrientes de orden n se juntan en la siguiente corriente de orden $n+1$.

3.2.6 Hidrometría

Se realizó una revisión del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), compilado por CONAGUA (2016). El BANDAS, integra la red hidrométrica nacional, donde se registra el nivel de agua y caudal (aforo) en los principales ríos de la República Mexicana. Con del SIG, se examinó la localización de las estaciones hidrométricas, contenidas en la capa vectorial¹⁷ puesta a disposición por el IMTA.

Para obtener un referente sobre la calidad de los datos contenidos en el BANDAS, se revisó el estudio realizado por la Oficina de las Naciones Unidas de Servicios para Proyectos (UNOPS, por sus siglas en inglés) en la cuenca del río Verde, y el análisis de la hidrometría en la cuenca del río Santiago realizado por Rizo-Decelis (2017) .

3.2.7 Modelado hidrológico¹⁸

Los impactos que tienen los cambios del uso del suelo sobre el comportamiento de las descargas hidrológicas han sido estudiados desde de la década de 1960 (Carter, 1961; James, 1965; Leopold, 1968; Viessman, 1966). Los modelos paramétricos desarrollados por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS, del inglés *National Resources Conservation Service*), antes llamado Servicio de Conservación de Suelos (SCS, del inglés *Soil Conservation Service*), y por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (E.E.U.U.) son representativos de algunas de las herramientas más comúnmente aplicadas para estimar el cambio en el comportamiento de descarga a medida que una cuenca hidrográfica experimenta una urbanización (Moglen & Beighley, 2002). Los avances en

¹⁷ Disponible para su descarga en <http://hidrosuperf.imta.mx/bandas/>

¹⁸ La mayor parte de la descripción de este apartado proviene del USDA (1986) a menos que se indique lo contrario.

ciencias de la computación, la automatización, la creciente presencia de los SIG y la disponibilidad de información geoespacial de alta resolución han permitido la evolución hacia modelos espacialmente distribuidos.

La comprensión de todos los procesos en la cuenca es esencial para cualquier trabajo hidrológico (Rakotoarisoa, Fleurant, Randriamaherisoa, & Razakamanana, 2014). Asimismo, los modelos hidrológicos para determinar la escorrentía y el pico de descarga idealmente deberían estar basados en los registros de flujo estacionario a largo plazo para el área de estudio. Sin embargo, en México, tales registros rara vez están disponibles, particularmente para pequeñas áreas de drenaje. Incluso cuando están disponibles, el análisis estadístico, generalmente es impreciso debido a los cambios de cobertura y uso del suelo. Por esta razón, es común que para determinar los caudales máximos se utilicen modelos hidrológicos basados en características físicas medibles (por ejemplo, precipitación, superficie, pendiente media, cobertura y uso del suelo) de cuencas únicamente. A través de la comprensión de estas características, y la experiencia en el uso de estos modelos, es posible realizar juicios acertados sobre cómo modificar los parámetros del modelo para reflejar las condiciones cambiantes de la cuenca (Costanza et al., 1997).

Se eligió el TR-20 (del inglés *Technical Release No. 20*) debido a que presenta procedimientos simplificados para calcular el volumen de escorrentía en tormentas, la velocidad máxima de descarga, los hidrogramas y los volúmenes de almacenamiento requeridos para los depósitos de agua de inundación. Estos procedimientos son aplicables en cuencas hidrográficas pequeñas, especialmente para cuencas hidrográficas urbanas. Fue publicado por primera en 1982 (SCS, 1982). El TR-20 es particularmente útil en la evaluación hidrológica de eventos de inundación. Se puede usar para analizar las condiciones actuales de la cuenca hidrográfica y para evaluar el impacto de los cambios propuestos en la cuenca. El TR-20 proporciona una serie de técnicas que son útiles para modelar cuencas hidrográficas pequeñas; utiliza la ecuación de escorrentía del SCS (Ecuación 16) para predecir la tasa máxima de escorrentía, así como el volumen total (Aquaveo, 2016).

3.2.7.1 Precipitación

El modelo descrito en TR-20 comienza con cierta cantidad de lluvia uniformemente distribuida en la cuenca hidrográfica durante un periodo de tiempo específico. La lluvia se

convierte en escorrentía utilizando un número de curva de escorrentía (CN). El CN está basado en los tipos de suelos, la cobertura vegetal, la cantidad de áreas menos permeables, la interceptación y el almacenamiento en la superficie. Posteriormente, la escorrentía se transforma a un hidrograma utilizando la teoría del hidrograma unitario y los procedimientos de enrutamiento que dependen del tiempo de viaje de agua a través de los segmentos de la cuenca.

Los caudales máximos en cuencas hidrográficas pequeñas, por lo general, son resultado de precipitaciones intensas y breves, que pueden ocurrir como eventos distintos o como parte de una tormenta de mayor duración (USDA, 1986). Usualmente, estas tormentas, se distribuyen sobre un área pequeña y las intensidades tienen mucha variación. Una práctica común en el análisis de precipitación-escorrentía, es desarrollar una distribución sintética de lluvia para usar en lugar de eventos de tormentas reales. Esta distribución incluye las intensidades de lluvia máximas para la frecuencia de diseño seleccionada dispuestas secuencialmente de tal manera que es crítica para producir un máximo de escorrentía. El TR-20 permite modelar eventos de tormenta naturales o sintéticos. Adicionalmente, éste incluye cuatro distribuciones regionales de tiempo de lluvia, las cuales son distribuciones por un período de 24 horas¹⁹. La tormenta de 24 horas, si bien es más larga que la necesaria para determinar los picos de estas cuencas pequeñas es apropiada para determinar los volúmenes de escorrentía. Por lo tanto, una sola duración de la tormenta y la distribución de la precipitación sintética asociada pueden usarse para representar tanto los caudales máximos como los volúmenes de escorrentía para cierto rango de tamaños de área de drenaje.

Además de que la intensidad de una lluvia varía considerablemente durante una tormenta, también varía por región geográfica. Para representar varias regiones de los Estados Unidos, el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (por sus siglas en inglés NRCS) desarrolló cuatro distribuciones sintéticas de lluvia las 24 horas (I, IA, II y III) a partir de datos de frecuencia de duración del Servicio Meteorológico Nacional (por sus siglas en

¹⁹ Este período fue elegido debido a la disponibilidad general de los datos de lluvia diaria que fueron utilizados para estimar las cantidades de lluvia de 24 horas.

inglés NWS) o datos de tormentas locales. El Tipo IA es el menos intenso y el Tipo II es la lluvia de corta duración más intensa. Las cuatro distribuciones se muestran en la Figura 5.

Los Tipos I y IA representan el clima marítimo del Pacífico con inviernos húmedos y veranos secos. Tipo III representa la zona el Golfo de México y las áreas costeras del Atlántico donde las tormentas tropicales traen grandes cantidades de lluvia las 24 horas. El Tipo II representa el resto del país. Para el caso de Guadalajara, la distribución de precipitación que se asemeja a los eventos de lluvia es el tipo II.

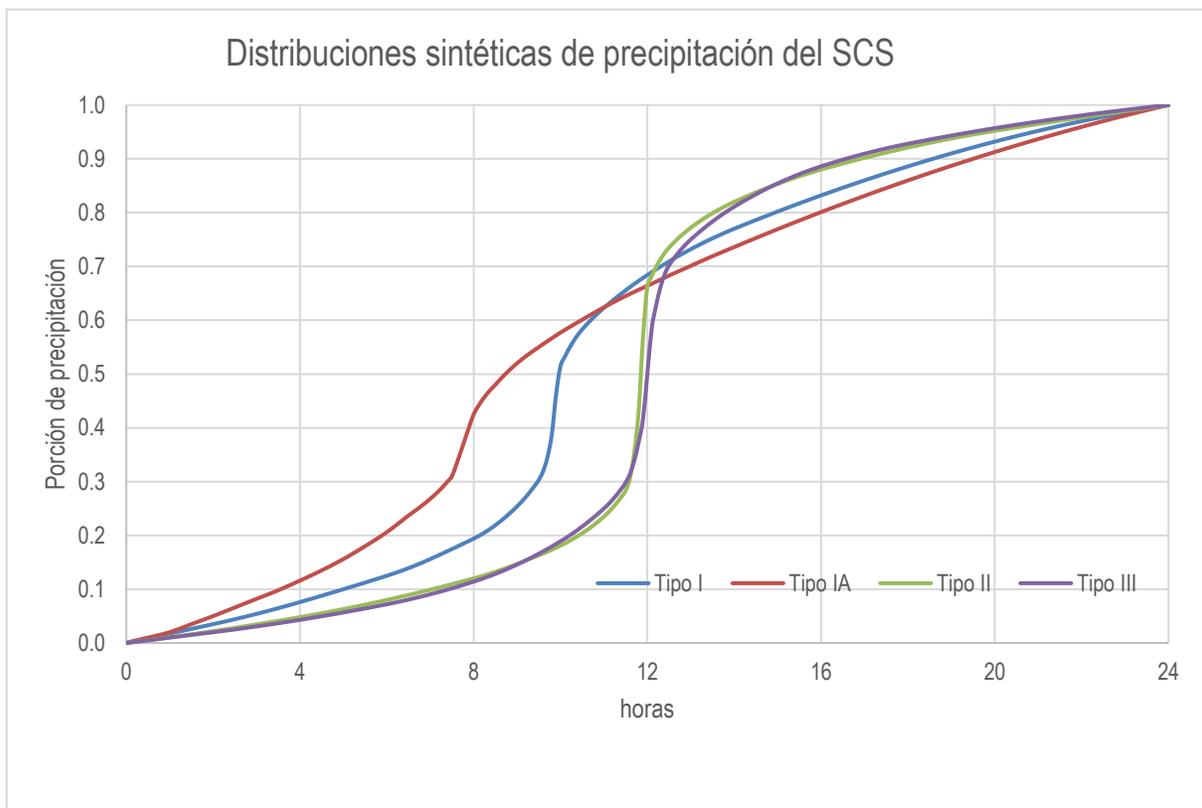


Figura 5. Distribuciones de lluvia en 24 horas, las abscisas representan las horas del día y las ordenadas la porción de precipitación total. Fuente: Elaboración propia con datos del USDA (1986)

3.2.7.2 Estimación de la escorrentía

La ecuación del método de número de curva de escorrentía del SCS es:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

Q = escorrentía (in)

P = lluvia (in)

S = retención máxima potencial después de la escorrentía comienza (in) y

I_a = abstracción inicial (in)

La abstracción inicial (I_a) comprende todas las pérdidas antes de que comience la escorrentía. Incluye el agua retenida en las depresiones superficiales, el agua interceptada por la vegetación, la evaporación y la infiltración. La abstracción, aunque es muy variable, generalmente está correlacionada con los parámetros de suelo y cobertura. A través de estudios de numerosas pequeñas cuencas hidrográficas agrícolas, se encontró que I_a era aproximada por la siguiente ecuación empírica (USDA, 1986):

$$I_a = 0.2S \quad \text{Ecuación 17}$$

Al eliminar I_a como un parámetro independiente, esta aproximación permite el uso de una combinación de S y P para producir una cantidad de escorrentía que resulta:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad \text{Ecuación 18}$$

La variable S se relaciona con el suelo y con las condiciones de cobertura de la cuenca a través del CN. El CN tiene un rango de 0 a 100, y S está relacionado con CN por la siguiente ecuación:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

Ecuación 19

La Figura 5 y Cuadro 6 resuelven la Ecuación 18 y la Ecuación 19 para un rango de CN y precipitación.

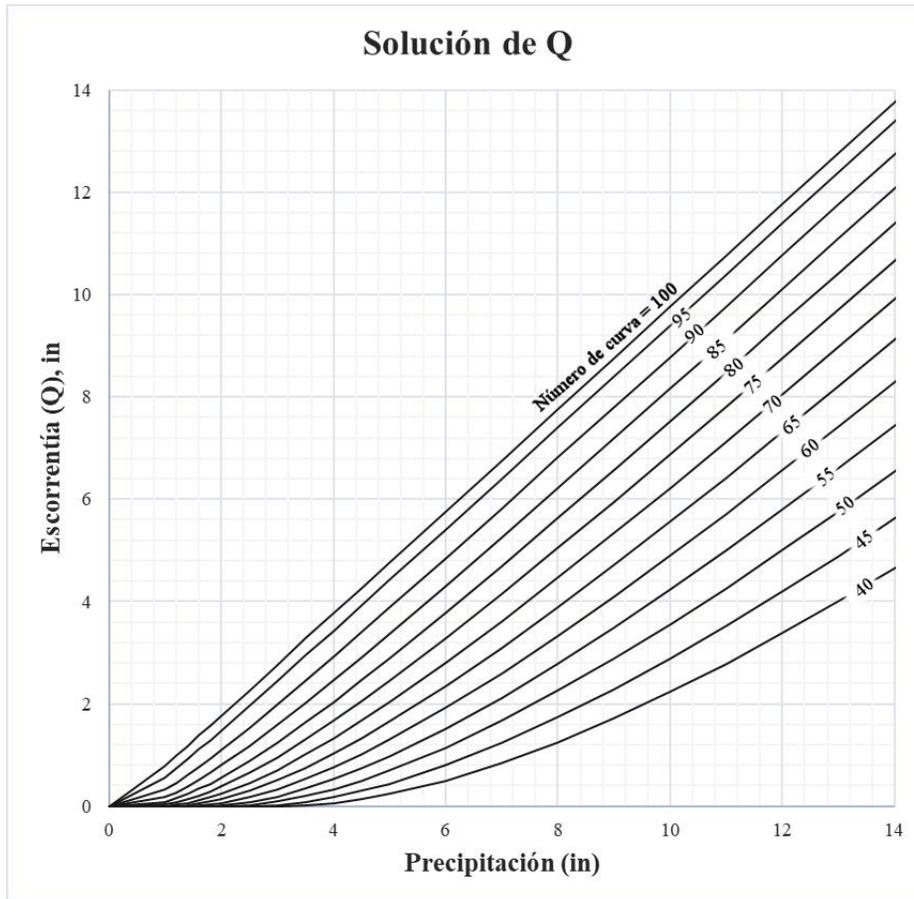


Figura 6. Solución para la ecuación de escorrentía. Fuente: Modificado de USDA (1986).

Cuadro 6. Escorrentía para un CN determinado. Fuente: Modificado de USDA (1986).

P(in)	CN=40	CN=45	CN =50	CN=55	CN=60	CN=65	CN=70	CN=75	CN=80	CN=85	CN=90	CN=95	CN=100
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0.08	0.17	0.32	0.56	0.79
1.2	0	0	0	0	0	0	0.03	0.07	0.15	0.27	0.46	0.74	0.99
1.4	0	0	0	0	0	0.02	0.06	0.13	0.24	0.39	0.61	0.92	1.18
1.6	0	0	0	0	0.01	0.05	0.11	0.2	0.34	0.52	0.76	1.11	1.38
1.8	0	0	0	0	0.03	0.09	0.17	0.29	0.44	0.65	0.93	1.29	1.58
2	0	0	0	0.02	0.06	0.14	0.24	0.38	0.56	0.8	1.09	1.48	1.77
2.5	0	0	0.02	0.08	0.17	0.3	0.46	0.65	0.89	1.18	1.53	1.96	2.27
3	0	0.02	0.09	0.19	0.33	0.51	0.71	0.96	1.25	1.59	1.98	2.45	2.77
3.5	0.02	0.08	0.2	0.35	0.53	0.75	1.01	1.3	1.64	2.02	2.45	2.94	3.27
4	0.06	0.18	0.33	0.53	0.76	1.03	1.33	1.67	2.04	2.46	2.92	3.43	3.77
4.5	0.14	0.3	0.5	0.74	1.02	1.33	1.67	2.05	2.46	2.91	3.4	3.92	4.26
5	0.24	0.44	0.69	0.98	1.3	1.65	2.04	2.45	2.89	3.37	3.88	4.42	4.76
6	0.5	0.8	1.14	1.52	1.92	2.35	2.81	3.28	3.78	4.3	4.85	5.41	5.76
7	0.84	1.24	1.68	2.12	2.6	3.1	3.62	4.15	4.69	5.25	5.82	6.41	6.76
8	1.25	1.74	2.25	2.78	3.33	3.89	4.46	5.04	5.63	6.21	6.81	7.4	7.76
9	1.71	2.29	2.88	3.49	4.1	4.72	5.33	5.95	6.57	7.18	7.79	8.4	8.76
10	2.23	2.89	3.56	4.23	4.9	5.56	6.22	6.88	7.52	8.16	8.78	9.4	9.76
11	2.78	3.52	4.26	5	5.72	6.43	7.13	7.81	8.48	9.13	9.77	10.39	10.76
12	3.38	4.19	5	5.79	6.56	7.32	8.05	8.76	9.45	10.11	10.76	11.39	11.76
13	4	4.89	5.76	6.61	7.42	8.21	8.98	9.71	10.42	11.1	11.76	12.39	12.76
14	4.65	5.62	6.55	7.44	8.3	9.12	9.91	10.67	11.39	12.08	12.75	13.39	13.76
15	5.33	6.36	7.35	8.29	9.19	10.04	10.85	11.63	12.37	13.07	13.74	14.39	14.76

Los principales factores que determinan el CN son: el grupo hidrológico del suelo (por sus siglas en inglés, HSG), el tipo de cobertura, el tratamiento, la condición hidrológica y la condición de escorrentía antecedente (siglas en inglés ARC). Otro factor considerado es si las áreas menor permeabilidad se conectan directamente al sistema de drenaje o si el flujo se extiende sobre áreas permeables antes de ingresar al sistema de drenaje.

Las tasas de infiltración de los suelos varían considerablemente y se ven afectadas por la permeabilidad subsuperficial. El NRCS clasifica los suelos en cuatro grupos (A, B, C y D) de acuerdo con su tasa de infiltración mínima, obtenida para el suelo desnudo después

de una humectación prolongada. Los cuatro grupos de suelo están definidos de la siguiente manera:

Grupo A tienen un bajo potencial de escorrentía y altas tasas de infiltración incluso cuando están saturados. Se componen principalmente de arena profunda, bien a excesivamente drenada o grava y tienen una alta tasa de transmisión de agua (más de 0.30 in / h).

Grupo B tienen tasas de infiltración moderadas cuando están completamente mojados y consisten principalmente en suelos que van de moderadamente profundos a profundos, de moderadamente bien a bien drenados con texturas que van de finas a moderadamente gruesas. Estos suelos tienen una tasa moderada de transmisión de agua (0.15-0.30 in / h).

Grupo C tienen bajas tasas de infiltración cuando están saturados y consisten principalmente en suelos con una capa que impide el movimiento descendente del agua, los suelos van de una textura moderadamente fina a fina. Los suelos del Grupo C tienen una tasa baja de transmisión de agua (0.05-0.15 in / h).

Grupo D tienen un alto potencial de escorrentía, una tasa de infiltración muy baja cuando están saturados y consisten principalmente en suelos arcillosos con un alto potencial de expansión, son suelos con una capa de arcilla o arcilla en la superficie o cerca de ella y suelos poco profundos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen una tasa muy baja de transmisión de agua (0-0.05 in / h).

El Cuadro 7 presenta el grupo hidrológico del suelo según la textura y tasa de infiltración del suelo.

Cuadro 7. Rango de tasa de infiltración por grupo hidrológico del suelo. Elaboración propia con base en USDA (1986).

HSG	Texturas del suelo	Tasa de infiltración (in/h)	Tasa de infiltración (mm/h)
A	Arena, arena arcillosa o franco arenosa	> 30	7.62
B	Franco limoso o limo	0.15 - 0.30	3.81 - 7.62
C	Franco arcillo arenosos	0.05 - 0.15	1.27 - 3.81
D	Franco arcilloso, franco arcillo-limoso, arcilla arenosa, arcilla limosa o arcilla.	< 0.05	< 1.27

El Cuadro 8 aborda la mayoría de los tipos de cobertura, como la vegetación, el suelo desnudo y las superficies con menor permeabilidad. El tratamiento es un modificador de tipo de cobertura para describir el manejo de tierras agrícolas cultivadas. Incluye prácticas mecánicas, tales como nivelación y terrazas, y las prácticas de gestión, por ejemplo, la rotación de cultivos y la labranza reducida o nula. La condición hidrológica²⁰ indica los efectos del tipo de cobertura y el tratamiento sobre la infiltración y la escorrentía. Una buena condición hidrológica indica que el suelo generalmente tiene un bajo potencial de escorrentía para ese grupo específico hidrológico del suelo, tipo de cobertura y tratamiento.

Cuadro 8. CN para áreas urbanas. Fuente: Modificado de Chow, Maidment, & Mays (1988)

Descripción del uso del suelo	Grupo hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Estacionamientos pavimentados, techos, etc.	98	98	98	98
Calles y caminos				
Pavimentado con bordillos y alcantarillas pluviales.	98	98	98	98
Grava	76	85	89	91
Terracería	72	82	87	89
Tierras agrícolas				
Sin tratamiento de conservación (sin terrazas).	72	81	88	91
Con tratamiento de conservación (terrazas).	62	71	78	81
Tierra para pastoreo				
Pobre (<50% de cobertura o pastoreo excesivo)	68	79	86	89
Buena (50-75% de cobertura; pastoreo poco intenso)	39	61	74	80
Pastizal (hierba, sin pastoreo, segada)	30	58	71	78
Matorral (buena, >75% de cobertura)	30	48	65	73
Forestal / Bosques				
Pobre (árboles pequeños / arbustos destruidos por exceso de pastoreo o incendios)	45	66	77	83
Aceptable (pastoreo, no incendio, algo de cobertura arbustiva)	36	60	73	79
Bueno (sin pastoreo; arbustos cubren suelo)	30	55	70	77
Espacios abiertos (césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.):				
Aceptable (pasto cubre 50-75% del área)	49	69	79	84
Bueno (cobertura de pasto > 75% del área)	39	61	74	80

²⁰ Por general se estima a partir de la densidad de la planta y la cobertura de residuos en las áreas de muestra.

Comercial (85% impermeable)	89	92	94	95
Industrial (72% impermeable)	81	88	91	93
Residencial:				
Lote de 1/8 de acre, aprox. 65% impermeable	77	85	90	92
Lote de 1/4 de acre, aprox. 38% impermeable	61	75	83	87
Lote de 1/2 de acre, aprox. 25% impermeable	54	70	80	85
Lote de 1 acre, aprox. 20% impermeable	51	68	79	84

3.2.7.3 Limitaciones de la ecuación de escorrentía del SCS

Los números de curva describen condiciones promedio, que son útiles para propósitos de diseño. Sin embargo, la ecuación de número de la curva de escorrentía debe utilizarse con cautela cuando se pretenda recrear características específicas de una tormenta real debido a que la ecuación no contiene una expresión de tiempo y, por lo tanto, no tiene en cuenta la duración o la intensidad de la lluvia.

La abstracción inicial (I_a), que consiste en interceptación, infiltración inicial, almacenamiento de depresión superficial, evapotranspiración y otros factores, se generaliza como $0.2S$ con base en datos de cuencas hidrográficas agrícolas (S , es la retención máxima potencial después de que comience la escorrentía). Esta aproximación puede ser especialmente importante en una aplicación urbana porque la combinación de áreas impermeables con áreas permeables puede implicar una pérdida inicial significativa que no sucede. Por otro lado, el efecto opuesto, una mayor pérdida inicial, puede ocurrir si las áreas impermeables tienen depresiones superficiales que almacenan cierta escorrentía. Para usar un relación que no sea $I_a = 0.2S$, se debe volver a desarrollar la Ecuación 18, Figura 6 y Cuadro 6 utilizando los datos originales de precipitación-escorrentía para establecer nuevas relaciones S o CN para cada cubierta y grupo hidrológico del suelo

Para escorrentías menores a 0.5 pulgadas, la precisión del CN disminuye. Los procedimientos de escorrentía SCS se aplican solo a la escorrentía superficial directa: es necesario tomar en cuenta las grandes fuentes de flujo subsuperficial o niveles altos de agua subterránea que contribuyen a la escorrentía.

Se recomienda utilizar otro procedimiento para determinar la escorrentía cuando el CN ponderado sea menor a 30.

3.2.7.4 Tiempo de concentración y tiempo de viaje

El tiempo de viaje (T_T) es el tiempo que tarda el agua en viajar de un lugar a otro dentro de una cuenca hidrográfica. Es un componente del tiempo de concentración (T_c), que denota el tiempo transcurrido para que la escorrentía viaje desde el punto hidráulicamente más distante de la cuenca hasta un punto de interés aguas abajo. El T_c equivale a la sumatoria de todos los tiempos de viaje para componentes consecutivos del sistema de drenaje.

El T_c influye en la forma y el pico del hidrograma de escorrentía. La urbanización usualmente disminuye el T_c , aumentando así el pico de descarga. Los siguientes apartados describen los principales factores que afectan el tiempo de concentración y el tiempo de viaje.

Uno de los efectos más significativos del desarrollo urbano en la velocidad del flujo es una menor resistencia al flujo. Por ejemplo, las áreas no desarrolladas con un flujo superficial muy lento y poco profundo debido a la vegetación se modifican por el desarrollo urbano: el caudal circula por las calles, canales y alcantarillas pluviales que transportan la escorrentía río abajo más rápidamente. El tiempo de viaje a través de la cuenca hidrográfica generalmente se reduce.

En cuencas pequeñas no urbanas, gran parte del tiempo de viaje resulta del flujo superficial en los sectores localizados aguas arriba. Por lo general, la urbanización reduce la longitud del flujo terrestre al transportar la escorrentía de aguas pluviales a un canal lo antes posible. Como los diseños de canal tienen características hidráulicas eficientes, la velocidad del flujo de escorrentía aumenta y por tanto el tiempo de viaje disminuye.

Las pendientes pueden aumentar o disminuir dependiendo de varios factores como lo son el tipo de urbanización, el diseño de las alcantarillas pluviales y las acequias se utilizadas el diseño del sistema de gestión del agua. Pero generalmente, la pendiente tenderá a aumentar cuando los canales se rectifican y disminuyan cuando el flujo terrestre se dirija a través de alcantarillas pluviales, canales de desagüe y diversiones.

3.2.7.5 Cálculo del tiempo de viaje y el tiempo de concentración

El agua circula a través de una cuenca de tres maneras: como una hoja de agua²¹, un flujo concentrado poco profundo, un flujo de canal abierto o alguna combinación de estos. El tipo está en función del sistema de transporte.

El tiempo de viaje (T_T) es la relación entre la longitud del flujo y la velocidad del flujo:

$$T_T = \frac{L}{3600V} \quad \text{Ecuación 20}$$

Dónde:

T_T = tiempo de viaje (h)

L = longitud del tramo (ft)

V = velocidad promedio (ft / s)

3600 = factor de conversión de segundos a horas.

El tiempo de concentración (T_c) es la suma de los valores de T_t para los diversos segmentos de flujo consecutivos:

$$T_c = T_{t_1} + T_{t_2} + \dots T_{t_m} \quad \text{Ecuación 21}$$

Dónde:

T_c = tiempo de concentración (h)

m = número de segmentos de flujo

3.2.7.6 Cálculo del caudal máximo e hidrograma

El TR-20 utiliza el método del hidrograma unitario adimensional (HUA), desarrollado por el SCS, este método se construyó con base en la teoría del hidrograma unitario (Sherman, 1932). El HUA es muy útil para construir un hidrograma unitario sintético aplicable para una amplia variedad de cuencas hidrográficas, y se puede transformar en un hidrograma de descarga

²¹ Del inglés *sheet flow*, es el flujo de escorrentía pluvial que fluye en una capa o lamina delgada sobre la superficie del suelo.

versus tiempo, dado el área de drenaje, el tiempo de concentración y el factor de tasa máxima²². La duración asociada con el HUA se calcula mediante la fórmula proporcionada en el manual de ingeniería nacional de hidrología (NRCS, 2007), y es aproximadamente cinco veces el tiempo a el caudal máximo (T_p). El HUA consiste en el 37.5% del volumen de escorrentía total antes del pico de descarga y el volumen restante después de que ocurre la descarga pico. El caudal máximo se define de la siguiente manera:

$$q_p = \frac{484AQ}{T_p} \quad \text{Ecuación 22}$$

Dónde:

q_p = descarga máxima (pies cúbicos sobre segundo)

T_p = tiempo a el caudal máximo (horas)

484 = factor de tasa máxima (constante empírica)

A = área de drenaje (millas cuadradas)

Q = escorrentía (in)

Estudios empíricos indican que T_p equivale a $2/3 T_c$, sustituyendo T_p por T_c en la Ecuación 22, resulta la siguiente ecuación.

$$q_p = \frac{726AQ}{T_c} \quad \text{Ecuación 23}$$

Los datos de entrada necesarios para desarrollar un hidrograma incluyen (1) precipitación de 24 horas (in), (2) distribución de lluvia apropiada (puede ser sintética: Tipo I, Tipo IA, Tipo II o Tipo III), (3) CN, (4) T_c (horas) y (5) área de drenaje (mi^2).

²² Del inglés peak rate factor.

3.2.7.7 Limitaciones del hidrograma unitario

El procedimiento del hidrograma unitario supone que la descarga en cualquier momento es proporcional al volumen de escorrentía y que los factores de tiempo que afectan la forma del hidrograma son constantes. Los datos de campo y las pruebas de laboratorio han demostrado que el supuesto de una relación lineal entre los componentes de la cuenca hidrográfica no es estrictamente cierto. Las relaciones no lineales no se han investigado lo suficiente como para determinar sus efectos en un hidrograma sintético (NRCS, 2007).

El hidrograma unitario es útil para obtener los caudales máximos y los hidrogramas dentro de una cuenca hidrográfica. Sin embargo, su precisión disminuye a medida que la complejidad de la cuenca aumenta. Para comparar las condiciones actuales y las desarrolladas de una cuenca hidrográfica, use el mismo procedimiento para estimar T_c para ambas condiciones.

3.2.8 Aplicación del TR-20

3.2.8.1 Interfase WMS

Para el análisis hidrológico, se eligió el software *Watershed Modeling System*, abreviado WMS, desarrollado por el Laboratorio de Investigación de Modelización Ambiental (en inglés *Environmental Modeling Research Laboratory*) de la Universidad Brigham Young en cooperación con el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU. Actualmente es desarrollado por la empresa Aquaveo LLC.

El WMS ofrece herramientas dentro de un entorno de SIG para realizar la delineación automática de cuencas y determinar propiedades morfométricas importantes de la cuenca, tales como el área, la pendiente y las distancias de los cauces, entre otros. También sirve como una interfaz gráfica para varios modelos hidráulicos e hidrológicos, incluido el TR-20. Por tanto, permite que, de una manera simple, se establezcan los parámetros del modelo a través de una interfaz gráfica de usuario para su ejecución y, posteriormente, la visualización los resultados (Aquaveo, 2016).

3.2.8.2 Obtención del número de curva correspondientes a la cobertura y uso de suelo en la microcuenca “El Guayabo”

3.2.8.2.1 Generación de escenarios

Se plantearon cuatro escenarios para simular y evaluar la respuesta hidrológica de la microcuenca ante los cambios de cobertura y uso de suelo: (1) El escenario en 1993; (2) El escenario en 1999; (3) El escenario en 2011, y; (4) La zonificación primaria vigente de la ZMG, homologada por el Instituto Metropolitano de planeación del Área Metropolitana de Guadalajara (IMEPLAN), que sirvió de insumo para el Plan de Ordenamiento Territorial Metropolitano del Área Metropolitana de Guadalajara (POTMet) -Descrito posteriormente en las sección 4.4.3-. A continuación, se describen los pasos seguidos para la obtención de las capas vectoriales que serán insumos en el modelado hidrológico:

Primeramente, se obtuvo la capa vectorial de zonificación primaria de la ZMG a través del SIGMetro (IMEPLAN, 2017b), en el SIG se realizó un recorte de dicha capa utilizando como geometría de salida una capa correspondiente a un búfer de dos kilómetros de la microcuenca. Posteriormente, se procedió a la corrección topológica de la capa resultante del recorte debido a que se identificaron muchos errores como superposición entre los límites de polígonos adyacentes; vértices erróneos, falsos polígonos²³ y espacios entre entidades geométricas. Dichos errores impiden que el conjunto de datos tenga una estructura continua y, sería probable que se generaran errores posteriores en el modelado hidrológico.

Una vez generada la capa topológicamente correcta, ésta se utilizó para generar los demás escenarios. Los escenarios se generaron en el orden de la fecha más reciente a la más antigua, utilizándose la capa más anterior como insumo de la siguiente, es decir, una vez generada la capa del 2011, ésta se utilizó para generar la capa de 1999 y esta última para generar la capa de 1993. Para la realización de cada escenario, se utilizó ortofotografía aérea correspondientes a cada año. El Cuadro 9 muestra las características de las ortofotografías utilizadas.

²³ Polígonos no deseados, resultantes de operaciones de geoproceto, como la intersección, donde los bordes de los datos de entrada no tienen coincidencia topológica.

Cuadro 9. Características de la ortofotografía utilizada. Fuente: Elaboración propia.

Escenario	Ortofoto (s)	Escala / tamaño de pixel	Fuente
1993	F13D65e, F13D65f	1:20,000	INEGI
1999	F13D65e, F13D65f	1:20,000	INEGI
2011	Área Metropolitana de Guadalajara 2011	15 cm	IIEG (2011)

Para llevar un control de calidad se elaboró una malla de 3X3 cuadrantes y se digitalizó un cuadrante a la vez (Figura 7).

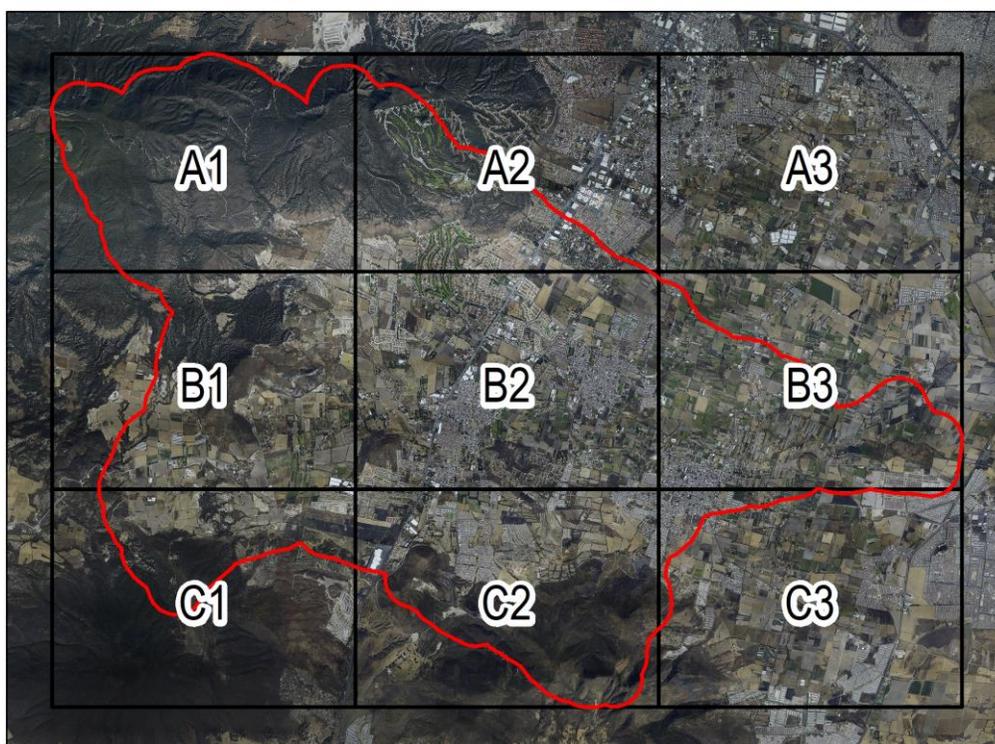


Figura 7. Cuadrantes auxiliares en el control de calidad sobrepuestos sobre la ortofoto correspondiente al año 2011 y búfer de 500 metros de la microcuenca. Fuente: Elaboración propia con datos del IIEG (2011).

3.2.8.2.2 Limitaciones en la generación de los escenarios

La conversión entre algunos usos podría no suponer un cambio en la respuesta hidrológica en la realidad, por ejemplo, existen zonas habitacionales ubicadas en vialidades principales, esquinas, etc., que cambian a uso comercial pero no hay modificación en su aspecto físico.

Se utilizó indistintamente el uso agropecuario, sin importar el tipo (temporal, riego, etc.). Aunque las zonas establecidas “Granjas y huertos” en la capa vectorial de uso general permanecieron en los escenarios anteriores, debido a que no es posible determinar con certeza en la ortofoto el uso del suelo, todos los usos con ocupación agrícola (p.ej., agrícola, granjas, etc.) se consideraron con el uso “Agropecuario”, para sobreponer esta limitación se utilizarán los mismos números de curva para dichos usos.

3.2.8.3 Asignación del grupo hidrológico del suelo en el área de estudio

La asignación de grupos hidrológicos de los suelos presentes en la microcuenca consistió en dos métodos: (1) asignación a partir de mediciones de la tasa de infiltración en campo, y; (2) con base en el tipo de suelo, subunidad de suelo y clase textural.

El muestreo se hizo en un predio de 6.7 hectáreas en el Bosque La Primavera (Jiménez-González et al., 2018), donde se midió la tasa de infiltración en medio saturado con un infiltrómetro marca “Turf Tec Infiltrometer” de doble anillo. El resumen del muestreo se presentan en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Resumen del muestreo de tasa de infiltración. Fuente: Jiménez-González et al. (2018)

Número de muestras	23
Mínimo (mm/h)	44
Máximo (mm/h)	408.73
media (mm/h)	148.0
Desviación estándar	77.5
Coefficiente de variación	52%

De acuerdo con la cartografía edafológica, escala 1:50,000 (CETENAL, 1975a), todos los muestreos del Cuadro 10 corresponden al tipo de suelo Regosol eútrico con textura gruesa. Debido a la alta tasa de infiltración presente, se asignó a este tipo de suelo y con esa clase textural, como Grupo A. Para aquellos otros tipos de suelo diferentes al Regosol eútrico con textura gruesa, se aplicó la metodología propuesta por Hernández-Jimenez (2014) que se basa en la caracterización del tipo de suelo, sub-unidad (unidad calificadora) y clase textural para conversión. Se utilizó como insumo principal la carta vectorial edafológica escala 1:50,000 elaborada por la Comisión de Estudios del Territorio Nacional -CETENAL- (1975a) obtenida

a través de INEGI que contiene, entre otros datos, estos tres variables (INEGI, 2015). En el Cuadro 11 se muestran las posibles asignaciones de la clasificación de INEGI con las del USDA.

Cuadro 11. Posibles asignaciones con base en clase textural. Fuente: Modificado de Hernández-Jimenez (2014) basado en NRCS (2007) e INEGI (2015).

Clase textural INEGI	Grupo hidrológico del suelo según USDA	
Gruesa: menos del 18 % de Arcilla, más de 65% de arena	A	menos del 10 % de arcilla
	B	más del 90% de arena y grava
Media: menos 35% de arcilla (18% al 35%)	B	entre 10% y 20 % de arcilla
	C	entre 50% y 90% de arena
Fina: más de 35% de arcilla	C	entre 20% y 40% de arcilla
	D	menos del 50% de arena

De acuerdo con el cuadro anterior, para cada clase textural de INEGI, es posible asignar dos grupos hidrológicos de los suelos. Por tanto, se utilizó el tipo de suelo y subunidad como elementos de apoyo para la asignación. Entre las subunidades cuya presencia implica una disminución en la capacidad de infiltración, se encuentra presente únicamente en la microcuenca, aquella denominada como “eútrico” (ver sección 4.2.3.2 Subunidades de suelo presentes en la Microcuenca “El Guayabo”). Por tanto, aquellas clases texturales con la subunidad eútrico tomarían la clase de grupo hidrológico con menor permeabilidad (con excepción del caso regosol eútrico, visto anteriormente). En el caso de Feozem hálpico, se toma de manera conservadora la clase textural gruesa como grupo B, mismo grupo que se asigna a ese tipo de suelo, pero con clase textural media. En el Cuadro 12 se resumen los grupos de hidrológicos de suelo resultantes.

Cuadro 12. Asignación de los suelos grupos hidrológicos utilizados en el modelado hidrológico. Fuente: elaboración propia.

Tipo de suelo	Unidad calificadora	Textura	GSH
Regosol	eútrico	Gruesa	A
Feozem	hálpico	Gruesa	B
Feozem	hálpico	Media	B
Fluvisol	eútrico	Gruesa	B
Gleysol	mólico	Media	C

3.2.8.4 Asignación del número de curva para los usos y coberturas del suelo en la microcuenca “El Guayabo”

Otro aspecto importante que considerar para determinar el número de curva es la cobertura y uso del suelo. Con la ayuda del Cuadro 13, se determinó el número de curva basado en la capa vectorial de uso general y el grupo de hidrológico del suelo.

Cuadro 13. Tabla de decisión para asignación del CN con base en las coberturas y uso general del suelo y la el grupo hidrológico del suelo. Fuente: Elaboración propia con base en USDA (1986) y Bedient, Huber, & Vieux (2013).

Uso general	A	B	C	D
Actividades Extractivas	77	86	91	94
Actividades Silvestres	36	60	73	79
Actividades Silvestres / Espacios verdes abiertos y recreativos	49	69	79	84
Actividades Silvestres, Habitacional ²⁴	36	60	73	79
Agropecuario	59	74	83	87
Comercial y de servicios	89	92	94	95
Comercial y de servicios, instalaciones especiales e infraestructura	89	92	94	95
Equipamiento, espacios verdes abiertos y recreativos	49	69	79	84
Espacios verdes abiertos y recreativos	49	69	79	84
Espacios verdes abiertos y recreativos, Instalaciones especiales e infraestructura	49	69	79	84

²⁴ Por ejemplo: El Palomar y Santa Anita Residencial

Forestal	36	60	73	79
Granjas y huertos	59	74	83	89
Habitacional	77	85	90	92
Habitacional/ Industrial	81	88	91	93
Habitacional, Instalaciones especiales e infraestructura	81	88	91	93
Industrial	81	88	91	93
Industrial, Instalaciones especiales e infraestructura	81	88	91	93
Instalaciones especiales e infraestructura	81	88	91	93
Mixto	81	88	91	93
Servicios a la industria y al comercio	89	92	94	95
Turístico	81	88	91	93
Calles	98	98	98	98

A través del WMS, que utiliza la Ecuación 24, se calculó el número de curva ponderado para cada uno de los tres escenarios a modelar.

$$CN_{ponderado} = \frac{\sum_i^n CN_i A_i}{\sum_i^n A_i} \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde, CN_i , equivale al Número de curva correspondiente al polígono i , y A_i , equivale a la superficie del polígono i .

3.2.8.5 Determinación del tiempo de concentración

El T_c es un parámetro de gran importancia para muchos de los modelos hidrológicos modernos, utilizados por científicos y profesionistas actualmente. De acuerdo con Wong (2009), el T_c es el más utilizado de todos los parámetros relativos al tiempo. Sin embargo, al ser definido a partir de fórmulas empíricas, no existe una formula universal aceptada y por tanto se encuentran en la literatura una gran variedad de definiciones. En México, el método más común para determinar el T_c , es la fórmula de Kirpich (Breña-Puyol, 2003), que relaciona el tiempo de concentración con la longitud del cauce principal y la pendiente de la cuenca:

$$T_c = 0.0003455 \frac{L^{0.77}}{\sqrt{S}} \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde L es la longitud del cauce principal en metros, y S es la pendiente media del cauce principal. Debido a que el método fue concebido para cuencas agrícolas pequeñas en Tennessee, Estados Unidos, es cuestionable su aplicabilidad de cuencas medianas y grandes o cuencas urbanizadas en México. Otra desventaja es que el método de Kirpich produce tiempos de concentración muy conservadores o cortos que resultan en altas tasas máximas de escorrentía (Kellagher, 2002). Por lo tanto, se recomienda utilizarse, únicamente si los datos disponibles están limitados a la longitud y pendiente de la cuenca.

Se realizó una revisión de diferentes fórmulas de T_c (Breña-Puyol, 2003; de Almeida, Almeida, Gabas, & Sobrinho, 2017; Grimaldi, Petroselli, Tauro, & Porfiri, 2012; Velez Upegui & Botero Gutierrez, 2011), y se encontró que en muchas ecuaciones empíricas, no se ve reflejado el efecto de la vegetación, salvo en aquellas que hacen uso del número de curva o al coeficiente de escorrentía, ya que estos parámetros de forma indirecta, incluyen la cobertura vegetal. No incluir el efecto de la vegetación en las ecuaciones limita su confiabilidad, ya que a mayor cobertura vegetal, la respuesta hidrológica es menor, por lo que los tiempos de concentración se hacen mayores (Velez Upegui & Botero Gutierrez, 2011). Las ecuaciones del SCS incluyen de forma indirecta este efecto con la incorporación del CN. Por esta razón, se eligió para el cálculo del T_c , la ecuación del tiempo de retraso del SCS, en inglés *Lagtime*, ver Ecuación 26.

$$T_c = 0.00526L^{0.8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7} Y^{-0.5} \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde:

T_c = tiempo de concentración, expresado en horas

L = longitud del cauce principal, expresado en pies.

CN = número de curva

Y = pendiente media del cauce principal

3.2.9 Comparativa con otros métodos hidrológicos

Debido a la carencia de datos hidrométricos en la zona, no es posible la calibración del modelo. Sin embargo, se realizó una comparativa, para las variables descarga máxima (q_p) y volúmenes de escorrentía, entre el TR-20 y los resultados de los distintos métodos utilizados para el modelar hidrológicamente la microcuenca “El Guayabo” del estudio de riesgo de la cuenca de “El Ahogado” (CEA, 2011). Para que los parámetros de entrada fuesen lo más parecido posible, se usaron las mismas precipitaciones para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años utilizadas en el estudio del CEA. Asimismo, el escenario de cobertura y uso del suelo utilizado fue el correspondiente al año 2011, que es el mismo año del estudio de la CEA. El siguiente cuadro muestra las precipitaciones a los periodos de retorno mencionados, que se utilizaron para la comparación.

Cuadro 14. Precipitaciones a distintos periodos de retorno. Fuente: CEA (2011)

P5	P10	P25	P50	P100
75.09	85.50	97.41	105.82	113.69

El Cuadro 15 muestra los métodos a comparar.

Cuadro 15. Métodos por comparar. Fuente: elaboración propia.

Pai Wu
D.M. Gray
Hidrograma Unitario Triangular
Burkli-Ziegler
Mac-Math
Racional
TR-20

3.2.10 Determinación de las áreas de inundación en función del caudal

Para la determinación de las áreas de inundación del cauce principal de la microcuenca “El Guayabo”, se utilizaron los resultados del modelo hidráulico aplicado en el estudio de la CEA (2011). En dicho estudio, se realizó un levantamiento topográfico para determinar las

secciones transversales de cauce principal. Asimismo, los fondos del arroyo se determinaron con bancos de nivel. Posteriormente, se utilizó el software hidráulico HEC-RAS para la determinación de las superficies de inundación para los periodos de retorno de 5, 10, 20, 25, 50, 100, 500 y 1,000 años.

En el SIG, se asignó a cada polígono de inundación, resultado del estudio de la CEA (2011), el caudal correspondiente en m³/s. Consecutivamente, se elaboró un modelo TIN (del inglés, *Triangulated Irregular Network*) a través del método de Delaunay . Un modelo TIN tiene excelentes propiedades geométricas (Yu et al., 2015) del cual pueden generar modelos digitales de elevación. En este caso, se utilizó el TIN para generar un modelo digital, en el cual el valor z, corresponde al caudal. Posteriormente, se elaboró un programa computacional en el lenguaje de programación Python (Anexo 2) para extraer polígonos de inundación para cualquier caudal dado entre 75 y 305 m³/s.

3.2.10.1 Cálculo de la mitigación potencial de la escorrentía

Para cuantificar la mitigación potencial de la escorrentía que provee un tipo cobertura de suelo particular, de acuerdo con cierto escenario de precipitación, se utilizó la Ecuación 27, que se basa en el método propuesto por Ennaanay et al. (2011).

$$MPE_{sx} = P_{sx} - Q_{sx} \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde MPE_{sx} es la mitigación potencial de escorrentía en una parcela x , con respecto a una precipitación P , correspondiente a un periodo de retorno s . Q es la ecuación de escorrentía del SCS (Ecuación 18), pero es dependiente del umbral en función de la precipitación P_s y la abstracción inicial ($0.2S$), ver Ecuación 28.

$$\left\{ \begin{array}{ll} Q_{sx} = 0 & \text{si } P_s \leq 0.2S_x \\ Q_{sx} = \frac{(P_s - 0.2S_x)^2}{P_s + 0.8S_x} & \text{si } P_s > 0.2S_x \end{array} \right\} \quad \text{Ecuación 28}$$

La Ecuación 29, que define S , es la Ecuación 17 modificada para ser utilizada en unidades del Sistema Internacional.

$$S_x = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Ecuación 29}$$

Para medir el impacto que tendrá una zona particular en la mitigación de la escorrentía potencial, debido a un cambio en la cobertura del suelo para una precipitación correspondiente a un periodo de retorno s , se propone la siguiente ecuación:

$$\Delta MPE_{sx} = \frac{MPE_{sx} - MPE'_{sx}}{MPE_{sx}} \quad \text{Ecuación 30}$$

Donde, ΔMPE_{sx} es el cambio porcentual en la mitigación potencial de la escorrentía, entre dos escenarios, un anterior y un posterior (denotado con el símbolo de la prima) en una parcela x , con respecto a una precipitación P y a un periodo de retorno s .

3.2.11 Determinación del índice de riesgo

Se utilizó la Ecuación 3 para el analizar el impacto en función del riesgo de inundación, que tendrá el cambio en el uso general del suelo entre los escenarios del 2011 y el proyectado de acuerdo con los planes parciales. A continuación, se describen los resultados de cada componente del riesgo.

3.2.11.1 Determinación del componente de peligro

Para generar las capas espaciales correspondientes al componente del peligro. Primeramente, se generó, para los escenarios del 2011 y el Proyectado, una capa vectorial del polígono de inundación correspondiente al caudal resultante de las precipitaciones correspondientes a los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años. Posteriormente, se aplicó secuencialmente la herramienta “Actualizar” a las capas con polígonos de inundación, utilizando como entrada la capa con un mayor periodo de retorno y como capa de “actualización” la capa del siguiente periodo de retorno. Después, se creó un atributo en la capa correspondiente a la probabilidad (P) de ocurrencia al año de dicho polígono de inundación, se utilizó la siguiente ecuación para su cálculo.

$$P = \frac{1}{Tr}$$

Ecuación 31

Donde, P es la probabilidad de ocurrencia, y Tr es el periodo de retorno.

3.2.11.2 Generación del índice de vulnerabilidad

Para la determinación del índice de vulnerabilidad se utilizó la técnica matemática de análisis de componentes principales (ACP). El ACP es un método multivariado que busca las interrelaciones entre p variables numéricas definidas simultáneamente (Véliz-Capuñay, 2016), permitiendo la identificar las similitudes y las diferencias dentro de un conjunto de datos, y transformar un conjunto de datos correlacionados a uno nuevo sin correlación (Zhu, 2016), el cual, ayuda a expresar la información de los elementos, en nuevas variables llamadas *componentes principales*. En muchos casos es posible interpretar el concepto subyacente que cada componente principal contiene, debido a las correlaciones entre las variables originales, dado que el significado de las variables puede ser trasladado a los componentes (Véliz-Capuñay, 2016). El ACP ha sido exitoso en la generación de índices de vulnerabilidad (por ejemplo, Ballesteros, Jiménez, & Viavattene, 2018; Cançado et al., 2008; Gómez-Palacios, Torres, & Reinoso, 2017; Kolli et al., 2016; Rogelis, Werner, Obregón, & Wright, 2016; See & Porio, 2015).

Las variables utilizadas para elaborar el índice de vulnerabilidad, fueron escogidas con base en la literatura disponible (Grineski et al., 2012; Jung et al., 2014; Kolli et al., 2016; Krishnamurthy & Krishnamurthy, 2012; Nasiri, Mohd Yusof, & Mohammad Ali, 2016; Reiter & Weiland, 2011; See & Porio, 2015). Se utilizaron como insumos variables del Censo Nacional de Población y Vivienda del 2010 agregado a nivel AGEB. El cuadro siguiente describe las variables utilizadas, la clave para su manejo, así como su fuente.

Cuadro 16. Variables utilizadas para la determinación del índice de vulnerabilidad. Fuente: elaboración propia.

Variable	Clave	Fuente
Valor medio de la tierra	ValorMed	Derivado a partir de datos de Casas y Terrenos (2018)
Densidad de población	DEN_R	Derivada del Censo Nacional de Población y Vivienda 2010 agregada a nivel AGEB.
Porcentaje de viviendas sin agua entubada	VIV17_R	Censo Nacional de Población y Vivienda 2010 agregada a nivel AGEB.
Porcentaje de hogares con jefatura femenina	HOGAR2_R	Censo Nacional de Población y Vivienda 2010 agregada a nivel AGEB.
Porcentaje de personas sin derechohabencia a servicios de salud	SALUD2_R	Censo Nacional de Población y Vivienda 2010 agregada a nivel AGEB.
Porcentaje de personas con alguna discapacidad	DISC1_R	Censo Nacional de Población y Vivienda 2010 agregada a nivel AGEB.
Porcentaje de personas analfabetas mayores a 15 años	EDU28_R	Censo Nacional de Población y Vivienda 2010 agregada a nivel AGEB.

Antes de realizar el ACP, se realizaron los siguientes tratamientos previos a los datos: para en aquellas zonas donde no existe un AGEB urbano, pero si existe peligro de inundación, se crearon polígonos de un área similar a los AGEBs contiguos. Para el caso del escenario 2011, se consideró, en dichos polígonos, como cero todas las variables indicadoras de vulnerabilidad, con la excepción al valor medio de la tierra. Para el caso del escenario Proyectado, los polígonos se rellenaron con los promedios de las variables utilizando los AGEBS contiguos. Para obtener un estimado de la densidad f , una vez que estén consolidados de acuerdo al plan parcial, se calculó la densidad proyectada (D_p) para cada AGEB por medio de Ecuación 32 densidad (ver Ecuación 32).

$$D_p = \frac{\text{Población Total}}{\text{Área Urbanizada en 2011}}$$

Ecuación 32

Para la generación de las capas espaciales a contener las variables mencionadas en el Cuadro 16, se realizó una intersección espacial entre las capa de AGEBS urbanos modificada (con las variables del Censo Nacional de Población y Vivienda de 2010), la capa de valor medio por uso general ²⁵ del suelo y la capa correspondiente a la inundación de un caudal correspondiente a 310 m³/s. Una vez intersecadas dichas capas, a través del paquete estadístico *Statgraphics*²⁶ se realizó el análisis de componentes principales, del cual se obtuvieron los pesos de los primeros dos componentes principales, así como los eigenvalores (autovalores o valor propio) correspondientes.

Se elaboró y ejecutó un programa computacional en el lenguaje *Python*, (Anexo 3) el cual estandariza las variables (z_i) del Cuadro 16, mediante la Ecuación 33 y que posteriormente calcula el índice de vulnerabilidad (Ecuación 34) utilizando la media poblacional (\bar{x}) y la desviación estándar (σ) del escenario de 2011.

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad \text{Ecuación 33}$$

Para calcular el índice de vulnerabilidad, se utilizó la Ecuación 34.

$$InVul = \frac{AV_1 CP_1 + AV_2 CP_2}{AV_1 + AV_2} \quad \text{Ecuación 34}$$

Donde, *InVul* es el índice de vulnerabilidad, CP_i es el componente principal i , y AV_i es el eigenvalor correspondiente al componente principal i .

3.2.11.3 Determinación del riesgo

La Ecuación 3, conceptualiza el riesgo como a coincidencia espacial entre el peligro y la vulnerabilidad. En virtud de ello, se obtuvo la intersección espacial entre las capas del componente de peligro y el componente de vulnerabilidad, para cada uno de los dos

²⁵ Para que fueran comparables los escenarios 2011 y proyectado, se agregaron a cada uso general del suelo el valor medio correspondiente (ver Cuadro 42).

²⁶ Desarrollado por la empresa Statgraphics Technologies, Inc.

escenarios. Posteriormente, se llevó a cabo la multiplicación de ambos componentes. Dicha operación, al tomar en cuenta la probabilidad de ocurrencia en el peligro, aseguró que, aunque el área tenga una alta vulnerabilidad, si su probabilidad de ocurrencia es baja, el riesgo es bajo. Por el contrario, si la vulnerabilidad es baja pero la probabilidad de ocurrencia es alta, se clasifique como riesgo alto. Posteriormente, se normalizaron los resultados de dicha operación, con valores de 0 a 1, utilizando los datos de máximo y mínimo de ambos conjuntos. Para la estratificación de clases, se utilizó el método de optimización *Natural Breaks* (Jenks, 1977), obteniendo así las categorías de riesgo.

4. Caracterización del área de estudio

4.1 Características generales

La microcuenca “El Guayabo” tiene una superficie aproximada de 76 km², se localiza en la parte alta de la cuenca El Ahogado en los municipios de Tlajomulco de Zúñiga y San Pedro Tlaquepaque de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) (Ver sección 4.4.1.1), en el Estado de Jalisco, México (Ver Figura 8).

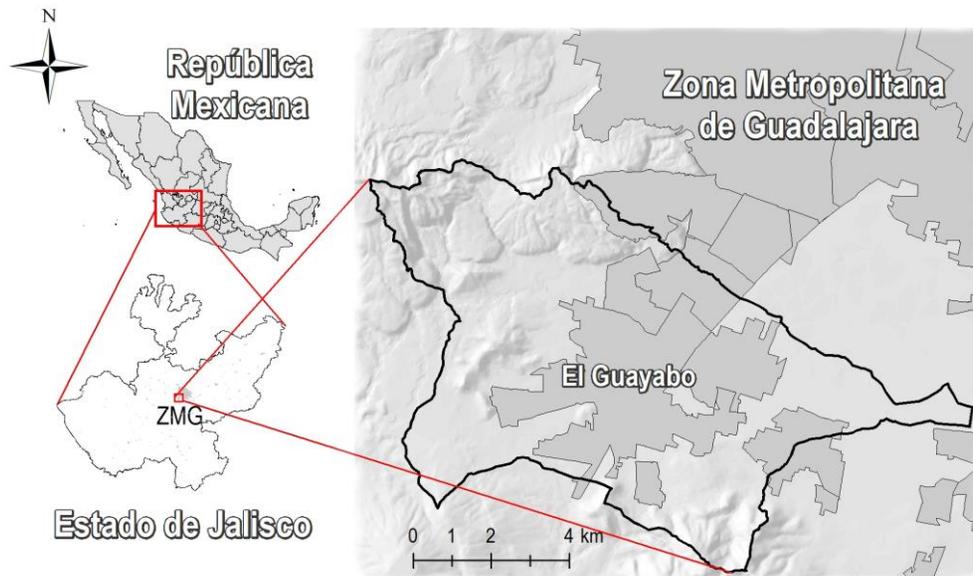


Figura 8. Ubicación general de “El Guayabo”. Fuente: elaboración propia con datos del INEGI y CEA (2011).

El Guayabo tiene un desnivel topográfico de 661 metros. La parte más alta se encuentra a 2,200 metros sobre el nivel del mar, en la zona denominada como cerro “Las Planillas” en el área natural protegida Bosque La Primavera (BLP), mientras que la parte más baja se encuentra en la presa “El Guayabo” a una altitud de 1,539 msnm, ver Figura 9. La pendiente media de la cuenca es de 4.1% (Ver sección 4.2.4.1).

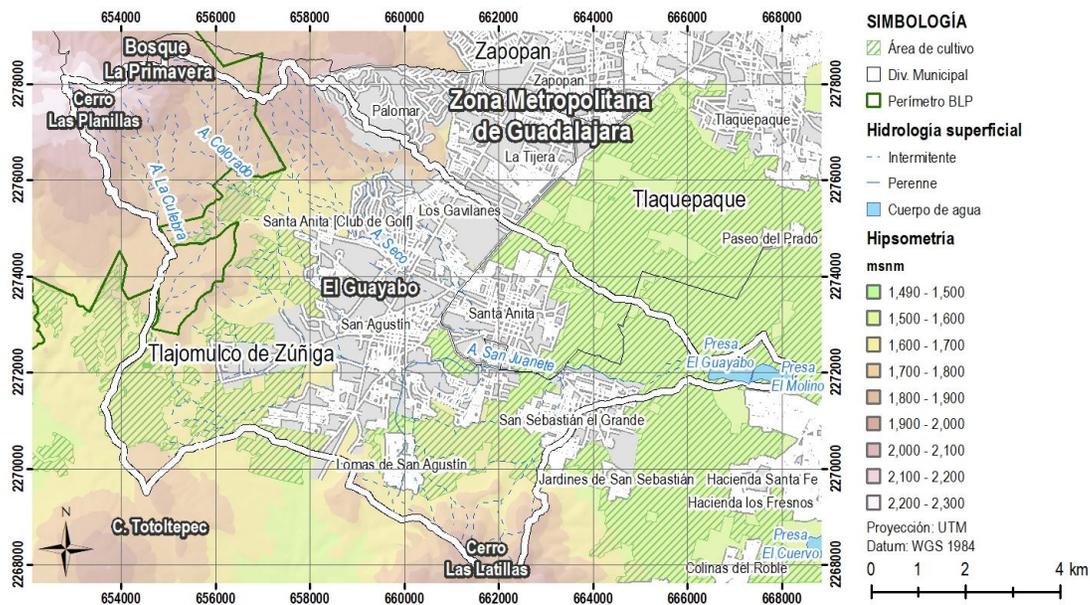


Figura 9. Mapa hipsométrico de la microcuenca “El Guayabo”. Fuente: elaboración propia con datos del INEGI y CEA (2011)

Gran parte del área de estudio se encuentra en la zona donde lo urbano y lo rural se entremezclan. Por un lado, están los crecientes desarrollos que albergan la vivienda de personas de clase media y media alta. Por el otro lado, están los terrenos de uso agrícola, producto de las actividades económicas de la región, que están expuestos a la especulación consecuente de la creciente demanda de vivienda de los habitantes de la ZMG. Esta zona rural-urbana es de alta complejidad, ya que se encuentra influenciada por diversos factores sociales, políticos y económicos. La parte alta de la microcuenca se encuentra dentro del área natural protegida del BLP, siendo el tipo de vegetación predominante bosque de encino-pino. La zona contigua del BLP, fuera del polígono protegido, se ha caracterizado por la construcción de nuevos desarrollos habitacionales, resultantes de la expansión de la ZMG, en zonas anteriormente agrícolas. A pesar de esta expansión, la actividad económica principal sigue siendo la agricultura. La parte media de la microcuenca se encuentra ocupada por la mancha urbana de la ZMG, siendo la avenida López Mateos la que divide por la mitad a la microcuenca, en esta zona se encuentran localidades, como San Agustín y Santa Anita, y fraccionamientos Los Gavilanes y Santa Anita (Club de Golf). La parte correspondiente al municipio de Tlaquepaque se encuentra completamente urbanizada, con usos

predominantemente habitacionales e industriales, mientras que la zona sur cercana al arroyo principal (Arroyo San Juanate) es predominantemente terreno agrícola.

4.2 El medio físico

4.2.1 Características climáticas

4.2.1.1 Tipo de clima

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García (1964, 2004) para la República Mexicana, el clima predominante en el área de estudio está representado por dos tipos: Semicálido subhúmedo (A)C(w1)(w)²⁷ y Templado subhúmedo C(w2)(w)²⁸. Ambos tipos con precipitaciones pluviales en verano e invierno, con valores medios anuales entre 800 y 1,000 mm. Siendo las precipitaciones invernales aproximadamente el 5% de la precipitación total anual. Debido a las características torrenciales, el 77% de las lluvias se consideran de tipo erosivo (CONANP, 2000).

4.2.1.2 Temperatura, precipitación y evapotranspiración

De acuerdo con los datos meteorológicos analizados (sección 3.2.3.1), el área de estudio tiene una precipitación media anual de 866 mm, con máximos de 222 mm durante el mes julio, una temperatura media anual de 20°C, con máximos promedio de 32.9°C en mayo, y una evapotranspiración anual potencial de 947 mm. El siguiente cuadro muestra las normales meteorológicas para la microcuenca “El Guayabo”.

²⁷ (A)C, Semicálido, (w), subhúmedo, 1, humedad media, w, de verano, (w), < 5, < 40, Med.> 18.

²⁸ C, Templado, (w)(w), subhúmedo, 2, más húmedo, w, de verano, (w), < 5, < 40, 12 y 18.

Cuadro 17. Normales meteorológicas para la microcuenca “El Guayabo”. Fuente: Elaboración propia.

Datos climáticos para el centroide de la microcuenca "El Guayabo" (1980-2010).													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Récord T _{Max} (°C)	27.2	29.5	31.8	34.2	34.8	34.1	29.3	28.7	28.7	29.1	28.6	27.2	34.8
Promedio T _{Max} (°C)	25.5	27.4	29.6	31.7	32.9	30.6	27.8	27.6	27.4	27.6	27.2	25.7	28.4
Temp. Media (°C)	15.7	17.3	19.2	21.6	23.4	23.4	21.7	21.5	21.3	20.3	18.0	16.1	20.0
Promedio T _{Min} (°C)	5.9	7.2	8.8	11.4	14.0	16.1	15.7	15.5	15.2	12.9	8.8	6.6	11.5
Récord T _{Min} (°C)	3.7	3.1	7.1	10.0	12.3	15.1	15.0	14.7	14.1	11.0	6.9	4.0	3.1
Precipitación Promedio (mm)	19.4	6.7	2.5	4.3	20.4	181.1	222.0	190.2	152.2	50.7	9.5	6.8	866.6
Precipitación promedio en 24h (mm)	6	4	1	2	7	24	25	22	22	13	5	3	11.2
Evapotranspiración Potencial (mm)	41.9	48.9	70.4	92.3	118.5	115.8	101.2	96.2	86.5	76.7	55.2	44.0	947.5

4.2.2 Geología

El área de estudio se encuentra localizada en la Sierra La Primavera (SLP), que es parte del Cinturón Volcánico Transmexicano²⁹ (CVTM), subprovincia Guadalajara. De acuerdo con Mahood (1980), la SLP es un complejo volcánico del Pleistoceno tardío, compuesto de domos y coladas de lava comendítica, estratos de ceniza (tobas), depósitos aéreos pumicíticos, y sedimentos de lagos-calderas. La unidad litológica más característica de la SLP es la denominada formación Toba Tala, consecuencia de erupciones piroclásticas que ocurrieron hace 95,000 años, cubriendo alrededor de 20 km³ de magma, en aproximadamente de 200 km², distribuidas, en su mayor parte, en la actual ZMG.

De acuerdo con el estudio JVC (2003), existen siete unidades litológicas, listadas a continuación, en orden cronológico, desde la más antigua hasta la más reciente, conforme a la recopilación hecha por Rizo-Decelis (2017):

1. *Grupo San Cristóbal*. Mioceno (11-8.5 Ma). Coladas de basalto y andesita basáltica, con intercalaciones de tobas ácidas, acumulaciones de ceniza y lapilli pumicítico.

²⁹ También llamado Eje Neovolcánico Transversal Mexicano, Eje Volcánico Transversal o Faja Neovolcánica Transmexicana

2. *Grupo Guadalajara Inferior*. Mioceno – Plioceno (7.15-5.0 Ma). Constituido por coladas, conos y brechas de composición riolítica e ignimbrítica, material piroclástico y coladas de basalto.
3. *Grupo Guadalajara Superior*. Plioceno (5.0 – 3.5 Ma). Ignimbritas, riolitas y basaltos. Incluyendo la Ignimbrita de San Gaspar y el denominado Basalto Guadalajara, con edades entre 4 y 3.5 Ma.
4. *Conos cineríticos, ignimbritas y basaltos*. Plioceno-Pleistoceno (2.5-1.4 Ma)
5. *Formación Toba Tala*. Pleistoceno. (~ 0.0095 Ma). Constituida por material piroclástico, ceniza, lapilli y fragmentos de pumicita y obsidiana.
6. *Conos riolíticos del Pleistoceno*. Pleistoceno (0.025-0.06 Ma). Formados por coladas de lava félsica.
7. Materiales geológicos del Cuaternario: aluvial, residual y lacustre, de formación reciente.

La geología del área de estudio (Figura 10), se compone principalmente de rocas volcánicas ácidas, extrusivas, y con intercalaciones de ignimbritas y acumulaciones piroclásticas. Una gran parte del parte de la microcuenca “El Guayabo” se compone de tobas aflorantes, con estratos potentes de lapilli de alta permeabilidad relativa. En los cerros Totoltepec y Las Latillas, se encuentran basaltos y andesitas respectivamente. A lo largo del cauce del arroyo principal se encuentra material aluvial del Cuaternario.

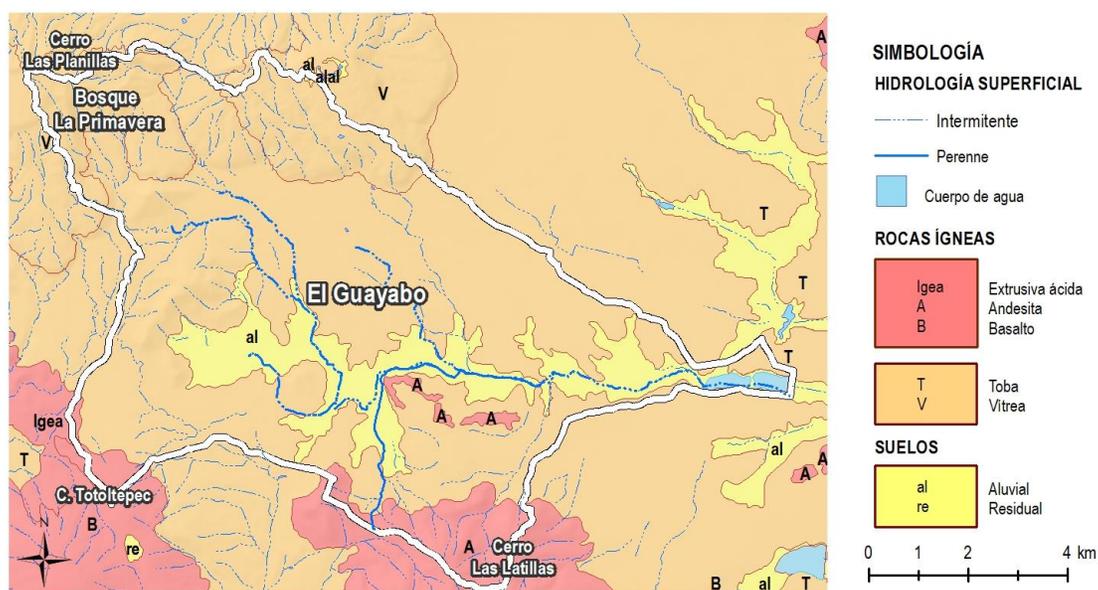


Figura 10. Geología del área de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos de CETENAL (1975b)

La formación Toba Tala (ver Figura 11) se compone de estratos de cenizas de piroclastos de distintas granulometrías, en promedio su permeabilidad es alta, por lo que permite la rápida infiltración del agua a los estratos subsuperficiales, cuenta un espesor de cientos de metros de acuerdo con los sondeos realizados en la ZMG. Por ejemplo, la Figura 12 muestra un sondeo en el Bosque La Primavera (zona de la caldera) realizado por Rosas-Elguera, Ferrari, Martínez, & Urrutia-Fucugauchi (1997).



Figura 11. Corte mostrando un perfil de jal en el Bosque La Primavera. Fuente: Fotografía tomada por David Rizo.

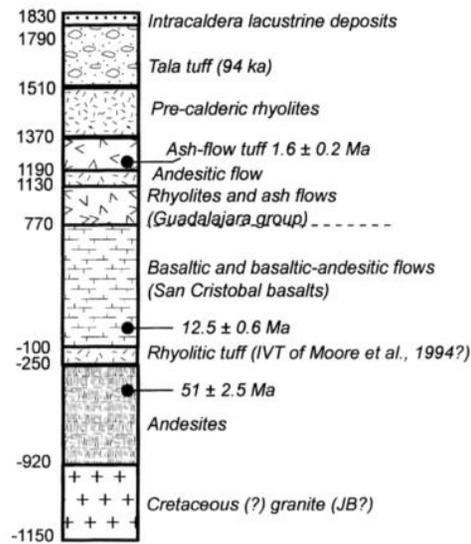


Figura 12. Perfil estratigráfico de un sondeo en La Primavera. Fuente: Rosas-Elguera et al. (1997)

4.2.3 Edafología: tipos de suelo, textura y espesor

De acuerdo con la carta edafológica escala 1:50,000, elaborada por CETENAL, basada en la clasificación de Suelos FAO/UNESCO 1968, modificada por la Dirección de Estudios del Territorio Nacional (DETENAL) en 1970. Las unidades de suelo, que se encuentran en la microcuenca, se componen de 50.4 % de Feozem, 46.2 % de Regosol, 2.5 de Fluvisol y 0.9 % de Gleysol (correspondiente a la presa).

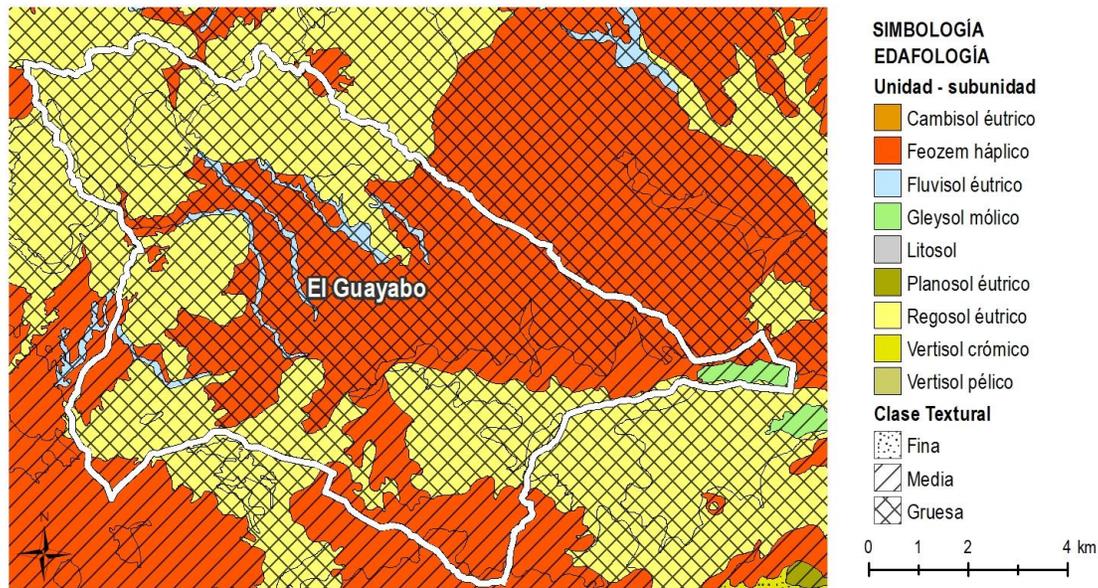


Figura 13. Edafología. Fuente: Elaboración propia con datos de CETENAL (1975a)

Las unidades y subunidades de los suelos presentes en la microcuenca, se describen en las siguientes secciones, con base en la Guía para la Interpretación de Cartografía de Edafología del INEGI (2004).

4.2.3.1 Unidades de suelo presentes en el área de estudio

Feozems: Suelos que se pueden presentarse en casi todo tipo de relieve y clima, con excepción de regiones tropicales lluviosas o zonas muy desérticas. Se caracteriza por tener una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes, similar a las capas superficiales de los Chernozems y los Castañozems, con la diferencia de que no presenta las capas ricas en calcon. Los Feozems tienen una profundidad muy variable. Cuando son profundos, se encuentran mayormente en terrenos planos y son muy utilizados para la agricultura de riego o temporal, de granos, legumbres u hortalizas, con rendimientos altos. Los Feozems menos profundos, situados en laderas o pendientes, presentan como principal limitante la roca o alguna cementación muy fuerte en el suelo, tienen rendimientos más bajos y se erosionan con más facilidad, sin embargo, pueden utilizarse para el pastoreo o la ganadería con resultados aceptables.

Fluvisol: Literalmente significa suelo de río. Se constituyen por materiales transportados por agua. Son suelos muy poco desarrollados, medianamente profundos y presentan

generalmente estructura débil o suelta. Se encuentran en todos los países, y están siempre cercanos a los lechos de los ríos. Presentan capas alternadas de arena con piedras o gravas redondeadas, como efecto de la corriente y crecidas del agua en los ríos. Son suelos muy permeables.

Gleysol: Son suelos pantanosos con textura arcillosa muy poco permeables, se encuentra en zonas donde el agua se acumula y se estanca el agua la mayor parte del año, con profundidad menor a los 50 cm. Tienen textura fina, por lo que su drenaje interno es lento. Son de color pardo a gris y su contenido de materia orgánica va de moderado a alto. Se caracterizan por presentar, en la parte donde se saturan con agua, colores grises, azulosos o verdosos, que muchas veces al secarse y exponerse al aire se tornan rojizos.

Regosol: Frecuentemente son someros. Tienen poco desarrollo y por ello no presentan capas muy diferenciadas entre sí. En general son claros o pobres en materia orgánica, se parecen bastante a la roca que les da origen (en el caso del área de estudio, es derivado del intemperismo de la toba, pómez y riolita). Generalmente, están asociados con Litosoles y con afloramientos de roca o tepetate.

4.2.3.2 Subunidades de suelo presentes en la Microcuenca “El Guayabo”.

Eútrico: Suelos ligeramente ácidos a alcalinos y más fértiles que los suelos dístricos. Presente en los tipos de suelo Fluvisol y Regosol.

Háplico: Suelos que no presentan características de otras subunidades existentes en ciertos tipos de suelo. Presente en el tipo Feozem.

Mólico: Suelos con una capa superficial suave, oscura, fértil y rica en materia orgánica. Presente en el tipo Gleysol.

4.2.3.3 Clase textural

De acuerdo con el INEGI (2004), la clase textural se refiere al tamaño general de las partículas que conforman el suelo. La textura “gruesa” representa los suelos arenosos (con más de 65% de arena), con una menor capacidad de retención de agua y nutrientes para las plantas. Los suelos de textura “media”, también llamados francos, se encuentran equilibrados en la proporción de arenas, arcillas y limos. Los denominados textura “fina” son suelos arcillosos (con más de 35% de arcilla) que tienen mal drenaje, por lo tanto, se inundan fácilmente, tienen escasa permeabilidad, se endurecen al secarse.

4.2.4 Hidrografía de la microcuenca

La microcuenca “El Guayabo” forma parte de la cuenca de “El Ahogado” (Figura 14). Administrativamente, “El Ahogado”, que tiene una superficie de 510 km², se localiza en la Subcuenca “Rio Corona- Rio Verde”, clave “RH12Eb”, que pertenece a la Región Hidrológica 12, Lerma-Chapala-Santiago, todo este sistema drena una superficie aproximada de 125,000 km². El principal eje de drenaje de dicho sistema es el Rio Grande de Santiago, que desemboca al Océano Pacífico en la costa del estado de Nayarit.

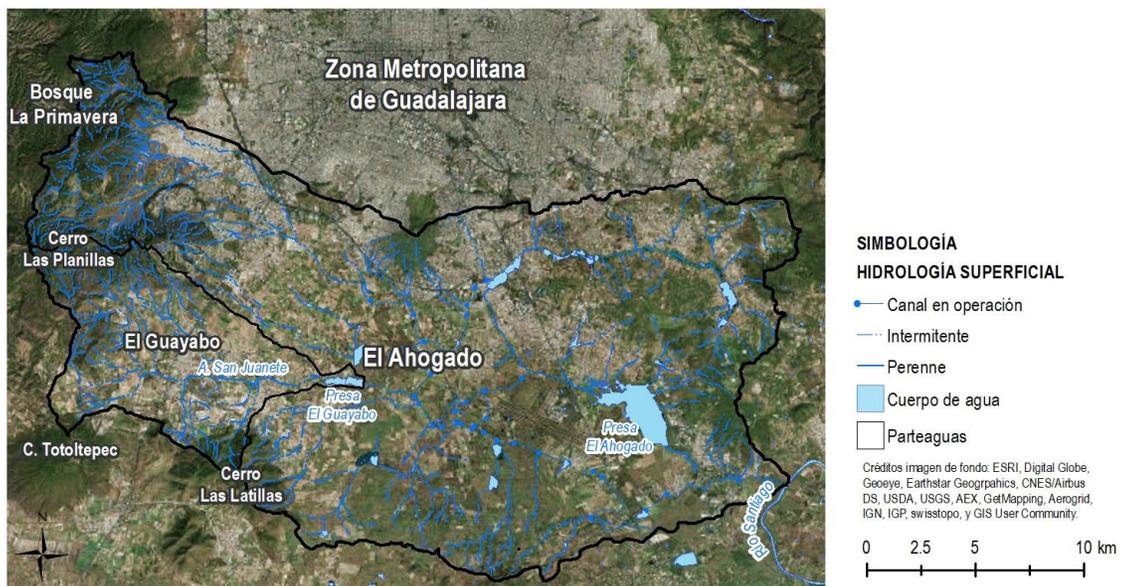


Figura 14. Situación geográfica la cuenca del Ahogado. Fuente: Elaboración propia con datos de CEA (2011) e INEGI.

La microcuenca “El Guayabo” (Figura 15) tiene una superficie aproximada de 76 km², y se localiza en el sector suroeste de la ZMG, en los municipios de Tlajomulco de Zúñiga y San Pedro Tlaquepaque, Jalisco. Tiene una dirección de drenaje predominante es de Oeste-Este, siendo el Arroyo San Juanate el cauce más importante.

La cabecera de la cuenca se encuentra en el sector denominado Cerros Las Planillas, en el Bosque de La Primavera, donde nace el Arroyo La Culebra a una altitud aproximada de 2300 msnm. Aguas abajo, éste confluye con el Arroyo Colorado en las faldas del cerro del mismo nombre, cerca de la localidad San Agustín. El cauce se entuba al intersectar con la Av. López Mateos Sur (Carretera 64 Guadalajara-Jiquilpan) y emerge cuando confluye con el

cauce del Arroyo San Juanate, que nace en el Cerro Las Latillas, el Arroyo San Juanate fluye entre las localidades de Santa Anita (Incorporación arroyo Seco) y San Sebastián el Grande para descargar sus aguas en la presa de “El Guayabo”.

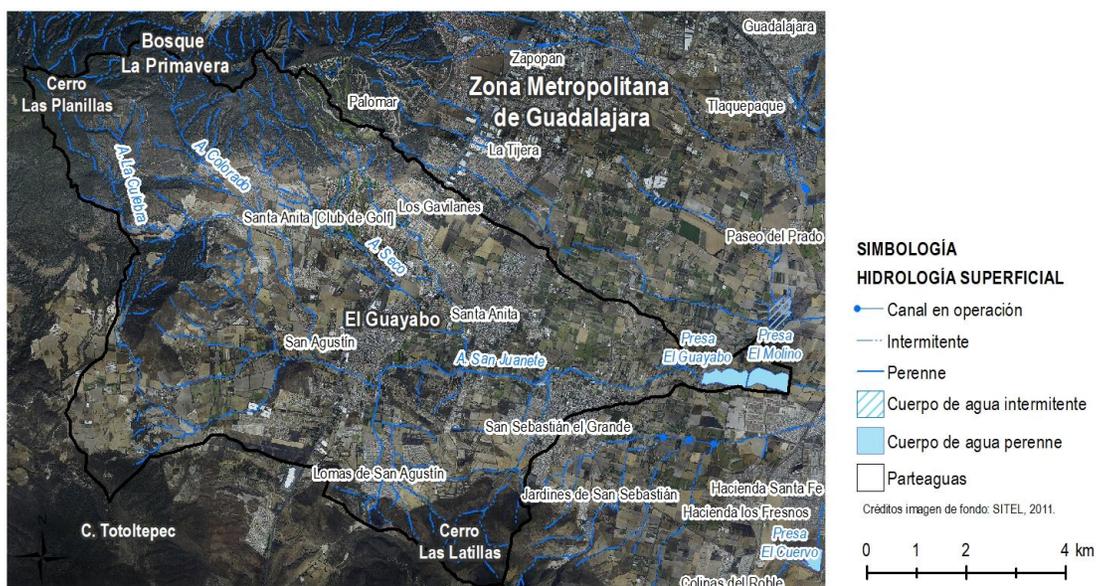


Figura 15. Hidrología superficial de la microcuenca “El Guayabo”. Elaboración: fuente propia con base en las cartas topográficas de INEGI, clave F13D65e y F13D65f, escala 1: 20,000.

4.2.4.1 Características hidromorfológicas.

La microcuenca “El Guayabo” tiene un área de 76.6 km², se considera una cuenca pequeña (entre 25 y 250 km²) según la clasificación de Campos-Aranda (2010). De acuerdo con los valores obtenidos del coeficiente de compacidad (1.65) y el factor forma (0.28) se describe como una cuenca asimétrica con una forma un poco alargada. Las cuencas con forma más alargada tienden a presentar tiempos de concentración más lentos. Por otro lado, la cuenca presenta una pendiente moderada de 4.1% y un rango de altitud entre 1539 y 2300 metros sobre el nivel del mar.

Cuadro 18. Parámetros morfométricos de la cuenca del Guayabo. Fuente: Elaboración propia

Variable	Símbolo	Resultados	Unidad
Área de la cuenca	A	76.7	km ²
Perímetro de la cuenca	P	51.3	km
Altitud mínima de la cuenca	H _{min}	1539	msnm
Altitud media de la cuenca	H _{med}	1670	msnm
Altitud máxima de la cuenca	H _{max}	2300	msnm
Pendiente media de la cuenca	S	4.1	%
Longitud directa	L _a	16.6	km
Coefficiente de compacidad (Gravelius)	K _c	1.65	-
Relación elongación	E	0.59	-
Factor forma	F	0.28	-
Longitud cauce principal	L _m	19.9	km
Orden corriente	O	4	-
Densidad drenaje	D _d	1.89	km/km ²

El Guayabo corresponde un orden de corriente 4, según en el método de Strahler-Horton (Strahler, 1952). El Guayabo presenta un tipo de relieve accidentado leve, el perfil hipsométrico indica que es una cueca con un arroyo principal maduro (ver Figura 16).

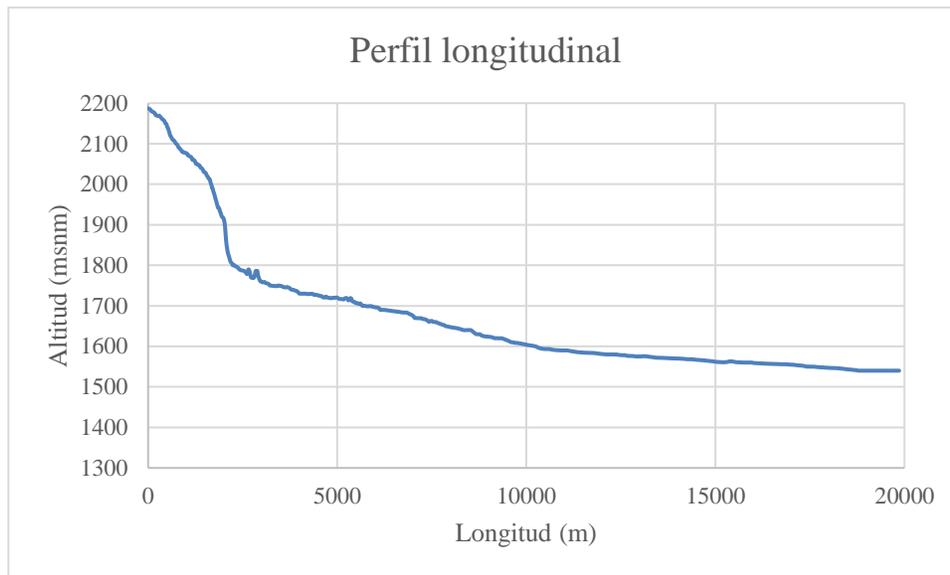


Figura 16. Perfil longitudinal del cauce principal de El Guayabo. Fuente: elaboración propia a partir de datos de INEGI.

La densidad de drenaje de la microcuenca es de 0.40, indicando una densidad baja (< 5 km/km²).

4.2.4.2 Hidrometría

No existen estaciones hidrométricas en la microcuenca “El Guayabo”. De acuerdo con la revisión efectuada a través del BANDAS, la estación hidrométrica, más cercana aguas abajo, es la estación El Salto, con identificador 12359, que se encuentra ubicada sobre el cauce del río Santiago, en la localidad de El Salto, aproximadamente 30 kilómetros aguas abajo de la presa el Guayabo, con un área drenada³⁰ de aproximada de 1510 km² (ver Figura 17). Dicha estación, cuenta con un periodo de operación del año 1950 al año 1985, y reanudando en 1995.

³⁰ A partir del nacimiento del río Santiago en Chapala.

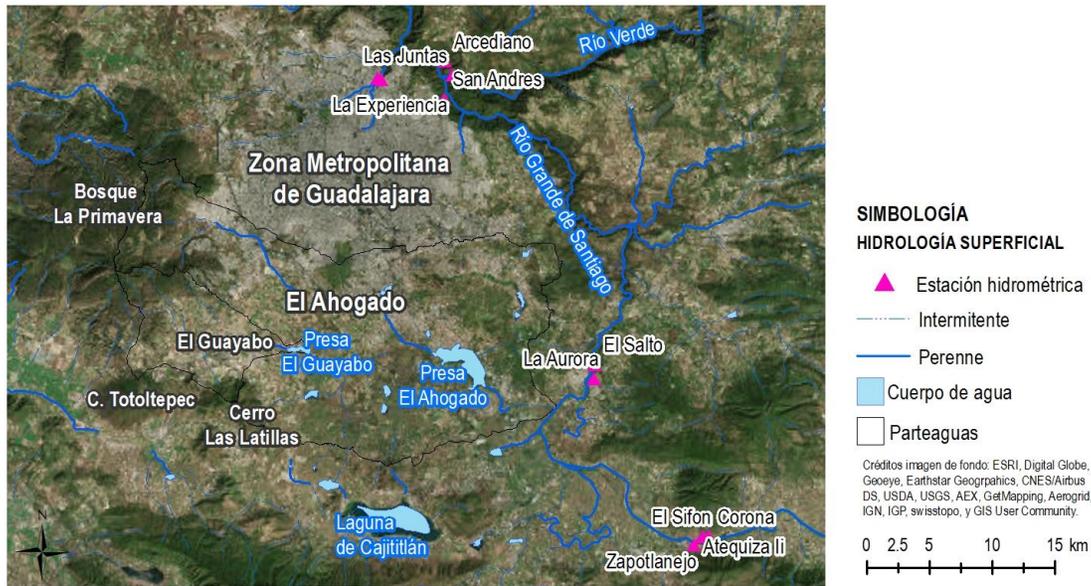


Figura 17. Estaciones hidrométricas cercanas al área de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI.

En México, el modelo de gestión del agua, del territorio y los recursos naturales, se ha relacionado fuertemente y casi únicamente con la explotación de éstos (Aguirre-Jiménez, 2004). La realidad es que en México, los datos de hidrometría son muy deficientes (Monte, 2013). Y que, el hecho de contar con una estación hidrométrica no garantiza la adecuada cantidad y calidad de los datos. Rizo-Decelis (2017) hizo una revisión de 98 estaciones hidrométricas ubicadas en la cuenca del río Santiago, y encontró que la gran mayoría de las estaciones hidrométricas consultadas presentan considerables lagunas en los datos. Siendo solamente 26, las que contienen más del 80% de los datos correspondientes al periodo 1970-2014.

La Oficina de las Naciones Unidas de Servicios para Proyectos (UNOPS, por sus siglas en inglés), realizó una evaluación de 40 estaciones hidrométricas contenidas en el BANDAS dentro de los límites de la cuenca del río Verde³¹ y tres estaciones fuera de esta cuenca: La estación Arcediano (localizada aproximadamente 500 m aguas abajo de la confluencia del río Verde con el río Santiago, la estación San Andrés (localizada en el arroyo

³¹ El río Verde es uno de los tributarios principales del río Santiago, debido a su área drenada y al aporte anual de agua, aproximadamente de 32 hm³/año y con un caudal medio de 28 m³/s.

San Andrés, afluente del río Santiago) y la estación Las Juntas, localizada en confluencia entre río Verde y Santiago (UNOPS, 2017a). Dicho estudio compiló la información oficial disponible: datos de las estaciones hidrométricas, represas con información sobre su operación, estaciones climatológicas. De manera complementaria, realizaron actividades de campo para verificación y mejorar el entendimiento de la cuenca. Para asegurar que los resultados fuesen fidedignos, utilizaron equipos con tecnologías de vanguardia y siguieron rigurosos protocolos internacionales para las mediciones (cf. UNOPS, 2017b). Entre los resultados obtenidos, encontraron que *“en el caso de los aforos realizados y la comparación con información oficial, se observaron diferencias importantes en prácticamente todas las estaciones hidrométricas”*(UNOPS, 2017a, p.77). Asimismo, recomendaron realizar mantenimiento periódico a las estaciones cuyos sensores consisten en sistemas flotantes y realizar la calibración apropiada de aquellas con sensores con tecnologías de radar o Doppler.

4.3 Medio biótico

4.3.1 Tipos de vegetación

La diversidad vegetal de microcuenca “El Guayabo”, es fruto de la subducción entre dos provincias fisiográficas: Sierra Madre Occidental (SMO) y el CVTM. Además de los sistemas naturales, también se encuentran, actividades agrícolas tanto de cultivos temporales como de riego, producto de las actividades económicas de la zona.

Para la descripción de los tipos de vegetación, se utilizan los datos del INEGI, éste agrupa los diferentes tipos de vegetación del país con base en las afinidades ecológicas, florísticas y fisonómicas. La agrupación es en primera instancia por cuestiones climáticas, sin embargo, en ciertas ocasiones se basa en aspectos edafológicos, geológicos y topográficos que pueden llegar a tener una especial relevancia, Asimismo, dicho sistema de clasificación también toma en cuenta lo que se denomina “desarrollo de la vegetación” que considera el grado de perturbación (natural o antrópica). Se define como vegetación primaria cuando no existe disturbio o éste es muy bajo; vegetación secundaria como aquella que debido a perturbaciones ha sido modificada y presenta el proceso de sucesión ecológica (INEGI, 2015). De acuerdo con la Serie VI de Uso de Suelo y Vegetación escala 1:250,000 de INEGI,

existen nueve tipos de vegetación o coberturas del suelo presentes en el área de estudio. El Cuadro 19 muestra las superficies para cada tipo de vegetación o cobertura del suelo.

Cuadro 19. Tipos de vegetación o coberturas del suelo presentes en la microcuenca “El Guayabo”. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de vegetación / cobertura del suelo	Área (ha)	Porcentaje
Agricultura de riego anual	1 129.34	15%
Agricultura de temporal anual	1 801.72	24%
Asentamientos humanos	2 237.03	29%
Bosque de encino	126.16	2%
Bosque de encino-pino	1 486.26	20%
Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia	294.24	4%
Pastizal inducido	465.29	6%
Cuerpo de agua	63.99	1%
Total	7 604.02	100%

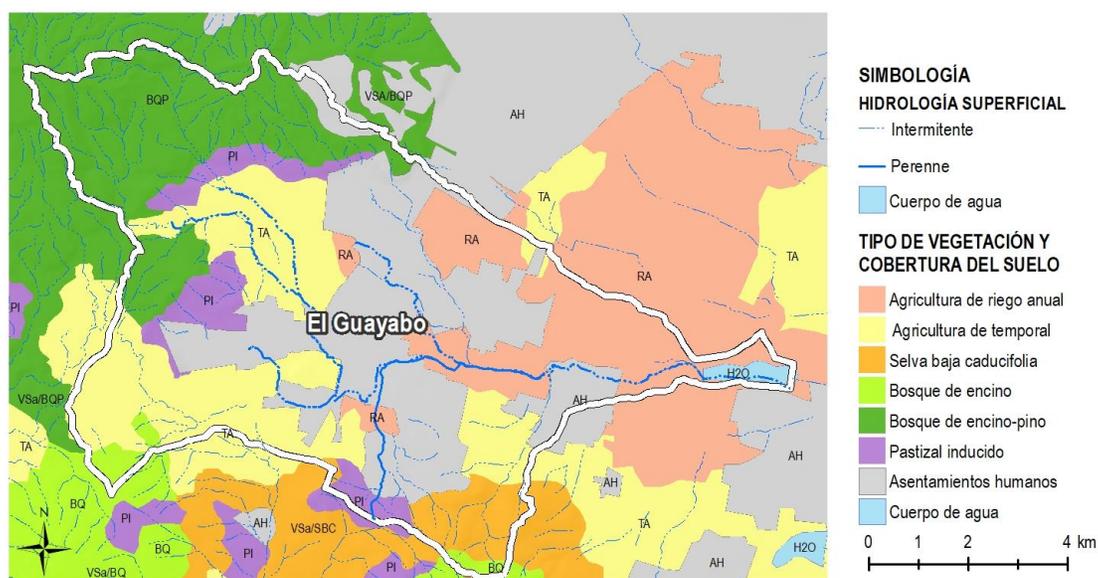


Figura 18. Tipos de vegetación y coberturas del suelo, de acuerdo Serie VI de Uso del Suelo y Vegetación. Fuente: elaboración propia con datos de INEGI.

El INEGI, en la Guía para la interpretación de cartografía de Uso del suelo y Vegetación Escala 1:250 000 Serie V³² (INEGI, 2015), define los tipos de vegetación del Cuadro 19 de la siguiente manera:

Agricultura de riego: Aquellos agrosistemas que utilizan agua suplementaria para el desarrollo de los cultivos durante el ciclo agrícola. Por ejemplo, riego por aspersión, goteo, u otra técnica, como es el caso del agua rodada³³, el bombeo desde la fuente de suministro (pozo de extracción) o por gravedad procedente de aguas arriba de algún cuerpo de agua natural o artificial.

Agricultura de temporal: es la agricultura donde el ciclo vegetativo de los cultivos³⁴ depende exclusivamente precipitación y de la capacidad del suelo para la retención de agua. Pueden ser áreas de monocultivo o de policultivo. En ocasiones, combinadas con pastizales o con zonas de riego, pero que presenta una dominancia de los cultivos cuyo desarrollo es dependiente a la precipitación pluvial.

Bosque de Encino (BQ): Estas comunidades vegetales se distribuyen en las zonas montañosas de México (por ejemplo, la SMO y el CVTM). Se desarrolla en condiciones ecológicas diversas, cercanas al nivel del mar hasta los 3000 m de altitud. Se encuentra en distintas clases de roca madre, tanto ígneas, sedimentarias y metamórficas, tanto en suelos que van desde someros hasta profundos. Estas comunidades se conforman por distintas especies de encinos o robles del género *Quercus*, y que, por lo general, son zonas de transición entre los bosques de coníferas y las selvas, el tamaño varía entre 4 y 30 metros de altura, y van desde abiertos hasta a muy densos. Por lo general, el Bosque de Encino se encuentra muy relacionado con los Bosques de Pino, formando una serie de mosaicos complejos.

Bosque de Encino-Pino (BQP): Estas comunidades está conformada por encinos (*Quercus spp.*), y en menor proporción pinos (*Pinus spp.*), se encuentra distribuida principalmente en

³² Contiene los elementos que integran la quinta serie de información de Uso del Suelo, y es una actualización de las publicadas en 1980, 2005, 2009 y 2012, con el objeto de apoyar la interpretación de la información de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250 000 serie V, generada por el INEGI durante el periodo 2011 y 2013.

³³ Distribución del agua directamente al cultivo a través de surcos o tubería a partir de un canal principal.

³⁴ Para entrar en la categoría de temporal deben permanecer sembradas al menos un 80% del ciclo agrícola.

los sistemas montañosos del país (por ejemplo, la SMO y el CVTM). Se le encuentra en altitudes que van desde los 300 metros hasta los 2,800 metros sobre el nivel medio del mar. Son arboles perennifolios y caducifolios, la floración y fructificación es variable durante todo el año con alturas entre 8 y 35 m, ver Figura 19.



Figura 19. Bosque de Encino-Pino. Fuente: Fotografía tomada por el autor.

Selva Baja Caducifolia (SBC): Se desarrolla en climas des tipo cálidos subhúmedos, semisecos o subsecos. Las precipitaciones anuales oscilan entre 300 y 1,500 mm, con una temporada de estiaje bien delimitada que va desde seis a ocho meses. El rango altitudinal se encuentra desde el nivel del mar hasta los 1900 msnm. Se encuentra mayormente en laderas con suelos de buen drenaje. Los componentes arbóreos de esta selva son, por lo general, de bajo porte, normalmente entre 4 y 10 m. El estrato herbáceo es reducido y se aprecia con el comienzo de la época de lluvias.

Pastizal Inducido (PI): Esta comunidad emerge como consecuencia del desmonte de cualquier tipo de vegetación, se compone principalmente por gramíneas o graminoides. Puede también aparecer en aquellas áreas agrícolas abandonadas o en zonas que se incendian con frecuencia. Los pastizales inducidos, por lo general, corresponden a una fase de la sucesión normal de comunidades vegetales, cuyo clímax es, por lo común, un bosque o un

matorral, sin embargo, otras veces no forma parte de ninguna serie normal de sucesión de comunidades. La categoría de pastizales inducidos, en el área de estudio, prosperan una vez destruidos los bosques de pino y de encino.

4.3.2 Flora

La diversidad florística más importante de la microcuenca “El Guayabo”, se encuentra en la parte alta, correspondiente al área natural protegida (ANP) “Bosque La Primavera”, que cuenta con un listado de flora de más de 1000 especies, distribuidas en 6 divisiones, 107 familias y 409 géneros (CONANP, 2000). Entre estas especies, se encuentran aquellas de género *Quercus spp.* y *Pinus spp.* También se encuentran especies con valor florístico importante. Por ejemplo, las orquídeas terrestres (ver Figura 20) son abundantes en la zona, representando un caso excepcional por su diversidad, siendo el género *Bletia spp.* el más representativo.



Figura 20. *Hexalectris brevicaulis* (L.O. Williams), una orquídea saprófita, vista en la parte alta de la microcuenca.

Fuente: Fotografía tomada por el autor.

Debido a su origen reciente (ver apartado de *Geología*), no existen elementos de flora endémicos de la zona, pero sí especies endémicas de la región denominada Nueva Galicia, tal como el *Agave guadalajarana* (Trel.) y la *Mammillaria jaliscana* (Britton & Rose) - CONANP, 2000-.



Figura 21. *Mammillaria jaliscana* vista en la zona del arroyo de La Culebra. Fuente: Fotografía tomada por el autor.

4.3.3 Fauna

De igual manera que la flora encontrada en el área de estudio, la diversidad faunística más importante es aquella que se encuentra La Primavera; cuenta con un registro de cerca de 350 especies de vertebrados distribuidos en 7 peces, 20 anfibios, 49 reptiles, 205 aves y 60 mamíferos (Bosque La Primavera OPD, 2016) . En el año 2000, 19 especies se encontraban listados bajo algún tipo de categoría de protección de acuerdo con la NOM-059-ECOL-1994³⁵, doce de ellas en estatus de amenaza, de las cuales cuatro son endémicas. (CONANP, 2000). La Figura 22 muestra un puma (*Felis concolor*) captado por una cámara instalada cerca del parteaguas norte de la microcuenca.

³⁵ NORMA Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-1994, que determina las especies y subespecies de flora y fauna silvestres terrestres y acuáticas en peligro de extinción, amenazadas, raras y las sujetas a protección especial, y que establece especificaciones para su protección.



Figura 22. Puma (*Felis concolor*) captado con cámara trampa cerca del parteaguas norte de la microcuenca “El Guayabo”. Fuente: ITESO-Anillo Primavera (2017)

La presencia del puma (*Felis concolor*), una especie indicadora (CONANP, 2000) dado que se encuentra en la cúspide de la cadena trófica, destaca que el hábitat se encuentra buena calidad. Asimismo, En la microcuenca, también se cuentan registros de otros mamíferos mayores como el venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), ver Figura 23.



Figura 23. Venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), en la parte alta de la microcuenca. Fuente: Fuente: ITESO-Anillo Primavera (2017)

4.4 Medio antrópico

4.4.1 Demografía y contexto socioeconómico

4.4.1.1 Contexto metropolitano

La zona metropolitana de Guadalajara (ZMG) se encuentra en el Estado de Jalisco, México (Figura 8). De acuerdo con las cifras del Censo Nacional de Población y Vivienda 2010, la ZMG concentraba 4.5 millones de habitantes, en un territorio perteneciente a ocho municipios: Guadalajara, Zapopan, San Pedro Tlaquepaque, Tonalá, El Salto y Tlajomulco de Zúñiga, Juanacatlán, Ixtlahuacán de los Membrillos (INEGI, 2010a). En 2014, la Comisión de Asuntos Metropolitanos del Congreso del Estado de Jalisco dictaminó la inclusión del municipio de Zapotlanejo a la ZMG (Congreso del Estado de Jalisco, 2014). Según el Consejo Nacional de Población, la ZMG alcanzó en 2017, los 4.98 millones de personas (aproximadamente el 62% de la población del estado). En 7 años, la ZMG aumentó su población en 482 mil habitantes, aproximadamente 10.7% (IIEG, 2017). Este incremento poblacional representa un gran desafío para satisfacer la demanda consecuente de alimentación, vivienda y servicios tales como vialidades, agua potable, alcantarillado luz eléctrica entre otros, ejerciendo presión sobre los servicios ecosistemas que proveen servicios a la población.

4.4.1.2 Contexto socio-demográfico en la microcuenca “El Guayabo”

La microcuenca “El Guayabo” se sitúa en la parte alta de la cuenca El Ahogado en los municipios de Tlajomulco de Zúñiga (90%) y San Pedro Tlaquepaque (10%). Tlajomulco de Zúñiga es uno de los municipios con mayor crecimiento poblacional del país debido a la extraordinaria expansión demográfica del la ZMG. En el quinquenio 2005 a 2010, la población tuvo un aumento de 293,007 nuevos habitantes. Actualmente, cuenta con una población aproximada de 570 mil habitantes (IIEG, 2017).

De acuerdo con el censo del 2010, la microcuenca “El Guayabo” concentraba alrededor de 92,000 personas que residen en 7 localidades urbanas y 37 localidades rurales (INEGI, 2010a).

La expansión urbana en el área de estudio ha crecido notablemente en los últimos años. En la parte alta cercana al Bosque La Primavera, han proliferado nuevos fraccionamientos (con menos de 10 años) de clase media-alta, como lo son El Origen, Bosques de Santa Anita, Bosque Real de Santa Anita, Residencial Pontevendra, Senderos de las Moras, que imponen una importante presión al bosque (ver Figura 24). En la parte media, se localizan la localidad de San Agustín y Santa Anita, que fueron incorporadas a la mancha urbana. En la parte baja, el uso de suelo predominante es el agrícola, en esta zona, la localidad urbana de mayor extensión es San Sebastián El Grande.



Figura 24. Ejemplo de la uurbanización dentro de la microcuenca en el límite de la ANP La Primavera. Fuente: Fotografía tomada por el autor.

La microcuenca el Guayabo, tiene una densidad media de población de 1,200 habitantes por kilómetro cuadrado. Asimismo, concentra alrededor de 3,594 unidades económicas (DENUE, 2015). En 2010, de acuerdo con datos de CONAPO, el 19 % de los habitantes del área de estudio se encontraban en un nivel de marginación “muy bajo”, el 21 % en nivel “bajo”, el 44 % en nivel “medio” y el 15 % con un grado de marginación “alto”. Ver Figura 25.

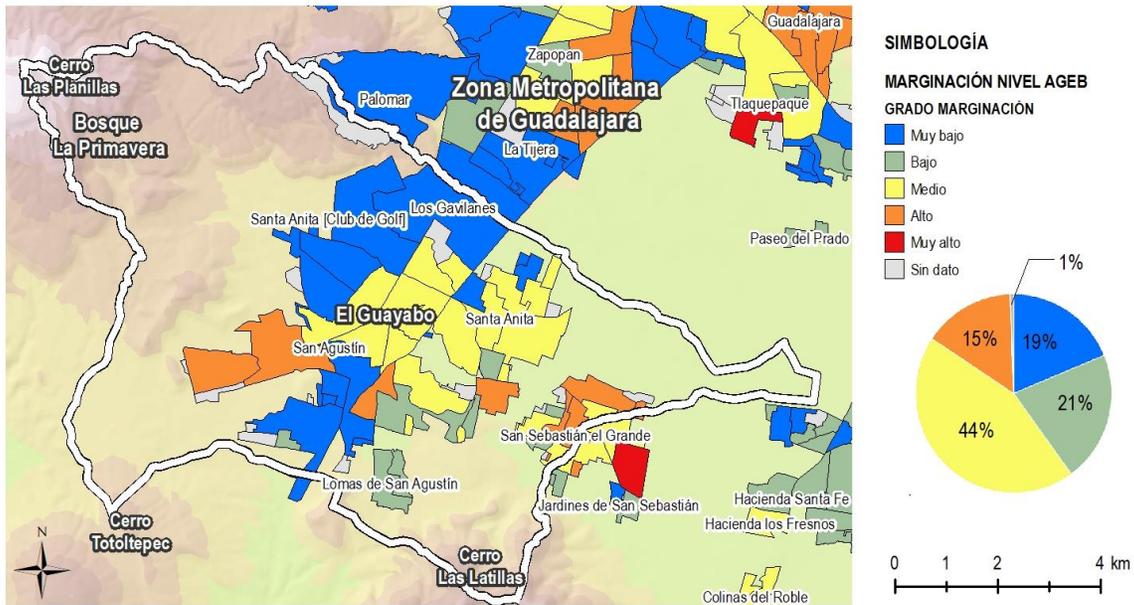


Figura 25. Grado de marginación a nivel de área geostatística básica (AGEB). Fuente: elaboración propia con datos de CONAPO (2012).

El precio de la tierra (Casas y Terrenos, 2018)³⁶ varía a lo largo de la microcuenca (ver Figura 26), siendo mayor el valor en las zonas más cercanas a la mancha urbana de la ZMG. Destaca el aumento en la plusvalía de los fraccionamientos contiguos al polígono protegido del Bosque La Primavera. Las superficies con menor valor son aquellas que tienen usos predominantemente agrícolas. Asimismo, las poblaciones de Santa Anita y San Sebastián, localizadas en la parte baja de la microcuenca, presentan precios relativamente bajos, con respecto a la media de la microcuenca.

³⁶ <https://www.casasyterrenos.com/>

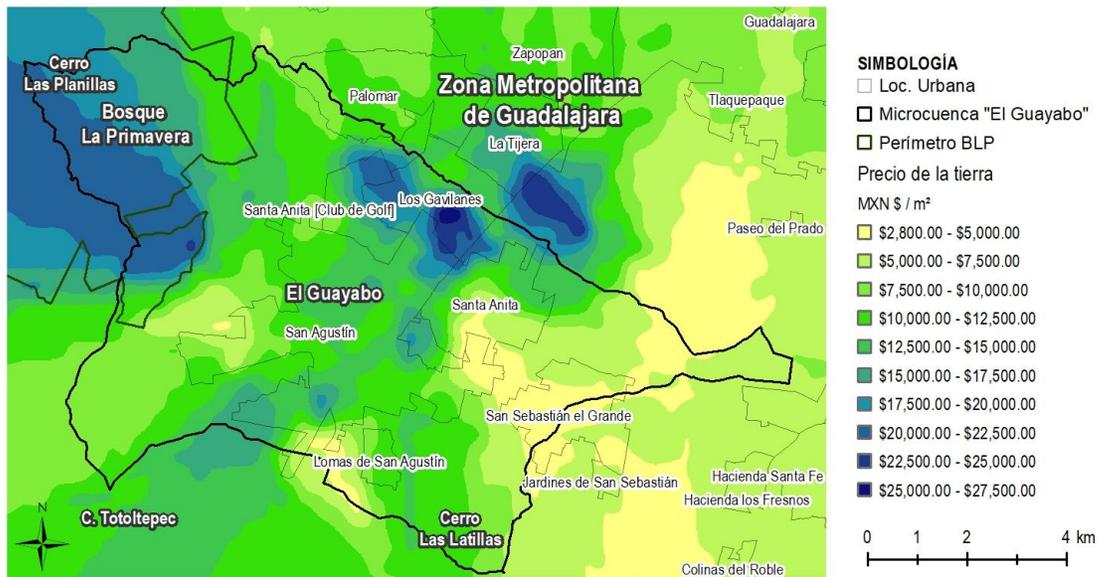


Figura 26. Precio de la tierra. Fuente: Elaboración propia con datos de Casas y Terrenos (2018).

4.4.1.3 Inundaciones en Tlajomulco de Zúñiga.

Los problemas por inundaciones en el municipio de Tlajomulco de Zúñiga han sido recurrentes para sus habitantes en los últimos años. La Comisión Estatal del Agua de Jalisco (CEA) presentó en 2011, un análisis de riesgo de inundación para la cuenca de El Ahogado (CEA, 2011). En este análisis, se reconoció que el incremento en el desarrollo de viviendas en la cuenca de El Ahogado ha puesto en riesgo a los habitantes que se encuentran ubicados cerca de arroyos. De las trece subcuencas que conforman la cuenca de El Ahogado, destacan cinco por ser las más pobladas y de mayor riesgo: Arroyo Seco, Arroyo de Enmedio, El Guayabo, Las Juntas y El Mulato, calculando que para una lluvia con un periodo de 100 años podría afectar cerca de 130 mil habitantes.

Entre las acciones realizadas por el gobierno municipal de Tlajomulco de Zúñiga para la prevención de inundaciones, se encuentran el mantenimiento y limpieza de drenaje pluvial y canales; desazolve de presas. Asimismo, se contempla la construcción de cinco vasos reguladores y dieciséis obras hidráulicas complementarias, sumando una inversión de 62.4 millones de pesos (Gobierno de Tlajomulco de Zúñiga, 2017b). Entre las obras proyectadas dentro del área de estudio se encuentran: la construcción de vado-alcantarilla y de un colector de captación de agua pluvial que va la calle 16 de Septiembre al arroyo San Juanate, en la

localidad de San Sebastián, y; la compra y desazolve de la Presa El Guayabo (Figura 27), que serviría para la prevención de inundaciones en las localidades inmediatas aguas debajo de la presa, y que de acuerdo al gobierno municipal, beneficiaría a más de 125 mil habitantes (Gobierno de Tlajomulco de Zúñiga, 2017a). La compra de la presa tuvo un costo de 100 millones de pesos, a presa tiene una superficie de 22 hectáreas y cuenta una capacidad máxima dos millones de metros cúbicos. Asimismo, se pretende que la presa sea también un parque público y una planta potabilizadora (Gobierno de Tlajomulco de Zúñiga, 2018).



Figura 27. Dragado y desazolve de la presa El Guayabo. Fuente: Informador (2017).

4.4.1.4 Contexto socioambiental de la Cuenca del Ahogado.

Para fines administrativos, la cuenca el Ahogado forma parte de la Subcuenca Río Corona-Río Verde de la Región Hidrológica 12 Lerma-Chapala-Santiago. La cuenca del Ahogado se encuentra en el valle de Toloquilla y abarca 5 municipios de la ZMG: El Salto, Tlaquepaque, Tlajomulco de Zúñiga, Tonalá y Zapopan. Tiene una superficie aproximada de 565 km² y comprende áreas de gran diversidad económica y social. En la parte oeste de la cuenca (parte alta), en las cercanías con el ANP Bosque La Primavera, se ha tenido un crecimiento que obedece a la expansión de la mancha urbana de Guadalajara, donde se han establecido

desarrollos habitacionales de clase media y media alta. En la parte media de la cuenca, predomina el uso agrícola, mientras que en la zona baja (sector Este) se han asentado manufactureras y servicios industriales, que a su vez han propiciado corredores de comercio y servicios vinculados a este desarrollo. El crecimiento poblacional en la cuenca ha sido explosivo, pasando de 50 mil habitantes en 1970 a 485 mil habitantes en el año 2000 (Mendoza-Pérez & Venegas-Herrera, 2003).

La alta densidad de industrias en la parte baja de la cuenca, ha deteriorado la salud del ecosistema y de la población. Por esta razón, el 27 de enero de 2009, la Comisión Estatal de Derechos Humanos de Jalisco (CEDHJ) emitió una recomendación a diversas autoridades estatales y municipales por “violación de los derechos humanos a gozar de un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, a la salud, al agua, a la alimentación, al patrimonio, a la legalidad, a la seguridad social, al desarrollo sustentable, a la democracia, al trabajo, a tener una vivienda en un entorno digno, los derechos de niñas y niños a un nivel de vida adecuado para su desarrollo físico, espiritual, moral y social” (CEDHJ, 2009). En atención a esta recomendación, se publicó en el periódico oficial “El Estado de Jalisco”, la delimitación del polígono de fragilidad ambiental (POFA), así como los criterios que deberán observarse para su protección del medio ambiente (Gobierno del Estado de Jalisco, 2009). El POFA contempla toda la cuenca El Ahogado y añadiendo una zona aguas abajo de la confluencia del Arroyo el Ahogado con el río Santiago. El 21 de febrero del 2011 se instaló el Órgano Técnico Mixto (OTM) para el rescate del POFA.

4.4.2 Contexto Territorial del Bosque la Primavera

El Bosque la Primavera es un Área Natural Protegida de 30,500 hectáreas contigua a la ZMG, la cual provee importantes servicios ecosistémicos a sus habitantes. Por ejemplo, servicios recreativos y culturales (Álvarez-Contreras, 2016; Balderas-Torres & De Alba-Martinez, 2015) y mitigación de cambio climático (Balderas-Torres, MacMillan, Skutsch, & Lovett, 2015).

El BLP ha tenido distintas declaratorias territoriales a través de los años. En 1934, cerca de 10,000 km² aledaños a la ciudad de Guadalajara, que incluían a La Primavera, se declararon “Zona de Protección Forestal”. En 1970, Gobierno del Estado de Jalisco,

categorizó al BLP como de utilidad pública y uso turístico. En 1980, por mandato presidencial, se decretó a La Primavera como Zona de Protección Forestal y Refugio de la Fauna Silvestre. En el año 2000, se publicó en el Diario Oficial de la Federación, el acuerdo que le decreta como Área de Protección de Flora y Fauna "La Primavera" (CONANP, 2000). En el 2011, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) decretó al BLP como Reserva de la Biósfera (UNESCO, 2011). Sin embargo, estos decretos de protección no han sido una medida eficiente para evitar su degradación. De acuerdo con Huerta-Martínez & Ibarra-Montoya (2014), la tasa de incendios del periodo 1998-2012 fue 1.13%, superando a la media nacional. El principal factor de incidencia de los incendios, para este mismo periodo, fueron las prácticas de quema de cultivo de caña de azúcar de zonas aledañas y que se propagan al BLP. Asimismo, el cambio en la legislación en materia energética del 2014 que permite la explotación de la energía geotérmica en áreas naturales protegidas supone un riesgo de degradación ambiental para el BLP. En julio de 2015, la Secretaría de Energía entregó a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) una concesión de explotación en el área de Cerritos Colorados y permisos para inspección en el Estado de Jalisco, entre los cuales se encuentra la zona denominada Las Planillas (CFE, 2016).

4.4.3 Contexto de la ordenación territorial

Los instrumentos jurídicos más importantes que intervienen en la planeación y ordenación del territorio en la ZMG son la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos; la Ley General de Asentamientos Humanos; el Plan Nacional de Desarrollo, la Constitución Política del Estado de Jalisco; los Planes Estatales de Desarrollo de Jalisco; la Ley de Asentamientos Humanos del Estado de Jalisco; la Ley de Desarrollo Urbano del Estado de Jalisco; Programas de Ordenamiento Ecológico (general, regional y local); Programa de Ordenamiento Territorial; la Ley de Coordinación Metropolitana; el Programa de Ordenamiento Territorial Metropolitano del Área Metropolitana de Guadalajara y los Planes Parciales de Desarrollo Urbano. Los dos principales programas de ordenamiento al territorio en México son el Ordenamiento Ecológico y el Ordenamiento Territorial, encontrados en dos diferentes leyes: La Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y

Desarrollo Urbano y la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente respectivamente.

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), define al Ordenamiento Ecológico Territorial (OET) de la siguiente manera: *“El instrumento de política ambiental cuyo objeto es regular o inducir el uso del suelo y las actividades productivas, con el fin de lograr la protección del medio ambiente y la preservación y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, a partir del análisis de las tendencias de deterioro y las potencialidades de aprovechamiento de los mismos”* (LGEEPA, 2018)

Existen cuatro modalidades del OET: general, marino, regional y local. Los dos primeros son de competencia federal, el tercero de competencia estatal y el cuarto de competencia municipal. El OET es la conjunción de las Unidades de Gestión Ambiental (UGA). Una UGA es la unidad mínima del área de Ordenamiento Ecológico, que tiene asignada los lineamientos y estrategias ambientales. Posee condiciones de homogeneidad de atributos físico-bióticos, socioeconómicos y de aptitud sobre la base de un manejo administrativo común. Asimismo, una UGA representa la unidad estratégica de manejo que intenta minimizar los conflictos ambientales y maximizando el consenso intersectorial sobre la utilización del territorio (SEMARNAT, 2006)

La Figura 28 muestra las UGAS en la microcuenca “El Guayabo” de acuerdo con el OET vigente en Tlajomulco de Zúñiga, para el caso de las áreas correspondientes a otros municipios, por ejemplo, la porción correspondiente a Tlaquepaque se muestra el OET Estatal. La parte alta del área de estudio, correspondiente al Bosque La Primavera, está clasificada como área natural protegida con políticas de protección para su conservación o su restauración. La parte media alta (UGA III-05AgP-AR), corresponde a asentamientos humanos con política para su aprovechamiento y restauración. La UGA clasificada como industrial, corresponde a la zona industrial de la ZMG. La parte baja, predomina el uso agropecuario, y mezcla de asentamientos humanos y agricultura (caso de la localidad de San Sebastián).

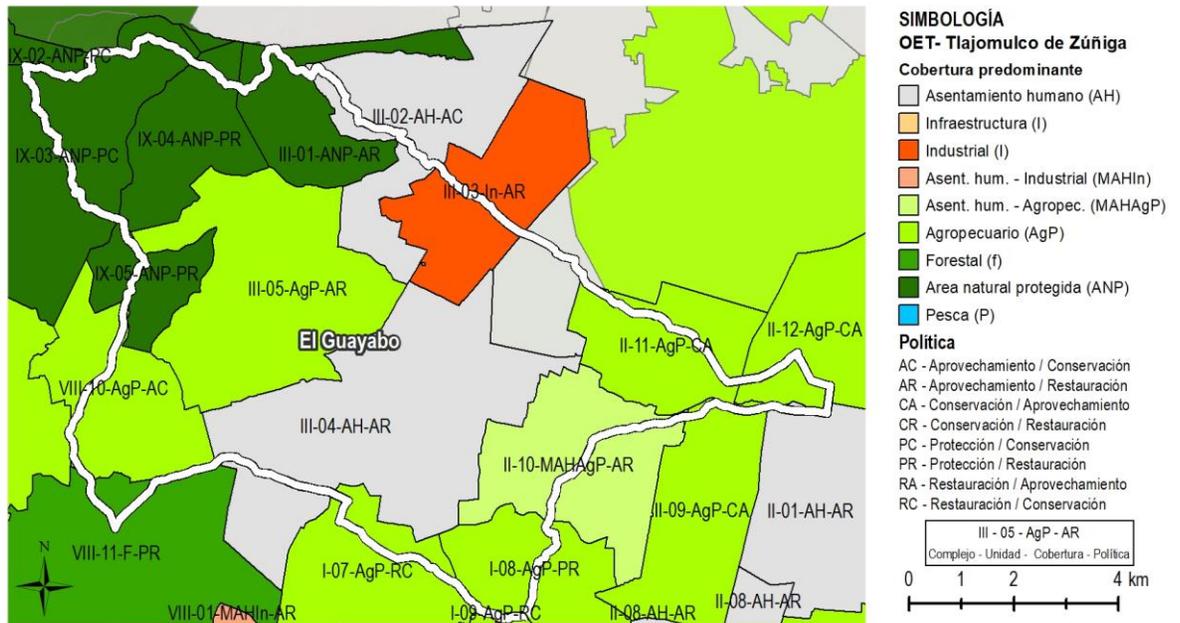


Figura 28. UGAS en la microcuenca “El Guayabo”. Fuente: elaboración propia con datos del OET de Gobierno de Tlajomulco de Zúñiga (2010) y OET del Gobierno del Estado de Jalisco (2006).

En la búsqueda de un mejor modelo de integración urbana, se creó la Ley de Coordinación Metropolitana del Estado de Jalisco, que a su vez estableció un sistema de organización que se basa en cuatro instancias: “*la Junta de Coordinación Metropolitana, como instancia rectora y de construcción de los acuerdos políticos; el Consejo Ciudadano Metropolitano, que aporta la visión de los habitantes y modula las acciones del gobierno; el Consejo Consultivo de Planeación Metropolitana, que fortalece las capacidades de los agentes gubernamentales en la toma de decisiones; y el Instituto Metropolitano de Planeación*”³⁷, que aporta los estudios, proyectos y propuestas técnicas de desarrollo integral para la ciudad completa”. (IMEPLAN, 2017a, p.13). A partir del Código Urbano para el Estado de Jalisco en 2008 y la Ley de Coordinación Metropolitana en 2011, se dio peso legal a las decisiones de planeación del territorio que promueve el Instituto Metropolitano de Planeación del Área Metropolitana de Guadalajara (IMEPLAN). Jurídicamente, el IMEPLAN es un órgano técnico, es una entidad pública y descentralizada de carácter

³⁷ Posteriormente llama Instituto Metropolitano de Planeación del Área Metropolitana de Guadalajara.

intermunicipal con personalidad jurídica y patrimonio propio, con autonomía técnica en el ejercicio de sus atribuciones (Arellano-Ríos, 2014).

El Programa de Ordenamiento Territorial Metropolitano del Área Metropolitana de Guadalajara (POTMet), es un instrumento de planeación metropolitana para el ordenamiento e indicación espacial. Es referencia inmediata para los instrumentos de desarrollo urbano u ordenación del territorio de los nueve municipios que conforman el Área Metropolitana de Guadalajara. El POTMet, contempla seis ejes estratégicos: (1) Modelo policéntrico de ciudad y fortalecimiento de una estructura metropolitana; (2) Crecimiento ordenado y con infraestructura; (3) Sustentabilidad ambiental (Sistema verde); (4) Vivienda y desarrollo urbano, (5) Gestión urbana, y; (6) Zonas estratégicas y Nuevos Entornos Urbanos Sustentables (NEUS). Dentro del eje de sustentabilidad ambiental, el POTMet reconoce que *“El proceso de urbanización ha generado, simultáneamente, un aumento en la demanda de servicios de los ecosistemas y una disminución en la capacidad de los mismos para satisfacerla, al ser impactados por cambios de uso de suelo, actividades productivas y otras acciones humanas”* (IMEPLAN, 2017a, p. 306). Asimismo, menciona *“Como parte de este cambio en el paisaje, los cauces dentro de la ciudad, en muchos casos han sido entubados y en su lugar hoy existen vialidades, tal es el caso de arroyos como el Álamo, el Arenal, Agua Prieta, el Atemajac, el Chicalote y el trazo original del San Juan de Dios. Esto ha tenido como consecuencia además de la evidente afectación al paisaje urbano, la pérdida de servicios de los ecosistemas de los ríos incluyendo control de avenidas de agua, transporte de sedimentos, regulación de la temperatura y soporte de biodiversidad”* (IMEPLAN, 2017a, p.80). Sin embargo, no se menciona cómo deben de ser identificados y evaluados, ni la provisión ni los beneficiarios.

La Figura 29 muestra la clasificación (zonificación primaria) de acuerdo con el POTMet en el área de estudio. La Figura 29, muestra que en el futuro las localidades de San Agustín y San Sebastián El Grande, quedarán absorbidas por la mancha urbana.

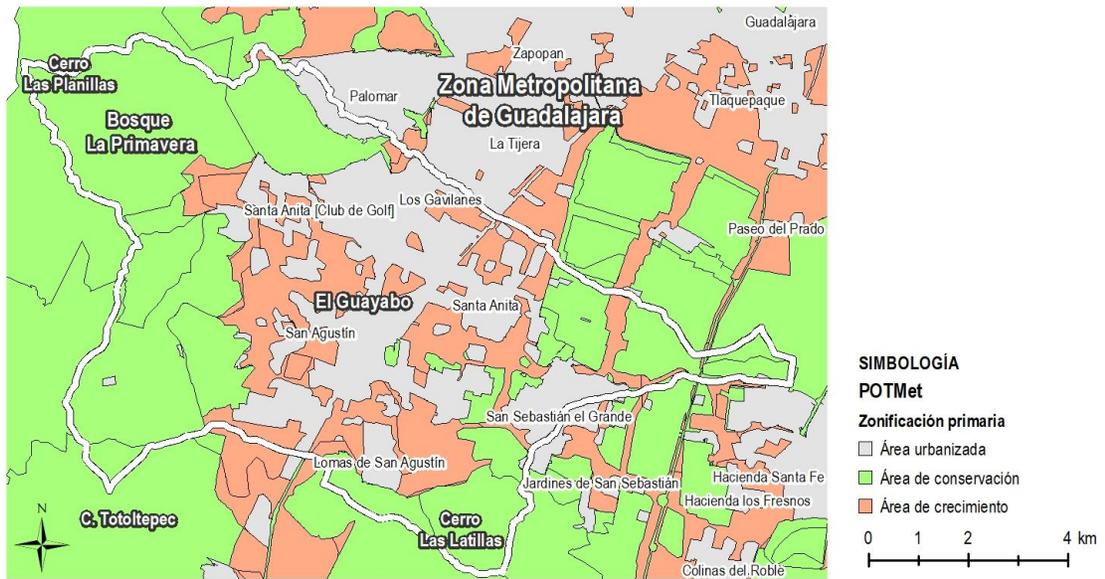


Figura 29. Zonificación primaria del POTMet en la microcuenca “El Guayabo”. Fuente: elaboración propia con datos de IMEPLAN (2017a).

La Figura 30, muestra la zonificación secundaria, la cual muestra los posibles cambios en la cobertura del suelo.

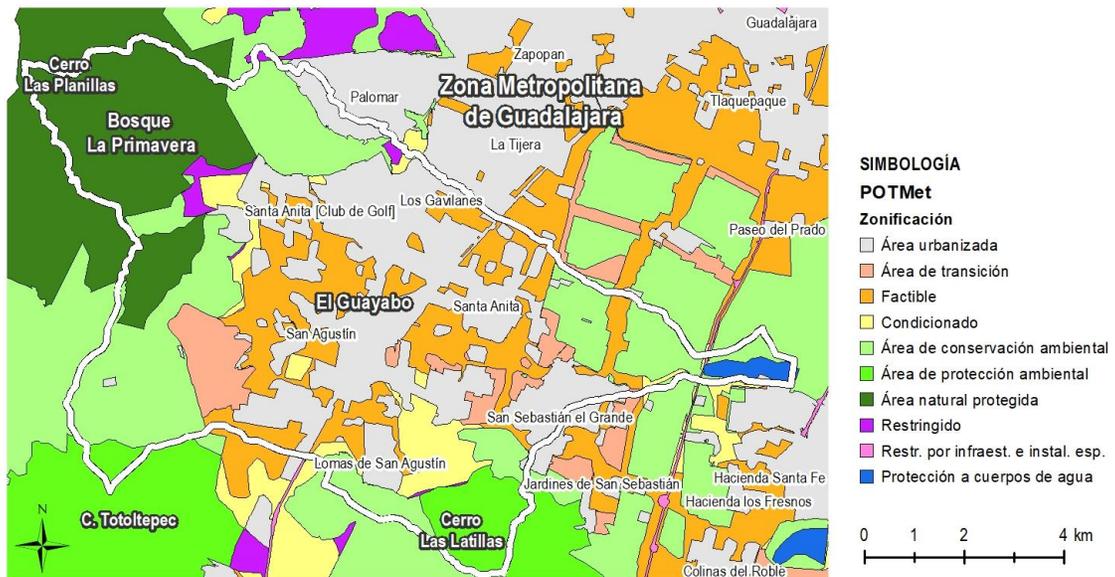


Figura 30. Zonificación secundaria del POTMet. Fuente: elaboración propia con datos de IMEPLAN (2017a).

La Figura 31, muestra los usos generales del suelo vigentes (octubre de 2015) en la microcuenca “El Guayabo”, compilados y homologados por IMEPLAN.

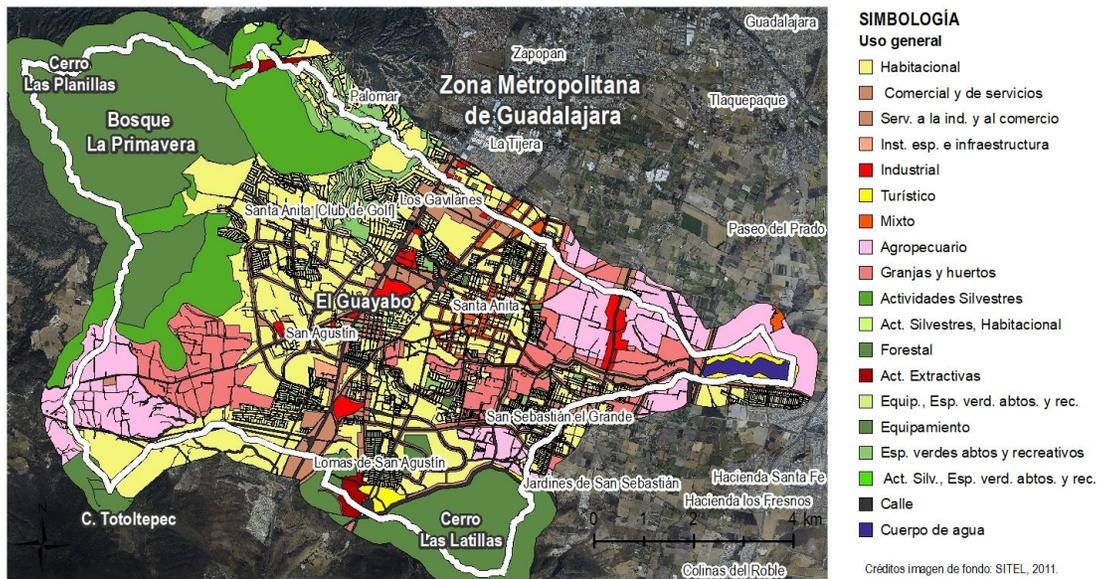


Figura 31. Usos generales de la zonificación primaria vigente la microcuenca “El Guayabo”. Fuente: elaboración propia con datos de IMEPLAN (2017a).

La Figura 32 muestra aquellos lugares donde existe conflicto entre el uso del suelo vigente, clasificado como urbano (por ejemplo, usos habitacionales, comercial y de servicios, industrial, mixto, actividades extractivas, turístico, etc.) y las zonas demarcadas como conservación en el POTMet. Para esto, se asumió que las zonas actuales clasificadas como de uso agropecuario que entran dentro de la categoría de “conservación ambiental” mantendrían dicho uso.

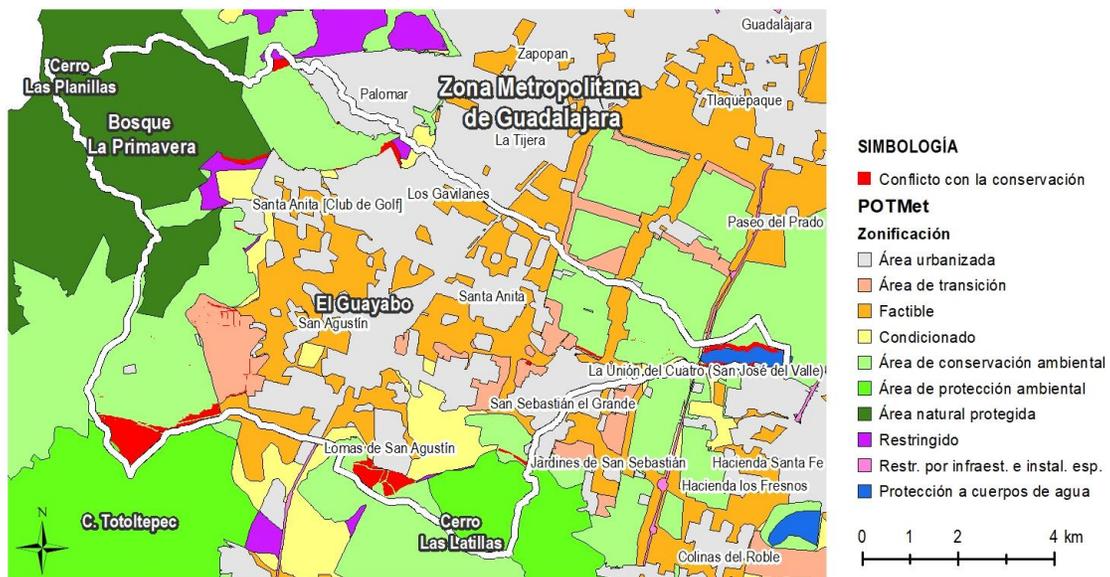


Figura 32. Zonas con conflicto entre conservación propuesta por el POTMet y el uso general del suelo del plan parcial proyectado. Fuente: Elaboración propia con datos de IMEPLAN (2017a).

La superficie de las zonas discrepantes de la Figura 32 suma un total 2.13 km², el cual representa menos del 3% de la superficie total. Por ello es razonable afirmar que para el caso de la microcuenca “El Guayabo”, el POTMet equivale al uso del suelo vigente. Sin embargo, es importante mencionar la mayor parte de estas zonas, se encuentra en el cerro Totoltepec que tiene una cobertura forestal.

5. Resultados y discusión

5.1 Análisis de los datos de precipitación

A continuación, se describen los resultados de los análisis de precipitación anual, obtenidos a partir de datos de precipitación diaria. El Cuadro 20 presenta el resumen estadístico las series de datos de precipitación anual de para las estaciones contempladas en el Cuadro 3. Existen siete estaciones donde la asimetría estandarizada o curtosis está fuera del rango de -2 a +2. Esto indica que existe no-normalidad significativa en los datos, y por tanto descarta la suposición de que los datos provienen de distribuciones normales. Para apreciar visualmente la distribución del conjunto de datos, la Figura 33, muestra el gráfico de caja y bigotes.

Cuadro 20. Resumen estadístico de los datos de precipitación anual por estación. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ERIC III.

	Media	Desv. estándar	Coef. de variación	Mínimo	Máximo	Rango	Asimetría	Curtosis
ACATLÁN DE JUÁREZ	774.59	115.88	14.96%	540.3	1049	508.7	0.980621	0.124331
GUADALAJARA (DGE)	993.48	178.52	17.97%	614.8	1567.3	952.5	1.37931	3.08838
HUERTA VIEJA	930.09	187.60	20.17%	631.8	1444.3	812.466	2.51002	1.48954
PRESA HURTADO	873.33	144.82	16.58%	610.8	1299.7	688.9	1.89745	1.70373
TLAQUEPAQUE	993.20	216.77	21.83%	674.4	1574.9	900.5	2.09899	0.422366
ZAPOPAN	1008.66	160.10	15.87%	810.97	1377.6	566.633	2.13046	-0.15882
TLAJOMULCO DE ZÚÑIGA	787.90	125.09	15.88%	409.43	1077.5	668.071	-1.39473	2.55778
LA EXPERIENCIA	930.22	156.18	16.79%	681.5	1512.4	830.921	4.19416	6.25263
TONALÁ	822.29	167.28	20.35%	368.1	1354.2	986.1	1.1668	4.6854
GUAYABO	866.61	110.91	12.80%	666.58	1139.01	472.427	1.52937	0.898303

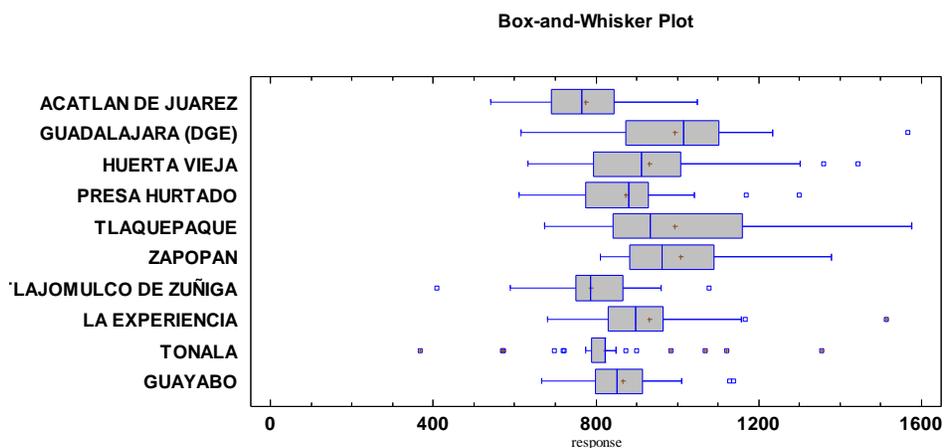


Figura 33. Diagrama de caja y bigotes de las estaciones meteorológicas. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ERIC III.

La Figura 34 muestra, de manera gráfica, las medias para cada estación y su intervalo de confianza. La gráfica está elaborada de tal manera que, si dos medias son la misma, sus intervalos se traslaparán el 95.0 %.

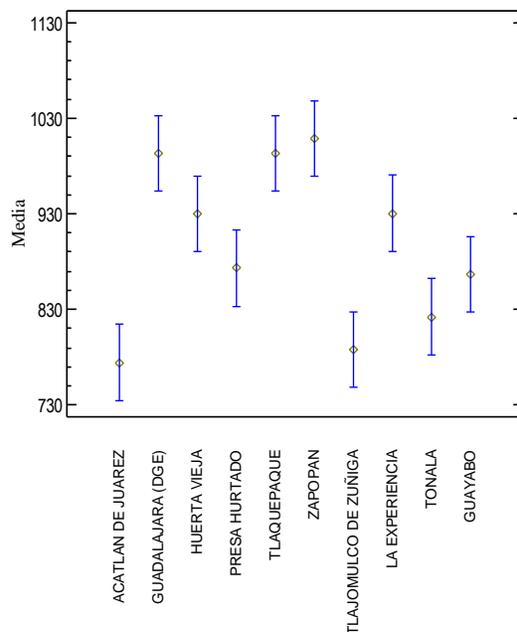


Figura 34. Gráfico de medias e intervalos de confianza 95.0%. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ERIC III.

La *Prueba F* en la tabla de ANOVA, se utilizó para probar si hay diferencias significativas entre las medias. En la tabla ANOVA (Cuadro 21) se descompone la varianza de los datos

en dos componentes: uno entre grupos y otro dentro del grupo. La *Prueba F*, que en este caso es igual a 9.09674, es una relación entre la estimación entre grupos y la estimación dentro del grupo. Dado que el *Valor-P* de la *Prueba F* es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 10 variables al nivel de confianza del 95.0%.

Cuadro 21. Tabla ANOVA. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ERIC III.

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Media al cuadrado	Prueba F	Valor-P
Entre grupos	2.08E+06	9	231423	9.10	0.0000
Dentro de grupos	7.63E+06	300	25440.2		
Total (Corr.)	9.71E+06	309			

Para determinar las medias que son significativamente diferentes de las demás, se utilizó la prueba de rangos múltiples. El Cuadro 22 muestra los resultados de la prueba de rangos múltiples para “El Guayabo”. El resultado completo se puede consultar en el Anexo 4.

Cuadro 22. Prueba de rangos múltiples "El Guayabo". Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ERIC III.

Comparativa	Diferencia	+/- Límites
ACATLÁN DE JUÁREZ – GUAYABO *	-92.012	79.7258
GUADALAJARA (DGE) - GUAYABO *	126.872	79.7258
HUERTA VIEJA - GUAYABO	63.489	79.7258
PRESA HURTADO - GUAYABO	6.71198	79.7258
TLAQUEPAQUE - GUAYABO *	126.593	79.7258
ZAPOPAN - GUAYABO *	142.058	79.7258
TLAJOMULCO DE ZÚÑIGA - GUAYABO	-78.7098	79.7258
LA EXPERIENCIA - GUAYABO	63.6118	79.7258
TONALÁ - GUAYABO	-44.4162	79.7258

* Denota diferencia estadísticamente significativa

Cuadro 23. Homogeneidad de grupos para las estaciones meteorológicas. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ERIC III.

	Media	Grupos homogéneos
ACATLAN DE JUAREZ	774.593	X
TLAJOMULCO DE ZUÑIGA	787.895	XX
TONALA	822.189	XXX
GUAYABO	866.605	XXX
PRESA HURTADO	873.317	XX
HUERTA VIEJA	930.094	XX
LA EXPERIENCIA	930.217	XX
TLAQUEPAQUE	993.198	X
GUADALAJARA (DGE)	993.477	X
ZAPOPAN	1008.66	X

Se utilizó la prueba de Bartlett para probar la igualdad de varianzas entre las estaciones meteorológicas. A continuación, se presentan los resultados:

Cuadro 24. Prueba de Bartlett. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ERIC III.

	Test	Valor-P
Bartlett's	1.08555	0.00381065

La prueba de Bartlett compara un promedio ponderado de las varianzas intra-muestra con su media geométrica. Un *Valor-P* menor de 0.05, indica una diferencia significativa entre desviaciones estándar intra-muestra a un nivel de significancia del 5%. El Cuadro 25 muestra una comparación de las desviaciones estándar para cada par de muestras. Valores-P por debajo de 0.05, de los cuales hay doce, indican una diferencia estadísticamente significativa entre las dos sigmas en el nivel de significación del 5%.

Cuadro 25. Análisis de varianza por prueba de Bartlett. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ERIC

III.

Comparativa	Sigma1	Sigma2	Razón F	Valor-P
ACATLAN DE JUAREZ / GUADALAJARA (DGE)	115.875	178.515	0.421336	0.0207
ACATLAN DE JUAREZ / HUERTA VIEJA	115.875	187.598	0.381526	0.0102
ACATLAN DE JUAREZ / PRESA HURTADO	115.875	144.819	0.64022	0.2277
ACATLAN DE JUAREZ / TLAQUEPAQUE	115.875	216.765	0.285759	0.001
ACATLAN DE JUAREZ / ZAPOPAN	115.875	160.095	0.52387	0.0817
ACATLAN DE JUAREZ / TLAJOMULCO DE ZUÑIGA	115.875	125.088	0.858119	0.6779
ACATLAN DE JUAREZ / LA EXPERIENCIA	115.875	156.18	0.55046	0.1075
ACATLAN DE JUAREZ / TONALA	115.875	167.283	0.479816	0.0485
ACATLAN DE JUAREZ / GUAYABO	115.875	110.91	1.09154	0.812
GUADALAJARA (DGE) / HUERTA VIEJA	178.515	187.598	0.905513	0.7875
GUADALAJARA (DGE) / PRESA HURTADO	178.515	144.819	1.5195	0.2575
GUADALAJARA (DGE) / TLAQUEPAQUE	178.515	216.765	0.67822	0.2931
GUADALAJARA (DGE) / ZAPOPAN	178.515	160.095	1.24335	0.5545
GUADALAJARA (DGE) / TLAJOMULCO DE ZUÑIGA	178.515	125.088	2.03666	0.0558
GUADALAJARA (DGE) / LA EXPERIENCIA	178.515	156.18	1.30646	0.4685
GUADALAJARA (DGE) / TONALA	178.515	167.283	1.1388	0.7242
GUADALAJARA (DGE) / GUAYABO	178.515	110.91	2.59065	0.0111
HUERTA VIEJA / PRESA HURTADO	187.598	144.819	1.67805	0.1621
HUERTA VIEJA / TLAQUEPAQUE	187.598	216.765	0.74899	0.4333
HUERTA VIEJA / ZAPOPAN	187.598	160.095	1.37309	0.3902
HUERTA VIEJA / TLAJOMULCO DE ZUÑIGA	187.598	125.088	2.24918	0.0298
HUERTA VIEJA / LA EXPERIENCIA	187.598	156.18	1.44279	0.3208
HUERTA VIEJA / TONALA	187.598	167.283	1.25763	0.534
HUERTA VIEJA / GUAYABO	187.598	110.91	2.86098	0.0052
PRESA HURTADO / TLAQUEPAQUE	144.819	216.765	0.446345	0.0306
PRESA HURTADO / ZAPOPAN	144.819	160.095	0.818266	0.5863
PRESA HURTADO / TLAJOMULCO DE ZUÑIGA	144.819	125.088	1.34035	0.4271
PRESA HURTADO / LA EXPERIENCIA	144.819	156.18	0.859799	0.6818
PRESA HURTADO / TONALA	144.819	167.283	0.749455	0.4342
PRESA HURTADO / GUAYABO	144.819	110.91	1.70494	0.1497
TLAQUEPAQUE / ZAPOPAN	216.765	160.095	1.83326	0.1023
TLAQUEPAQUE / TLAJOMULCO DE ZUÑIGA	216.765	125.088	3.00295	0.0035
TLAQUEPAQUE / LA EXPERIENCIA	216.765	156.18	1.92631	0.0775
TLAQUEPAQUE / TONALA	216.765	167.283	1.6791	0.1616

TLAQUEPAQUE / GUAYABO	216.765	110.91	3.81978	0.0004
ZAPOPAN / TLAJOMULCO DE ZUÑIGA	160.095	125.088	1.63804	0.1823
ZAPOPAN / LA EXPERIENCIA	160.095	156.18	1.05076	0.893
ZAPOPAN / TONALA	160.095	167.283	0.915907	0.8115
ZAPOPAN / GUAYABO	160.095	110.91	2.0836	0.0486
TLAJOMULCO DE ZUÑIGA / LA EXPERIENCIA	125.088	156.18	0.641473	0.2298
TLAJOMULCO DE ZUÑIGA / TONALA	125.088	167.283	0.559149	0.1169
TLAJOMULCO DE ZUÑIGA / GUAYABO	125.088	110.91	1.27201	0.514
LA EXPERIENCIA / TONALA	156.18	167.283	0.871664	0.7092
LA EXPERIENCIA / GUAYABO	156.18	110.91	1.98295	0.0655
TONALA / GUAYABO	167.283	110.91	2.2749	0.0276

Los resultados obtenidos en las pruebas estadísticas de precipitación total anual plantean una heterogeneidad espacial debido a localidad de los fenómenos, o bien una falla en las bases de datos.

5.1.1 Determinación de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la ecuación de Bell (Ecuación 9) para la obtención de las curvas IDF para los periodos de retorno a analizar.

Cuadro 26. Altura de precipitación (mm) para la microcuenca “El Guayabo” de acuerdo con la ecuación de Bell.

Fuente: Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ERIC III.

Tr en años	Duraciones en minutos									
	5	10	15	20	30	45	60	80	100	120
2	9.11	13.63	16.67	19.02	22.63	26.62	29.71	33.03	35.77	38.13
5	12.02	18.00	22.00	25.10	29.86	35.13	39.21	43.59	47.22	50.33
10	14.23	21.30	26.03	29.70	35.34	41.58	46.40	51.59	55.87	59.56
20	16.43	24.59	30.07	34.30	40.81	48.02	53.59	59.58	64.53	68.78
25	17.14	25.66	31.37	35.78	42.58	50.09	55.90	62.15	67.32	71.76
50	19.34	28.96	35.40	40.39	48.05	56.53	63.09	70.14	75.97	80.98
100	21.55	32.25	39.43	44.99	53.52	62.97	70.28	78.14	84.63	90.21

A partir de esta información, es posible construir las curvas IDF para la microcuenca “El Guayabo”.

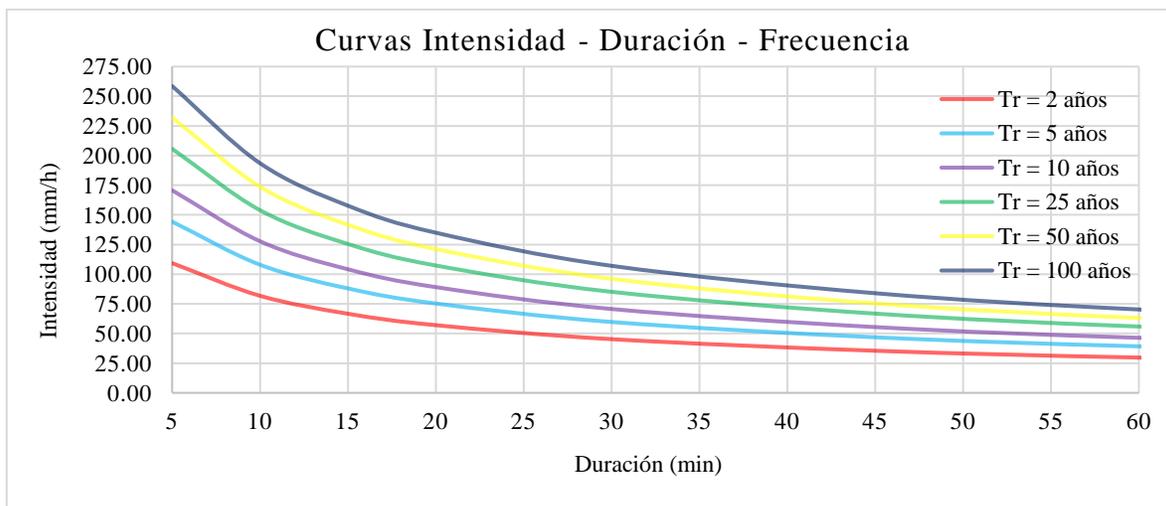


Figura 35. Curvas IDF para la microcuenca “El Guayabo” obtenidas mediante la ecuación de Bell. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ERIC III.

5.1.2 Resultados de precipitaciones máximas diarias

Para el caso del método California, el Cuadro 27 presenta los máximos diarios anuales con los 31 años de datos interpolados al centroide de microcuenca. Donde P, corresponde a datos de precipitación máxima en el año ordenado de mayor a menor).

Cuadro 27. Cálculos auxiliares para el procesamiento estadístico de la serie de máximos anuales por el criterio de interpolación. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ERIC III.

TR	No.de orden (m)	P(mm)	Te	logTe
31	1	81.5838775	31.000	1.477121
30	2	75.4392681	15.500	1.176091
29	3	74.4114061	10.333	1.000000
28	4	74.005494	7.750	0.875061
27	5	73.6287878	6.200	0.778151
26	6	67.9720108	5.167	0.698970
25	7	67.7167789	4.429	0.633468
24	8	67.5691975	3.875	0.568202
23	9	66.6170302	3.444	0.518514
22	10	66.5593627	3.100	0.477121
21	11	66.4503369	2.818	0.431364
20	12	65.8112462	2.583	0.397940

19	13	61.6813343	2.385	0.361728
18	14	61.4690073	2.214	0.322219
17	15	56.6535707	2.067	0.301030
16	16	55.7823289	1.938	0.278754
15	17	55.0000462	1.824	0.255273
14	18	54.1497247	1.722	0.204120
13	19	54.0475631	1.632	0.204120
12	20	52.1135237	1.550	0.176091
11	21	51.6221488	1.476	0.146128
10	22	51.2471192	1.409	0.146128
9	23	48.9016962	1.348	0.113943
8	24	48.7418515	1.292	0.079181
7	25	48.6282681	1.240	0.079181
6	26	47.0715167	1.192	0.041393
5	27	46.8187118	1.148	0.041393
4	28	45.8074151	1.107	0.041393
3	29	43.2108578	1.069	0.000000
2	30	42.7441139	1.033	0.000000
1	31	39.7378064	1.000	
	Suma	2374.9	124.845	11.824
	Media	79.2	4.027	0.394

Posteriormente, se realizó un ajuste logarítmico con los datos del Cuadro 27 para obtener la precipitación en función del periodo de retorno, ver Figura 36. El ajuste mostró un coeficiente de determinación (R^2) de 0.8918.

$$P(Tr) = 12.114\ln(Tr) + 47.662$$

Ecuación 35

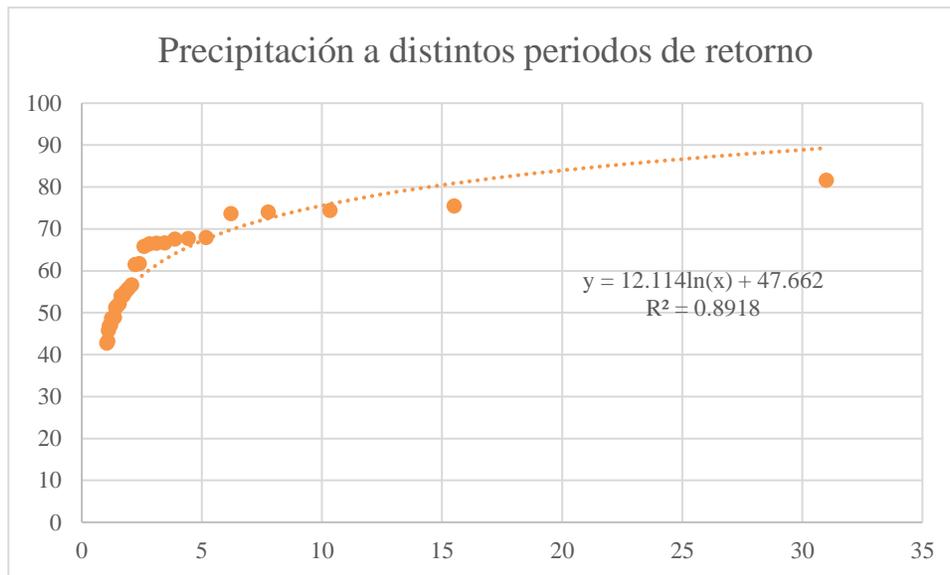


Figura 36. Ajuste para obtener la precipitación en función del periodo de retorno. Fuente: Elaboración propia.

Se aplicó la Ecuación 35 para obtener la precipitación para los distintos periodos de retorno, posteriormente se multiplicó por el factor de corrección 1.13, sugerido por Weiss (1964) para precipitaciones de 24 horas. El siguiente cuadro muestra las precipitaciones máximas diarias obtenidas a los distintos periodos de retorno.

Para el caso del método Gumbel, las precipitaciones se obtuvieron directamente del software *EasyFit*.

El Cuadro 28, presenta los resultados obtenidos a partir los métodos California y Gumbel, para las precipitaciones máximas en 24 horas, para los periodos de retorno analizados Asimismo, se muestran las precipitaciones utilizadas para la determinación de riesgo en el estudio de la CEA (2011).

Cuadro 28. Comparativa de las precipitaciones diarias máximas. Fuente: Elaboración propia.

Método	P ₂	P ₅	P ₁₀	P ₂₅	P ₅₀	P ₁₀₀
Gumbel	63.96	75.26	82.72	92.10	99.10	106.11
California	63.34	75.89	85.38	97.92	107.41	116.90
Estudio CEA	-	75.09	85.50	97.41	105.82	113.69

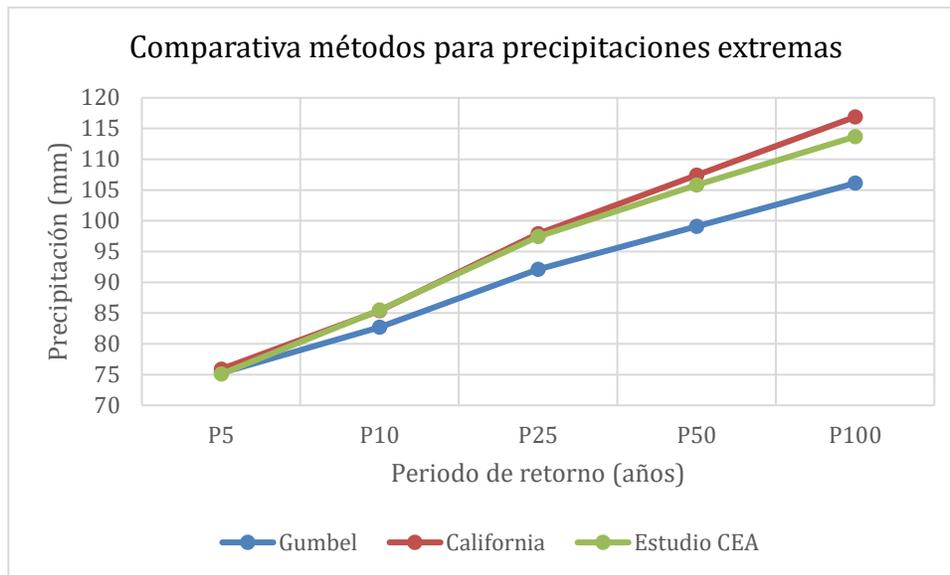


Figura 37. Precipitaciones extremas (mm) por periodo de retorno (años). Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ERIC III.

De acuerdo con el Cuadro 28 y la Figura 37, las precipitaciones resultantes presentan bastante similitud entre sí. Por lo general, entre más pequeños los periodos de retorno, las precipitaciones son más parecidas entre sí. El método de Gumbel es el que presenta, con excepción del periodo de retorno de 2 años, las menores magnitudes. Se eligieron los resultados de dicho método para utilizar como insumo en el modelado matemático, puesto que se pretende evitar sobreestimar el servicio ecosistémico de regulación de inundaciones.

5.2 Modelado hidrológico

A continuación, se presentan los resultados de modelado hidrológico, así como de los insumos utilizados.

5.2.1 Grupo de suelo hidrológico

La Figura 38, muestra el resultado de la asignación de los Grupos de Suelo Hidrológicos de acuerdo la carta edafológica, escala 1:50,000 (CETENAL, 1975a). Se aprecia que los grupos predominantes en el área de estudio son A y B, y sólo hay presencia del Grupo C en las presas. En la zona forestal, correspondiente a ANP del Bosque La Primavera, el grupo

predominante es A. En la parte media de la microcuenca el grupo con mayor representatividad es el Grupo B.

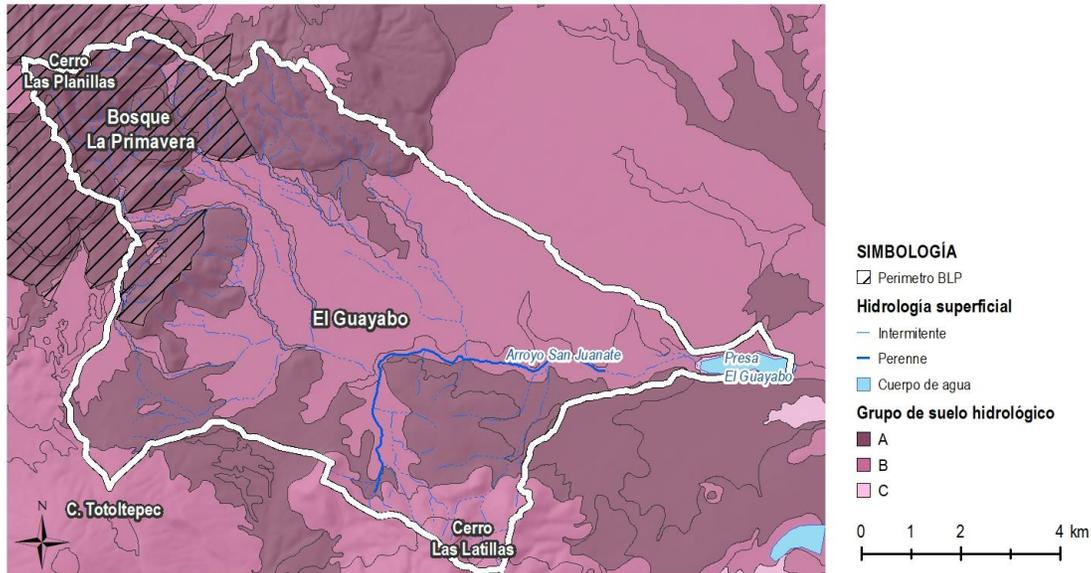


Figura 38. Mapa resultante de los grupos hidrológicos del suelo. Fuente: elaboración propia a partir de datos de INEGI y CEA (2011)

Se recomienda, en la medida de lo posible, muestrear directamente en campo, las tasas de infiltración de cada suelo, para poder asignar el grupo hidrológico del suelo. Asimismo, podría asignarse, de una manera más conservadora, el *Feozem hálpico* con textura media como Grupo C.

5.3 Escenarios de cobertura y uso del suelo

A continuación, se presentan los mapas resultantes de la foto interpretación de la ortofotografía de alta resolución (Cuadro 9) para la obtención de las capas de los escenarios a modelar:

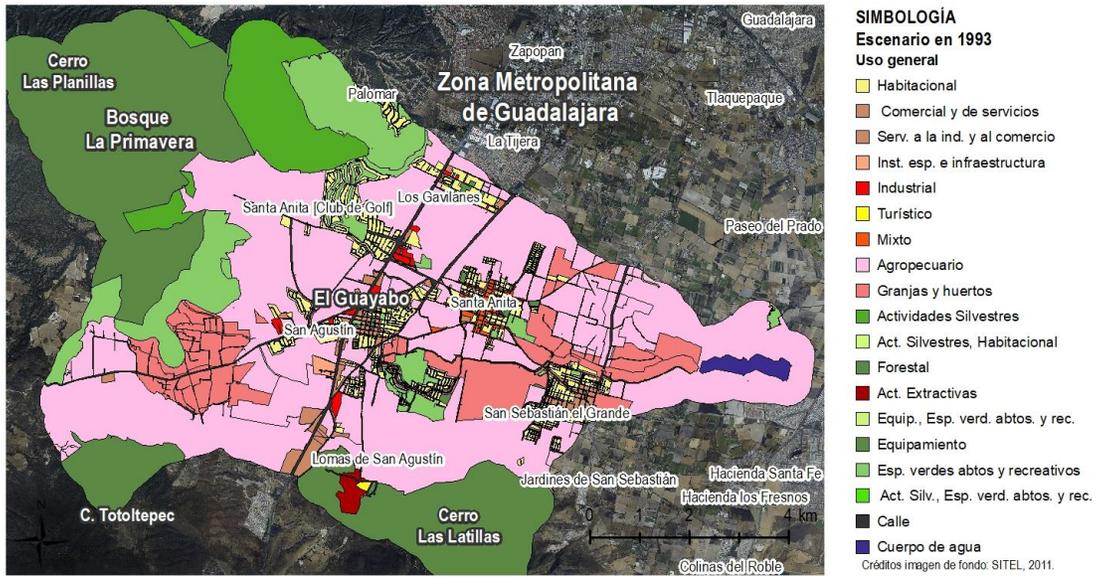


Figura 39. Escenario de uso del suelo en 1993. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de IMEPLAN.

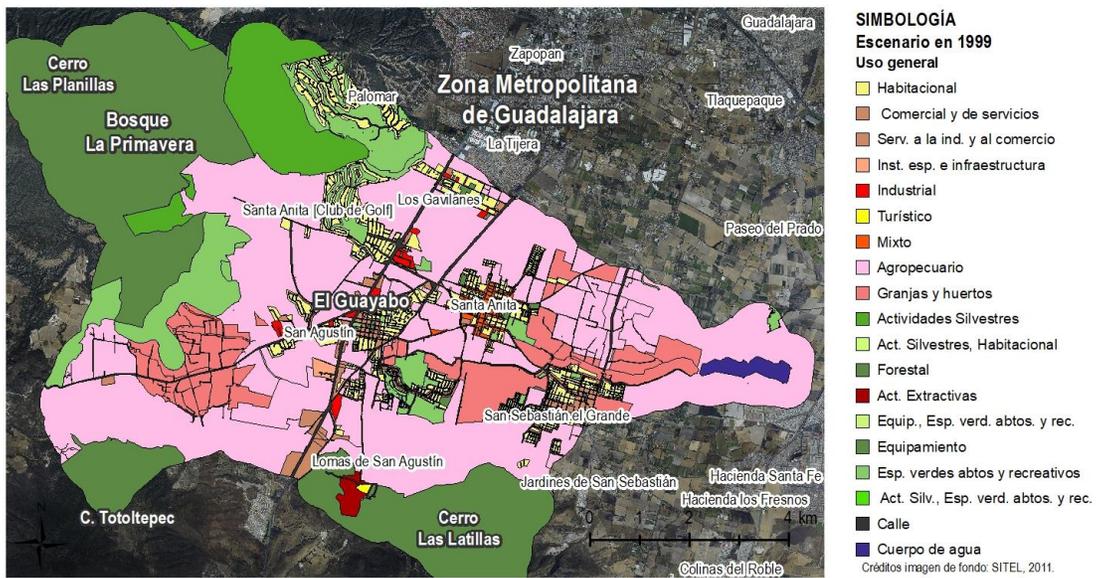


Figura 40. Escenario de uso del suelo en 1999. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de IMEPLAN.

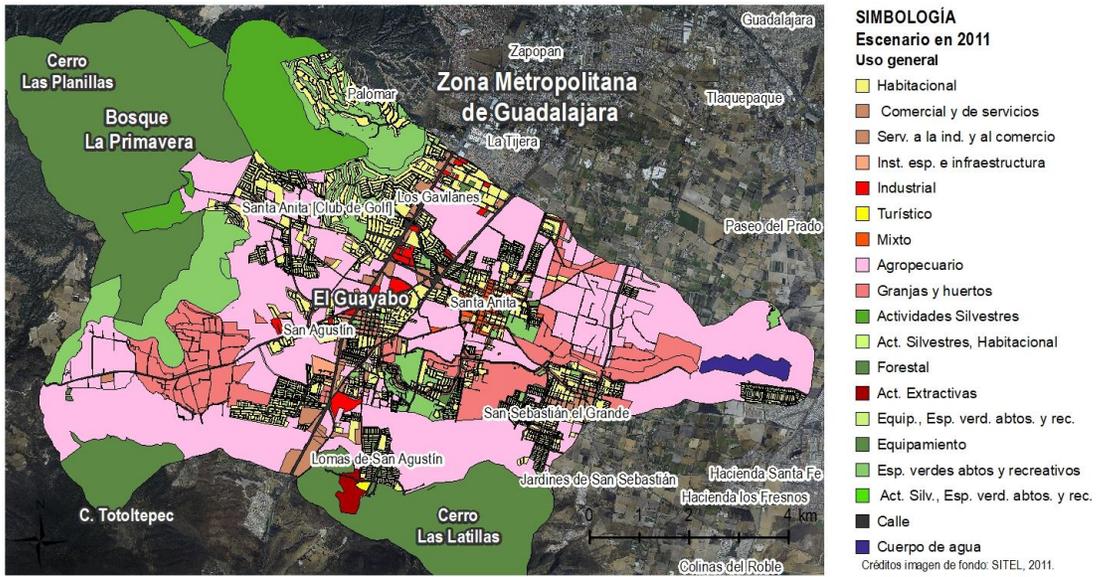


Figura 41. Escenario de uso del suelo en 2011. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de IMEPLAN.

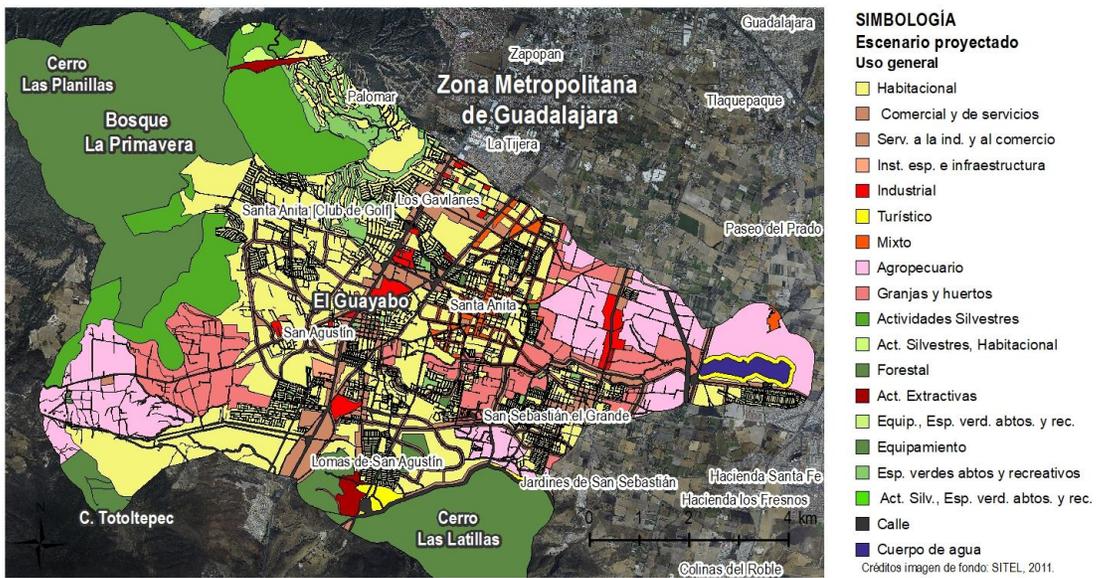


Figura 42. Escenario de uso del suelo proyectado. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de IMEPLAN.

El Cuadro 29 muestra para cada uso general del suelo, las superficies y porcentajes correspondientes para cada uno de los cuatro escenarios a modelar.

Cuadro 29. Áreas y porcentaje de los usos generales en los escenarios modelados. Fuente: elaboración propia.

Uso General	Escenario 1993		Escenario 1999		Escenario 2011		Escenario proyectado	
	Área (ha)	Porc.	Área (ha)	Porc.	Área (ha)	Porc.	Área (ha)	Porc.
Actividades Extractivas	21	0.3%	21	0.3%	21	0%	30	0%
Actividades Silvestres	415	5.4%	415	5.4%	415	5%	659	9%
Actividades Silvestres, Habitacional	0	0.0%	0	0.0%	0	0%	8	0%
Agropecuario	3103	40.5%	3083	40.2%	2259	29%	584	8%
Calle	318	4.2%	340	4.4%	558	7%	781	10%
Comercial y de servicios	148	1.9%	149	1.9%	231	3%	555	7%
Cuerpo de agua	54	0.7%	54	0.7%	54	1%	54	1%
Equipamiento	25	0.3%	27	0.4%	36	0%	68	1%
Espacios verdes abiertos y recreativos	620	8.1%	575	7.5%	615	8%	203	3%
Forestal	1700	22.2%	1700	22.2%	1701	22%	1590	21%
Granjas y huertos	745	9.7%	726	9.5%	697	9%	612	8%
Habitacional	407	5.3%	464	6.1%	934	12%	2197	29%
Industrial	31	0.4%	33	0.4%	60	1%	106	1%
Instalaciones especiales e infraestructura	15	0.2%	15	0.2%	18	0%	18	0%
Mixto	55	0.7%	56	0.7%	61	1%	141	2%
Servicios a la industria y al comercio	3	0.0%	3	0.0%	3	0%	3	0%
Turístico	4	0.1%	4	0.1%	4	0%	58	1%

De acuerdo con el Cuadro 29 y la Figura 43, se observa una tendencia a la pérdida de superficie de uso agrícola para su conversión a uso habitacional. En el escenario proyectado ocurrirá la mayor pérdida de superficie agrícola: cerca de 2,520 ha desde el año 1993. La superficie forestal, debido al estatus de protección del Bosque La Primavera, permanece prácticamente sin cambio.

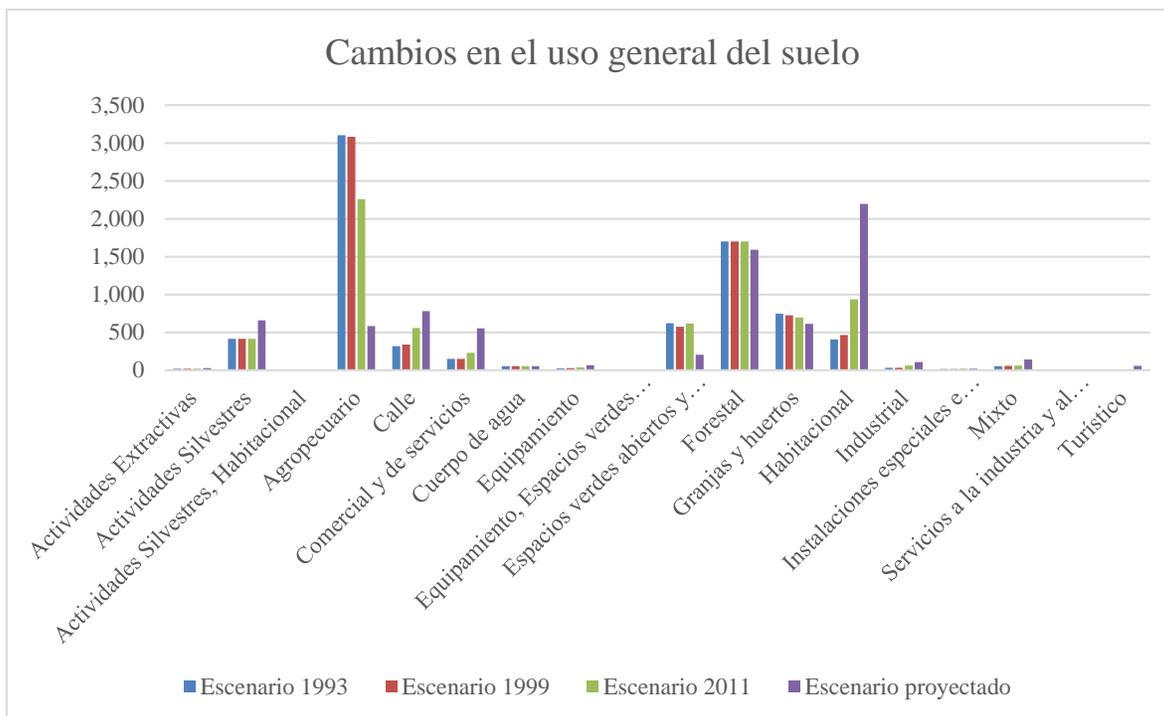


Figura 43. Superficie por uso del suelo para los escenarios a modelar. Fuente: elaboración propia derivado datos obtenidos de IMEPLAN.

5.4 Número de curva

Se realizó, en WMS, un análisis de superposición de mapas entre los datos de Grupo de Suelo Hidrológico (Figura 38) y los datos de los escenarios de uso del suelo datos (Figura 39, Figura 40, Figura 41 y Figura 42). Posteriormente, se aplicó la Ecuación 22 para obtener los CN ponderados para cada escenario y sus mapas resultantes. A continuación, se presentan los reportes generados³⁸ por el WMS, para cada escenario.

³⁸ Expresados en millas cuadradas.

=====
 Runoff Curve Number Report
 (Generated by WMS)
 =====

Tue Apr 10 11:21:09 2018

Runoff Curve Number Report for Basin 1B

HSG	Land Use Description	CN	Area mi^2	Product CN x A
A	Deciduous Forest Land	36	6.179	222.439
A	Cropland and Pasture	59	3.094	182.552
B	Cropland and Pasture	74	8.287	613.222
B	Streets and Roads	98	0.874	85.653
B	Commercial and Services	92	0.341	31.390
B	Open Spaces, lawns, golf courses, etc.	79	0.458	36.185
A	Commercial and Services	89	0.238	21.215
B	Deciduous Forest Land	60	2.089	125.353
A	Open Spaces, lawns, golf courses, etc.	68	1.767	120.137
B	Orchards, Groves, Vineyards, Nurseries, and Or	74	1.505	111.369
A	Orchards, Groves, Vineyards, Nurseries, and Or	59	0.991	58.461
A	Streets and Roads	98	0.351	34.353
B	Mixed Urban or Built-up Land	88	0.215	18.920
B	Residential	85	1.103	93.758
B	Industrial	88	0.136	11.928
A	Industrial	81	0.065	5.300
A	Residential	77	0.519	39.948
B	Strip Mines, Quarries and Gravel Pits	86	0.023	2.010
A	Strip Mines, Quarries and Gravel Pits	77	0.009	0.720
A	Mixed Urban or Built-up Land	81	0.014	1.136

CN (Weighted) = Total Product \ Total Area
 =====
 64.2661

Figura 44. Reporte del WMS del número de curva ponderado para el escenario de 1993. Fuente: elaboración propia.

=====
 Runoff Curve Number Report
 (Generated by WMS)
 =====

Fri Jan 12 13:11:01 2018

Runoff Curve Number Report for Basin 1B

HSG	Land Use Description	CN	Area mi ²	Product CN x A
A	Cropland and Pasture	59	3.669	216.452
B	Cropland and Pasture	74	9.792	724.638
B	Streets and Roads	98	1.074	105.295
B	Commercial and Services	92	0.406	37.388
B	Open Spaces, lawns, golf courses, etc.	79	0.568	44.859
A	Commercial and Services	89	0.284	25.269
B	Deciduous Forest Land	60	2.143	128.598
A	Open Spaces, lawns, golf courses, etc.	68	2.244	152.559
A	Deciduous Forest Land	36	2.004	72.149
B	Orchards, Groves, Vineyards, Nurseries, and Or	74	1.787	132.239
A	Orchards, Groves, Vineyards, Nurseries, and Or	59	1.102	65.034
A	Streets and Roads	98	0.445	43.646
B	Mixed Urban or Built-up Land	88	0.256	22.535
B	Residential	85	1.358	115.460
B	Industrial	88	0.173	15.187
A	Residential	77	0.818	63.013
A	Industrial	81	0.078	6.313
B	Strip Mines, Quarries and Gravel Pits	86	0.028	2.394
A	Strip Mines, Quarries and Gravel Pits	77	0.011	0.857
A	Mixed Urban or Built-up Land	81	0.017	1.353

CN (Weighted) = Total Product \ Total Area
 =====
 69.8995

Figura 45. Reporte del WMS del número de curva ponderado para el escenario de 1999. Fuente: elaboración propia.

=====
 Runoff Curve Number Report
 (Generated by WMS)
 =====

Thu Apr 12 13:00:57 2018

Runoff Curve Number Report for Basin 1B

HSG	Land Use Description	CN	Area mi ²	Product CN x A
A	Cropland and Pasture	59	2.859	168.661
B	Cropland and Pasture	74	6.255	462.876
B	Streets and Roads	98	1.919	188.060
B	Commercial and Services	92	0.770	70.827
B	Open Spaces, lawns, golf courses, etc.	79	0.730	57.688
A	Commercial and Services	89	0.362	32.243
B	Deciduous Forest Land	60	2.179	130.762
A	Open Spaces, lawns, golf courses, etc.	68	2.349	159.745
A	Deciduous Forest Land	36	2.038	73.363
B	Orchards, Groves, Vineyards, Nurseries, and Or	74	1.925	142.423
A	Orchards, Groves, Vineyards, Nurseries, and Or	59	1.036	61.119
A	Streets and Roads	98	0.708	69.344
B	Mixed Urban or Built-up Land	88	0.272	23.911
B	Residential	85	3.068	260.789
A	Residential	77	1.342	103.302
B	Industrial	88	0.260	22.915
A	Industrial	81	0.130	10.546
B	Strip Mines, Quarries and Gravel Pits	86	0.028	2.434
A	Strip Mines, Quarries and Gravel Pits	77	0.011	0.872
A	Mixed Urban or Built-up Land	81	0.017	1.376

=====
 CN (Weighted) = Total Product \ Total Area
 =====
 72.3065

Figura 46. Reporte del WMS del número de curva ponderado para el escenario de 2010. Fuente: elaboración propia.

=====

Runoff Curve Number Report
(Generated by WMS)

=====

Wed Apr 11 12:39:09 2018

Runoff Curve Number Report for Basin 1B

HSG	Land Use Description	CN	Area mi^2	Product CN x A
A	Cropland and Pasture	59	1.060	62.535
B	Cropland and Pasture	74	1.293	95.708
B	Streets and Roads	98	2.719	266.482
B	Commercial and Services	92	2.063	189.802
A	Commercial and Services	89	0.858	76.365
B	Residential	85	7.306	621.000
A	Residential	77	3.148	242.413
B	Deciduous Forest Land	60	1.823	109.399
A	Streets and Roads	98	1.363	133.550
B	Orchards, Groves, Vineyards, Nurseries, and Or	74	2.145	158.736
A	Deciduous Forest Land	36	0.593	21.350
A	Orchards, Groves, Vineyards, Nurseries, and Or	59	1.003	59.185
B	Mixed Urban or Built-up Land	88	0.814	71.620
A	Open Spaces, lawns, golf courses, etc.	68	0.688	46.763
A	Strip Mines, Quarries and Gravel Pits	77	0.057	4.372
A	Mixed Urban or Built-up Land	81	0.076	6.132
B	Industrial	88	0.517	45.526
B	Open Spaces, lawns, golf courses, etc.	79	0.549	43.362
A	Industrial	81	0.151	12.265
B	Strip Mines, Quarries and Gravel Pits	86	0.032	2.713

CN (Weighted) = Total Product \ Total Area

=====

80.305

Figura 47. Reporte del WMS del número de curva ponderado para el escenario proyectado. Fuente: elaboración propia.

El Cuadro 30, sintetiza los números de curva ponderados para cada escenario.

Cuadro 30. Número de curva ponderado para cada escenario. Fuente: Elaboración propia.

Escenario	CN
1993	64.3
1999	69.9
2011	72.3
Proyectado	80.3

A continuación, se presentan los mapas de número de curva para cada uno de los escenarios modelado.

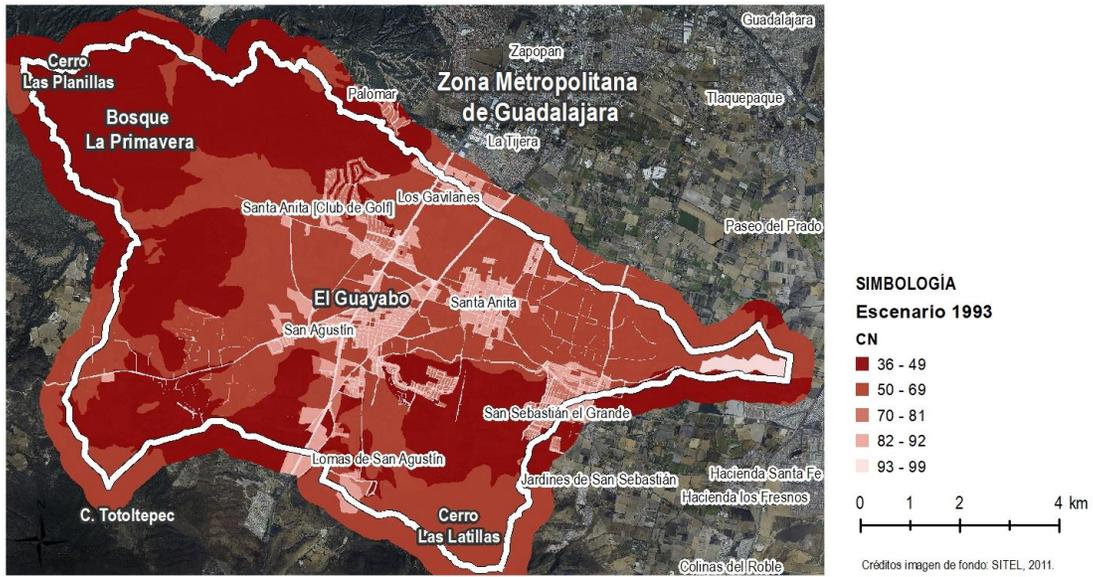


Figura 48. Números de curva del escenario 1993. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IMEPLAN, INEGI y CEA (2011).

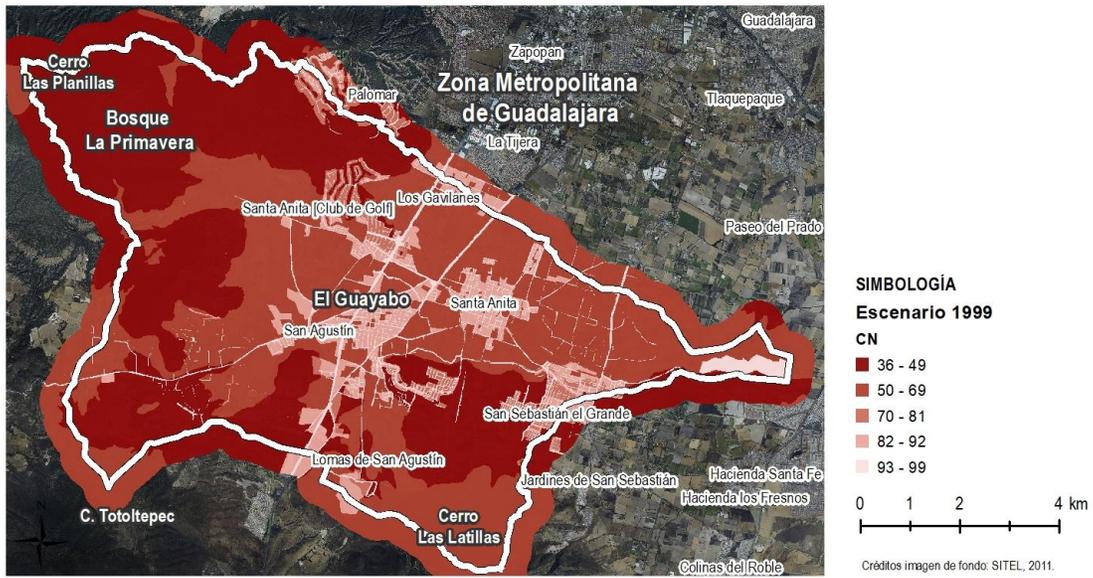


Figura 49. Números de curva del escenario 1999. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IMEPLAN, INEGI y CEA (2011).

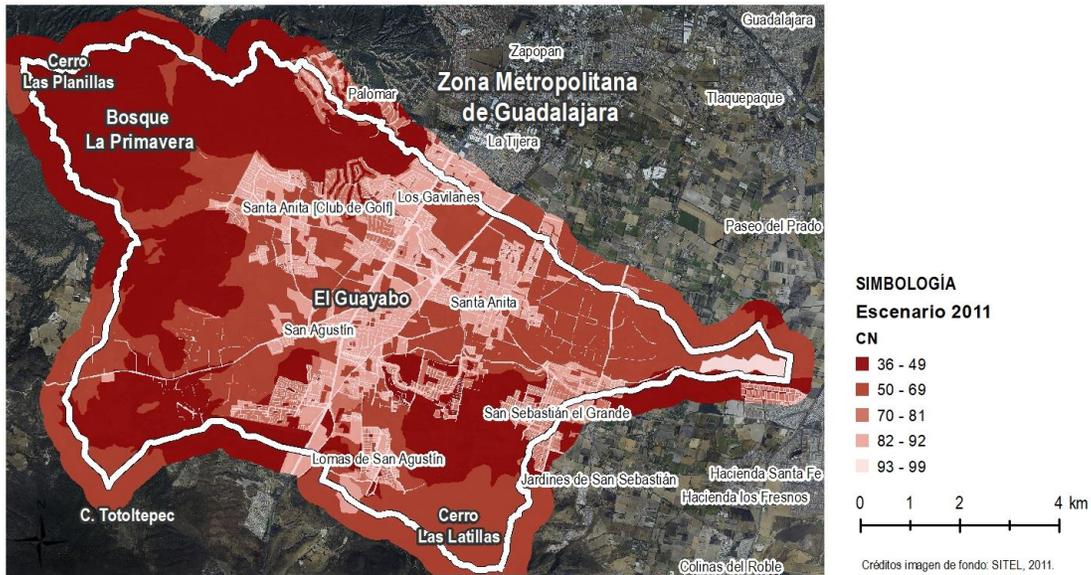


Figura 50. Número de curva del escenario 2011. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IMEPLAN, INEGI y CEA (2011).

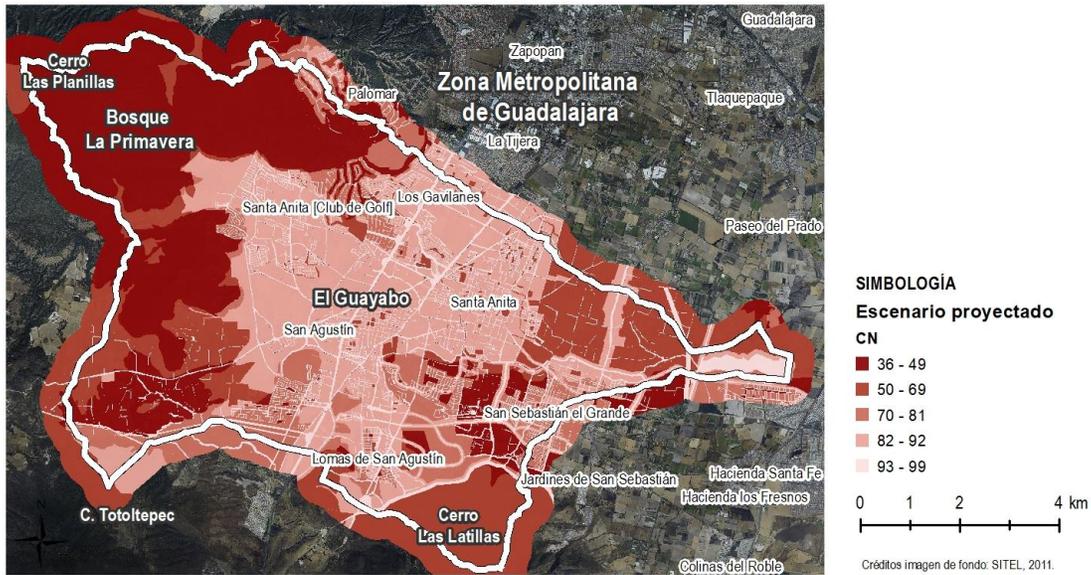


Figura 51. Número de curva del escenario proyectado. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IMEPLAN, INEGI y CEA (2011).

De acuerdo con el cuadro y figuras anteriores, los cambios del uso general del suelo han propiciado un aumento en los números de curva ponderados. Principalmente debido a la pérdida de superficies agrícolas que se han transformado en zonas urbanas.

5.4.1 Tiempos de concentración resultantes para la microcuenca “El Guayabo”.

Los tiempos de concentración para cada escenario se calcularon directamente en WMS, mediante la Ecuación 25. El cuadro siguiente presenta los T_c resultantes para cada uno de los escenarios a modelar. Los cambios en la cobertura y uso general del suelo han disminuido los tiempos de concentración dentro de la microcuenca.

Cuadro 31. Tiempos de concentración resultantes para los escenarios modelados. Fuente: elaboración propia.

Escenario	Tc (h)
1993	6.25
1999	5.39
2011	5.05
Proyectado	3.99

5.5 Modelado de TR-20

5.5.1 Comparación del TR-20 con otros métodos

A continuación, se presentan los resultados para el caudal máximo (q_p) y el volumen de escorrentía, del TR-20, así como de los distintos métodos utilizados en el estudio de la CEA (2011). Es importante mencionar, que dicho estudio eligió el modelo del Hidrograma Unitario Triangular como el mejor para utilizar como insumo en el modelo hidráulico para cálculo de las cotas y superficies de inundación.

Cuadro 32. Resultado de los distintos métodos de descarga máxima expresada en m³/s para distintos periodos de retorno. Fuente: elaboración propia con datos de CEA (2011)

Método	Periodo de retorno				
	5	10	25	50	100
Pai Wu	85.90	128.64	185.12	229.26	273.38
D.M. Gray	133.85	169.30	211.88	243.00	272.77
Hidrograma Unitario Triangular	74.27	105.01	145.32	177.18	208.77
Burkli-Ziegler	73.26	84.06	98.31	109.11	119.92
Mac-Math	100.73	115.58	135.17	150.02	164.88
Racional	359.99	413.07	483.07	536.16	589.24
Promedio	138.00	169.28	209.81	240.79	271.49
TR-20	60.51	81.55	108.62	128.78	148.44

En el Cuadro 33 se presenta la diferencia porcentual entre los resultados obtenidos por el TR-20 y los distintos métodos, para cada periodo de retorno analizado.

Cuadro 33. Diferencias porcentuales de los caudales máximos entre el TR-20 y los métodos utilizados por la CEA (2011). Fuente: elaboración propia con datos de CEA (2011).

Método	Periodo de retorno				
	5	10	25	50	100
Pai Wu	30%	37%	41%	44%	46%
D.M. Gray	55%	52%	49%	47%	46%
Hidrograma Unitario Triangular	19%	22%	25%	27%	29%
Burkli-Ziegler	17%	3%	-10%	-18%	-24%
Mac-Math	40%	29%	20%	14%	10%
Racional	83%	80%	78%	76%	75%
Promedio	56%	52%	48%	47%	45%

De acuerdo con la comparativa de los caudales máximos, se puede afirmar que los resultados obtenidos se encuentran dentro del mismo orden de magnitud que los trabajos previos. Con respecto al método elegido por el estudio de la CEA (2011), el método del Hidrograma Unitario Triangular, el promedio de la diferencia porcentual es de 24%. Los resultados, para todos los periodos de retorno analizados, indican que el TR-20 arroja menores caudales. Se

trata entonces de un escenario conservador, puesto que se estaría subestimado el servicio de regulación de inundaciones.

Los volúmenes obtenidos por el TR-20 se encuentran, con excepción del método Pai Wu, dentro del mismo orden de magnitud que los métodos utilizados por la CEA (Cuadro 34). Con respecto al método del Hidrograma Unitario Triangular, el TR-20 en promedio fue en 16% mayor (Cuadro 35).

Cuadro 34. Comparativa de volúmenes de escorrentía expresados en m³ por periodo de retorno. Fuente: elaboración propia con datos de CEA (2011).

Método	Periodo de retorno				
	5	10	25	50	100
Pai Wu	410,688	615,027	885,035	1,096,027	1,769,186
D.M. Gray	1,555,745	1,967,707	2,462,605	2,824,311	3,170,428
Hidrograma Unitario Triangular	1,233,597	1,659,161	2,204,960	2,616,153	3,017,633
Promedio	1,066,677	1,413,965	1,850,867	2,178,830	2,652,416
TR-20	1,495,956	1,958,562	2,543,629	2,976,876	3,398,206

Cuadro 35. Diferencias porcentuales entre los volúmenes entre el TR-20 y los métodos utilizados por la CEA. Fuente: elaboración propia con datos de CEA (2011).

Método	Periodo de retorno				
	5	10	25	50	100
Pai Wu	-264%	-218%	-187%	-172%	-92%
D.M. Gray	4%	0%	-3%	-5%	-7%
Hidrograma Unitario Triangular	-21%	-18%	-15%	-14%	-13%
Promedio	-40%	-39%	-37%	-37%	-28%

5.5.2 Resultados del TR-20

En la presente sección se describen los resultados obtenidos por el WMS para el modelo hidrológico TR-20, utilizando como parámetros de entrada los siguientes: la delimitación del parteaguas de la microcuenca a partir del método de microcuenca delimitada por el WMS utilizando como insumo las curvas de nivel de las cartas topográficas del INEGI, escala 1:20,000 (Claves F13D65E y F13D65F); las precipitaciones máximas diarias para los

periodos de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años obtenidas por el método de Gumbel; las coberturas de uso general del suelo, correspondientes a los escenarios 1993, 1999, 2011 y el escenario proyectado, y la capa de grupo hidrológico del suelo .

Las siguientes figuras muestran las salidas del WMS correspondientes a los hidrogramas de cada escenario, las ordenadas representan el caudal en ft^3/s , mientras que las abscisas representan el tiempo en minutos. La cresta del hidrograma corresponde a el caudal máximo del evento de tormenta modelado.

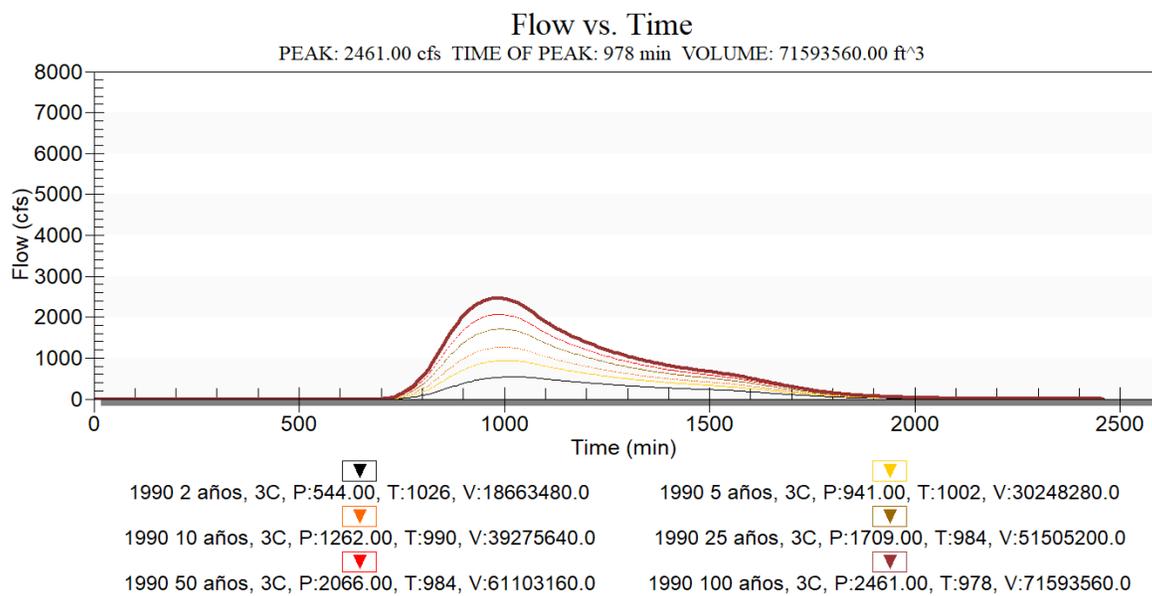


Figura 52. Hidrogramas resultantes del escenario 1993 para los periodos de retorno analizados. Fuente: elaboración propia con WMS.

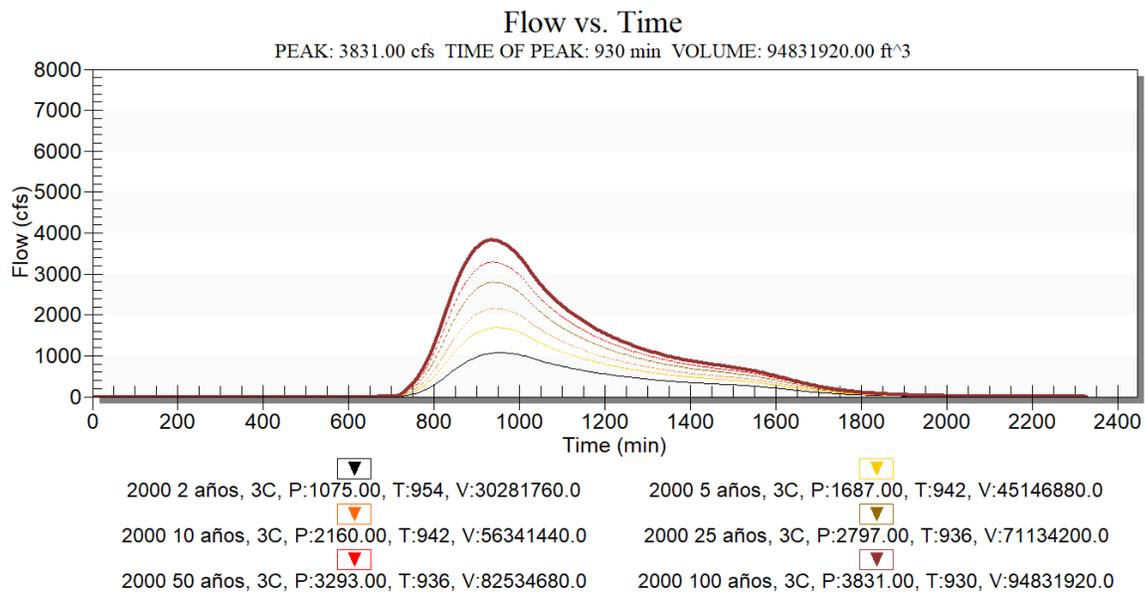


Figura 53. Hidrogramas resultantes del escenario 1999 para los periodos de retorno analizados. Fuente: elaboración propia con WMS.

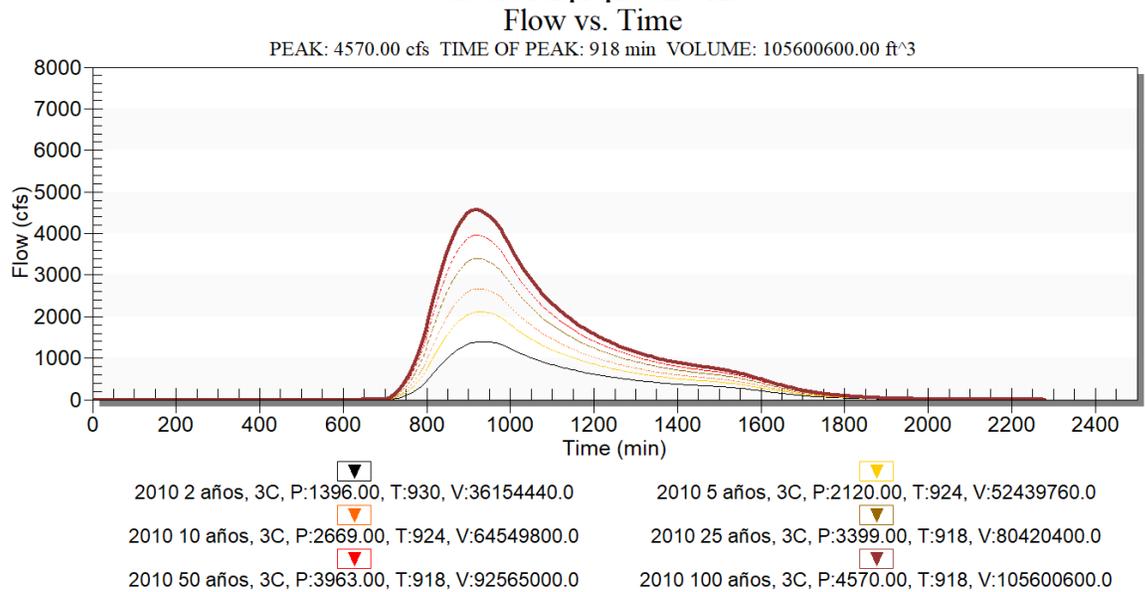


Figura 54. Hidrogramas resultantes del escenario 2011 para los periodos de retorno analizados. Fuente: elaboración propia con WMS.

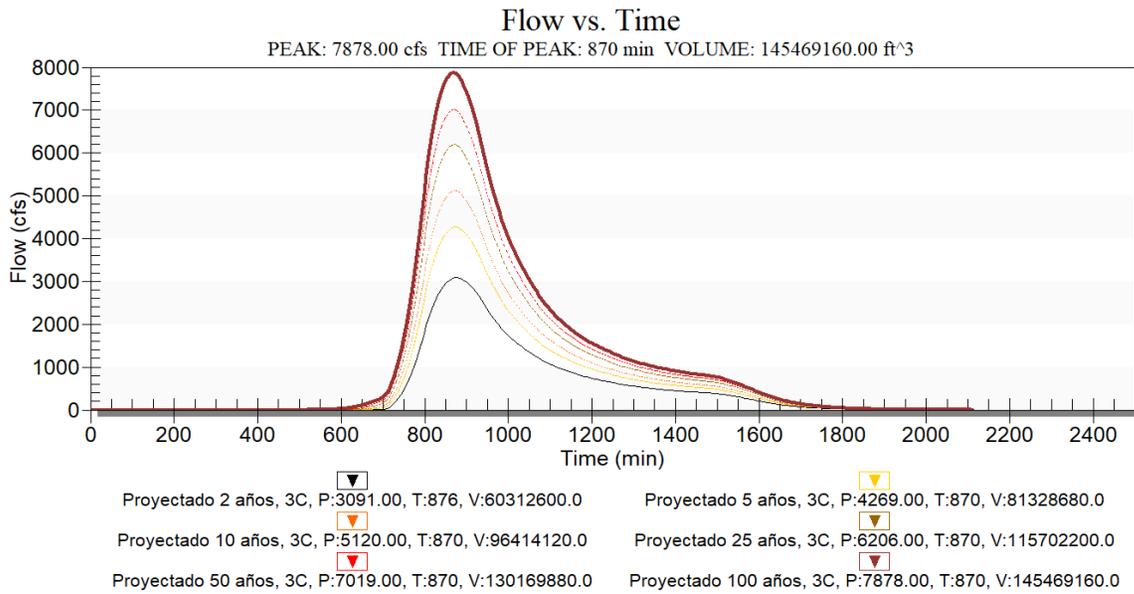


Figura 55. Hidrogramas resultantes del escenario proyectado para los periodos de retorno analizados. Fuente: elaboración propia con WMS.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para las simulaciones de los escenarios para cada periodo de retorno. El Cuadro 36 presenta los caudales máximos, expresadas en unidades de medida del sistema inglés, para cada escenario, por periodo de retorno analizado.

Cuadro 36. Resultados del TR-20 para descarga máxima obtenidos a través del WMS. Fuente: elaboración propia.

	TR - 2 años	TR - 5 años	TR - 10 años	TR - 25 años	TR - 50 años	TR - 100 años
Escenario	DM (ft ³ /s)					
1993	544	941	1262	1709	2066	2461
1999	1075	1687	2160	2797	3293	3831
2011	1390	2120	2669	3399	3963	4570
Proyectado	3091	4269	5120	6206	7019	7878

El Cuadro 37 presenta las los volúmenes escurridos, expresados en unidades de medida del Sistema Inglés, por escenario, por periodo de retorno analizado.

Cuadro 37. Resultados del TR-20 para volumen escurrido obtenidos a través del WMS. Fuente: elaboración propia.

	TR - 2 años	TR - 5 años	TR - 10 años	TR - 25 años	TR - 50 años	TR - 100 años
Escenario	V (ft ³)					
1993	18,663,480	30,248,280	39,275,640	51,505,200	61,103,160	71,593,560
1999	30,281,760	45,146,880	56,341,440	71,134,200	82,534,680	94,831,920
2011	36,154,440	52,439,760	64,549,800	80,420,400	92,565,000	105,600,600
Proyectado	60,312,600	81,328,680	96,414,120	115,702,200	130,169,880	145,469,160

El Cuadro 38 presenta los caudales máximos, el Cuadro 39 presenta las los volúmenes escurridos, ambos expresadas en unidades del Sistema Internacional, para cada escenario, por periodo de retorno analizado.

Cuadro 38. Descargas máximas, convertidos a unidades del Sistema Internacional. Fuente: elaboración propia.

	TR - 2 años	TR - 5 años	TR - 10 años	TR - 25 años	TR - 50 años	TR - 100 años
Escenario	DM (m ³ /s)					
1993	15.40	26.65	35.74	48.39	58.50	69.69
1999	30.44	47.77	61.16	79.20	93.25	108.48
2011	39.36	60.03	75.58	96.25	112.22	129.41
Proyectado	87.53	120.88	144.98	175.73	198.76	223.08

Cuadro 39. Volumen escurrido convertido a unidades del Sistema Internacional. Fuente: elaboración propia.

	TR - 2 años	TR - 5 años	TR - 10 años	TR - 25 años	TR - 50 años	TR - 100 años
Escenario	V (m ³)					
1993	528,490	856,534	1,112,160.44	1,458,462	1,730,246	2,027,301
1999	857,483	1,278,415	1,595,409.29	2,014,293	2,337,118	2,685,337
2011	1,023,778	1,484,926	1,827,843.78	2,277,248	2,621,145	2,990,271
Proyectado	1,707,860	2,302,968	2,730,139.35	3,276,316	3,685,994	4,119,221

Analizando la Figura 56, que muestra de manera gráfica los datos de los caudales máximos por escenario, se observa que la diferencia proporcional de caudal máximo entre los escenarios para un periodo de retorno dado se incrementa conforme mayor sea el periodo de retorno. Es decir, para los eventos menos intensos, los caudales tienden a ser más parecidos. Mientras que, para eventos intensos, la diferencia es mayor. Esto se comprueba analizando las pendientes de las ecuaciones mostradas en el Cuadro 40 donde se aprecia un incremento por cada escenario posterior en el tiempo.

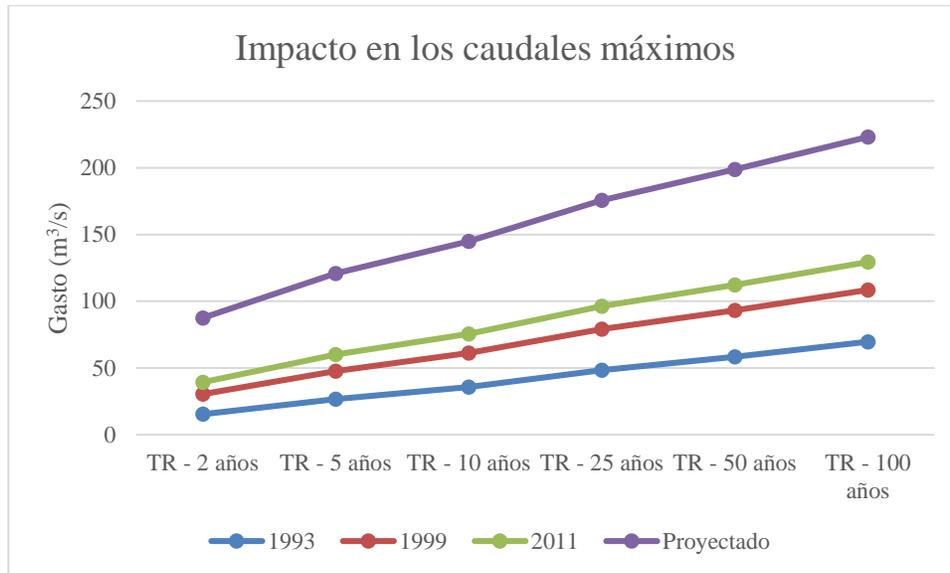


Figura 56. Impacto en los caudales máximos por periodo de retorno. Fuente: elaboración propia.

Cuadro 40. Ajustes lineales para los caudales resultantes para cada periodo de retorno analizado por escenario simulado. Elaboración: fuente propia.

Escenario	Ajuste lineal	R ²
1993	$y = 10.847x + 4.43$	0.9989
1999	$y = 15.562x + 15.582$	0.9988
2011	$y = 17.928x + 22.726$	0.9985
Proyectado	$y = 26.918x + 64.279$	0.9966

Las siguientes figuras muestran el hidrograma para cada escenario en función del periodo de retorno. Se puede apreciar que el caudal máximo y el volumen aumentan, mientras que el tiempo al gasto máximo disminuye conforme al cambio de escenario.

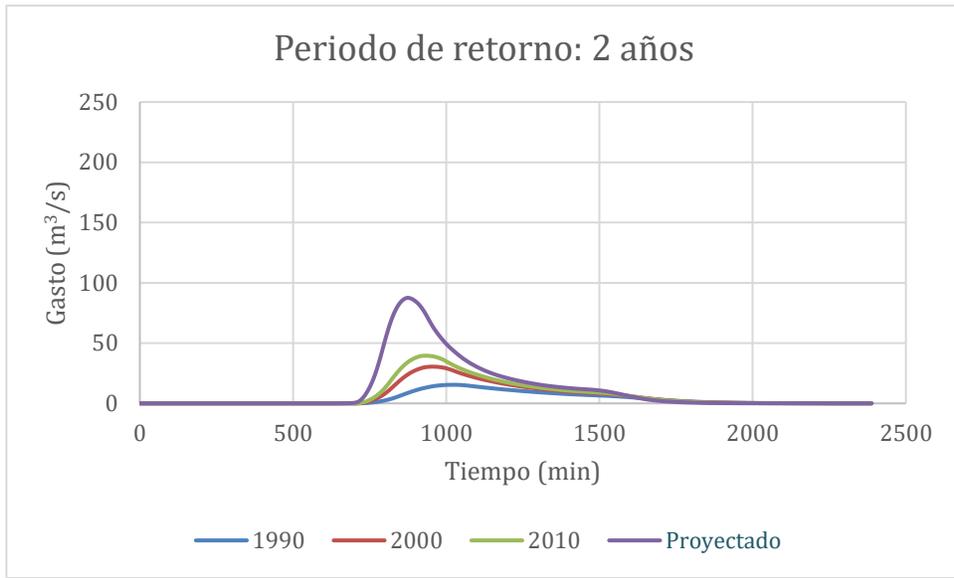


Figura 57. Hidrograma de los distintos escenarios para el periodo de retorno de 2 años. Fuente: elaboración propia.

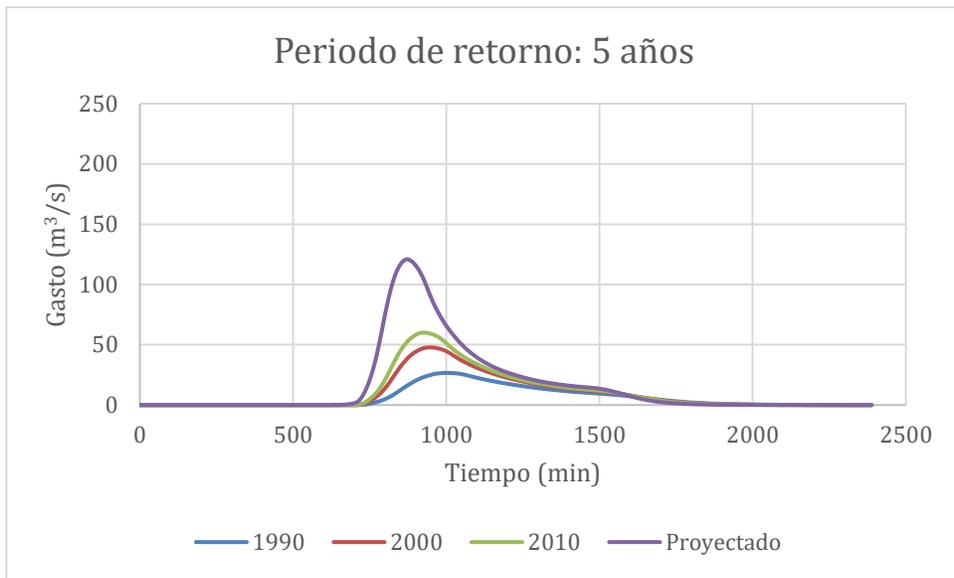


Figura 58. Hidrograma de los distintos escenarios para el periodo de retorno de 5 años. Fuente: elaboración propia.

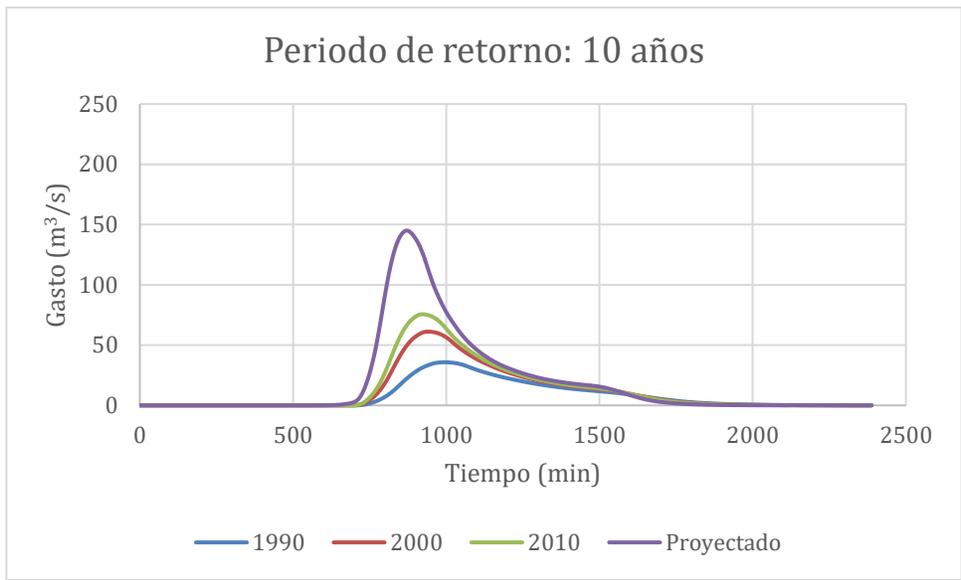


Figura 59. Hidrograma de los distintos escenarios para el periodo de retorno de 10 años. Fuente: elaboración propia.

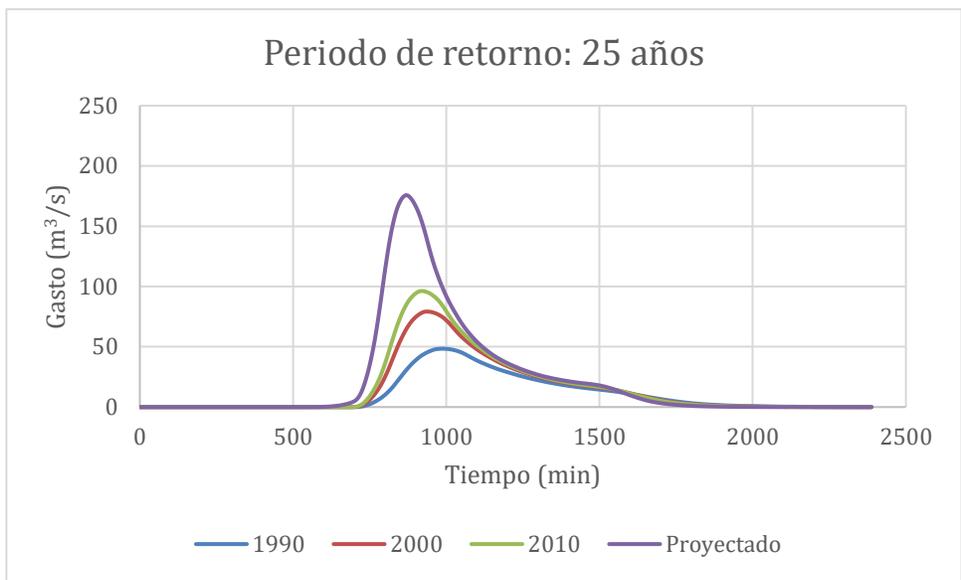


Figura 60. Hidrograma de los distintos escenarios para el periodo de retorno de 25 años. Fuente: elaboración propia.

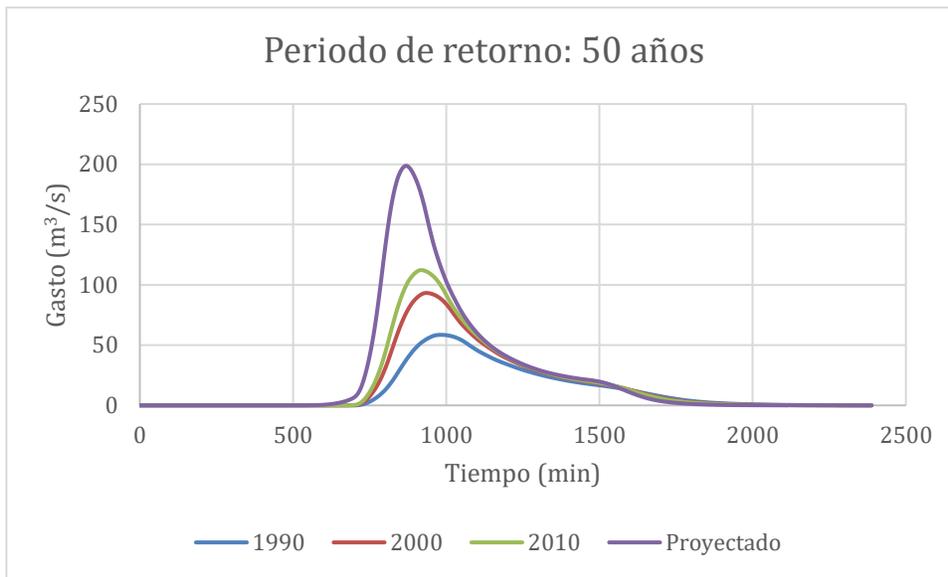


Figura 61. Hidrograma de los distintos escenarios para el periodo de retorno de 50 años. Fuente: elaboración propia.

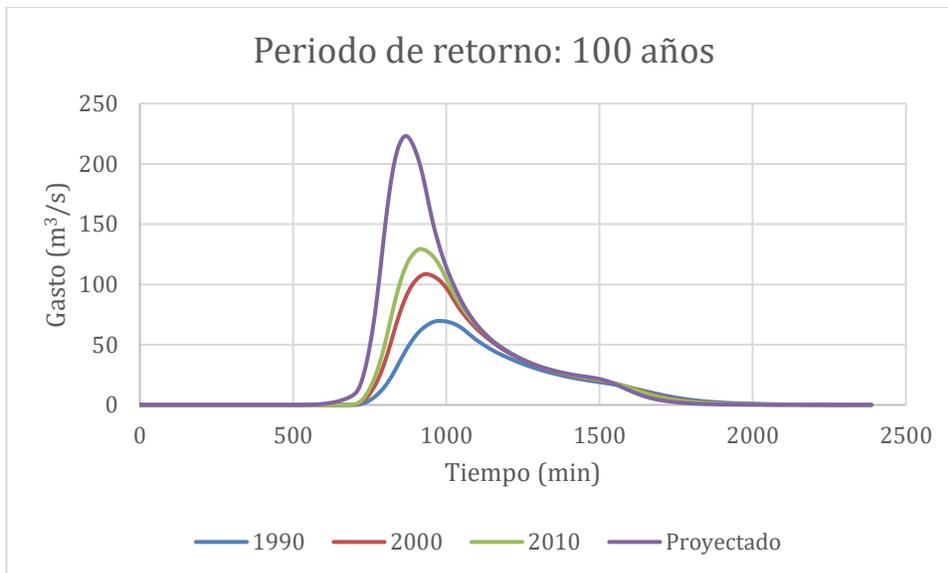


Figura 62. Hidrograma de los distintos escenarios para el periodo de retorno de 100 años. Fuente: elaboración propia.

Las figuras anteriores, muestran que los cambios en la cobertura del suelo han generado cambios en la hidrología de la microcuenca. Los escenarios con menor cantidad de áreas verdes (más recientes), debido a la conversión de usos agrícolas y forestales a usos urbanos

(principalmente habitacionales), presentan un mayor volumen de esorrentía y un caudal máximo mayor, que se presenta en un tiempo menor.

5.6 Inundación del cauce principal

En la Figura 63 se muestra la superficie de inundación del cauce principal en la microcuenca “El Guayabo”, en función del caudal, obtenido a partir del modelado hidráulico realizado por la CEA (2011).



Figura 63. Superficie de inundación en función del caudal. Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI y CEA (2011)

La Figura 64, muestra la superficie inundada del cauce principal en función del caudal, en la parte media y baja de la cuenca.



Figura 64. Inundación en la parte media y baja de la microcuenca “El Guayabo”. Fuente: elaboración propia con datos de INEGI y CEA (2011)

5.7 Evaluación del servicio ecosistémico de regulación de inundaciones

La siguiente figura muestra la solución de la Ecuación 27 para las precipitaciones correspondientes a los periodos de retorno analizados según su número de curva.

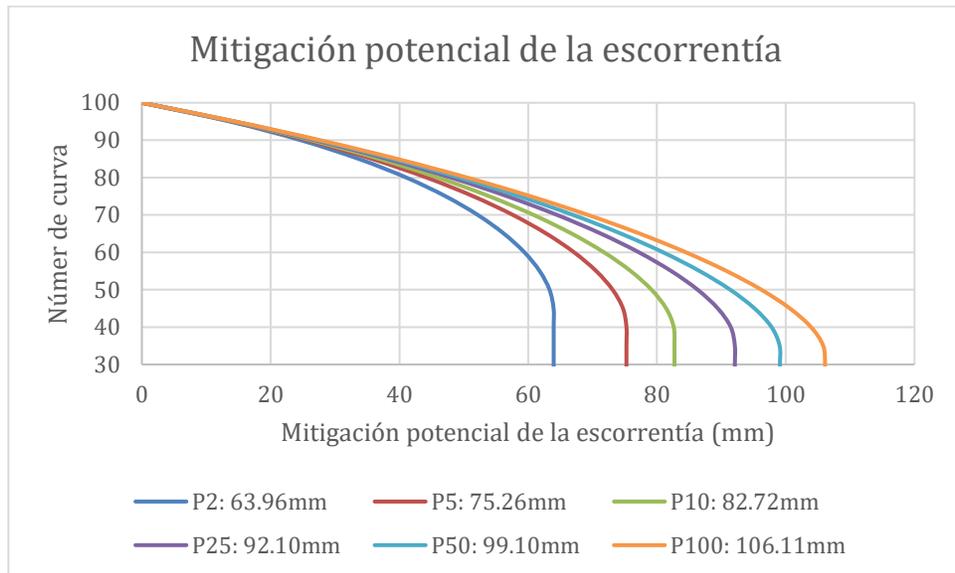


Figura 65. Solución de la Ecuación 27 para las precipitaciones correspondientes a un periodo de retorno dado. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con Figura 65, la mitigación potencial de la escorrentía disminuye conforme aumenta la precipitación. Esto se debe a que precipitaciones grandes saturan rápidamente el suelo, haciendo prácticamente despreciable la mitigación en relación a la altura de la precipitación (Ennaanay et al., 2011).

Se realizó un análisis comparativo, en términos de la mitigación potencial en la escorrentía (MPE), entre los escenarios 2011 y el proyectado, para las precipitaciones correspondientes a los periodos de retorno de 25 y 50 años. En primer lugar, con el fin de identificar dónde sucederán los cambios, se realizó una intersección espacial entre los dos escenarios mencionados, y se generó una capa (Figura 66), que identifica las permanencias y cambios en las coberturas y usos del suelo entre estos dos escenarios.

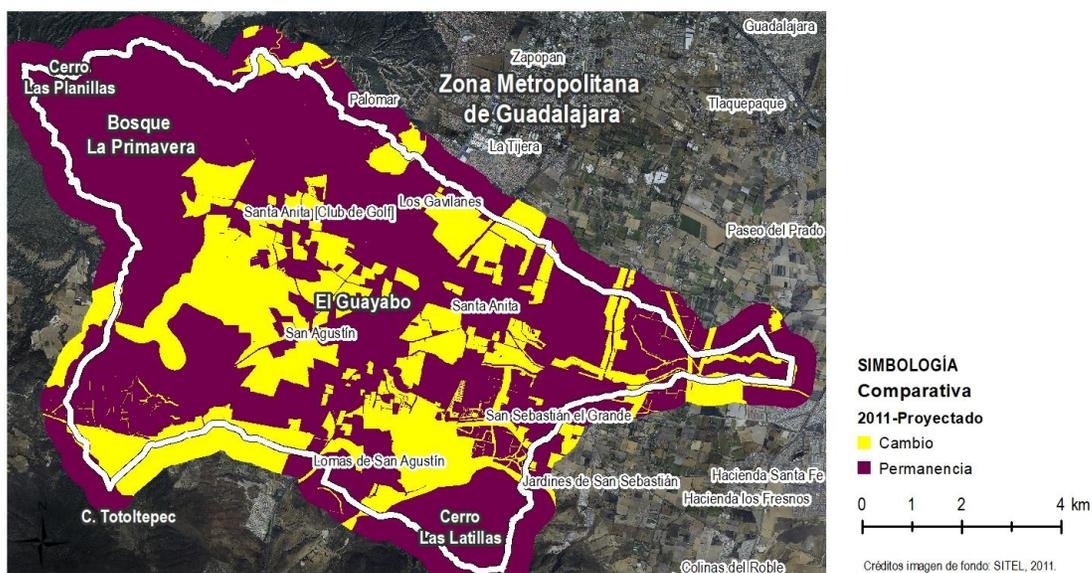


Figura 66. Permanencia y cambios en las coberturas y usos del suelo entre el escenario proyectado y 2011. Fuente: elaboración propia con datos de IMEPLAN, INEGI y CEA (2011).

Posteriormente, se utilizó la Ecuación 27 para cuantificar la mitigación potencial en la escorrentía (MPE) de los escenarios 2011 y Proyectado, para las precipitaciones correspondientes a los periodos de 25 y 50 años. A continuación, se presentan los mapas resultantes.

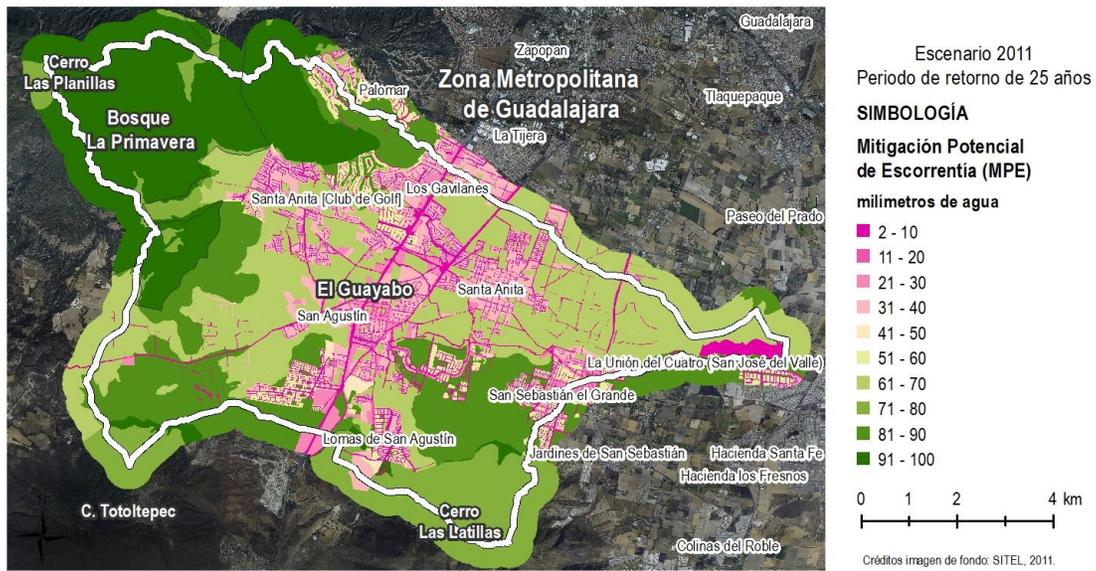


Figura 67. MPE del Escenario 2011 para una precipitación con un periodo de retorno de 25 años. Fuente: elaboración propia con datos IMEPLAN, INEGI y CEA (2011).



Figura 68. MPE del Escenario Projectado para una precipitación con un periodo de retorno de 25 años. Fuente: elaboración propia con datos de IMEPLAN, INEGI y CEA (2011).



Figura 69. MPE del Escenario 2011 para una precipitación con un periodo de retorno de 50 años. Fuente: elaboración propia con datos de IMEPLAN, INEGI y CEA (2011).

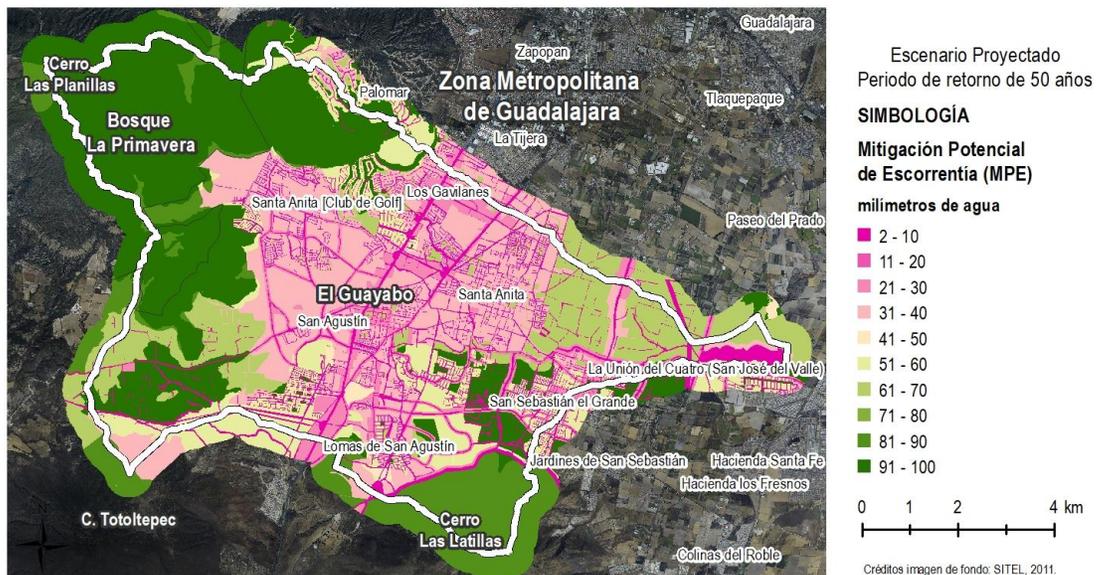


Figura 70. MPE del Escenario Projectado para una precipitación con un periodo de retorno de 50 años. Fuente: elaboración propia con datos de IMEPLAN, INEGI y CEA (2011).

De las cuatro figuras anteriores se puede apreciar la disminución en la mitigación potencial de escorrentía entre el escenario del 2011 y el escenario proyectado, principalmente en la parte media-alta, debido al cambio en la cobertura y uso del suelo. Para cuantificar el cambio en MPE, se aplicó la Ecuación 30 para la precipitación correspondiente al periodo de retorno de 50 años (Figura 69 y Figura 70), el resultado se muestra en la Figura 71.

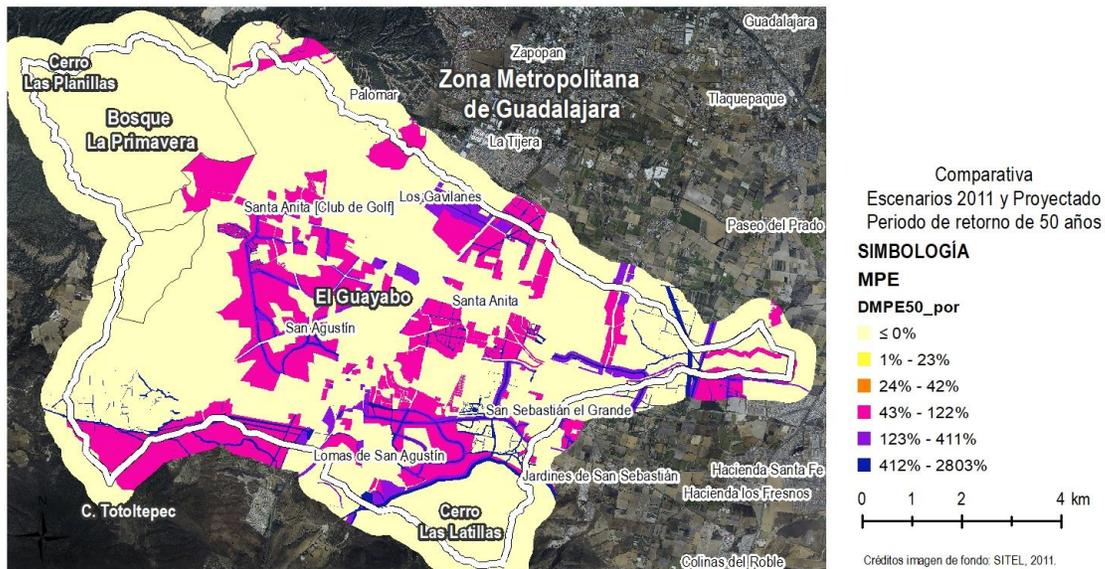


Figura 71. Cambio porcentual en la mitigación potencial entre el escenario de 2011 y proyectado, para una precipitación con periodo de retorno de 50 años. Fuente: elaboración propia con datos IMEPLAN, INEGI y CEA (2011).

En la Figura 71 se muestran en valores negativos aquellas zonas donde el cambio representa una mayor mitigación. Es importante mencionar que muchos de estos cambios son imperceptibles en el mapa, por la existencia de polígonos falsos resultantes de la intersección. Los valores positivos, muestran las zonas en las que disminuirá la mitigación potencial. Destacan las zonas aquellas zonas con cambios mayores al 400%, que son el resultado del cambio en zonas con alto potencial de mitigación, a coberturas prácticamente impermeables.

5.7.1 Área inundada

La superficie inundada en función del caudal se calculó mediante un algoritmo elaborado en lenguaje computacional Python (ver Anexo 2). El resultado se muestra en la Figura 72.

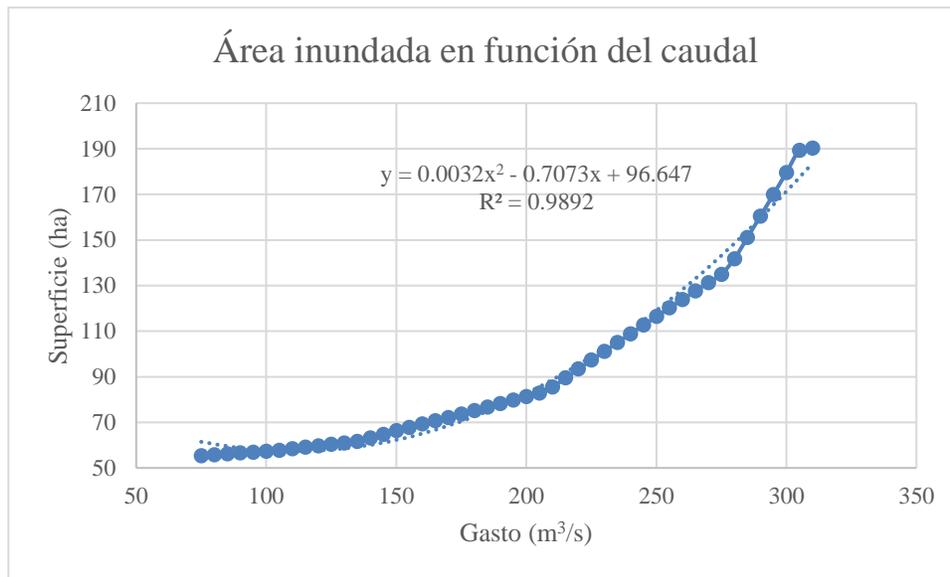


Figura 72. Superficie afectada por inundación en función del caudal. Fuente: elaboración propia.

Haciendo el ajuste correspondiente de la gráfica de la Figura 72, se obtiene la ecuación de superficie inundada en función del caudal, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9892.

$$SI = 0.0032x^2 - 0.7073x + 96.647$$

Ecuación 36

Donde, SI es la superficie inundada expresada en hectáreas y x , corresponde al caudal en m^3/s .

La Figura 73, muestra el impacto, en términos de caudal máximo y área inundada, que habrá entre el escenario 2011 y el escenario proyectado para una precipitación correspondiente a 50 años.

Área inundada en función del caudal

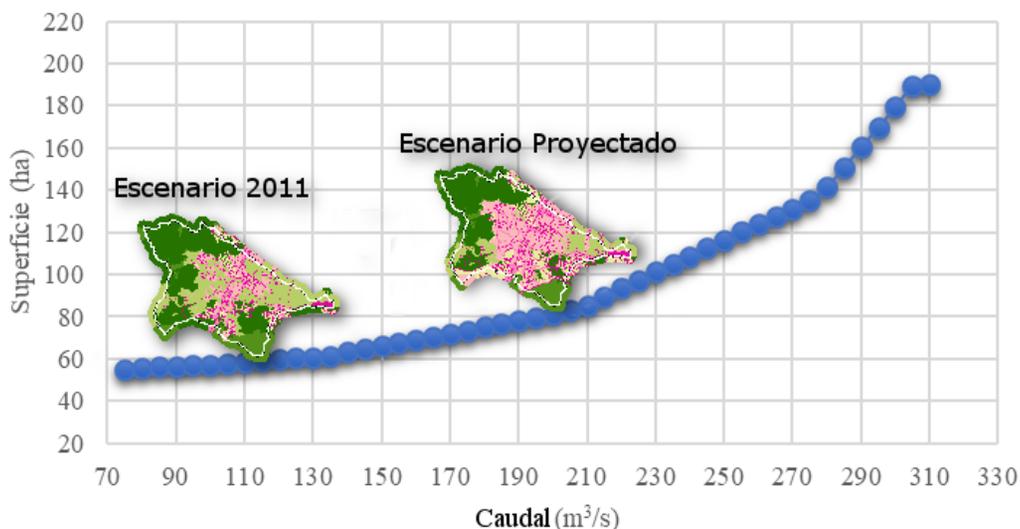


Figura 73. Comparativa del área inundada y caudal de los escenarios 2011 y Proyectado para un periodo de retorno de 50 años. Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos de IMEPLAN.

De la figura anterior, se puede apreciar que el cambio en la cobertura del escenario proyectado con respecto al escenario 2011, para una misma precipitación (periodo de retorno de 50 años), resultará en el aumento, tanto el caudal máximo (incremento de 94 m³/s) como área inundada (aumento de 25 hectáreas de inundación).

5.7.2 Valoración de la tierra

Con la técnica de estadísticas zonales, se calculó el valor medio de la tierra para el área de estudio, utilizando como “máscara” el polígono correspondiente a la inundación para un periodo de retorno de 1,000 años y la capa de valor de la tierra (Figura 26). El cuadro muestra los estadísticos descriptivos.

Cuadro 41. Estadísticos descriptivos del valor de la tierra dentro del polígono para un polígono de inundación correspondiente a un periodo de retorno de 1,000 años. Fuente: elaboración propia.

Número de muestra	76110
Media (MXN\$/m ²)	8128
Mediana (MXN\$/m ²)	5894
Desviación estándar	4264
Mínimo (MXN\$/m ²)	3498
Máximo (MXN\$/m ²)	17768
Rango (MXN\$/m ²)	14270
Coef. Variación	52%

Como una primera aproximación, podría utilizarse como indicador *a grosso modo*, la multiplicación de la Ecuación 36 con el valor medio de la tierra (MXN\$8,128/m²), asumiendo los costos de los daños ocasionados por un caudal dado, son proporcionales al área inundada.

Con la finalidad de obtener un estimado con mayor precisión del valor medio de la tierra por uso general del suelo, se realizó un recorte de la capa del escenario 2011, utilizando como entidad de recorte la capa del polígono correspondiente a la inundación para un periodo de retorno de 1,000 años. Posteriormente, se utilizó la técnica de estadísticas zonales, para el calcular el valor medio por uso general del suelo, utilizando como insumo la capa de valor de la tierra y el recorte anteriormente mencionado.

Cuadro 42. Valor medio de la tierra por uso general del suelo correspondiente al polígono de inundación correspondiente a un periodo de retorno de 1,000 años. Fuente: elaboración propia.

Uso General del suelo	Media	Mediana	Desv. Estándar	Mínimo	Máximo	Rango
Agropecuario	9886.18	9851.82	548.41	3501.23	17768.40	14267.17
Calle	7385.00	7229.76	624.64	3580.81	17727.04	14146.22
Comercial y de servicios	10560.63	10554.61	81.27	3722.78	17003.49	13280.71
Espacios verdes abiertos y recreativos	8220.19	8269.72	194.48	3891.34	17385.90	13494.56
Granjas y huertos	7394.63	7408.11	486.99	3498.01	15701.62	12203.60
Habitacional	11081.73	11083.92	67.83	3561.98	17642.81	14080.82
Mixto	5896.97	5897.25	10.02	3655.99	14620.25	10964.26

* Todos valores se encuentran en MXN\$/m².

La Figura 74, muestra el valor medio del precio de la tierra resultante de la técnica de estadísticas zonales.

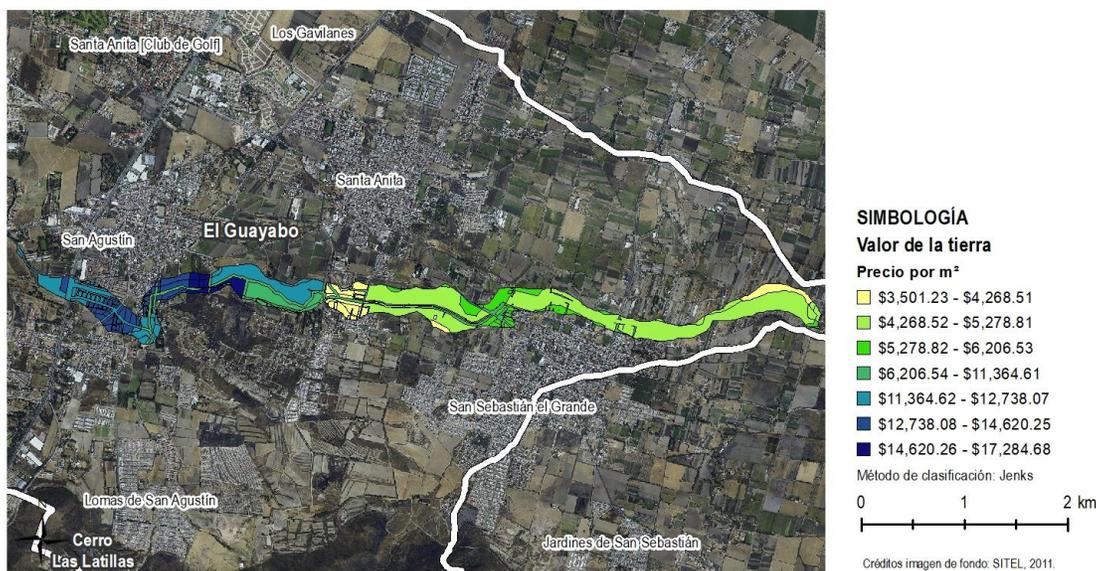


Figura 74. Valor de la resultante de la técnica de estadísticas zonales con la capa de uso general del suelo acotada al polígono de inundación con periodo de retorno de 1,000 años. Fuente: elaboración propia con datos de IMEPLAN, Casas y Terrenos (2018) y CEA (2011).

5.7.3 Análisis de riesgo

Para analizar el impacto en el servicio ecosistémico de regulación de inundación, en función del riesgo de inundación, que tendrá el cambio en el uso general del suelo entre los escenarios proyectados, se utilizó la Ecuación 3. A continuación, se describen los resultados de cada componente del riesgo.

5.7.3.1 Resultados para el componente de peligro

De las operaciones descritas en la sección 3.2.11.1 resultó un polígono para cada escenario, que contiene las áreas de inundación correspondientes a cada periodo de retorno y su probabilidad asociada. Posteriormente, se elaboraron los mapas del peligro de inundación de acuerdo con cada uno de los escenarios estudiados (Figura 75 y la Figura 76). Del análisis visual de los mapas de peligro, es posible detectar un aumento de área en los polígonos de inundación. Particularmente, se puede apreciar el incremento en la superficie inundada para un periodo de retorno de 5 años. Para corroborarlo, se cuantificó para cada uno de los escenarios la superficie inundada para cada periodo de retorno dado (ver

Cuadro 43).

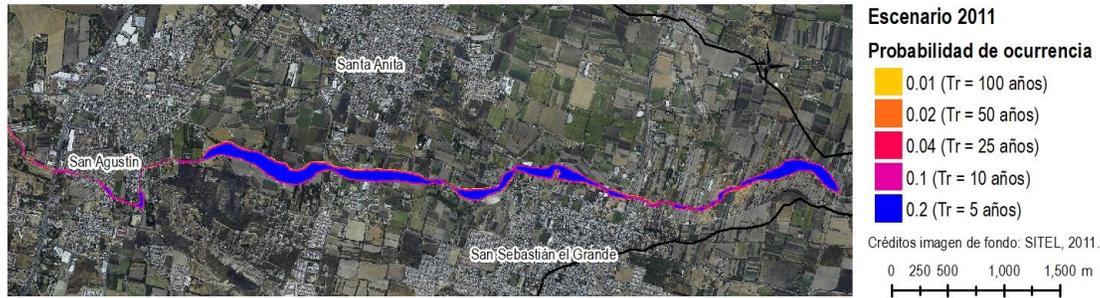


Figura 75. Superficie inundada en el Escenario 2011 por probabilidad de ocurrencia. Fuente: elaboración propia a partir de datos de CEA (2011).

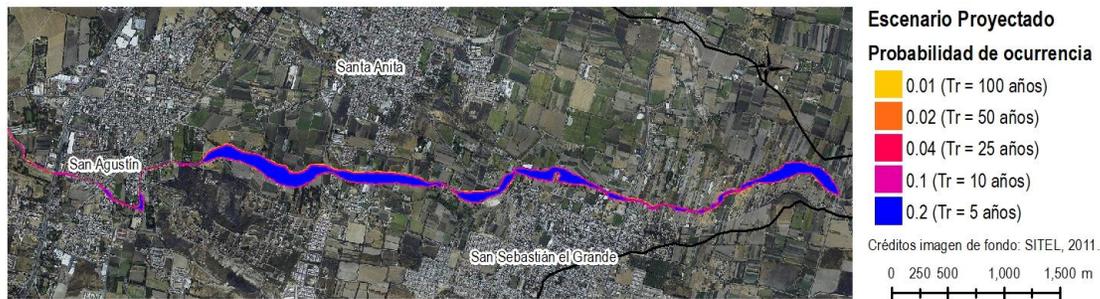


Figura 76. Superficie inundada en el Escenario Proyectado por probabilidad de ocurrencia. Fuente: elaboración propia a partir de datos de CEA (2011).

Cuadro 43. Superficie inundada por periodo de retorno para los escenarios analizados. Fuente: elaboración propia.

TR	Superficie inundada (ha)	
	Escenario 2011	Escenario Proyectado
5 años	33	60
10 años	55	65
25 años	57	74
50 años	59	81
100 años	61	93

En la Figura 77 se muestra de visual el impacto en la magnitud de la inundación por el cambio del uso del suelo.

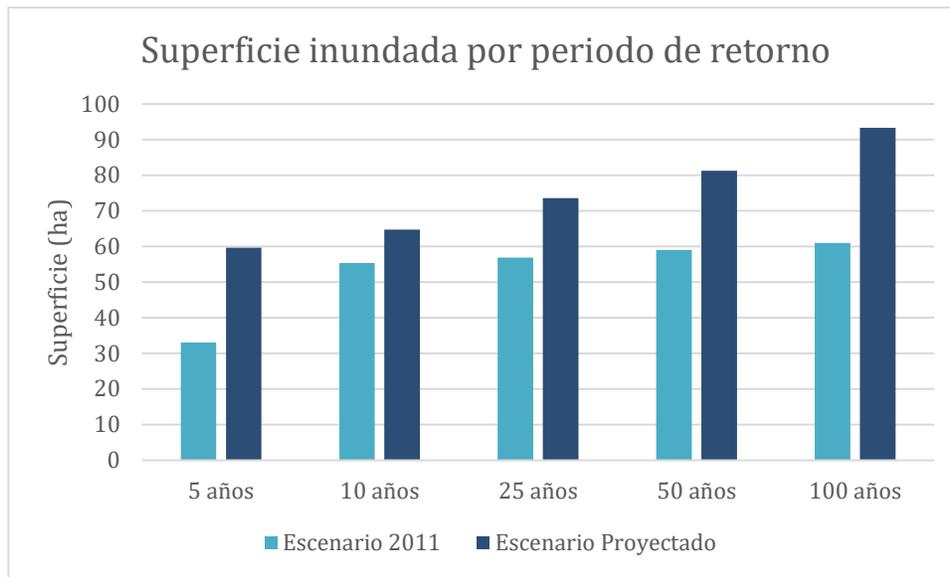


Figura 77. Superficie inundada por periodo de retorno para los escenarios analizados. Fuente: elaboración propia.

5.7.3.2 Índice de vulnerabilidad

A partir del resultado del análisis de componentes principales (ACP), se logró obtener un menor número de combinaciones lineales de las siete variables originales, que representan la mayor parte de la variabilidad en los datos. Para el caso del Escenario 2011, se extrajeron dos componentes, utilizando el criterio de que éstos tienen valores propios mayores o iguales a 1.0. Los dos primeros componentes, representan en conjunto el 74.1% de la variabilidad en los datos originales. El Cuadro 44, muestra los componentes extraídos, así como su eigenvalor y el porcentaje de la varianza explicada.

Cuadro 44. Componentes principales resultantes, eigenvalor y varianza explicada. Fuente: elaboración propia.

Componente Principal	Eigenvalor	Porcentaje de varianza	Porcentaje acumulado
1	3.9346	56.21	56.21
2	1.25123	17.89	74.08
3	0.81668	11.67	85.75
4	0.46901	6.70	92.45
5	0.28316	4.04	96.50
6	0.19904	2.84	99.34
7	0.04626	0.66	100.0

En la Figura 78, se muestran aquellos los eigenvalores de cada componente. Un eigenvalor mayor a uno, en datos estandarizados, indica que el componente principal explicaría más varianza de lo que lo hace una de las variables originales.

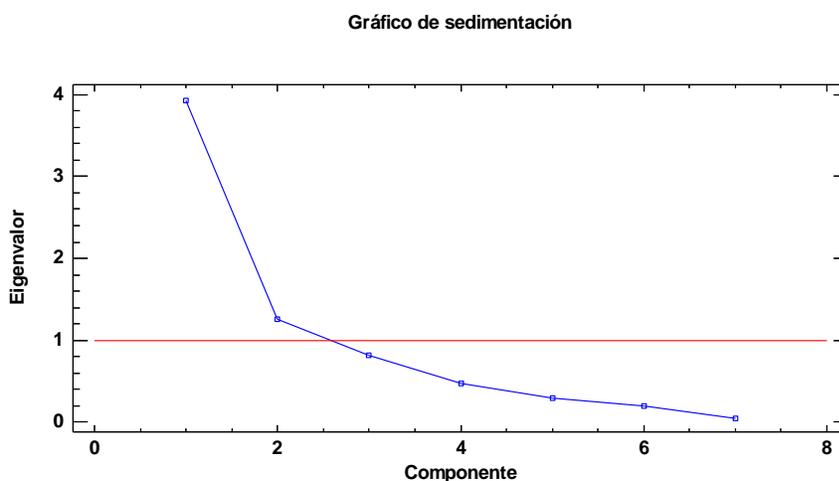


Figura 78. Gráfico de sedimentación de los eigenvalores de los componentes principales. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo al Cuadro 44 y a la Figura 78, los dos primeros componentes principales son los únicos con eigenvalores mayor a uno.

Cuadro 45. Pesos de las variables originales en los dos primeros componentes. Fuente: elaboración propia.

	<i>Componente 1</i>	<i>Componente 2</i>
ValorMed	0.237	-0.393
DEN_R	0.421	-0.265
VIV17_R	0.107	0.738
HOGAR2_R	0.448	-0.055
SALUD2_2	0.463	0.262
DISC1_R	0.420	-0.234
EDU28_R	0.401	0.320

En la Figura 79, se utilizan puntos para representar los puntajes de las observaciones en los componentes principales, y se usan vectores para representar los coeficientes de las variables

en los componentes principales. Tanto la dirección como la longitud de los vectores ayudan a su interpretación.

De acuerdo con el Cuadro 45 y la Figura 79, el primer componente principal está asociado con las variables DEN_R, HOGAR2_R, SALUD2_2, DISC1_R y EDU28_R. Mientras que el segundo componente principal está asociado con VIV17_R e inversamente con ValorMed.

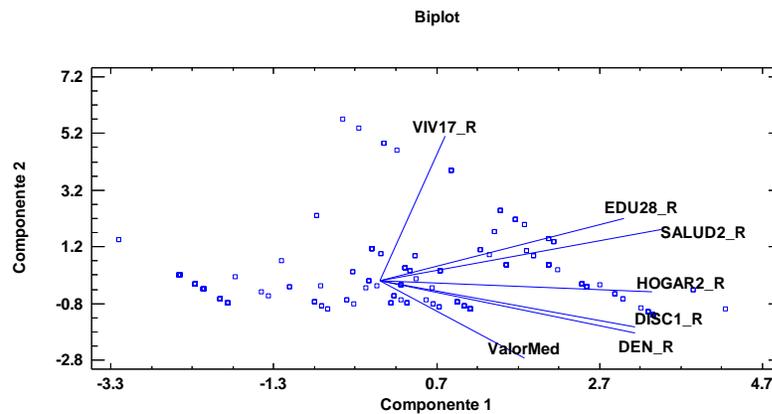


Figura 79. Diagrama de dispersión y magnitud y dirección de las variables originales. Fuente: elaboración propia.

Para que ambos escenarios fuesen comparables, con un programa realizado en *Python* (Anexo 3), se normalizaron ambos escenarios, utilizando la Ecuación 33 utilizando la media y la desviación estándar correspondiente al escenario 2011. Posteriormente, se calculó el índice de vulnerabilidad (InVul) para ambos escenarios, mediante de la Ecuación 34. Una vez obtenidos los puntajes del InVul, se normalizaron entre 0 y 1, utilizando los datos de máximo y mínimo de ambos conjuntos. Mediante del método de *Natural Breaks* (Jenks), se obtuvieron cinco clases del índice de vulnerabilidad (Ver Cuadro 46). La Figura 80 muestra el índice de vulnerabilidad del escenario 2011 y el índice de marginación de CONAPO (2010) .

Cuadro 46. Valoración para obtener categorías de vulnerabilidad de acuerdo con el método de optimización *Natural Breaks*. Fuente: elaboración propia.

Rango de valor	Categoría de vulnerabilidad
0.000000 - 0.182437	Muy baja
0.182437 - 0.399676	Baja
0. 0.399676 - 0.560690	Media
0. 0.560690 - 0.704889	Alta
0.704889- 1.000000	Muy Alta

En la Figura 80 se puede apreciar una coincidencia espacial entre el grado de marginación de CONAPO y el índice de vulnerabilidad derivado del ACP. Debido a que el índice de vulnerabilidad toma en cuenta la densidad de población, éste marca como categoría muy baja, aquellas zonas donde hay menor población.

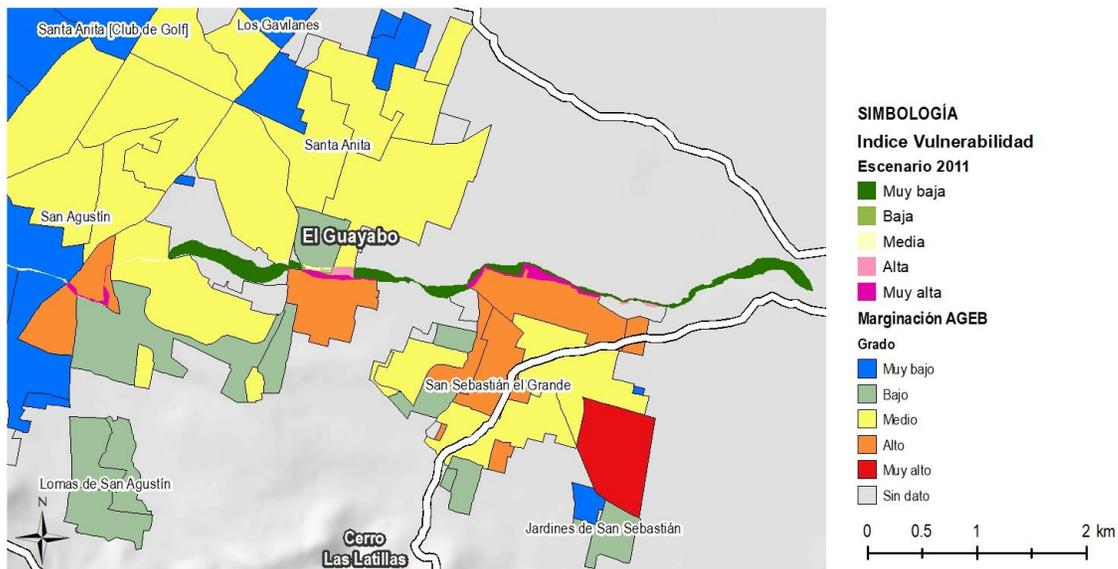


Figura 80. Mapa comparativo entre el índice de marginación de CONAPO (2010) y el índice de vulnerabilidad del Escenario 2010. Fuente: elaboración propia con datos del INEGI, CONAPO y CEA.

5.7.3.3 Mapas de riesgo

La Ecuación 3, conceptualiza el riesgo como la coincidencia espacial entre el peligro y la vulnerabilidad. Por esta razón, se utilizó la herramienta de intersección espacial entre las

capas del componente de peligro y el componente de vulnerabilidad, para cada uno de los dos escenarios (2011 y proyectado). Posteriormente, se realizó una multiplicación entre ambos componentes. La operación de dicha multiplicación, al tomar en cuenta la probabilidad de ocurrencia en el peligro, asegura que, aunque el área sea de alta vulnerabilidad, si su probabilidad de ocurrencia es baja, el riesgo será bajo. Por el contrario, si la vulnerabilidad es baja pero la probabilidad de ocurrencia es grande, se clasificará como riesgo alto. Nuevamente, se normalizaron los resultados de dicha operación, con valores entre 0 y 1, utilizando los datos de máximo y mínimo de ambos con conjuntos. Posteriormente, se utilizó el método de clasificación de *Natural Breaks* (Jenks) para obtener las categorías de riesgo.

Cuadro 47. Valoración para obtener categorías de riesgo de acuerdo con el método de optimización *Natural Breaks*.

Fuente: elaboración propia.

Rango de valor	Categoría de Riesgo
0.000000 - 0.062401	Bajo
0.062402 - 0.246805	Medio
0.246806 - 0.567544	Alto
0.567545 - 1.000000	Muy Alto

A continuación, se presentan los mapas resultantes de cada escenario. Para mejorar su interpretación, se agruparon los usos generales del suelo en cinco categorías principales.

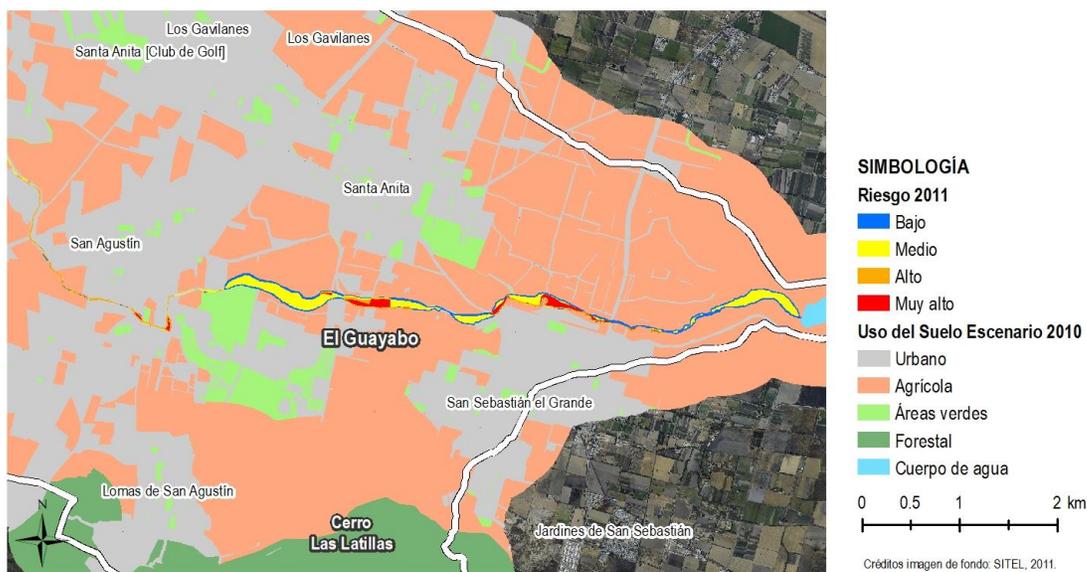


Figura 81. Riesgo de inundación para el Escenario 2011. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IMEPLAN, INEGI y CEA (2011).

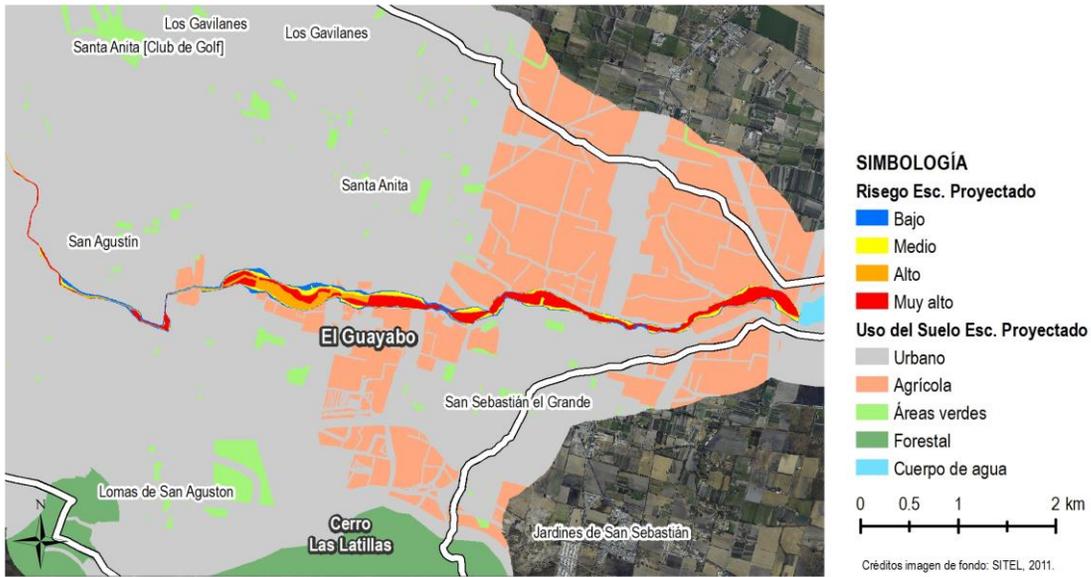


Figura 82. Riesgo de inundación para el Escenario Proyectado. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IMEPLAN, INEGI y CEA (2011).

Dentro del SIG, calculó el área según su categoría de riesgo para cada uno de los escenarios. Se encontró un aumento significativo en las áreas con riesgo alto y muy alto (Cuadro 48 y Figura 83)

Cuadro 48. Superficie por categoría de riesgo para cada escenario. Fuente: elaboración propia.

Riesgo	Superficie (ha)	
	2011	Proyectado
Bajo	16.51	15.34
Medio	28.57	14.35
Alto	8.19	17.90
Muy alto	6.60	44.79
Total	59.86	92.38

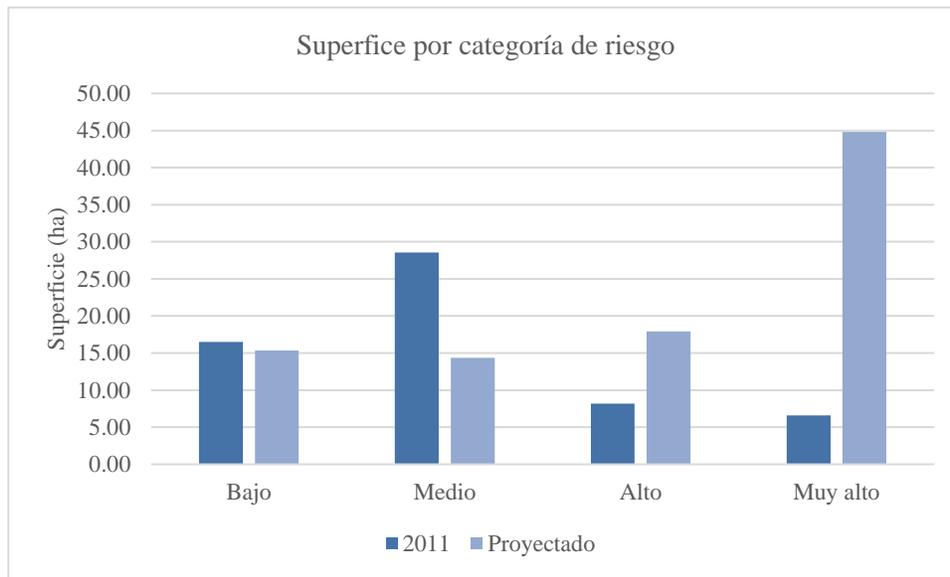


Figura 83. Comparativo por escenario de cambio en la superficie por categoría de riesgo. Fuente: elaboración propia

5.7.1 Identificación de zonas de provisión y demanda

En la Figura 84 se presenta un mapa en que se identifican aquellas zonas donde existe provisión del servicio ecosistémico en el Escenario 2011, pero que habrá de cambiar en el Escenario Proyectado a un uso que provee un menor servicio de regulación.

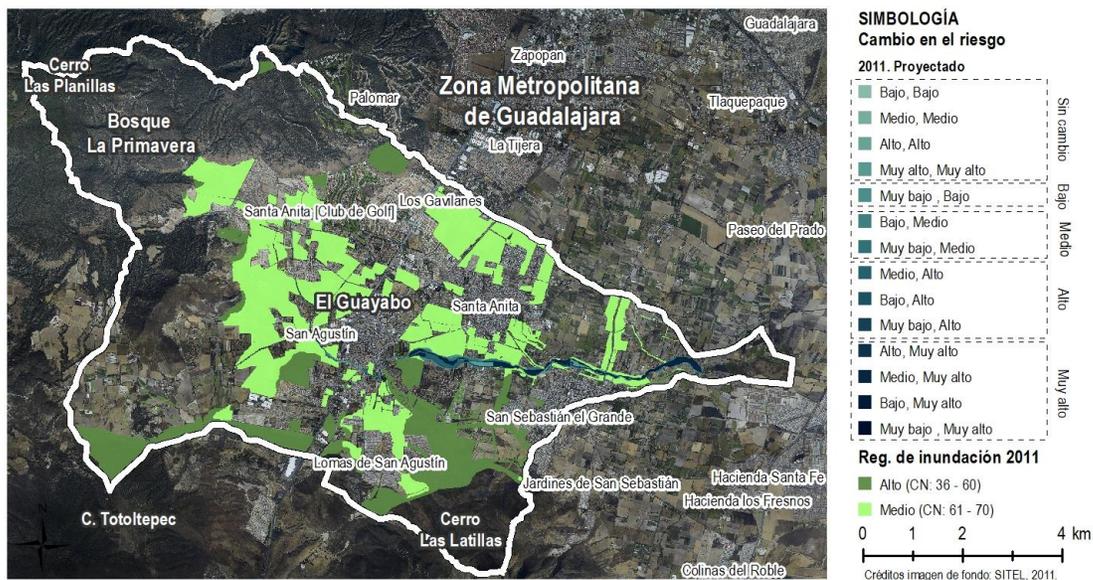


Figura 84. Zonas de provisión que dejarán de existir en el Escenario Proyectado e impacto en el riesgo de inundación. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IMEPLAN, INEGI y CEA (2011).

En la Figura 84 se agruparon las clases, en correspondencia al riesgo transferido del Escenario 2011 al Escenario Proyectado. La clase “Sin cambio”, no implica que no exista riesgo en esas zonas, pero sí indica que no habrá un cambio significativo. De acuerdo con la Figura 83 y la Figura 84, es razonable afirmar que a lo largo del cauce principal hasta el punto de salida de la microcuenca, en la entrada de la presa de “El Guayabo”, las zonas forestales y agrícolas están disminuyendo el riesgo por inundación. Asimismo, es posible aseverar que para el caso de la microcuenca “El Guayabo”, existe una clara incompatibilidad entre los usos de suelo proyectado “aguas arriba” y “aguas abajo”. Para mantener el servicio ecosistémico aguas abajo (parte media de la microcuenca), deben permanecer los usos agrícolas y forestales. Si el cambio de uso del suelo es aguas arriba, los usos aguas abajo deben permanecer agrícolas, minimizando la exposición de la población. Se podría argumentar que el servicio de regulación de inundaciones podría sustituirse con obras de protección, como barreras contra inundación, vasos reguladores y canales más eficientes. Sin embargo, el costo de replazo sería económicamente muy alto. Asimismo, estas obras compensarían solamente, en el mejor de los casos, el servicio ecosistémico de regulación de inundaciones, no los demás servicios ecosistémicos provistos en la zona.

6. Conclusiones

La metodología planteada en este estudio cumplió con el objetivo de evaluar del servicio ecosistémico de regulación de inundaciones en la microcuenca “El Guayabo”. El índice de riesgo por inundación propuesto fue capaz de evaluar, cuantitativamente, aquellas áreas donde se provee el dicho servicio: las capacidades locales para suministrarlo, así como la localización de los beneficiarios.

Los métodos utilizados en este estudio se inclinaron hacia una postura conservadora: las precipitaciones modeladas son menores que las utilizadas en otros estudios hidrológicos para la misma zona geográfica. En comparación con otros métodos, se obtuvieron valores de caudales máximos menores.

El análisis de la mitigación potencial de la escorrentía confirmó que las diferentes coberturas y usos del suelo tienen distintas capacidades de proveer los servicios ecosistémicos de regulación. Siendo las coberturas forestales y agrícolas las que tienen una mayor capacidad de mitigación de la escorrentía.

Los resultados del análisis de cambio entre los distintos escenarios de cobertura y uso del suelo revelan una pérdida de superficie de cobertura agrícola, del 38% en 2011 al 16% en el escenario proyectado. Para este mismo periodo, habrá un aumento en las coberturas urbanas (del 24% al 51%). En la microcuenca “El Guayabo”, actualmente existe un servicio de regulación de inundaciones. Sin embargo, la transformación a coberturas y usos del suelo menos permeables en la parte media-alta aumentará significativamente la escorrentía, volumen y caudal máximo que impactará aguas abajo. Aunado a esto, debido a la urbanización proyectada en la parte baja, aumentará la exposición, y por tanto el riesgo por inundación. De acuerdo con lo anterior, hidrológicamente hablando, existe un conflicto entre los usos de suelo proyectados, tanto en los planes parciales proyectados como en el POTMet, esta pérdida del servicio tendrá que compensarse con un sustituto tecnológico que implicará un costo económico. Se concluye entonces, que los ecosistemas forestales y agrícolas, debido a su capacidad de mitigar la escorrentía, disminuyen en el riesgo de inundación aguas abajo en microcuencas urbanas.

El Bosque de la Primavera es una de las áreas que proveen mayormente el servicio ecosistémico de regulación de inundaciones (entre otros servicios ecosistémicos que aún

requieren evaluarse). Su estatus de Área Natural Protegida no garantiza la integridad de los SE que suministra, existen amenazas como los incendios forestales y cambios en su gestión, que pueden degradar la capacidad de provisión.

A pesar de los retos técnicos que las simulaciones y las modelaciones conllevan por sí mismas, son herramientas importantes para evaluar distintos escenarios de gestión territorial. Para sacar mayor provecho de estas herramientas, es imperativo instrumentar las microcuencas urbanas, y contar con datos históricos de hidrometría confiables, que sean de uso libre para la población, con el objeto de garantizar una buena gobernanza. Dichos datos hidrométricos calibrados permitirán alimentar modelos predictivos de las respuestas hidrológicas que sucederán y, por tanto, evaluar y corregir políticas territoriales. Es de vital importancia una gestión más adecuada que apunte hacia prácticas sustentables de los recursos hídricos, territoriales y de los recursos naturales. Esto requiere de un enfoque multidimensional, así como de la conjunción de elementos ecológicos, físicos, económicos y financieros, sociales y ambientales.

La metodología propuesta en este trabajo fue apropiada para evaluar escenarios donde exista degradación de los servicios ecosistémicos, pero también será útil para evaluar donde, a partir de políticas territoriales, se busque incrementar el servicio de regulación de inundaciones. En este sentido, la cartografía de zonas del suministro y demanda del servicio de regulación de inundaciones será fundamental para la elaboración de estrategias que garanticen su provisión futura. Este estudio sienta las bases técnicas para evaluar e implementar medidas de protección en zonas prioritarias que mitiguen la generación de escorrentía en eventos extremos de lluvia, por ejemplo, techos verdes, captación de agua pluvial y pozos de absorción. También puede ayudar en la búsqueda de mecanismos financieros, como lo son los pagos por servicios ambientales, o políticas que promuevan conservación de áreas prioritarias que proveen servicios ecosistémicos relevantes. Cuando se implementen políticas territoriales, es importante tomar en cuenta todos los servicios ecosistémicos provistos un área y hacer un análisis de costo beneficio de dar prioridad a un uso de suelo determinado. Por ejemplo, para el caso de las zonas agrícolas en el área de estudio, además de proveer servicio de regulación de inundaciones, proveen cosechas de plantas comestibles aprovechables por los humanos. Por lo tanto, una valoración adecuada

debe estar en función, no solo del costo monetario de reemplazo del servicio, sino también de los beneficiarios de los servicios ecosistémicos.

Es necesaria una mayor generación de conocimiento sobre la relación provisión-flujo-beneficiario de servicios ecosistémicos de regulación de inundaciones en microcuencas urbanas, para aportar claridad a los instrumentos de planeación territorial sobre cómo los SE y sus cambios deben ser medidos y evaluados. Queda el gran reto de una incorporación eficaz de los SE en la toma de decisiones, planeación y ordenamiento territorial.

7. Referencias

- Aguirre-Jiménez, A. A. (2004). Gestión integral del agua en cuencas hidrológicas desde la perspectiva de un modelo vertical. *Carta Económica Regional*, 17(núm. 89, julio-septiembre).
- Albert, C., Hauck, J., Buhr, N., & von Haaren, C. (2014). What ecosystem services information do users want? Investigating interests and requirements among landscape and regional planners in Germany. *Landscape Ecology*, 29(8), 1301.
- Álvarez-Contreras, M. D. (2016). *El ocio y la cultura ambiental en áreas naturales de Guadalajara: el bosque de La Primavera y la barranca del río Santiago*. Centro de Investigaciones y Estudios Superiores de Antropología Social, Guadalajara, México.
- Anderson, M. B. (1985). A reconceptualization of the linkages between disasters and development. *Disasters*, 9 Suppl s1, 46–51.
- Andrew, M. E., Wulder, M. a., & Nelson, T. a. (2014). Potential contributions of remote sensing to ecosystem service assessments. *Progress in Physical Geography*, 38(3), 328–353. <http://doi.org/10.1177/0309133314528942>
- Aquaveo. (2016). TR-55. Recuperado el 1 de abril de 2018, a partir de <https://www.aquaveo.com/software/wms-tr55>
- Arellano-Ríos, A. (2014). La condición política de la coordinación metropolitana en Guadalajara, México. *Revista Estado, Gobierno, Gestión Pública*, (Nº 23), 89–119. Recuperado a partir de <https://revistaeggp.uchile.cl/index.php/REGP/article/download/36825/38388/>
- Asamblea General de las Naciones Unidas. (1987). *Report of the world comission on environment and development: Our common future*. Oslo.
- Atkinson, P., Clark, M. J., G. Lewis, H., Bevington, J., Murdock, A., & Branson, J. (2012). *State-of-the-art in Risk Mapping*. Recuperado a partir de https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/286939/12-1304-state-of-the-art-risk-mapping.pdf
- Baecher, G. B. (2009). Quantifying Flood Risk. En *ASFPM Foundation's Symposium 1: Defining and Measuring Flood Risks and Floodplain Resources* (pp. 1–24). ASFPM Foundation. Recuperado a partir de <http://www.asfpmfoundation.org/ace->

files/forum/Quantifying_Flood_Risk_FINAL.pdf?pagename=forum/Quantifying_Flood_Risk_FINAL.pdf

- Bagstad, K. J., Semmens, D. J., & Winthrop, R. (2013). Comparing approaches to spatially explicit ecosystem service modeling: A case study from the San Pedro River, Arizona. *Ecosystem Services*, 5, 40–50. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.07.007>
- Bagstad, K. J., Villa, F., Batker, D., Harrison-Cox, J., Voigt, B., & Johnson, G. W. (2014). From theoretical to actual ecosystem services: mapping beneficiaries and spatial flows in ecosystem service assessments. *Ecology and Society*, 19(2). Recuperado a partir de <http://www.ecologyandsociety.org/vol19/iss2/art64/>
- Balderas-Torres, A., & De Alba-Martinez, H. (2015). Valoración de áreas forestales próximas a zonas urbanas en México: incorporando a los usuarios de los servicios ambientales en REDD+. En F. Paz & J. Wong (Eds.), *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2014. Serie Síntesis Nacionales*. Texcoco, Estado de México, México.: Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida y el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Recuperado a partir de http://www.pmc carbono.org/pmc/publicaciones/Libro_Merida_2014_PMC_ISBN-web.pdf
- Balderas-Torres, A., MacMillan, D. C., Skutsch, M., & Lovett, J. C. (2015). ‘Yes-in-my-backyard’: Spatial differences in the valuation of forest services and local co-benefits for carbon markets in México. *Ecological Economics*, 109, 130–141. <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.11.008>
- Ballesteros, C., Jiménez, J. A., & Viavattene, C. (2018). A multi-component flood risk assessment in the Maresme coast (NW Mediterranean). *Natural Hazards*, 90(1), 265–292. <http://doi.org/10.1007/s11069-017-3042-9>
- Balvanera, P., & Cotler, H. (2007). Los servicios ecosistémicos y la toma de decisiones: retos y perspectivas, 117–123.
- Balvanera, P., Uriarte, M., Almeida-Leñero, L., Altesor, A., DeClerck, F., Gardner, T., ... Vallejos, M. (2012). Ecosystem services research in Latin America: The state of the art.

- Ecosystem Services*, 2, 56–70. <http://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.09.006>
- Becker, E., & Jahn, T. (Eds.). (1999). Exploring Uncommon Ground: Sustainability and Social Sciences. En *Sustainability and the Social Sciences: A cross-disciplinary approach to integrating environmental considerations into theoretical reorientation* (1st ed.). London: UNESCO.
- Bedient, P. B., Huber, W. C., & Vieux, B. E. (2013). *Hydrology and floodplain analysis* (5th ed.). Upper Saddle River: Pearson.
- Bergkamp, G., & Cross, K. (2006). Groundwater and ecosystem services: towards their sustainable use. *International Symposium on Groundwater Sustainability (ISGWAS)*, 177–193. Recuperado a partir de <http://aguas.igme.es/igme/isgwas/Ponencias ISGWAS/13-Bergkamp.pdf>
- Bouiadjra, S. E. B., Zerey, W. El, & Benabdeli, K. (2011). Étude diachronique des changements du couvert végétal dans un écosystème montagneux par télédétection spatiale : cas des monts du Tessala (Algérie occidentale). *Physio-Géo, Iss Volume 5, Pp 211-225 (2011)*, (Volume 5), 211. <http://doi.org/10.4000/physio-geo.2048>
- Brahmi, N., Hatira, A., & Rabia, M.-C. (2010). Contribution de la télédétection et des systèmes d'information géographique à la prise en compte du risque de prolifération des Aedes dans les zones humides de Bizerte (Nord de la Tunisie). *Physio-Géo, Iss Volume 4, Pp 151-168 (2010)*, (Volume 4), 151. <http://doi.org/10.4000/physio-geo.1262>
- Breña-Puyol, A. F. (2003). *Hidrología urbana* (Primera ed). México, D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana. Recuperado a partir de <http://www.uamenlinea.uam.mx/materiales/licenciatura/hidrologia//libro2-hidrologia/libro-web/portada1.htm>
- Burkhard, B., Kroll, F., & Müller, F. (2010). Landscapes' capacities to provide ecosystem services – a concept for land-cover based assessments. *Landscape Online*, 1–22. <http://doi.org/10.3097/LO.200915>
- Campos-Aranda, D. F. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. (Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Ed.) (Tercera). San Luis Potosí: Editorial Universitaria Potosina.
- Campos-Aranda, D. F. (2010). *Introducción a la hidrología urbana* (1era ed.). San Luis Potosí: Daniel Francisco Campos Aranda.
- Cançado, V., Brasil, L., Nascimento, N., & Guerra, A. (2008). Flood risk assessment in an

- urban area : Measuring hazard and vulnerability. En *11th International Conference on Urban Drainage* (pp. 1–10). Edinburgh.
- Carter, C., Scott, A., Hardman, M., Everard, M., & Corstanje, R. (2012). Ecosystem Tools Literature Review. Recuperado el 20 de mayo de 2016, a partir de http://neat.ecosystemsknowledge.net/pdfs/ecosystem_services_tools_literature_review_full.pdf
- Carter, W. (1961). *Magnitude and Frequency of Floods in Suburban Areas*. U.S. Geological Survey Professional Paper 424-B.
- Casas y Terrenos. (2018). Casas y Terrenos. Recuperado a partir de <https://www.casasyterrenos.com/>
- CBD. (2010). COP Decision. Recuperado el 20 de septiembre de 2014, a partir de <http://www.cbd.int/decision/cop/?id=12268>
- CEA. (2011). *Sistema de información geográfica para la prevención de inundaciones en la Cuenca El Ahogado*. Guadalajara.
- CEA. (2012). Puntos vulnerables de la Cuenca El Ahogado. Guadalajara: Comisión Estatal del Agua Jaslico. Recuperado a partir de www.ceajalisco.gob.mx
- CEDHJ. (2009). *Recomendación 1/2009*. Guadalajara.
- CETENAL. (1975a). Carta edafológica, Guadalajara Oeste, F-13-D-65. Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). Recuperado a partir de www.inegi.org.mx
- CETENAL. (1975b). Carta geológica, Guadalajara Oeste, F-13-D-65. Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). Recuperado a partir de www.inegi.org.mx
- CFE. (2016). Boletín de prensa: Información de CFE (110). Mexico, D.F.: Gerencia de Comunicación Social, Comisión Federal de Electricidad.
- Chen, A. S., Hsu, M. H., Chen, T. S., & Chang, T. J. (2003). An integrated inundation model for highly developed urban areas, (106), 221–230.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- Coase, R. H. (1960). The Problem of Social Cost. *The Journal of Law & Economics*, 3, 1–44. Recuperado a partir de <http://www.jstor.org/stable/724810>
- CONAGUA. (2016). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales. Gerencia de Aguas

Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR), Subdirección General Técnica, CONAGUA.

CONANP. (2000). *Programa de manejo del Área de Protección de Flora y Fauna “La Primavera”*, México (Vol. 1). México, D.F. Recuperado a partir de http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/programas_manejo/primavera.pdf

CONAPO. (2012). *Índice de Marginación Urbana 2010*. (Consejo Nacional de Población, Ed.) (Primera ed). Ciudad de México: Consejo Nacional de Población, Secretaría de Gobernación. Recuperado a partir de http://www.conapo.gob.mx/en/CONAPO/Indice_de_marginacion_urbana_2010

Congreso del Estado de Jalisco. (2014). Dictamen que incluye a Zapotlanejo al Área Metropolitana de Guadalajara. Recuperado a partir de <http://www.congreso.jal.gob.mx/?q=boletines/dictamen-que-incluye-zapotlanejo-al-rea-metropolitana-de-guadalajara>

Costanza, R., Arge, R., Groot, R. De, Farberk, S., Grasso, M., Hannon, B., ... Suttonkk, P. (1997). The value of the world ' s ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(May), 253–260.

Crossman, N. D., Burkhard, B., Nedkov, S., Willemen, L., Petz, K., Palomo, I., ... Maes, J. (2013). A blueprint for mapping and modelling ecosystem services. *Ecosystem Services*, 4, 4–14. <http://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.02.001>

Daily, G. C. (1997). *Nature's Services: Societal Dependence On Natural Ecosystems*. Island Press. Recuperado a partir de <http://books.google.com/books?id=JyxZbqO3xq0C&pgis=1>

de Almeida, I. K., Almeida, A. K., Gabas, S. G., & Sobrinho, T. A. (2017). Performance of methods for estimating the time of concentration in a watershed of a tropical region. *Hydrological Sciences Journal*, 62(14), 2406–2414. <http://doi.org/10.1080/02626667.2017.1384549>

de Araujo Barbosa, C. C., Atkinson, P. M., & Dearing, J. a. (2015). Remote sensing of ecosystem services: A systematic review. *Ecological Indicators*, 52, 430–443. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.01.007>

Derissen, S., & Latacz-Lohmann, U. (2013). What are PES? A review of definitions and an extension. *Ecosystem Services*, 6, 12–15. <http://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.02.002>

- Ebert, A., Kerle, N., & Stein, A. (2008). Urban social vulnerability assessment with physical proxies and spatial metrics derived from air- and spaceborne imagery and GIS data. *NATURAL HAZARDS*, 48(2), 275–294.
- EC. (2011). *Our life insurance, our natural capital: an EU biodiversity strategy to 2020*.
- Egoh, B., Drakou, E. G., Dunbar, M. B., & Maes, J. (2012). *Indicators for mapping ecosystem services: a review*. European Commission. Recuperado a partir de <http://ies.jrc.ec.europa.eu/>
- Eichler, M. (1999). Sustainability from a Feminist Sociological Perspective: A Framework for Disciplinary Reorientation. En E. Becker & T. Jahn (Eds.), *Sustainability and the Social Sciences: A cross-disciplinary approach to integrating environmental considerations into theoretical reorientation*. London: UNESCO.
- Ennaanay, D., Conte, M., Brooks, K., Nieber, J., Sharma, M., Wolny, S., & Mendoza, G. (2011). Valuing land cover impact on storm peak mitigation. En P. Kareiva, H. Tallis, T. H. Ricketts, G. C. Daily, & S. Polasky (Eds.), *Natural Capital Theory and Practice of Mapping Ecosystem Services* (1st ed.). Oxford: Oxford University Press.
- Ericksen, P., Leeuw, J. De, Said, M., Silvestri, S., & Zaibet, L. (2012). Mapping ecosystem services in the Ewaso Ng'iro catchment. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 8(June 2013), 37–41.
- Evans, S., Gunn, N., & Williams, D. (2007). Use of GIS in Flood Risk Mapping. ... *Seminar GIS* (...), 1–12. Recuperado a partir de <https://idrc-gisworkshop.pbworks.com/f/Use+of+GIS+in+flood+risk+Mapping.pdf>
- Farley, J. (2012). Ecosystem services: The economics debate. *Ecosystem Services*, 1(1), 40–49. <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.002>
- Fedeski, M., & Gwilliam, J. (2007). Urban sustainability in the presence of flood and geological hazards: The development of a GIS-based vulnerability and risk assessment methodology. *Landscape and Urban Planning*, 83(1), 50–61. <http://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.05.012>
- Fitter, A., Elmqvist, T., Haines-young, R. O. Y., Potschin, M., Rinaldo, A., Seta, H., ... Zobel, M. (2010). An Assessment of Ecosystem Services and Biodiversity in Europe. *Issues in Environmental Science and Technology*, 30, 1–28.
- FLOODsite. (2009). *Language of risk. Project definitions. 2nd Ed. Report T32-0401*.

Recuperado a partir de floodsite.net

García, E. (1964). *Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen* (5a ed.). México, D.F.: Instituto de Geografía - UNAM.

García Lemus, V. M. (2004). Rompiendo paradigmas en desastres y desarrollo. *Vivir con el riesgo, informe Mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres, un desafío para el desarrollo*, 1–7.

Gobierno de Tlajomulco de Zúñiga. (2010). Programa de Ordenamiento Territorial Local. Tlajomulco de Zúñiga: Gobierno de Tlajomulco de Zúñiga. Recuperado a partir de https://www.tlajomulco.gob.mx/sites/default/files/transparencia/planes/poel_completo.pdf

Gobierno de Tlajomulco de Zúñiga. (2017a). Con la presa del Guayabo mejoraremos el servicio de agua potable y disminuirán inundaciones. Nota de prensa. Recuperado el 28 de agosto de 2018, a partir de [Con la presa del Guayabo mejoraremos el servicio de agua potable y disminuirán inundaciones](https://www.tlajomulco.gob.mx/prensa/con-la-presa-del-guayabo-mejoraremos-el-servicio-de-agua-potable-y-disminuiran-inundaciones)

Gobierno de Tlajomulco de Zúñiga. (2017b). Tlajomulco avanza con obras para mitigar inundaciones. Nota de prensa. Recuperado el 28 de agosto de 2018, a partir de <https://www.tlajomulco.gob.mx/prensa/tlajomulco-avanza-con-obras-para-mitigar-inundaciones>

Gobierno de Tlajomulco de Zúñiga. (2018). Se aprueba por unanimidad la construcción de la planta potabilizadora en corredor Chapala. Nota de prensa. Recuperado el 28 de agosto de 2018, a partir de [https://tlajomulco.gob.mx/prensa/se-aprueba-por-unanimidad-la-construcción-de-la-planta-potabilizadora-en-corredor-chapala](https://tlajomulco.gob.mx/prensa/se-aprueba-por-unanimidad-la-construccion-de-la-planta-potabilizadora-en-corredor-chapala)

Gobierno del Estado de Jalisco. (2006). Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial del Estado de Jalisco (última reforma 2006). Guadalajara: Secretaría de Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable, Gobierno del Estado de Jalisco.

Gobierno del Estado de Jalisco. (2009, agosto 9). El. *El Estado de Jalisco. Periódico Oficial*, p. 16. Guadalajara.

Gómez-Palacios, D., Torres, M. A., & Reinoso, E. (2017). Flood mapping through principal component analysis of multitemporal satellite imagery considering the alteration of water spectral properties due to turbidity conditions. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 607–623. <http://doi.org/10.1080/19475705.2016.1250115>

- Grêt-Regamey, A., Weibel, B., Bagstad, K. J., Ferrari, M., Geneletti, D., Klug, H., ... Tappeiner, U. (2014). On the effects of scale for ecosystem services mapping. *PLoS one*, 9(12), e112601. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0112601>
- Greve, A. I. (2012). Linking urban form, land cover pattern, and hydrologic flow regime in the Puget Sound Lowland. *Urban Ecosystems*, 15(2), 437–450. <http://doi.org/10.1007/s11252-012-0233-8>
- Grimaldi, S., Petroselli, A., Tauro, F., & Porfiri, M. (2012). Time of concentration: a paradox in modern hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, 57(2), 217–228. <http://doi.org/10.1080/02626667.2011.644244>
- Grineski, S. E., Collins, T. W., Ford, P., Fitzgerald, R., Aldouri, R., Velázquez-Angulo, G., ... Lu, D. (2012). Climate change and environmental injustice in a bi-national context. *Applied Geography*, 33, 25–35. Recuperado a partir de <http://10.0.3.248/j.apgeog.2011.05.013>
- Grineski, S. E., Collins, T. W., Romo Aguilar, M. de L., & Aldouri, R. (2010). No Safe Place: Environmental Hazards & Injustice along Mexico's Northern Border. *Social Forces*, (5), 2241.
- Gutiérrez-Garza, E., & González-Gaudiano, É. (2010). *De las teorías del Desarrollo Sustentable: Construcción de un enfoque multidisciplinario* (1era ed.). Monterrey, Nuevo León, Nuevo León: UANL.
- Haase, D., Schwarz, N., Strohbach, M., Kroll, F., & Seppelt, R. (2012). Synergies, Trade-offs, and Losses of Ecosystem Services in Urban Regions: an Integrated Multiscale Framework Applied to the Leipzig-Halle Region, Germany. *Ecology and Society*, 17(3).
- Hauck, J., Schweppe-kraft, B., Albert, C., Görg, C., Jax, K., Jensen, R., ... Grêt-regamey, A. (2013). The Promise of the Ecosystem Services Concept for Planning and Decision-Making, 4(February), 232–236.
- Hernández-Guerrero, J. A. (2006). *Identificación de zonas de inundación en la cuenca del Ahogado a partir de la variable de precipitación máxima en 24 hrs. (1970-2001)*. Universidad de Guadalajara.
- Hernández-Jimenez, F. (2014). *Obtención del número de curva (NC) para la República Mexicana mediante el uso de sistemas de información geográfica, aplicando la metodología TR-55*. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Huerta-Martínez, F. M., & Ibarra-Montoya, J. L. (2014). Incendios en el bosque la primavera (Jalisco, México): un acercamiento a sus posibles causas y consecuencias. *CienciaUAT*, 9, 23–32. Recuperado a partir de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-78582014000100023&nrm=iso
- IIEG. (2011). Ortofoto del Área Metropolitana de Guadalajara de 2011. Zapopan, Jalisco: Instituto de Información Estadística y Geográfica del IIEG.
- IIEG. (2017). *Alcanza Área Metropolitana de Guadalajara los 5 millones de habitantes* (Nota técnica No. Boletín USD 17.11.06). Zapopan, Jalisco. Recuperado a partir de <https://iieg.gob.mx/contenido/noticias171116-habitante-5-millones-AMG.pdf>
- IISD. (2012). i. Winnipeg: Head Office, The International Institute for Sustainable Development. Recuperado a partir de https://www.iisd.org/pdf/2012/sd_timeline_2012.pdf
- IMEPLAN. (2017a). *Instituto Metropolitano de Planeación de Área Metropolitana de Guadalajara (IMEPLAN)*. Guadalajara. Recuperado a partir de http://imeplan.mx/sites/default/files/IMEPLAN/POTmet_IIIFB-BajaRes.pdf
- IMEPLAN. (2017b). SIGMetro. Guadalajara: Instituto Metropolitano de Planeación del Área Metropolitana de Guadalajara. Recuperado a partir de <http://sigmetro.imeplan.mx/>
- IMTA. (2013). Extractor rápido de información climática III, versión 3.2. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Comisión Nacional del Agua.
- INEGI. (2004). *Guías para la Interpretación de Cartografía Edafología*. México: Instituto Nacional de Estadística, y Geografía.
- INEGI. (2010a). Marco Geoestadístico Nacional. Recuperado el 26 de febrero de 2015, a partir de http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/M_Geoestadistico.aspx
- INEGI. (2010b). *Volumen y crecimiento. Población total según tamaño de localidad para cada entidad federativa*. Aguascalientes, Aguascalientes. Recuperado a partir de http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur_urb.aspx?tema=P
- INEGI. (2015). Guía para la interpretación de cartografía : uso del suelo y vegetación : escala 1:250, 000 : serie V. Aguascalientes, Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado a partir de

- http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/usuariosuelo/doc/guia_interusuariosuelov.pdf
- INEGI. (2017). Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación 1:250 000, Serie VI (Conjunto Nacional). Aguascalientes, Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado a partir de <https://www.inegi.org.mx/temas/mapas/usuariosuelo/>
- Informador. (2017, agosto 1). Realizan dragado de la presa 'El Guayabo' en Tlajomulco. Recuperado a partir de 1 de Agosto de 2017
- Irvem, A., & Topaloglu, F. (2012). Identification of flood risk area in the Orontes river basin, Turkey, using multi-criteria decision analyses. *JOURNAL OF FOOD AGRICULTURE & ENVIRONMENT*, 10(3-4), 895-899.
- James, L. D. (1965). Using a digital computer to estimate the effects of urban development on flood peaks. *Water Resources Research*, 1(2), 223-234. <http://doi.org/10.1029/WR001i002p00223>
- Jenks, G. F. (1977). Optimal data classification for choropleth maps. Lawrence, KS: University of Kansas, Department of Geography (Occasional Paper No. 2).
- Jiang, J., Wang, P., Lung, W. seng, Guo, L., & Li, M. (2012). A GIS-based generic real-time risk assessment framework and decision tools for chemical spills in the river basin. *Journal of Hazardous Materials*, 227-228, 280-291. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.05.051>
- Jiménez-González, J. P., Reyes-García, P., Monroy-Morales, A., de Alba-Martínez, H., Rizo-Decelis, L. D., & Hernández-Rivera, L. (2018). Análisis espacial de propiedades hidrológicas del suelo dentro del Área Natural Protegida "Bosque La Primavera". En *Latin American Geospatial Forum 2018 (6 al 8 de Noviembre)*. México, D.F.: Latin America Geospatial Forum. Recuperado a partir de www.lagf.org
- Jujnovsky, J., González-Martínez, T. M., Cantoral-Uriza, E. A., & Almeida-Lenero, L. (2012). Assessment of water supply as an ecosystem service in a rural-urban watershed in southwestern Mexico city. *Environmental Management*, 49(3), 690-702. <http://doi.org/10.1007/s00267-011-9804-3>
- Jung, Y., Shin, Y., Jang, C. H., Kum, D., Kim, Y. S., Lim, K. J., ... Lee, S. O. (2014). Estimation of flood risk index considering the regional flood characteristics: a case of South Korea. *Paddy and Water Environment*, 12(1), 41-49.

<http://doi.org/10.1007/s10333-014-0430-6>

- JVC. (2003). *Informe de la evaluación de impacto ambiental del proyecto entregado a la Secretaría del Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable (SEMADES), para la construcción de un estadio de fútbol y la urbanización del Centro de Cultura, Convenciones y Negocios*. Guadalajara.
- Kandziora, M., Burkhard, B., & Muller, F. (2013). Interactions of ecosystem properties, ecosystem integrity and ecosystem service indicators-A theoretical matrix exercise. *ECOLOGICAL INDICATORS VO* - 28, 54.
- Kellagher, R. B. B. (2002). *Report SR 580. Storage requirements for rainfall runoff from greenfield development sites*. Wallingford, Oxon.
- Klijn, F., Kreibich, H., de Moel, H., & Penning-Rowsell, E. (2015). Adaptive flood risk management planning based on a comprehensive flood risk conceptualisation. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 20(6), 845–864. <http://doi.org/10.1007/s11027-015-9638-z>
- Kolli, Z., Jouannic, G., Marchetti, M., Legendre, T., Gastaud, P., Gargani, J., & Arki, F. (2016). Flood risk vulnerability assessment: hierarchization of the main factors at a regional scale. *E3S Web of Conferences*, 7, 08014. <http://doi.org/10.1051/e3sconf/20160708014>
- Krishnamurthy, P. K., & Krishnamurthy, L. (2012). Social Vulnerability Assessment through GIS Techniques: A Case Study of Flood Risk Mapping in Mexico. En J. K. Thakur, S. K. Singh, A. L. Ramanathan, M. B. K. Prasad, & W. Gossel (Eds.), *Geospatial Techniques for Managing Environmental Resources* (pp. 276–291). Dordrecht: Springer Netherlands. http://doi.org/10.1007/978-94-007-1858-6_17
- Krzanowski, W. J., & Marriott, F. H. C. (1995). *Multivariate Analysis: distributions, ordination and inference. part 2. classification, covariance Structures and repeated measurements*. Edward Arnold.
- Leopold, L. B. (1968). *Hydrology for urban land planning - A guidebook on the hydrologic effects of urban land use. Circular*. Reston, VA. Recuperado a partir de <http://pubs.er.usgs.gov/publication/cir554>
- LGEEPA. (2018). Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (Última reforma publicada DOF 05-06-2018). Ciudad de México: Cámara de Diputados del

Honorable Congreso de la Unión, Secretaría General, Secretaría de Servicios Parlamentario.

- Lyu, R., Zhang, J., Xu, M., & Li, J. (2018). Impacts of urbanization on ecosystem services and their temporal relations: A case study in Northern Ningxia, China. *Land Use Policy*, 77, 163–173. <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.05.022>
- Maes, J., Hauck, J., Paracchini, M. L., Ratamáki, O., Termansen, M., Perez-soba, M., ... Bidoglio, G. (2011). A spatial assessment of ecosystem services in Europe : Methods , case studies and policy analysis - Synthesis report. Italy: European Commission, Joint Research Centre The. <http://doi.org/10.2788/41831>
- Maes, J., Paracchini, M. L., & Zulian, G. (2011). *A European assessment of the provision of ecosystem services*.
- Mahood, G. A. (1980). Geological evolution of a pleistocene rhyolitic center — Sierra La Primavera, Jalisco, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 8(2), 199–230. [http://doi.org/https://doi.org/10.1016/0377-0273\(80\)90105-5](http://doi.org/https://doi.org/10.1016/0377-0273(80)90105-5)
- Marc, L., Babu, S., & Hamilton, K. (2005). Ecosystem Conditions and Human Well-being. En R. Hassan, R. Scholes, & N. Ash (Eds.), *Millenium Ecosystem Assessment. Ecosystems and HumanWell-being: Current State and Trends* (pp. 123–164). Island Press.
- Martínez-Harms, M. J., & Balvanera, P. (2012). Methods for mapping ecosystem service supply: a review. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 8:1-2(September), 15–25.
- Masnata, A. (1973). Principes Méthodologiques de Pareto e Analyse Économique Contemporaine. *Revue d'économie politique VO* - 83, (6), 1109.
- McDonnell, M.J.;Picket, A., Nedkov, S., & Burkhard, B. (2012). Flood regulating ecosystem services—Mapping supply and demand, in the Etropole municipality, Bulgaria. *Ecological Indicators*, 21, 67–79. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.022>
- McDonnell, M. J., & Picket, A. . (1990). Ecosystem structure and function along gradients: an unexploited urban-rural opportunity for ecology. *Ecology*, 71(4), 1232–1237.
- McKenzie, E., Irwin, F., Ranganathan, J., Hanson, C., Kousky, C., Bennet, K., ... Paavola, J. (2011). Incorporating ecosystem services in decisions. En P. Kareiva, H. Tallis, T. H. Ricketts, G. C. Daily, & S. Polasky (Eds.), *Natural Capital Theory and Practice of*

- Mapping Ecosystem Services* (1st ed., pp. 341–355). Oxford: Oxford University Press.
- MEA. (2005). *Ecosystems and human well-being: Synthesis report*. Washington, D.C.: Island Press.
- Mendoza-Pérez, C., & Venegas-Herrera, A. del C. (2003). *Desbordado crecimiento de la cuenca del Ahogado* (Gaceta Universitaria). Zapopan, Jalisco.
- Mills, A. J., & Fey, M. V. (2004). Effects of vegetation cover of the tendency of soil to crust in South Africa. *Soil Use and Management*, 20, 308–317.
- Moglen, G. E., & Beighley, R. E. (2002). Spatially Explicit Hydrologic Modeling Of Land Use Change. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 38(1), 241–252. <http://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2002.tb01548.x>
- Monte, T. R. (2013). *Metodología para evaluar la modificación de la capacidad de autodepuración de los ríos por efecto de cambio climático*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Moulin, C., & Faytre, L. (2017). Réduire la vulnérabilité des territoires aux inondations : évaluer pour agir. *Sciences, Eaux & Territoires, Vol 2017, Iss 23, Pp 12-17 (2017) VO - 2017*, (23), 12.
- Nandi Arpita, nandi@etsu. ed., Mandal, A., Wilson, M., & Smith, D. (2016). Flood hazard mapping in Jamaica using principal component analysis and logistic regression. *Environmental Earth Sciences*, 75(6), 1–16.
- Nasiri, H., Mohd Yusof, M. J., & Mohammad Ali, T. A. (2016). An overview to flood vulnerability assessment methods. *Sustainable Water Resources Management*, 2(3), 331–336. <http://doi.org/10.1007/s40899-016-0051-x>
- Nemec, K. T., & Raudsepp-Hearne, C. (2013). The use of geographic information systems to map and assess ecosystem services. *Biodiversity and Conservation*, 22(1), 1–15. <http://doi.org/10.1007/s10531-012-0406-z>
- NRCS. (2007). *Part 630 Hydrology National Engineering Handbook*. Washington, DC.: Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture. Recuperado a partir de <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/?cid=stelprdb1043063>
- Ouma, Y. O., & Tateishi, R. (2014). Urban Flood Vulnerability and Risk Mapping Using

- Integrated Multi-Parametric AHP and GIS: Methodological Overview and Case Study Assessment. *WATER*, 6(6), 1515–1545.
- Padilla, A., & Delgado, J. (2013). Tratamiento y gestión de series temporales hidrológicas. Manual de usuario de la aplicación Trasero 2.1.0. Alicante: Departamento de ciclo hídrico. Diputación Provincial de Alicante.
- Paehlke, R. (1999). Towards Defining, Measuring, and Achieving Sustainability: Tools and Strategies for Environmental Valuation. En E. Becker & T. Jahn (Eds.), *Sustainability and the Social Sciences: A cross-disciplinary approach to integrating environmental considerations into theoretical reorientation* (1st ed.). London: UNESCO.
- Peggion, M., Bernardini, A., & Masera, M. (2008). *Geographic Information Systems and Risk Assessment*. Luxembourg: Recuperado a partir de <http://www.jrc.ec.europa.eu/>
- Pigou, A. C. (1920). *The economics of welfare* (1st ed.). London: MacMillan and Co., Limited.
- Primavera, B. La. (2016). Fauna del Bosque La Primavera. Recuperado el 14 de noviembre de 2018, a partir de <http://www.bosquelaprimavera.com/fauna.php>
- Raad, B. (2009). Fondements de la théorie des valeurs extrêmes, ses principales applications et son apport à la gestion des risques du marché pétrolier. *Mathematics and Social Sciences*, 47(186), 29–63.
- Rahmati, O., Zeinivand, H., & Besharat, M. (2016). Flood hazard zoning in Yasooj region, Iran, using GIS and multi-criteria decision analysis. *Geomatics, Natural Hazards & Risk*, 7(3), 1000–1017.
- Rakotoarisoa, M., Fleurant, C., Randriamaherisoa, A., & Razakamanana, T. (2014). Mise en oeuvre d'un modèle hydrologique conceptuel sur le bassin versant de la Sisaony, Région Analamanga, Madagascar.
- Reiter, J., & Weiland, U. (2011). Assessment of urban vulnerability towards floods using an indicator-based approach – a case study for Santiago de Chile, 2107–2123. <http://doi.org/10.5194/nhess-11-2107-2011>
- Reyers, B., Biggs, R., Cumming, G. S., Elmqvist, T., Hejnowicz, A. P., & Polasky, S. (2013). Getting the measure of ecosystem services: a social—ecological approach. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(5), 268–273. <http://doi.org/10.2307/23470507>
- Rizo-Decelis, L. D. (2017). *Consideraciones sobre la calidad del agua del río Santiago*

- (México) y cartografía de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos de su cuenca, para una adecuada gestión y planificación hidrológica. Universidad de Málaga.
- Robinson, J., & Tinker, J. (1995). Reconciling Ecological, Economic, and Social Imperatives: Towards an Analytical Framework. En *SDRI Discussion Paper Series 95 - I*. Vancouver: Sustainable Development Research Institute.
- Robinson, J., & Tinker, J. (1997). Reconciling Ecological, Economic, and Social Imperatives: A New Conceptual Framework. *Surviving Globalism: The Social and Environmental Dimensions*.
- Rogelis, M. C., Werner, M., Obregón, N., & Wright, N. (2016). Regional prioritisation of flood risk in mountainous areas. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(3), 833–853. <http://doi.org/10.5194/nhess-16-833-2016>
- Rosas-Elguera, J., Ferrari, L., López-Martínez, M., & Urrutia-Fucugauchi, J. (1997). Stratigraphy and Tectonics of the Guadalajara Region and Triple-Junction Area, Western Mexico. *International Geology Review*, 39(2), 125–140. <http://doi.org/10.1080/00206819709465263>
- Santillan, J. R., Marqueso, J. T., Makinano-Santillan, M., & Serviano, J. L. (2016). BEYOND FLOOD HAZARD MAPS: DETAILED FLOOD CHARACTERIZATION WITH REMOTE SENSING, GIS AND 2D MODELLING. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W1, 315–323. <http://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W1-315-2016>
- Santini, M., Caccamo, G., Laurenti, A., Noce, S., & Valentini, R. (2010). A multi-component GIS framework for desertification risk assessment by an integrated index. *Applied Geography*, 30(3), 394–415. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2009.11.003>
- SCS. (1982). *Computer Program for Project Formulation Hydrology. Technical Release No. 20*. Washington, D.C.
- See, J. C. G., & Porio, E. E. (2015). Assessing Social Vulnerability to Flooding in Metro Manila Using Principal Component Analysis. *Philippine Sociological Review*, 63, 53–80. Recuperado a partir de <http://www.jstor.org/stable/24717187>
- SEMARNAT. (2006). *Manuel del Proceso de Ordenamiento Ecológico* (Primera). Mexico: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado a partir de <http://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/ordenamiento-ecologico>

- Serna-Chavez, H. M., Schulp, C. J. E., Van Bodegom, P. M., Bouten, W., Verburg, P. H., & Davidson, M. D. (2014). A quantitative framework for assessing spatial flows of ecosystem services. *Ecological Indicators*, 39, 24–33. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.11.024>
- Shaver, E., Horner, R., Skupien, J., May, C., & Ridley, G. (2007). *Fundamentals of urban runoff management: Technical and institutional issues*. (R. Rehnby, Ed.) (2nd ed.). Madison: North American Lake Management Society.
- Sherman, L. K. (1932). Stream Flow from Rainfall by the Unit Graph Method. *Engineering News-Record*, Vol. 108, 501–505.
- Söderman, T., Kopperoinen, L., Shemeikka, P., & Yli-Pelkonen, V. (2012). ECOSYSTEM SERVICES CRITERIA FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN URBAN REGIONS. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*, 14(02), 1250008. <http://doi.org/10.1142/S1464333212500081>
- Stein, A., Staritsky, I., Bouma, J., & Van Groenigen, J. W. (1995). Interactive GIS for environmental risk assessment. *International journal of geographical information systems*. <http://doi.org/10.1080/02693799508902053>
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topology. *Geological Society of America Bulletin*, 63(11), 1117–1142.
- Stürck, J., Poortinga, A., & Verburg, P. H. (2014). Mapping ecosystem services: The supply and demand of flood regulation services in Europe. *Ecological Indicators*, 38, 198–211. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.11.010>
- Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55–94. Recuperado a partir de <http://www.jstor.org/stable/210739>
- Tisdell, C. D. (2005). Managing ecosystems services for human benefit: economic and environmental policy challenges, 7(4).
- UNEP. (2004). *La reducción de riesgos de desastres: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo*.
- UNESCO. (2011). Biosphere Reserve Information, La Primavera.
- UNOPS. (2017a). *Estudio de balance hídrico de la cuenca del río Verde*. Mexico, D.F. Recuperado a partir de <http://201.131.6.193:8001/JaliscoSostenible/informe/>

- UNOPS. (2017b). Hidrometría y parámetros de campo. En *Estudio de balance hídrico de la cuenca del río Verde. Volumen 2*. Oficina de las Naciones Unidas de Servicios para Proyectos. Recuperado a partir de <http://201.131.6.193:8001/JaliscoSostenible/informe/#estudios-tecnicos>
- USDA. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55* (Second). Washington, DC.: United States Department of Agriculture. Recuperado a partir de https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf
- Velez Upegui, J. J., & Botero Gutierrez, A. (2011). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales. *Dyna (Medellin, Colombia)*, 78, 58–71.
- Véliz-Capuñay, C. (2016). *Análisis multivariante: métodos estadísticos multivariantes para la investigación* (Primera). Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Cengage Learning Argentina.
- Verhagen, W., Verburg, P. H., Schulp, N., & Stürck, J. (2015). Mapping Ecosystem Services. En J. A. Bouma & P. J. H. Van Beukering (Eds.), *Ecosystem Services from concept to practice* (1st ed.). Cambridge [England]: Cambridge University Press.
- Viessman, W. (1966). The hydrology of small impervious areas. *Water Resources Research*, 2(3), 405–412. <http://doi.org/10.1029/WR002i003p00405>
- Villalpando-Vizcaino, R., Ramón-Bravo, M. A., Orozco-Seifert, J. I., Maciel Ramos, M., Avelar Luna, A. S., & Mendoza Corvera, L. (2016). *Reporte de Proyecto de Aplicación Profesional. 4D08 -Proyectos de Impacto Socio-Ambiental: Servicios Ecosistémicos de Regulación de Inundaciones*. Tlaquepaque, Jalisco.
- Wan, L., Ye, X., Lee, J., Lu, X., Zheng, L., & Wu, K. (2015). Effects of urbanization on ecosystem service values in a mineral resource-based city. *Habitat International*, 46, 54–63. <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2014.10.020>
- Wang, Y., Li, Z., Tang, Z., & Zeng, G. (2011). A GIS-Based Spatial Multi-Criteria Approach for Flood Risk Assessment in the Dongting Lake Region, Hunan, Central China. *Water Resources Management*, 25(13), 3465–3484.
- Weiss, L. L. (1964). Ratio of True to Fixed-Interval Maximum Rainfall. *Journal of Hydraulics Division*, (90(HY1)), 77–82.
- Wong, T. S. W. (2009). Evolution of Kinematic Wave Time of Concentration Formulas for

Overland Flow. *JOURNAL OF HYDROLOGIC ENGINEERING* VO - 14, (7), 739.

- Youpeng, X., Jintao, X., Jinjia, D., Ying, C., Yixing, Y., & Xingqi, Z. (2010). Impacts of urbanization on hydrology in the Yangtze River Delta, China. *Water Science and Technology*, 62(6), 1221–1229. <http://doi.org/10.2166/wst.2010.391>
- Yu, Z., Luo, W., Hu, Y., Yuan, L., Zhu, A. X., & Lü, G. (2015). Change detection for 3D vector data: a CGA-based Delaunay–TIN intersection approach. *International Journal of Geographical Information Science*, 29(12), 2328–2347. <http://doi.org/10.1080/13658816.2015.1077963>
- Zhu, X. (2016). *GIS for environmental applications : a practical approach*. (Routledge, Ed.) (1st ed.). Abingdon.

Anexo 1. Resultados de campo para las mediciones de infiltración

A continuación se muestran los resultados de los muestreos en campo, descritos en Jiménez-González et al. (2018).

Muestra	Infiltración DA (mm/h)
M001	212
M002	124
M003	196
M004	152
M005	148
M006	132
M007	100
M008	408.7
M009	76
M010	112
M011	112
M012	104
M013	136
M014	60
M015	144
M016	44
M017	228
M018	196
M019	72
M020	220
M021	228
M022	128
M023	72

Anexo 2. Rutina para calcular el área inundada dado un caudal en *Python*

```
# -*- coding: utf-8 -*-
# Import system modules
import arcpy
from arcpy import env
from arcpy.sa import *
# Check out the ArcGIS Spatial Analyst extension license
arcpy.CheckOutExtension("Spatial")
# Overwrite pre-existing files
arcpy.env.overwriteOutput = True
# Script arguments
Gasto = 75
def AreaInundada(Gasto):
    # Local variables:
    MDG_recorte_1K_tif = "C:\\Users\\Hugo\\Dropbox\\PhD\\SIG\\Inundacion\\MDG_recorte_1K.tif"
    Temp = "C:\\Gasto\\Temp.tif"
    Temp_shp = "C:\\Gasto\\" + "Area_" + str(Gasto) + ".shp"
    #ShpArea = "C:\\Gasto\\" + "Area_" + str(Gasto) + ".shp"
    Temp_Layer = "Temp_Layer"
    TempLayer_1 = Temp_Layer
    TempLayer_2 = TempLayer_1
    # Process: Less Than Equal
    arcpy.gp.LessThanEqual_sa(MDG_recorte_1K_tif, Gasto, Temp)
    # Process: Raster to Polygon
    arcpy.RasterToPolygon_conversion(Temp, Temp_shp, "SIMPLIFY", "VALUE", "SINGLE_OUTER_PART", "")
    # Process: Make Feature Layer
    arcpy.MakeFeatureLayer_management(Temp_shp, Temp_Layer, "", "", "Shape Shape VISIBLE NONE;FID FID VISIBLE NONE;ID ID VISIBLE NONE;GRIDCODE GRIDCODE VISIBLE NONE")
    # Process: Select Layer By Attribute
```

```

arcpy.SelectLayerByAttribute_management(Temp_Layer, "NEW_SELECTION",
"\GRIDCODE" = 0")
# Process: Delete Features
arcpy.DeleteFeatures_management(TempLayer_1)
# Agregar campo
arcpy.AddField_management(Temp_shp, "Gasto", "SHORT", 3)
arcpy.CalculateField_management(Temp_shp, "Gasto", str(Gasto))
arcpy.AddField_management(Temp_shp, "Area", "DOUBLE")
exp = "{0}".format("!SHAPE.area@HECTARES!")
arcpy.CalculateField_management(Temp_shp, "Area", exp, "PYTHON")
# Process: Select Layer By Attribute
arcpy.SelectLayerByAttribute_management(Temp_Layer, "NEW_SELECTION", "\Area" <= 1")
# Process: Delete Features
arcpy.DeleteFeatures_management(TempLayer_1)
print("Se realizo correctamente la capa de ", Gasto, " m3/s")

```

Anexo 3. Rutina para estandarización de variables directamente en los atributos de la información vectorial en *Python*

```
# -*- coding: cp1252 -*-
import arcpy
from arcpy import env
import ast
import scipy
# Check out the ArcGIS Spatial Analyst extension license
arcpy.CheckOutExtension("Spatial")
env.workspace = "C:/Users/Hugo/Dropbox/PhD/SIG/Riesgo/"
# Overwrite pre-existing files
arcpy.env.overwriteOutput = True
Escenario2011 = "RiesgoEscenario2011_AGEBS.shp"
EscenarioProyectado = "RiesgoEscenarioProyectado_AGEBS.shp"
inFeatures = env.workspace + "/" + Escenario2011
inFeatures2 = env.workspace + "/" + EscenarioProyectado
# Field used in SQL expression
inField = "DEN_R"
L = ['ValorMed_2','DEN_R','VIV17_R','HOGAR2_R', 'SALUD2_R','DISC1_R','EDU28_R']
def Zscore(inFeatures, inField):
    # Obtener media y desviacion estandar
    # Iteracion entre las filas
    rows = arcpy.SearchCursor(inFeatures)
    row = rows.next()
    ValueList = list()
    while row:
        currentField = row.getValue(inField)
        ValueList.append(currentField)
        row = rows.next()
    #print(currentField)
    std = scipy.std(ValueList)
    mean = scipy.mean(ValueList)
    print "-----"
```

```

print (inField)
print "-----"
print ("Media: ", mean)
print ("Desviacion estandar: ", std)
print "-----"
# Crear y calcular campo
# Asegurarse que el nombre del campo sea menor de 10 caracteres
if inField > 10:
    Z_field = "Z_" + inField[:7]
else:
    Z_field = "Z_" + inField
# Crear campo
arcpy.AddField_management(inFeatures, Z_field, "DOUBLE")
exp = "(" + "!" + inField + "!" + "-" + str(mean) + ")" + "/" + str(std)
print (exp)
# Calcular campo
arcpy.CalculateField_management(inFeatures, Z_field, exp, "PYTHON")
#Score Proyectado
# Usa media y desviacion estandar
def Zscore2(inFeatures, inFeatures2, inField):
    # Obtener media y desviacion estandar
    # Iteracion entre las filas
    rows = arcpy.SearchCursor(inFeatures)
    row = rows.next()
    ValueList = list()
    while row:
        currentField = row.getValue(inField)
        ValueList.append(currentField)
        row = rows.next()
    #print(currentField)
    std = scipy.std(ValueList)
    mean = scipy.mean(ValueList)
    print "-----"

```

```

print (inField)
print "-----"
print ("Media: ", mean)
print ("Desviacion estandar: ", std)
print "-----"
# Crear y calcular campo
# Asegurarse que el nombre del campo sea menor de 10 caracteres
if inField > 10:
Z_field = "Z_" + inField[:7]
else:
Z_field = "Z_" + inField
# Crear campo
arcpy.AddField_management(inFeatures, Z_field, "DOUBLE")
exp = "(" + "!" + inField + "!" + "-" + str(mean) + ")" + "/" + str(std)
print (exp)
# Calcular campo
arcpy.CalculateField_management(inFeatures, Z_field, exp, "PYTHON")
# Crear y calcular campo
# Asegurarse que el nombre del campo sea menor de 10 caracteres
if inField > 10:
Z_field = "Z_" + inField[:7]
else:
Z_field = "Z_" + inField
# Crear campo
arcpy.AddField_management(inFeatures2, Z_field, "DOUBLE")
exp = "(" + "!" + inField + "!" + "-" + str(mean) + ")" + "/" + str(std)
print (exp)
# Calcular campo
arcpy.CalculateField_management(inFeatures2, Z_field, exp, "PYTHON")
# Normalizacion 0 - 1
def MaxMin(inFeatures, inField):
# Obtener media y desviacion estandar
# Iteracion entre las filas

```

```

rows = arcpy.SearchCursor(inFeatures)
row = rows.next()
ValueList = list()
while row:
currentField = row.getValue(inField)
ValueList.append(currentField)
row = rows.next()
#print(currentField)
std = scipy.std(ValueList)
mean = scipy.mean(ValueList)
maximum = scipy.amax(ValueList)
minimum = scipy.amin(ValueList)
print "-----"
print (inField)
print "-----"
print ("Media: ", mean)
print ("Desviacion estandar: ", std)
print ("Maximo: ", maximum)
print ("Minimo: ", minimum)
# Crear y calcular campo
# Asegurarse que el nombre del campo sea menor de 10 caracteres
if inField > 10:
N_field = "N_" + inField[:7]
else:
N_field = "N_" + inField
# Crear campo
arcpy.AddField_management(inFeatures, N_field, "DOUBLE")
exp = "(" + "!" + inField + "!" + "-" + str(minimum) + ")" + "/" + "(" + str(maximum) + "-" +
str(minimum) + ")"
print (exp)
print "-----"
print " "
# Calcular campo

```

```

arcpy.CalculateField_management(inFeatures, N_field, exp, "PYTHON")
#####
# Normalizacion 0 - 1 de ambos escenarios
def MaxMinEsc(inFeatures, inFeatures2, inField):
# Obtener media y desviacion estandar
# Iteracion entre las filas
Escenarios = [inFeatures, inFeatures2]
maximum = 0
minimum = 0

for i in Escenarios:
rows = arcpy.SearchCursor(i)
row = rows.next()
ValueList = list()
while row:
currentField = row.getValue(inField)
ValueList.append(currentField)
row = rows.next()
#print(currentField)
MaxTemp = scipy.amax(ValueList)
MinTemp = scipy.amin(ValueList)
if MaxTemp > maximum:
maximum = MaxTemp
if MinTemp < minimum:
minimum = MinTemp
print ("=====")
print(inField, "maximo: ", MaxTemp, "minimo: ", MinTemp)
print ("Maximo: ", maximum)
print ("Minimo: ", minimum)
# Crear y calcular campo Escenario 1
# Asegurarse que el nombre del campo sea menor de 10 caracteres
if inField > 10:
N_field = "N_" + inField[:7]

```

```

else:
N_field = "N_" + inField
# Crear y calcular campo Escenario 1
# Crear campo
arcpy.AddField_management(inFeatures, N_field, "DOUBLE")
exp = "(" + '!' + inField + '!' + "-" + str(minimum) + ")" + "/" + "(" + str(maximum) + "-" +
str(minimum) + ")"
print (exp)
print "-----"
print " "
# Calcular campo
arcpy.CalculateField_management(inFeatures, N_field, exp, "PYTHON")
# Crear y calcular campo Escenario 2
# Crear campo
arcpy.AddField_management(inFeatures2, N_field, "DOUBLE")
exp = "(" + '!' + inField + '!' + "-" + str(minimum) + ")" + "/" + "(" + str(maximum) + "-" +
str(minimum) + ")"
print (exp)
print "-----"
print " "
# Calcular campo
arcpy.CalculateField_management(inFeatures2, N_field, exp, "PYTHON")
####
def CalcularZscore(x):
for i in L:
Zscore(x, i)
print("Se realizo: ", i)
print("-----")
def CalcularZscore2(x,y):
for i in L:
Zscore2(x,y, i)
print("Se realizo: ", i)
print("-----")

```

```

def CalcularMaxMinEsc():
    for i in L:
        MaxMinEsc(inFeatures,inFeatures2, i)
        print("Se realizo: ", i)
        print("-----")

def ACP(inFeatures):
    # Crear y calcular campos Componente 1, Componente 2 y Indice
    # Calculo primer componente
    # Crear campo
    arcpy.AddField_management(inFeatures, "COMP_1", "DOUBLE")
    exp = "(0.237868*!Z_ValorMe!) + (0.421093*!Z_DEN_R!) + (0.0107493*!Z_VIV17_R!) +
(0.448832*!Z_HOGAR2_!)
(0.463356*!Z_SALUD2_!)+(0.420767*!Z_DISC1_R!)+(0.401685*!Z_EDU28_R!)"
    #print (exp)
    # Calcular campo
    arcpy.CalculateField_management(inFeatures, "COMP_1", exp, "PYTHON")
    print("Componente principal 1 calculado")
    # Calculo segundo componente
    # Crear campo
    arcpy.AddField_management(inFeatures, "COMP_2", "DOUBLE")
    exp2 = "-0.39346*!Z_ValorMe! - 0.265896*!Z_DEN_R! + 0.738288*!Z_VIV17_R! -
0.0557404*!Z_HOGAR2_! + 0.262145*!Z_SALUD2_! - 0.234845*!Z_DISC1_R!
+0.320063*!Z_EDU28_R!"
    #print (exp)
    # Calcular campo
    arcpy.CalculateField_management(inFeatures, "COMP_2", exp2, "PYTHON")
    print("Componente principal 2 calculado")
    # Indice Vulnerabilidad
    arcpy.AddField_management(inFeatures, "InVul", "DOUBLE")
    exp3 = "((3.9346*!COMP_1!)+(1.25123*!COMP_2!))/(3.9346+1.25123)"
    #print (exp)
    # Calcular campo

```

```
arcpy.CalculateField_management(inFeatures, "InVul", exp3, "PYTHON")  
print("Indice de vulnerabilidad calculado")
```

Anexo 4. Resultados de la prueba de rangos múltiples.

A continuación se presentan los resultados para la prueba de rangos múltiples:

Comparativa	Sig.	Diferencia	+/- Límites
ACATLAN DE JUAREZ - GUADALAJARA (DGE)	*	-218.884	79.7258
ACATLAN DE JUAREZ - HUERTA VIEJA	*	-155.501	79.7258
ACATLAN DE JUAREZ - PRESA HURTADO	*	-98.7239	79.7258
ACATLAN DE JUAREZ - TLAQUEPAQUE	*	-218.605	79.7258
ACATLAN DE JUAREZ - ZAPOPAN	*	-234.07	79.7258
ACATLAN DE JUAREZ - TLAJOMULCO DE ZUÑIGA		-13.3022	79.7258
ACATLAN DE JUAREZ - LA EXPERIENCIA	*	-155.624	79.7258
ACATLAN DE JUAREZ - TONALA		-47.5958	79.7258
ACATLAN DE JUAREZ - GUAYABO	*	-92.012	79.7258
GUADALAJARA (DGE) - HUERTA VIEJA		63.3828	79.7258
GUADALAJARA (DGE) - PRESA HURTADO	*	120.16	79.7258
GUADALAJARA (DGE) - TLAQUEPAQUE		0.278996	79.7258
GUADALAJARA (DGE) - ZAPOPAN		-15.1863	79.7258
GUADALAJARA (DGE) - TLAJOMULCO DE ZUÑIGA	*	205.582	79.7258
GUADALAJARA (DGE) - LA EXPERIENCIA		63.26	79.7258
GUADALAJARA (DGE) - TONALA	*	171.288	79.7258
GUADALAJARA (DGE) - GUAYABO	*	126.872	79.7258
HUERTA VIEJA - PRESA HURTADO		56.777	79.7258
HUERTA VIEJA - TLAQUEPAQUE		-63.1038	79.7258
HUERTA VIEJA - ZAPOPAN		-78.5691	79.7258
HUERTA VIEJA - TLAJOMULCO DE ZUÑIGA	*	142.199	79.7258
HUERTA VIEJA - LA EXPERIENCIA		-0.12287	79.7258
HUERTA VIEJA - TONALA	*	107.905	79.7258
HUERTA VIEJA - GUAYABO		63.489	79.7258
PRESA HURTADO - TLAQUEPAQUE	*	-119.881	79.7258
PRESA HURTADO - ZAPOPAN	*	-135.346	79.7258
PRESA HURTADO - TLAJOMULCO DE ZUÑIGA	*	85.4217	79.7258
PRESA HURTADO - LA EXPERIENCIA		-56.8999	79.7258
PRESA HURTADO - TONALA		51.1282	79.7258
PRESA HURTADO - GUAYABO		6.71198	79.7258
TLAQUEPAQUE - ZAPOPAN		-15.4652	79.7258
TLAQUEPAQUE - TLAJOMULCO DE ZUÑIGA	*	205.303	79.7258

* Denota diferencia estadísticamente signigicativa.

