

Capítulo 1.2

Cambio de uso de suelo y riesgo de inundación en el acuífero Toluquilla

Loza Reyes Aidé Fabiola¹

Sánchez Sánchez Yolanda²

Castillo Téllez Beatríz³

DOI: <https://doi.org/10.61728/AE20259426>



¹ Estudiante del Doctorado en Geología de la Universidad de Guadalajara. e-mail: aide.loza1167@alumnos.udg.mx

² Profesora-Investigadora. Universidad de Salamanca, España. Departamento de Geología Área de Geodinámica Externa, Facultad de Ciencias. e-mail: yolanda.ss@usal.es

³ Profesora-Investigadora. Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de Tonalá. Departamento de estudios de Agua y la Energía. e-mail: beatriz.castillo@academicos.udg.mx

1. Introducción

Las problemáticas sociales asociadas a la intervención antropogénica en los ecosistemas son una de las principales preocupaciones en todos los niveles, desde lo local a lo internacional. Problemas como inundaciones, sequías, eventos climatológicos extremos, subsidencias, entre otros, son algunos de los principales objetos de estudio en la búsqueda de su solución o mitigación, ya que afectan al medio ambiente, la economía y la sociedad. Para ello, es común encontrar modelos de intervención ante el riesgo, mas no de prevención. De este modo, el riesgo de inundación se plantea como una problemática derivada de la escasa o nula integración del sistema ambiental en la planificación del entorno urbano, lo cual ha favorecido un cambio de uso de suelo no estructurado. En este contexto, se analiza la interacción del crecimiento urbano, que conlleva la impermeabilización, como una de las variables con mayor impacto en la generación de inundaciones urbanas, afectando adicionalmente al medio ambiente en su conjunto. Considerando lo anterior, el área de estudio seleccionada es el acuífero Toluquilla, en el cual se identifica a la localidad de Ojo de Agua como un punto de alta vulnerabilidad frente a la transformación del entorno.

1.1. Sellado urbano e impermeabilización

Los cambios de uso de suelo son una de las principales características de las urbanizaciones. El sellado urbano y la impermeabilización son procesos relacionados con la transformación del suelo debido al crecimiento urbano. El sellado del suelo altera el curso natural del agua, elevando el riesgo de inundaciones y erosión (Scalenghe y Marsan, 2008). Illán et al. (2022) mencionan que el sellado urbano es uno de los principales procesos de degradación de suelos, mientras que la impermeabilización es su consecuencia directa. Debido a la impermeabilización intensiva de

las superficies urbanas, hay un incremento en el caudal y velocidad de escorrentías que ejerce mayor presión sobre el sistema de alcantarillado, aumentando considerablemente el riesgo de inundaciones (Scalenghe y Marsan, 2008). Es decir, la impermeabilización se refiere a la capacidad del suelo para impedir la infiltración de agua, afectando la interacción de este con los procesos naturales como la absorción y el ciclo hidrológico, generando problemas ambientales (Salas et al., 2019). Así, ambos procesos contribuyen al aumento de escurrimientos pluviales y al riesgo de inundaciones, a la vez que degradan los ecosistemas locales.

Autores como Matsushita et al. (2018), Zang et al. (2021), Rahman et al. (2022), entre otros, describen cómo el sellado urbano o el sellado de los suelos, reduciendo las superficies permeables y reduciendo la infiltración, aumentando la escorrentía e irrumpiendo así el ciclo hidrológico, ocasiona problemáticas ambientales tales como inundaciones en zonas urbanas y la intensificación del efecto isla de calor. Además de la implementación de estrategias de prevención como son los mapas de riesgos, los autores mencionan la importancia de tomar acciones a medida de mitigación basadas en la infraestructura urbana, no impidiéndola, sino propiciando su efectividad, mediante la implementación de pavimentos permeables, infraestructura hidráulica eficiente, jardines de captación, así como el incremento en cobertura vegetal.

1.2. Riesgo a inundación

El riesgo, de manera general, se define como la posibilidad de que un evento ocurra y produzca consecuencias negativas, ya sea para las personas, comunidades o el medio ambiente. La Organización de las Naciones Unidas (UN, 2007) señala que los desastres naturales suponen un riesgo considerable para las economías mundiales, especialmente debido a la creciente vulnerabilidad derivada de factores como la urbanización descontrolada, los peligros geológicos, el subdesarrollo, las condiciones demográficas, el cambio climático y la degradación ambiental. La combinación de estos factores aumenta la exposición de las poblaciones y los ecosistemas a eventos naturales extremos.

Las inundaciones destacan como uno de los eventos de mayor impacto económico y social, que genera el mayor monto de pérdidas económicas

a nivel mundial. Son catalogadas como el tipo de desastre más común, y su frecuencia ha aumentado en las últimas décadas debido a la combinación de los componentes climáticos, sociales y urbanos (Cavazos, 2015). Son definidas como el fenómeno en el cual se cubre de agua una o varias áreas de terreno que normalmente no están inundadas (Morote y Souto, 2020). Su magnitud puede variar desde unos pocos centímetros hasta varios metros, y su aparición puede ser progresiva o repentina (FEM, 2021).

Las características naturales, como las condiciones climáticas, geológicas y geomorfológicas, ejercen una influencia significativa en la ocurrencia de procesos de crecidas e inundaciones. Sin embargo, la frecuencia y magnitud de estos eventos también están estrechamente relacionadas con la intensidad de las intervenciones humanas en el entorno físico, las cuales modifican el comportamiento natural del agua en las áreas urbanas (Ogura y Soares, 2005).

El manejo sostenible y eficaz del agua requiere un enfoque holístico, que permita la vinculación entre el desarrollo económico y social con la protección de los ecosistemas naturales, proveyendo de un manejo apropiado entre la tierra y los usos del agua. De esta forma, los desastres relacionados con el agua, tales como inundaciones y sequías, que son parte importante en la determinación del desarrollo sostenible, deben ser integrados en la gestión de los recursos hídricos (WMO, 2009). La Organización de las Naciones Unidas (UN, 2007) estima un incremento en el riesgo de inundación y los escurrimientos, principalmente en zonas periurbanas. Las áreas periurbanas son los espacios alrededor de las ciudades, en los que se fusiona el paisaje rural (Miller et al., 2014). Estas áreas presentan una respuesta hidrológica diferente, debido a los cambios en la cobertura vegetal o el incremento en la infraestructura urbana, lo que reduce la infiltración y reemplaza los senderos naturales del escurrimiento hídrico (González et al., 2018).

Desde una perspectiva de sostenibilidad territorial, el desarrollo urbano debe considerar los impactos ambientales derivados de la expansión descontrolada de las ciudades. Esto incrementa la vulnerabilidad de las poblaciones asentadas en zonas con graves perturbaciones ambientales (Romero y Vásquez, 2005a, como se citó en Ruales, 2018). En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo analizar la relación

entre el cambio de uso de suelo y el riesgo de inundación en el acuífero Toluquilla, con énfasis en la localidad de Ojo de Agua, donde las transformaciones territoriales han generado impactos sociales, económicos y ambientales significativos.

1.3. Caracterización de la zona de estudio

Para comprender los procesos territoriales y las problemáticas derivadas de la antropogenización del suelo, es fundamental analizar no solo el entorno social, sino también el medio ambiente en el que estos procesos ocurren. En este sentido, el siguiente apartado tiene como objetivo contextualizar al lector sobre el área de estudio, proporcionando una visión del sistema hidrológico, social y ambiental que influye en los procesos analizados.

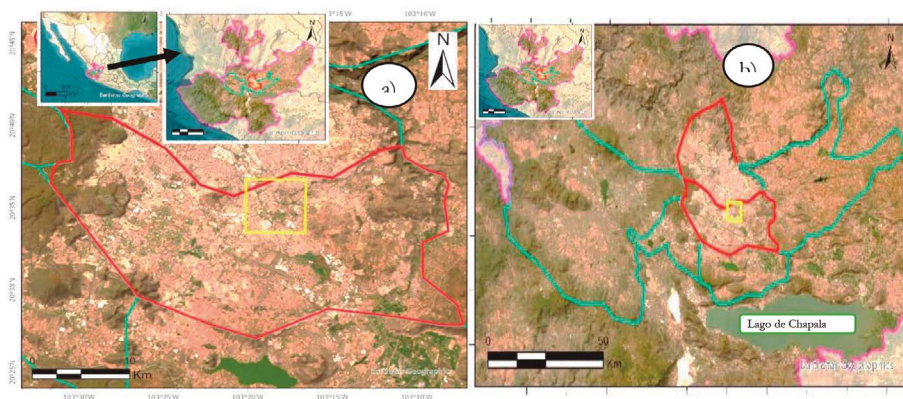
1.3.1. Acuífero Toluquilla

El acuífero Toluquilla se sitúa en la región centro del Estado de Jalisco, con una superficie aproximada de 632 km². Perteneció a la cuenca Lerma-Santiago y se encuentra comunicada con el río Grande de Santiago mediante el arroyo El Ahogado, en el que se encuentra su principal embalse que lleva el mismo nombre, que tiene una capacidad de almacenamiento de 6 hm³ y un área de 750 has (CONAGUA, 2024). Se extiende a través de los municipios de Zapopan, Guadalajara, San Pedro Tlaquepaque, Tonalá, Zapotlanejo, Juanacatlán, Tlajomulco de Zúñiga y El Salto.

Los acuíferos que lo colindan incluyen los de Ameca, San Isidro, Cajititlán, Altos de Jalisco y Atemajac. Entre 2003 y 2020, no se dispone de datos actualizados sobre la condición de estos acuíferos. Sin embargo, para el año 2020, se reporta que los acuíferos Ameca, San Isidro, Cajititlán y Altos de Jalisco se encuentran en condiciones de subexplotación, mientras que los acuíferos Atemajac y Toluquilla están sobreexplotados (Figura 1). En 2023, todos los acuíferos colindantes con Toluquilla presentan una disponibilidad media anual (DMA) negativa o en déficit. En particular, el acuífero Toluquilla exhibe el déficit más alto, con un valor de -75.61 hm³/año (CONAGUA, 2025).

Figura 1

En a) Mapa de ubicación del acuífero Toluquilla y la zona de estudio.
En b) Estado de los acuíferos colindantes en cuanto a disponibilidad media anual.



Fuente: Elaboración propia con base en datos de INEGI, 2010.

1.3.2. Ojo de Agua

La Colonia Ojo de Agua, perteneciente al municipio de San Pedro Tlaquepaque, en el estado de Jalisco, México. Se consideró, además, su cercanía con diversos cuerpos de agua: al norte, aproximadamente 200 metros, se encuentra el arroyo del Ahogado, que fluye de la presa Las Pintas, la cual, a su vez, se encuentra al noreste de la localidad. Al sur se encuentra el cuerpo de agua conocido como presa “El Chicharrón”; al este y al oeste (Figura 2) continúa el flujo de agua del arroyo El Ahogado hacia el cuerpo de agua del mismo nombre.

Figura 2
Ubicación de la localidad Ojo de Agua.



Fuente: Elaboración propia con base en datos del INEGI 2009

Dentro del Atlas municipal de Riesgos de San Pedro Tlaquepaque, se cuenta con un registro histórico de puntos de inundaciones en un periodo de 1919 a 2006, entre las que se encuentra Ojo de Agua. Se señalan, como causas de las inundaciones, los cambios en el ciclo de agua debido al proceso urbano, de entre los que se encuentran la pérdida del sistema de canales naturales, cambios en las microcuencas, revestimiento del suelo, entubamiento de cuerpos de agua, disminución de la capacidad hidráulica y la obsolescencia de los sistemas de colectores y obras hidráulicas (Valdivia y Castillo, 2009).

La Colonia Ojo de Agua es una de las localidades consideradas como punto de muy alto riesgo de inundación, donde se registran entre 10 y 30 eventos, siendo esta una de las categorías más altas (Georiesgos, 2024). Aunado a ello, se identifican problemas estructurales en las viviendas, como son: bajo nivel de las construcciones con respecto a las vialidades y cuerpos de agua, así como visible presencia de humedad. Esto último ocasionó en 2024 el colapso de una bóveda de una casa habitada (Figura 3).

Figura 3

En a) Colapso de una vivienda habitada por reblandecimiento de bóveda, y visibilidad de humedad en las viviendas. En b) y c) Condiciones de la calle en temporal de lluvias y evidencia de humedad en las viviendas al momento del colapso



Fuente: Protección Civil de Tlaquepaque, en Nmas, 2024.

La Unidad Estatal de Protección Civil y Bomberos del Estado de Jalisco (UEPCB Jalisco), primeros respondientes ante situaciones de riesgo, ha considerado 1237 puntos de evaluación de daños y necesidades para el área metropolitana de Guadalajara. De estos, 300 se encuentran en la colonia Ojo de Agua y en el noroeste se localiza otro concentrado de puntos, que inciden en el acuífero Toluquilla, por lo que se consideraron dentro del polígono de estudio, ya que representan el 42% del total de EDAN (527), encontrándose cercanos a los cuerpos de agua de El Órgano, La Ladrillera, los arroyos de El Ahogado y la Presa Las Pintas (UEPCB Jalisco, 2023). La localidad ha quedado inmersa en un proceso de expansión urbana e industrial, el cual se ha desarrollado principalmente sobre zonas de humedales o áreas sujetas a inundaciones temporales, y a una cota topográfica superior a la de la propia localidad y los cuerpos de agua circundantes.

Adicionalmente, una problemática relevante en la zona es la indefinición en la delimitación geopolítica de los cuerpos de agua, lo cual genera vacíos legales que son aprovechados para modificar el uso del suelo y permitir la urbanización en áreas originalmente destinadas a otros fines. Un ejemplo de esta situación se observa en el Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial y de Desarrollo Urbano del Municipio de San Pedro Tlaquepaque (POETDUM) (SEMADET, 2018). En dicho documento,

tanto la presa Las Pintas como el humedal La Ladrillera y el cuerpo de agua El Órgano aparecen dentro del límite municipal de San Pedro Tlaquepaque según el mapa de uso de suelo y vegetación. Sin embargo, en otras secciones del mismo documento, los límites municipales difieren, generando conflictos territoriales con el municipio de El Salto.

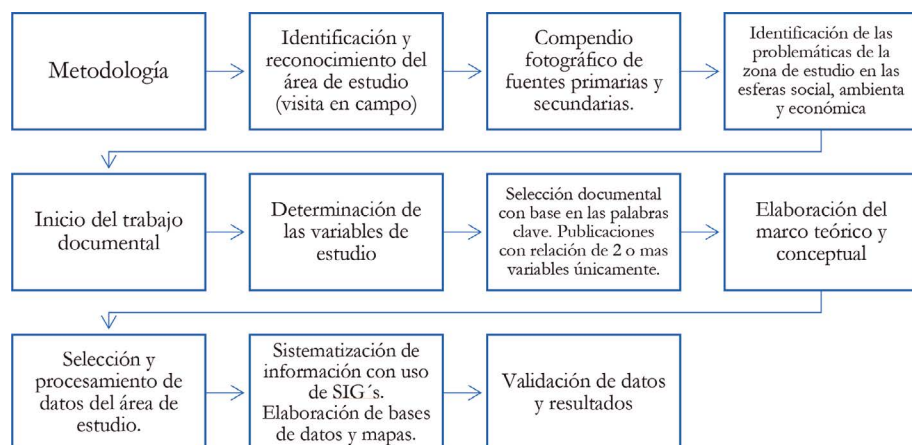
A nivel nacional, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) es la institución responsable de gestionar los peligros y riesgos que afectan o podrían afectar a las poblaciones, promoviendo acciones de política pública relacionadas con los peligros y las vulnerabilidades asociadas al riesgo de desastres. Para ello, emplea Sistemas de Información Geográfica (SIG) como herramienta principal para el análisis, la elaboración de proyecciones y la emisión de recomendaciones en zonas con presencia de fenómenos perturbadores permanentes o con algún nivel de peligrosidad. En este sentido, González et al. (2018) sugieren que, dentro de los planes de prevención y contingencia ante el riesgo de inundaciones por fenómenos hidrometeorológicos, se deben considerar los cambios de uso de suelo dentro de la gestión y planeación de la infraestructura urbana. Por ello, es necesaria su inclusión en la modelación, para ser tomadas en cuenta en dicha gestión y planeación, así como en los planes de prevención y contingencia ante el riesgo de inundaciones ocasionadas por fenómenos hidrometeorológicos (González et al., 2018). Por su parte, Miller et al. (2014) recomiendan el uso de tipologías de suelo urbano detalladas, que representen o apoyen al entendimiento de la alteración física de las vías hidrológicas, así como al diseño de medidas de mitigación de inundaciones, considerando la pérdida de superficie de áreas permeables.

2. Metodología

El proceso seguido, enmarcado en la teoría de sistemas, permite abordar las problemáticas no como elementos aislados, sino como partes integrantes de un todo. Para ello, se consideraron dos etapas que proporcionan una perspectiva tanto cualitativa como cuantitativa del análisis: 1) trabajo de campo y 2) trabajo documental. En la fase de trabajo de campo, se consideraron 2 momentos (Figura 4). La fase 1 comprendió el

reconocimiento del área de estudio. Se realizó un recorrido por la zona de estudio para identificar las características físicas de la zona de manera general, así como de las viviendas, con la finalidad de detectar signos y señales tanto de problemas estructurales como superficiales e información relevante que pudiera aportar datos al estudio o al propio conocimiento del área. En la fase 2, se elaboró un compendio fotográfico, tanto propio como de medios de comunicación, para documentar las características de la zona y las incidencias y problemáticas derivadas de las inundaciones.

Figura 4
Metodología



Fuente: Elaboración propia.

Derivado de un primer acercamiento *in situ*, sobre la carretera Guadalajara-Chapala, se determinó la zona de estudio, debido a que en esta zona se localiza uno de los puntos con mayor notoriedad de antropogenización y cambio de uso del suelo. Se realizaron tomas fotográficas de la zona, en la que se observa dicho fenómeno (Figura 5).

Figura 5

Características de la zona de estudio sobre la Guadalajara-Chapala, en la intersección y segmentación de los tres cuerpos de agua.



Nota: En a) Canal-residuo de lo que anteriormente era el humedal La Ladrillera, a la derecha, construcción de complejo departamental, a la izquierda abajo, muralla divisoria de los municipios de El Salto y San Pedro Tlaquepaque. En b) Relleno antropogénico del humedal La Ladrillera. c) Ubicación de la zona de primer acercamiento. En d) Carretera Guadalajara-Chapala flujo de aguas residuales hacia la presa Las Pintas por el canal residual.

Fuente: Elaboración propia (a, b y d), Febrero 2024 y Google Earth (c), mayo de 2025.

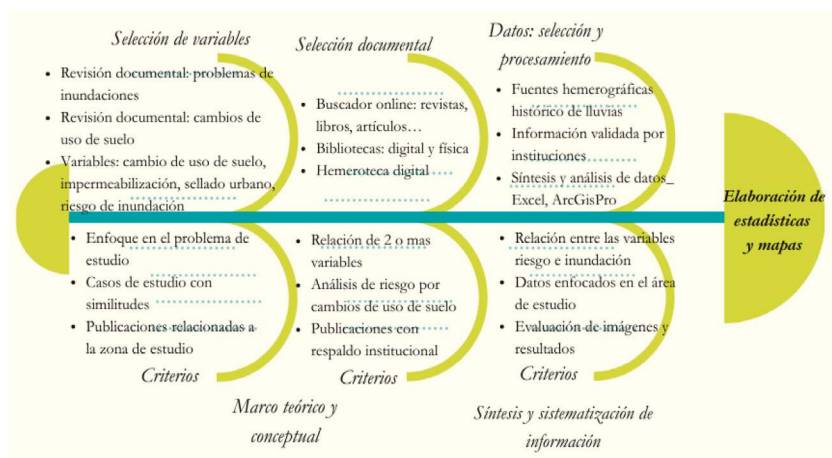
Posteriormente, se inició con la etapa 2: trabajo documental. Se dividió en 3 fases (ver Figura 6). La primera consistió en la selección de variables con base en el problema de estudio, enfocado en las inundaciones en la zona, mediante revisión documental y análisis del problema en específico, así como diversos casos de estudio relacionados. De ello se establecieron las palabras clave: humedal, cambio de uso de suelo, impermeabilización, sellado urbano y riesgo de inundación.

Una vez establecidas las palabras clave, se dio paso a la fase 2: selección documental. Esto conllevó la selección de libros, artículos de revistas, entre otros, utilizando las variables anteriormente establecidas, utilizando buscadores online. Se seleccionaron solo aquellas publicaciones que relacionaban 2 o más variables, omitiendo las que solo hacían mención de 1 de ellas. A partir de lo anterior, y en conjunto con la fase

1, se elaboró tanto el marco teórico como el conceptual. En este último, abordando las definiciones de las variables seleccionadas.

Figura 6

Etapas 2. Trabajo documental: Fases y criterios para su elaboración.



Fuente: Elaboración propia

En la fase 3: selección y procesamiento de datos, se identificaron las instituciones gubernamentales y no gubernamentales que proporcionan datos relacionados con la zona de estudio. Del mismo modo, se recurrió a fuentes hemerográficas que comprendieron el periodo de 2010 a 2024 para tomar datos del nivel máximo del agua alcanzado por las inundaciones. Se encontraron 12 eventos importantes en el periodo de junio de 2010 y agosto de 2024. La información relacionada con inundaciones se procesó en una base de datos en Excel, a partir de lo que se elaboraron gráficos. El polígono seleccionado representa un área de 36 km², en el que se consideraron 2 aglomerados de puntos EDAN y su cercanía a los cuerpos de agua colindantes con Ojo de Agua.

Se obtuvieron imágenes satelitales del área de estudio con ayuda de Copernicus Browser (Copernicus, 2025), shapefiles del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). En cuanto a las imágenes para el análisis espectral, se seleccionaron las que correspondían a una mayor nitidez, seleccionán-

dose archivos de diciembre de 2016 y noviembre de 2024. Se utilizaron imágenes TIFF de 32 bit float, con una resolución de 755x717 píxeles, en el sistema de coordenadas WGS 84 (EPSG:4326), haciendo uso de la capa true color (Color verdadero). Posteriormente, se procesaron y elaboraron los mapas temáticos y comparativos en el programa ArcGIS Pro (Esri, 2024). Para la validación de los datos obtenidos en los mapas, se utilizó la matriz de confusión propia del sistema ArcGIS Pro, que arroja la fiabilidad de los datos mediante el índice Kappa, correlacionando dos o más datos de evaluación. En este sentido, la interpretación del índice Kappa muestra que un índice de fuerza de concordancia de 0.4-0.6 es regular, 0.61-0.75 buena y mayor a 0.75 es excelente (Muñoz et al., 2022). Los datos de ocupación del suelo por áreas se operaron en Excel, donde se obtuvieron porcentajes y gráficos.

3. Resultados

Surgiendo como una necesidad de crecimiento y expansión, el cambio de uso de suelo es una problemática emergente en las sociedades actuales, cuya planeación, análisis y gestión debe ser vigilada para prevenir o mitigar efectos adversos en el proceso. Si bien es necesaria la constante reestructuración de las sociedades debido a su expansión y con ello los cambios de uso de suelo, no se debe perder de vista la sostenibilidad del propio territorio. En el caso analizado, el acelerado proceso de urbanización ha generado múltiples problemáticas derivadas del sellado e impermeabilización del suelo, lo cual ha modificado significativamente su funcionalidad, independientemente de su clasificación potencial o uso original. Así, se observa una pérdida progresiva de zonas destinadas a la recreación, un incremento en los niveles de contaminación del aire y del agua debido a la disminución de la cobertura vegetal y al uso inadecuado de los acuíferos como vertederos de residuos urbanos.

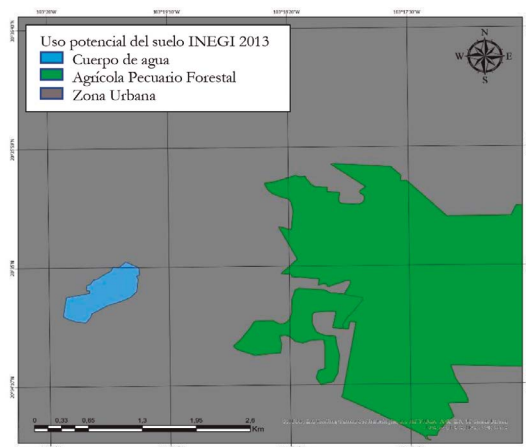
Considerando lo anterior, para la zona de estudio se realizaron mapas temáticos de cambios de uso de suelo, en los que se tomaron en cuenta 4 variables de ocupación del suelo: cuerpos de agua, infraestructura urbana, zonas sin infraestructura e industrias. Estas variables se determinaron por su interacción con la recarga del acuífero Toluquilla en cuanto a

infiltración. En este sentido, cabe señalar que una zona industrial es una zona impermeabilizada. Las zonas sin infraestructura bien pueden ser áreas verdes o de agricultura, en cuyo caso la infiltración está determinada por la modificación del suelo, representando zonas de poca o nula infiltración, considerándose como zonas de sellado urbano.

Para 2013, en el área de estudio, se muestran cuerpos de agua, agrícola-pecuario-forestal y la zona urbana que se localizan en dicha zona. Así, el organismo recomienda que el uso en la zona sea mayoritariamente urbano, proponiendo un 79 %, seguido del sector agrícola-pecuario-forestal con 20 %, dejando un 1 % los cuerpos de agua (Figura 7).

Figura 7

Mapa de uso potencial del suelo en el área de estudio 2013.



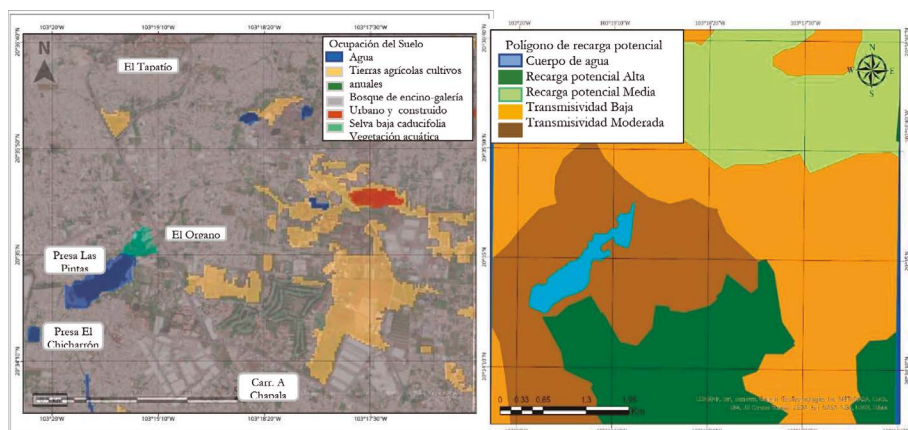
Fuente: Elaboración propia con base en datos de INEGI 2013.

Como se puede observar en la figura anterior, no hay delimitaciones precisas del uso del suelo que se propone para el área de estudio. Del mismo modo, es observable que no se considera como cuerpos de agua El Órgano, El Chicharrón y La Ladrillera, pese a su existencia dentro del polígono. Considerando que el área se encuentra sobre un acuífero, se debe tener en cuenta la adaptación del crecimiento urbano a la sostenibilidad del territorio, es decir, tomando en cuenta los ciclos naturales del acuífero. Para ello, se analiza en la Figura 8 un comparativo entre

la ocupación del suelo y la zonificación del acuífero para 2016, en la que se representan las áreas de recarga potencial alta y media, así como transividad alta y media. En cuanto a la ocupación del suelo para ese año, se puede observar que inciden las siguientes categorías: Agua, tierras agrícolas, urbano y construido, vegetación acuática, selva baja caducifolia y bosque de encino-galería.

Figura 8

Comparativo entre los usos de suelo y los polígonos de zonificación del acuífero para la recarga potencial en el año de 2016.



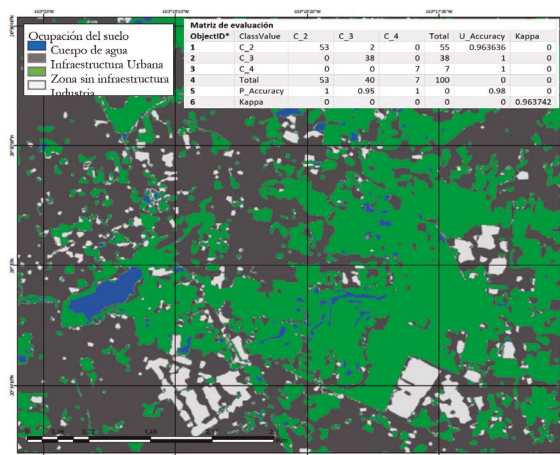
Fuente: Elaboración propia con base en datos de INEGI 2016.

Como se puede observar, haciendo un comparativo de los mapas en la Figura 8, el polígono correspondiente a una recarga potencial alta para el acuífero está ocupado por áreas urbanas, así como gran parte que corresponde a la zona de recarga potencial media. Lo que permite inferir que no se ha considerado la planeación urbana con base en las necesidades del acuífero, sino en respuesta al desarrollo urbano. En este contexto, es necesario reconsiderar las estrategias implementadas en relación con esta problemática, con el fin de abordar la sobreexplotación y déficit del acuífero Toluquilla. Además, se puede apreciar una reducción en el área de cuerpos de agua o vegetación acuática considerable, ya que en el mapa de uso de suelo se observa un polígono menor al representado en la zonificación del acuífero.

Por otra parte, utilizando el análisis espectral, dentro del polígono de estudio, para el año 2016, se tenía aproximadamente una cobertura de cuerpos de agua de 0.69 km² que representa un 2 % del territorio; 20.30 km² de infraestructura urbana (56 %, siendo el mayor porcentaje); 12.18 km² de zonas sin infraestructura (el 36 %) y 2.18 km² de áreas de industria (ocupando el 6 % del área). Cabe señalar que dentro de las zonas industriales podemos encontrar señalizadas áreas con infraestructura urbana; esto es debido a la localización de calles, avenidas o cubiertas de suelo, ya sea con grava, asfalto o concreto. La ocupación del suelo se muestra en la Figura 9. La validación de los datos obtenidos en el mapa fue favorable, obteniendo 0.96 de fuerza de concordancia, lo que le otorga una fiabilidad excelente al análisis realizado.

Figura 9

Mapa de ocupación del suelo en el área de estudio 2016.



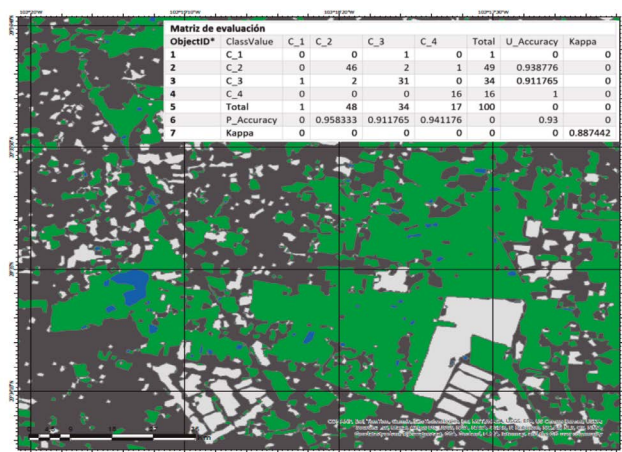
Fuente: Elaboración propia con base en imágenes satelitales de Copernicus Browser para 2016.

Se observa un relativo equilibrio entre la zona urbana y las áreas sin infraestructura, ya sea porque eran utilizadas como zonas de agricultura temporal o porque no había construcciones habitacionales o industriales en ellas. Por su parte, es perceptible una dispersión en las zonas industriales, esto debido a que hay pequeñas empresas en dicha zona, como talleres artesanales, almacenes, entre otros.

Para el año 2024, la ocupación del suelo se muestra en la Figura 10. La validación de la veracidad de los datos mediante el índice Kappa arrojó el valor de 0.88, lo que indica una fuerza de concordancia excelente, otorgando alta fiabilidad a los datos mostrados en el mapa. Aquí, se puede observar que los cuerpos de agua ocupan 0.38 km², es decir, el 1 % de la superficie de la zona de estudio; la infraestructura urbana, 56 % con 20.55 km²; las zonas sin infraestructura, 12.07 km², que representan un 33 %; y las zonas industriales, 10 %, con 3.51 km². Es así que se concentra el 89 % de ocupación del área por las zonas de infraestructura urbana y áreas sin infraestructura, ambas características de impermeabilización y sellado urbano, respectivamente.

Figura 10

Mapa de ocupación del suelo en el área de estudio en 2024 y matriz de confusión para la evaluación de resultados.

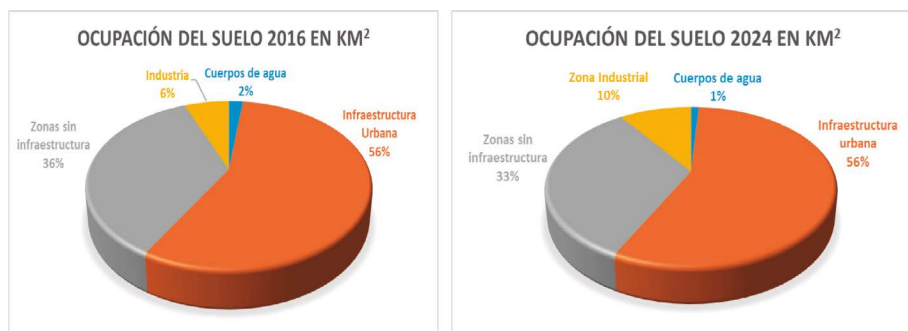


Fuente: Elaboración propia con base en imágenes satelitales de Copernicus Browser 2024.

Realizando el comparativo en el cambio de uso de suelo de la zona de estudio, se puede visualizar que no hay una modificación representativa en ello. La Figura 11 muestra, en el caso de la infraestructura urbana, que el porcentaje de ocupación se conservó. Por otra parte, los cuerpos de agua redujeron de un 2 a 1 %. En cuanto a las zonas sin infraestructura y las zonas con industrias, se puede inferir que el incremento en el área industrial corresponde al decremento en las zonas sin infraestructura.

Figura 11

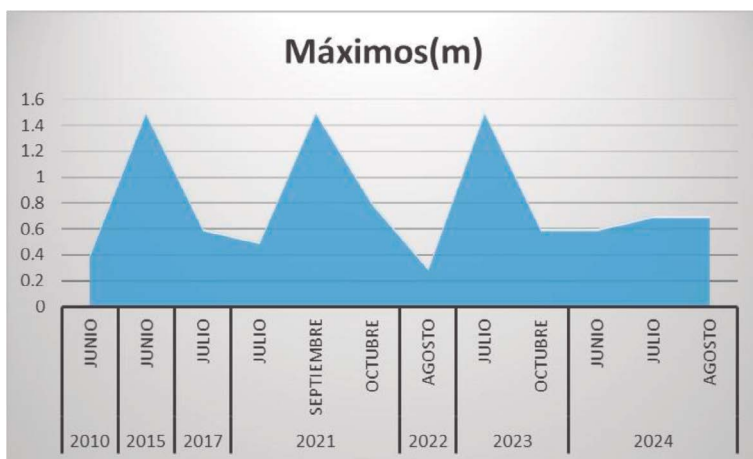
Comparativa entre los porcentajes de ocupación del suelo en 2016 y 2024.



Fuente: Elaboración propia con base en datos de los mapas de ocupación del suelo

El cambio en porcentaje más representativo son los cuerpos de agua y las zonas industriales, los cuales en ambos casos tuvieron una diferencia cercana al 50 %. Sin embargo, en el caso de la industria, representó un incremento de 2016 a 2024, y para el caso de los cuerpos de agua, un decremento. Profundizando en otra variable de análisis, y con base en el estudio de registros de inundaciones ocurridas en los últimos 15 años que han afectado directamente a la localidad de Ojo de Agua —así como a otras zonas cercanas—, se identificaron un total de 12 eventos documentados en fuentes hemerográficas digitales. El nivel máximo de inundación registrado fue de 1.5 metros de altura, alcanzado durante eventos ocurridos en los años 2015, 2021 y 2023, específicamente en los meses de junio, septiembre y julio, respectivamente, como se muestra en la Figura 12.

Figura 12
Histórico de inundaciones en el periodo de 2010 a 2024.



Fuente: Elaboración propia con base en fuentes hemerográficas.

Aquí se puede observar que los periodos con mayor registro de inundaciones de manera anual se encuentran entre los meses de junio a octubre, lo que corresponde al temporal de lluvias en la zona. Por otra parte, los meses con mayor incidencia en cuanto a gravedad de inundaciones por altura alcanzada son los meses de junio, julio y septiembre. Durante 2023 y 2024, se registraron inundaciones de una menor intensidad, pero que rebasaban los 40 cm de altura, lo que puede ocasionar daños a la propiedad de las personas afectadas.

4. Discusión

El sellado urbano y la impermeabilización son factores clave que alteran tanto la superficie como el subsuelo de las ciudades. La alteración del sistema natural urbano reduce los servicios ecosistémicos, como la captura de carbono y la regulación del clima. Además, estas transformaciones urbanas modifican las cuencas hidrográficas, impactando el flujo de agua y la calidad de los recursos hídricos, incrementando diversos riesgos, como inundaciones, muerte por arrastre debido al incremento en escorrentías, daño a infraestructura, entre otros.

Estas variables representan amenazas importantes para la estabilidad ecológica y la gestión del agua en áreas urbanas. Alteran el ciclo hídrico, aumentan el riesgo de inundaciones y contribuyen a la degradación de la biodiversidad. Por ello, es esencial integrar enfoques sostenibles de planificación urbana que consideren estos factores, regulando las áreas impermeabilizadas y fomentando la restauración de zonas verdes y de infiltración para mejorar la resiliencia de las ciudades ante fenómenos climáticos extremos.

A pesar de que en la zona de estudio no son notables los cambios de uso de suelo, valdría la pena analizar el contexto general del acuífero y la cuenca en cuanto a ocupación del suelo. Si bien INEGI muestra los usos potenciales, a nivel municipal no se han seguido estas recomendaciones, lo que ha ocasionado los crecientes problemas tanto de inundaciones como de escasez de agua. En este sentido, la recuperación del acuífero resulta compleja, ya que la modificación antrópica tiende más que a un sellado urbano, a la impermeabilización de los suelos.

A lo anterior se suman dos riesgos adicionales que deben ser considerados. El primero corresponde al aumento del riesgo sanitario para la población, derivado de la contaminación presente tanto en cuerpos de agua superficiales como subterráneos. Durante eventos de inundación, los contaminantes se dispersan en las zonas anegadas, afectando directamente la salud de los habitantes. Este impacto persiste incluso tras las labores de desazolve, incrementando la exposición y los riesgos asociados. El segundo riesgo es el riesgo por subsidencia. Si bien dentro de los atlas de riesgo se presenta una pequeña zona ya con esta incidencia, de abatirse completamente el acuífero, se podrían extender las áreas que pueden presentar agrietamientos, socavones y hundimientos. Bajo una consideración más amplia, las acciones de prevención de riesgos tendrían que integrar los abatimientos de acuíferos como áreas vulnerables que representan un peligro.

En cuanto a las inundaciones en las zonas bajas de la cuenca, un análisis superficial permite hacer un aproximado de metros cúbicos de depósito perdidos al desaparecer tanto El Órgano como la Ladrillera. Esto solo puede ser un aproximado, ya que no se cuenta con datos de profundidad para dichos cuerpos de agua. Sin embargo, y si consideramos una profundidad mínima de 2 metros, se puede estimar un volumen de

538 832 m³ de excedencia en el caudal, que recaen directamente en el vaso regulador Las Pintas y los canales o arroyos de El Ahogado que circundan a Ojo de Agua y las localidades aledañas. Cabe señalar que se ha perdido un área de 269 416 m² perteneciente a los cuerpos de agua, que actualmente fungen como zonas comerciales y residenciales.

Para las pequeñas localidades con mayor antigüedad, como lo es Ojo de Agua, el nivel socioeconómico y las características de las construcciones de las zonas habitacionales reflejan un nivel bajo de resiliencia, con un alto índice de vulnerabilidad, ya que su capacidad de afrontar las pérdidas materiales derivadas de eventos meteorológicos relacionados con el agua depende prácticamente en su totalidad de los fondos de emergencia ante desastres proporcionados por los gobiernos local y nacional. La irrupción del balance hidrológico de la zona, denota carencia e insuficiencia en la gestión de recursos hidrológicos, que se asocian directamente a problemáticas sociales como son la sequía e inundaciones. En consecuencia, aquellas zonas con cuencas altamente urbanizadas a sus alrededores tendrán una mayor probabilidad de inundación en época de lluvias y, en contraparte, de escasez de recursos hídricos.

5. Conclusiones

Al utilizar sistemas de información geográfica y métodos de teledetección como herramienta para el análisis de los territorios y las interacciones de la sociedad con ellos, es imprescindible considerar algunos aspectos. En primera instancia, es importante considerar que los análisis espaciales basados en teledetección están condicionados por la disponibilidad temporal de los datos. Esto implica que no se contará en todo momento con la secuencia de imágenes necesaria para realizar análisis espectrales o evaluaciones sistemáticas. Sin embargo, su utilización como herramienta de planeación resulta un factor clave, al permitir la evaluación de grandes áreas y diferentes capas de proyección sobre las que se pueden considerar los diferentes sistemas que componen un área determinada, optimizando tiempos y entregando resultados con una alta fiabilidad y detalle.

Por otra parte, se debe considerar que la impermeabilización intensiva contribuye a un desajuste en el balance hídrico urbano, limitando la disponibilidad de agua para uso humano y comprometiendo además

la recarga de mantos freáticos. La impermeabilización de suelos es un indicador del grado de urbanización y del desarrollo insostenible de una ciudad, siendo crucial regular las zonas impermeables para proteger los recursos hídricos y mitigar los impactos ambientales.

La intensidad de las inundaciones puede correlacionarse con los cambios en el uso del suelo, ya que estos responden a las transformaciones en las condiciones de los cauces naturales, lo que eventualmente conlleva una acumulación e incremento en la escorrentía superficial. En este contexto, un aumento en el escurrimiento requiere una mayor capacidad de almacenamiento, es decir, un mayor volumen de captación, que, en este caso, puede proporcionarse mediante vasos reguladores. Sin embargo, cuando estos han sido modificados o su capacidad ha sido reducida, su función de regulación se ve comprometida, lo que incrementa el riesgo de desbordamientos e inundaciones.

Los cambios de uso de suelo impactan directamente en el territorio, evitando la recarga del sobreexplotado acuífero Toluquilla, e incrementando el caudal que llega a los aún existentes cuerpos de agua y vasos reguladores que resultan insuficientes. Si bien se tienen identificadas las zonas de riesgo y plasmadas en documentos gubernamentales, se ha enfocado a acciones de reacción y no así de prevención. Por ello, es fundamental analizar la ocupación y transformación del suelo, destacando su integración en los planes destinados a la recarga y recuperación de acuíferos. Estos planes deben abordar de manera efectiva el problema del abatimiento, proporcionando soluciones sostenibles a la situación actual. El reconocimiento y análisis de los elementos que incrementan la vulnerabilidad y el riesgo a inundación, como la urbanización no planificada y el cambio climático, son esenciales para desarrollar estrategias de mitigación y adaptación que puedan reducir su impacto en las economías y comunidades afectadas.

6. Referencias

- Cavazos, T. (2015). *Conviviendo con la naturaleza: El problema de los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en México*. Instituto Latinoamericano de Ciencias Sociales (ILCSA).
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2024). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua del acuífero Toluquilla* (1402), Estado de Jalisco (Clave 1402). https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/jalisco/DR_1402.pdf
- Copernicus. (2025). *Sentinel-2 L2A imagery*. Copernicus Data Space Ecosystem. <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>
- Esri. (2024). ArcGIS Pro (Versión 3.3.52636) [Software]. *Environmental Systems Research Institute*. <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>
- Georiesgos Jalisco. (2024). *Mapas de riesgos*. <https://www.georiesgos-jalisco.com/mapas/estado-de-jalisco/amenazas>
- González, D., Becerril-Piña, R., Mastachi-Loza, C., Cervantes, M., Guevara, A., Romo, M. L. & González Sosa, E. (2018). El riesgo de inundación suscrito a los cambios de usos de suelo de cuencas periurbanas. En J. M. Rodríguez (Ed.), *Riesgo de desastres en México: Eventos hidrometeorológicos y climáticos* (pp. 440). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. <https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1001/1747/1/PUB-CAPITULOS-LIBROS-1201.PDF>
- Matsushita, Y., Fujimori, H., Iwata, M., & Takahashi, K. (2018). Degradation of the urban ecosystem function due to soil sealing: Involvement in the heat island phenomenon and hydrologic cycle in the Tokyo metropolitan area. *Progress in Geography*, 70, 1-12. <https://doi.org/10.1080/00380768.2018.1439342>
- Miller, J. D., Kim, H., Kjeldsen, T. R., Packman, J., Grebby, S. & Dearden, R. (2014). Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover. *Journal of Hydrology*, 515, 59-70. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.011>

- Muñoz, I., Cárdenas, Y. & Cháves, M. (2022). Fiabilidad interobservador del instrumento “POFRAS” para el inicio de la alimentación oral en prematuros hospitalizados. *Acta Pediátrica de México*, **43**(5), 270–279. <https://www.medigraphic.com/pdfs/actpedmex/apm-2022/apm225b.pdf>
- Nmas. (2024, 12 de febrero). *Tres personas resultan lesionadas tras derrumbe de la bóveda de una casa*. <https://www.nmas.com.mx/nmas-local/programas/las-noticias-guadalajara/videos/tres-personas-resultan-lesionadas-tras-derrumbe-la-boveda-una-casa/>
- Rahman, A., Khan, A., Haq, N., Samiullah & Shaw, R. (2022). Impact of soil sealing on the genesis of pluvial flood in Peshawar, Pakistan. *Arabian Journal of Geosciences*, **15**(4), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09816-7>
- Scalenghe, R. & Marsan, F. A. (2008). The anthropogenic sealing of soils in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, **90**(1–2), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.10.011>
- Unidad Estatal de Protección Civil de Baja California (UEPCB). (2023). *Sistema de Información Estatal para la Gestión de Riesgos de Desastres*. Monitoreo. Gobierno del Estado de Jalisco. <https://siegir.jalisco.gob.mx/#/map>
- Valdivia, L. & Castillo, M. (2009). *Actualización del Atlas de Peligros Naturales del Municipio de Tlaquepaque*. <https://transparencia.tlaquepaque.gob.mx/wp-content/uploads/2017/10/Documento-de-la-Actualizacion-del-Atlas-de-Riesgos-Naturales.pdf>
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2009). *Integrated flood management: Concept paper* (No. 1047). World Meteorological Organization.
- Zhang, Y., Li, X., Chen, Y., Wang, J. & Liu, H. (2021). Urbanization impacts on flood risks based on urban growth data and coupled flood models. *Natural Hazards*, **106**(1), 613–627. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04480-0>