



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

FACULTAD DE CIENCIAS



DOCTORADO EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

**VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO DEL
VALLE DE GUADALUPE, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO.**

TESIS

Para obtener el grado de
Doctora en Medio Ambiente y Desarrollo

Presenta

Guadalupe Díaz Gutiérrez

Director de Tesis

Dr. Luis Walter Daesslé

Codirector de Tesis

Dr. Francisco José Del Toro Guerrero

Ensenada, Baja California, México, 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

FACULTAD DE CIENCIAS

DOCTORADO EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

"VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE GUADALUPE, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO".

Tesis para obtener el grado de
Doctora en Medio Ambiente y Desarrollo

Presenta

Guadalupe Díaz Gutiérrez

Aprobada por:

Dr. Luis Walter Daesslé Heuser

Director de Tesis

Dr. Francisco José Del Toro Guerrero
Codirector de Tesis

Dra. Mariana Villada Canela
Sinodal

Dr. Georges Seingier
Sinodal

RICO AMOROS
ANTONIO MANUEL
21463610X

Firmado digitalmente por RICO
AMOROS ANTONIO MANUEL -
21463610X
Fecha: 2024.08.14 22:52:01
+02'00'

Dr. Antonio Rico Amorós
Sinodal

Resumen

Los acuíferos son vulnerables a la contaminación, especialmente cuando existe baja disponibilidad de agua en la región y grandes extensiones de riego agrícola. En este trabajo se realiza un análisis de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero de Guadalupe (AG) en la zona del Valle de Guadalupe (VG), Baja California, mediante la realización de una caracterización físico-geográfica y la aplicación del método DRASTIC, utilizando sistemas de información geográfica, con el objetivo de evaluar el grado de vulnerabilidad de este acuífero. Se utilizan los parámetros de profundidad del nivel freático, variación del nivel freático (recarga), medio acuífero, tipo de suelo, topografía, litología de la zona no saturada y conductividad hidráulica, los cuales proporcionan información sobre las características intrínsecas, asignando valoraciones de acuerdo a su probabilidad de causar contaminación, para finalmente obtener el índice de vulnerabilidad y mapas representativos de contaminación para escenarios húmedos y secos, los cuales representan espacialmente categorías de muy baja a muy alta vulnerabilidad. Además, el estudio aborda la distribución espacial y el comportamiento de las concentraciones de nitratos en el acuífero subterráneo para los años 2001, 2020 y 2021. Los resultados del método de vulnerabilidad se validan en el acuífero, con la concentración de nitratos como indicador de contaminación. Los parámetros de profundidad del agua e impacto en la zona vadosa son los indicadores más influyentes en el índice de vulnerabilidad de acuerdo a las evidencias en estudios similares. Este tipo de herramienta de extraordinaria utilidad, que en la investigación constituye una valiosa aportación para la gestión y sostenibilidad ambiental del acuífero y la ordenación del territorio, indicando zonas que van desde muy baja a muy alta vulnerabilidad, que podrán apoyar a tomar medidas de mitigación a la contaminación, con la identificación de sitios prioritarios de atención.

Por otro lado, es importante mencionar que los estudios sobre la dinámica espacio-temporal de los cambios de cobertura y uso del suelo en zonas áridas son escasos o muy puntuales, y algunos no incluyen factores sociodemográficos o antropogénicos que pudieran influir o ser una variable explicativa que describa el impacto al que están expuestos los recursos naturales y su efecto en la dinámica

hidrológica del área de estudio, por lo que no se cuenta con información actualizada sobre los procesos ecosistémicos y la dinámica espacio-temporal del territorio geográfico que se han presentado a través de los periodos de tiempo.

Por ello, en este trabajo se estudió la dinámica espacio-temporal de los cambios de cobertura y uso del suelo en esta región del Valle de Guadalupe, además de integrar el análisis estadístico espacial de las pérdidas, ganancias y persistencia de las diferentes coberturas superficiales del suelo en esta subcuenca; con el fin de contribuir a la generación de conocimiento y sustentar científicamente los procesos geográficos y espaciales de una región de importancia agroeconómica productiva, de gran impacto y crecimiento antropogénico y sociodemográfico. Finalmente se detectaron zonas de vulnerabilidad intrínseca, y se identificó el tipo de cobertura del suelo, para zonificar zonas de vulnerabilidad específica y se establecieron sitios de atención prioritaria

Palabras clave: Vulnerabilidad a la Contaminación, método DRASTIC, Región semiárida Mediterránea, Hidrología Subterránea, Nitratos, Geoestadística, Sistemas de Información Geográfica, Cambios de Uso de Suelo y Vegetación, Google Earth Engine.

Abstract

Aquifers are vulnerable to contamination, especially when there is low water availability in the region and large areas of agricultural irrigation. In this work, an analysis of the vulnerability to contamination of the Guadalupe aquifer in the Guadalupe valley area, Baja California, is carried out by performing a physical-geographical characterization and the application of the DRASTIC method, using geographic information systems, with the objective of evaluating the degree of vulnerability of this aquifer. The parameters of water table depth, water table variation (recharge), aquifer medium, soil type, topography, lithology of the unsaturated zone and hydraulic conductivity are used, which provide information on the intrinsic characteristics, assigning valuations according to their probability of causing contamination, to finally obtain the vulnerability index and representative maps of vulnerability to contamination for wet and dry scenarios, which spatially represent categories from very low to very high vulnerability. In addition, the study addresses the spatial distribution and behavior of nitrate concentrations in the groundwater aquifer for the years 2001, 2020, and 2021. The results of the vulnerability method are validated in the aquifer, with nitrate concentration as an indicator of contamination. The parameters of water depth and impact on the vadose zone are the most influential indicators in the vulnerability index. This type of research tool is a valuable contribution to aquifer management and environmental sustainability and land use planning, indicating areas of negligible to extreme vulnerability that can support pollution mitigation measures.

On the other hand, it is important to mention that studies on the spatio-temporal dynamics of land cover and land use changes in arid zones are scarce or very specific, and some do not include sociodemographic or anthropogenic factors that could influence or be an explanatory variable that could describe the impact to which natural resources are exposed and their effect on the hydrological dynamics of the study area. Therefore, there is no updated information on the ecosystemic processes

and spatio-temporal dynamics of the geographic territory that have occurred over periods of time.

For this reason, in this work we studied the spatial-temporal dynamics of land cover and land use changes in this region of the Guadalupe valley, in addition to integrating the spatial statistical analysis of the losses, gains and persistence of the different land surface covers in this sub-basin; in order to contribute to the generation of knowledge and scientifically support the geographic and spatial processes of a region of productive agroeconomic importance, of great impact and anthropogenic and socio-demographic growth.

Key words: Aquifer, Vulnerability, Contamination, DRASTIC method, Mediterranean Region, Semi-Arid Region, Groundwater Hydrology Nitrates, Geostatistics, Geographic Information Systems, Land Use Change and Vegetation, Google Earth Engine.

Dedicatorias

Mi dedicatoria más grande es para mis padres, que con todo su amor, apoyo y comprensión han hecho esta etapa de mi formación académica menos difícil.

A mis hermanas por todos sus consejos en momentos difíciles.

A esa persona especial para mí, durante tantos años de nuestra vida compartiendo juntos diferentes momentos.

A mis directores y sinodales de tesis por todo su apoyo y comprensión siempre.

A la Dra. Conchita por ser un gran pilar de apoyo en esta última etapa doctoral.

A mis amigas por todos los momentos tan agradables que compartimos en estas tierras.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), por el apoyo económico otorgado, el cual me permitió realizar los estudios de Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, durante los 3 años de mi formación.

A la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) por permitirme ser parte de su comunidad estudiantil y poder acceder a sus instalaciones y servicios.

Al Instituto de Investigaciones Oceanológicas por facilitarme un espacio de trabajo, acceso a laboratorios y materiales para llevar a cabo la investigación, y especialmente a la coordinación del posgrado; Dra. Gaby, por gestionar el apoyo económico para mi participación en el Congreso Internacional sobre Sostenibilidad Ambiental en Eslovenia 2023.

Al proyecto de CONAHCYT Ciencia Básica (2019-2023) Investigación de las interacciones hidrogeoquímicas e isotópicas asociadas a la recarga artificial de acuíferos costeros con agua residual tratada y su descarga submarina en el Noroeste de México, IRADES. Por el apoyo de campo y laboratorio a esta investigación.

A la dirección de Programas Nacionales Estratégicos de Conahcyt (Pronaces), específicamente al Proyecto Nacional de Investigación e Incidencia (PRONAI 319059) titulado “Observatorios Participativos Socio-Ecológicos de zonas áridas. Etapa II: Co-definición y cogeneración del conocimiento para la protección de la diversidad cultural y biótica y el desarrollo sostenible

A mi director de tesis el Dr. Walter Daesslé, principalmente por ser un gran ejemplo de persona con una calidad humana extraordinaria. Agradezco mucho su tiempo, apoyo, comprensión incondicional y gestión en esta etapa de mi formación.

A mi codirector de tesis el Dr. Francisco del Toro por su gran paciencia y disponibilidad en la asesoría de esta investigación.

A mis sinodales de tesis: Dra. Mariana Villada, Dr. Georges Seingier por sus comentarios, recomendaciones y críticas constructivas, durante los avances de mi trabajo.

A mi sinodal externo el Dr. Antonio Rico, por su disposición y tiempo para esta investigación, a pesar de la distancia y diferencia de horario (España – México).

A la Dra. Conchita Arrendo por ser un gran apoyo para mí y brindarme su amistad, cariño y comprensión en momentos difíciles. Por ser una gran investigadora y pero sobre todo excelente persona.

Al Dr. Eduardo y la Dra. Aby por su apoyo siempre y oportunidad de colaboración en sus trabajos de investigación.

A mis amigas Astrid, Marilynna, y Liliana por compartir juntas buenos y malos momentos en nuestro camino, pero siempre sacándonos una sonrisa.

Y finalmente, pero no menos importante a mi familia, por todo su apoyo y confianza, por creer en mí y tener siempre palabras de aliento a seguir adelante en todos los momentos buenos y malos vividos en esta etapa de mi vida.

Índice

Resumen.....	3
Dedicatorias	7
Agradecimientos	8
Índice	10
1. Introducción general	16
1.1 Protección de acuíferos.....	16
1.2 México y el Valle de Guadalupe, B.C.....	17
1.3 Método DRASTIC.....	19
1.4 Propósito y organización	21
2. Preguntas de investigación	23
3. Planteamiento del problema	24
4. Objetivos	25
4.1 Objetivo general.....	25
4.2 Objetivos particulares	25
5. Caracterización físico – geográfica de la zona de estudio.....	26
5.1 Localización, límites y extensión	26
5.2 Caracterización físico-geográfica del acuífero	29
5.2.1 Provincias fisiográficas	29
5.2.2 Clima.....	30
5.2.3 Hidrografía.....	31
5.2.4 Geomorfología	32
5.2.5 Geología	32
5.2.6 Estratigrafía	32
5.2.7 Hidrogeología	33
5.2.8 Conductividad hidráulica.....	34
5.2.9 Piezometría	34
5.2.10 Censo de aprovechamientos e hidrometría.....	35
5.2.11 Recarga total media anual (R)	35
5.2.12 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	35
6. Marco Teórico – metodológico	35
6.1 Marco metodológico general	35

6.2 Inicio del proceso: Caracterización de la subcuenca Guadalupe	36
6.3 Análisis de la situación	40
6.4 Inventario de las variables del sistema	40
6.5 Descripción de la relación entre variables	41
6.6 Identificación de las variables clave	42
6.7 Marco metodológico del modelo hidrogeomático	43
6.8 Modelación de la vulnerabilidad: Método DRASTIC	44
7. Integración de zonas de vulnerabilidad específica	51
7.1 Ponderación de capas	53
7.2 Vulnerabilidad específica	54
8. StoryMaps como herramienta de divulgación científica.	55
9. Dinámica espacio - temporal de la cobertura de suelo en el Valle de Guadalupe; aplicación de la geointeligencia computacional, mediante sensores remotos.	58
9.1 Introducción	59
9.2 Antecedentes	60
9.3 Justificación	61
9.4 Problemática	62
9.5 Materiales y métodos	63
9.5.1 Localización del área de estudio.	63
9.6 Obtención de la información.....	64
Fase 1. Extracción y depuración de la información.....	65
Fase 2. Generación de variables espectrales y de apoyo.....	65
Fase 3. Clasificación supervisada, análisis geoestadístico y validación.....	67
9.7 Resultados	67
9.7.1 Coberturas en 1984 y 2020	67
9.7.2 Persistencias por tipo de coberturas entre 1980 y 2020	71
9.7.3 Cambios entre tipos coberturas.....	72
9.7.4 Ganancias, pérdidas y persistencias para la cobertura agrícola.	73
9.7.5 Mapa de transición de matorral a agrícola.	74
9.7.6 Intercambios entre desprovisto de vegetación a agrícola.	75
9.7.7 Cobertura del suelo en 1980 y concentración de nitratos 2001.....	76
9.7.8 Cobertura del suelo en 1980 y concentración de nitratos 2001.....	77
9.8 Discusión	77

9.9 Conclusiones.....	79
9.10 Recomendaciones.	80
9.11 Referencias.....	81
10. Artículo titulado " Vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos en el valle vitivinícola mexicano de Guadalupe, México "sometido en inglés a la revista "Hydrology"	84
11. Integración de zonas de vulnerabilidad específica	114
11.1 Ponderación por tipo de cobertura.....	115
11.2 Vulnerabilidad específica	116
11.3 Concentración de nitratos.....	116
11.4 Identificación de sitios muestreados	118
11.5 Análisis por tipo de cobertura	118
11.6 Relación de variables de acuerdo a su ponderación.....	120
11.7 Vulnerabilidad específica para el escenario seco.....	121
11.8 Vulnerabilidad específica para el escenario húmedo	122
11.9 Sitios de atención, ante la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero.....	122
12. StoryMaps	125
13.- Conclusiones generales.....	127
14.- Recomendaciones	130
15.- Referencias.....	131

Índice de figuras por sesión

Introducción

Figura 1.1 Límites político-administrativos de los acuíferos La Misión, Guadalupe.	30
Figura 1.2 Localización de la subcuenca Guadalupe, en la que se encuentra el Acuífero Valle de Guadalupe.	30
Figura 3. Localización del Acuífero Guadalupe, correspondiente a la zona de estudio.....	35
Figura 4. Sección hidrogeológica esquemática del Acuífero Guadalupe, que muestra las principales características litológicas de las fosas “Porvenir y Calafia”.....	36
Figura 5. Procedimiento general para desarrollar la investigación.	39
Figura 6. Variables de evaluación del método DRASTIC (Aller et al., 1987).....	48
Figura 7. Esquema metodológico para la estimación de zonas vulnerables integrales a la contaminación de un acuífero.	57
Figura 8. Procedimiento de álgebra de mapas para la vulnerabilidad específica.....	59
Figura 9. Pasos para la elaboración de un StoryMaps	62

Dinámica espacio - temporal de la cobertura de suelo en el Valle de Guadalupe; aplicación de la geointeligencia computacional, mediante sensores remotos.

Figura 1. Localización del área de estudio	68
Figura 2. Clasificación de suelo y vegetación en el Valle de Guadalupe para los años de 1980... 73	73
Figura 3. Clasificación de uso de suelo y vegetación en el Valle de Guadalupe para los años de 2020.....	74
Figura 4. Persistencias de la cobertura a lo largo de los años 1984-2020.	76
Figura 5. Mapa de cambios desde los años 1980-2020.	77
Figura 6. Mapa de ganancias, pérdidas y persistencias 2020.	78
Figura 7. Mapa de transición de matorral a cobertura agrícola.	79
Figura 8. Mapa cobertura agrícola 2020.	80
Figura 9. Mapa cobertura agrícola 1980 y concentración de nitratos 2001.....	81
Figura 10. Mapa cobertura agrícola 2020 y concentración de nitratos 2020.....	82

Artículo titulado “ Vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos en el valle vitivinícola mexicano de Guadalupe, México ” sometido en inglés a la revista “Hydrology”

Figuras internas en el artículo

Integración de zonas de vulnerabilidad específica..... 119

Figura 11.1 Ponderación por tipo de cobertura del suelo en temporada húmeda. 120

Figura 11.2 Vulnerabilidad específica en un escenario seco..... 126

Figura 11.3 Vulnerabilidad específica en un escenario húmedo. 127

12. StoryMaps

Figura 12.1 Portada web de StoryMaps..... 131

Figura 12.1 Código QR de StoryMaps..... 132

Índice de figuras por sesión

Introducción

Tabla 1. Disponibilidad media anual (CONAGUA, 2024)	32
Tabla 2. Capas base de SIG para generar la caracterización físico-geográfica de la	41
Tabla 3. Listado de variables.	45
Tabla 4. Pesos asignados a los parámetros del método DRASTIC.....	50
Tabla 5. Valoración del parámetro de profundidad para el método DRASTIC.	51
Tabla 6. Valoración del parámetro recarga.....	52
Tabla 7. Valoración de Litología para el método DRASTIC.....	53
Tabla 8. Valoración de tipo de suelo para el método DRASTIC.....	53
Tabla 9. Valoración de pendiente para el método DRASTIC.	54
Tabla 10. Valoración de naturaleza de la zona no saturada para el método DRASTIC.....	55
Tabla 11. Valoración de conductividad hidráulica para el método DRASTIC.....	55
Tabla 12. Rangos de variación del DVI.	56
Integración de zonas de vulnerabilidad específica.....	56
Tabla 13. Pesos asignados de acuerdo a la categoría de vulnerabilidad	58
Tabla 15. Peso asignado por categoría en el escenario húmedo y seco.....	59
Tabla 14. Pesos por tipo de cobertura	59
Tabla 16. Pesos asignados de acuerdo a la concentración de nitratos.....	59
Tabla 17. Obtención y categorías de la vulnerabilidad específica.	60
Dinámica espacio - temporal de la cobertura de suelo	73
Tabla 1. Coberturas y áreas para 1984 y 2020	76
Integración de zonas de vulnerabilidad específica.....	120
Tabla 11.1 Pesos de la vulnerabilidad intrínseca como acuerdo del método DRASTIC.....	120
Tabla 11.2 Resultados de la vulnerabilidad específica.....	122
Tabla 11.3 Concentración y peso de nitratos para el año 2020.....	122
Tabla 11.4. Concentración y peso de nitratos para el año 2021.....	122
Tabla 11.5 Coincidencia espacial de sitios muestreados para 2020 y 2021	123
Tabla 11.6 identificación de sitios muestreados.....	123
Tabla 11.7 Correspondencia espacial de los sitios muestreados en dos distintos escenarios de vulnerabilidad específica.....	124
Tabla 11.8 Extracción de sitios espacialmente coincidentes de diferentes capas.....	126

1. Introducción general

1.1 Protección de acuíferos

Los acuíferos son unidades hidrogeológicas altamente vulnerables que tienen un factor de riesgo a la sobreexplotación y a la contaminación, debido a la factibilidad del sistema expuesto a ser afectado por una amenaza determinada en función de su intensidad y frecuencia.

La contaminación puede ser a causa de procesos naturales o antropogénicos y la sobreexplotación puede generar efectos perjudiciales. Por ejemplo: el agotamiento de manantiales, la desaparición de lagos y humedales, afectación en los ecosistemas, pérdida de vegetación, disminución en el aporte de nutrientes a la zona costera, el desbalance económico y problemas socioterritoriales, entre otros (Foster e Hirata, 1991).

La contaminación en aguas subterráneas tiende a aparecer lentamente, pero es muy persistente y, aunque el ciclo natural del agua tiene la capacidad de purificación, también tiene la facilidad de contaminarse fácilmente, siendo producto de nuestras actividades antropogénicas (Llamas, 1999).

La extracción intensiva de agua subterránea excede la capacidad de recarga natural en zonas áridas y semiáridas (FAO, 2011). Las características geológicas, geográficas y climáticas, determinan la calidad y disponibilidad del agua, provocando condiciones de escasez o abundancia (FAO, 2013). Estas condiciones se tornan críticas cuando existe una mala gestión en la recuperación y reúso del agua, principalmente en el caso de los acuíferos.

En tal sentido, surge la necesidad de implementar o consolidar políticas para proteger los acuíferos contra la explotación excesiva o irracional y contra el deterioro de su calidad debido a la contaminación (Franco, 2002). Este es especialmente el caso que ocurre dentro de las áreas agrícolas, donde las captaciones de agua subterráneas se encuentran bajo una presión ambiental causada por el bombeo constante por la actividad agrícola, que puede superar las entradas de agua renovable.

En cuanto a la calidad del agua, resulta fundamental conocer sus propiedades físicas, químicas y biológicas, para ser aprovechada de forma adecuada y segura. Para medir esta calidad se definen estándares específicos en función a los usos que se pretende dar, por ejemplo, agua potable, para uso agrícola o industrial (UNDP, 2000).

Los programas de protección de la calidad de las aguas subterráneas, revelan que existen dos líneas básicas de seguimiento y casi siempre independiente de conducta: la primera está dirigida a los pozos de captación, estableciendo perímetros de protección alrededor de la obra, definidos a partir de los tiempos de tránsito específico, distancia de la fuente o el comportamiento hidráulico del acuífero; y la segunda dirigida al acuífero, donde se definen las restricciones de uso de la tierra frente a la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos y a la importancia del recurso como fuente de abastecimiento público (Alvarado, 2000; Hirata y Rebuocas, 1999 y 2001).

Plata (2002) enfatiza que la independencia de la vulnerabilidad de atributos ajenos a las propiedades de los acuíferos, es decir, de características permanentes del medio, establece la diferencia con el concepto de protección (captaciones, manantiales, zonas húmedas, etc); el primero hace alusión a los acuíferos, en tanto que el segundo depende de propiedades que no son del medio (ubicación de la actividad contaminante, intensidad de la actividad, etc.).

La baja disponibilidad y calidad de agua subterránea, se ha convertido en uno de los principales problemas a nivel mundial. Se estima que 844 millones de personas (10.8 %) a nivel mundial no tienen acceso a agua potable (WHO / UNICEF, 2017).

1.2 México y el Valle de Guadalupe, B.C.

México enfrenta grandes problemáticas en materia de gestión y protección de sus recursos y agua subterránea. Entre ellas destacan la ausencia de herramientas para protección de los acuíferos frente a la disminución acelerada de la disponibilidad de agua en zonas con crecimiento y en proceso de creciente contaminación de los

cuerpos de agua, o reservorios como fuentes de abastecimiento ((Llamas y Custodio, 2002).

De acuerdo con Quroz (2020), las consecuencias de un desarrollo acelerado han propiciado el aumento de la extracción y el consumo de agua. El bombeo en zonas agrícolas y aumento en uso urbano, se traduce consecuentemente en una mayor extracción y generación de aguas residuales que, al ser descargadas sin tratamiento en los cuerpos receptores, perjudican su uso y disminuyen el potencial de aprovechamiento.

Con base a las estadísticas oficiales del agua en México (CONAGUA, 2023), existe mayor abundancia de agua en el sureste, donde la densidad poblacional e industrial es baja, pero escasea en el norte, noreste y centro, donde está la mayor concentración poblacional e industrial y se genera la mayor actividad agropecuaria.

En México, se han definido 653 acuíferos para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo. El Diario Oficial de la Federación (DOF) en noviembre 2023 publicó la actualización de la disponibilidad media anual del agua subterránea (correspondiente a la fecha de corte 30 de diciembre de 2022), determinando que el agua subterránea en México constituye un 40.5 % (36,800 hm³) del volumen concesionado total para usos consuntivos; agricultura (uso de agua para el riego de cultivos), abastecimiento público (el agua utilizada para el suministro de agua potable a las comunidades y ciudades), industria (agua utilizada en procesos industriales, incluyendo la manufactura, minería y otras actividades industriales), ganadería (agua destinada al consumo de animales y operaciones ganaderas).

La extracción excesiva del agua, el cambio de uso del suelo y el incremento poblacional, afectan al funcionamiento natural del sistema acuífero, perjudicando el desarrollo social, económico y ambiental. Actualmente la situación hídrica en los acuíferos cercanos a los núcleos poblacionales en Baja California es crítica (CONAGUA, 2018). La industria del vino representa un factor de desarrollo local y regional, el Consejo Mexicano Vitivinícola (2019), mencionó que en nuestro país se destinan 6,474 hectáreas para la producción de uva utilizada en los vinos, siendo

Baja California el principal productor con el 57%, seguido de Coahuila (32%), Querétaro (8%) y Guanajuato (3%).

Específicamente en el municipio de Ensenada, B.C., el funcionamiento y desarrollo de sus actividades agrícolas (principalmente vitivinícolas), depende en su mayoría del agua subterránea (Daesslé et al., 2020). El uso que se le da al agua subterránea (Acuífero Guadalupe), se divide en: uso agrícola (72.6 %), uso público urbano (18.4 %), uso doméstico (6%), uso local y ganadero (2.1 %) y uso industrial (0.9 %) (CONAGUA, 2013).

La recarga del acuífero Valle de Guadalupe está constituida por: 1) Infiltración vertical por eventos de precipitación en el área de recarga y medio fracturado en el frente de montaña y bloque montañoso, 2) Infiltración directa de agua teniendo en cuenta el drenaje del arroyo, incluyendo el área de subálveo aportando entradas horizontales, y por último 3) Recarga por percolación de agua de lluvia (Andrade, 1997; Kurczyn-Robledo et al., 2007; Campos, 2008; Del Toro-Guerrero *et al.*, 2014).

El volumen disponible de agua subterránea es cada vez menor debido a los periodos recurrentes de baja precipitación. Del-Toro Guerrero y Kretschmar (2020), mencionan que entre 1999 – 2009, fue el periodo de sequía que más ha afectado a la región. La extracción de agua subterránea supera el volumen de la recarga natural. Estas condiciones han provocado que el acuífero Valle de Guadalupe esté catalogado en un estado de sobreexplotación con un déficit aproximado de -18.22 Mm^3 (CONAGUA, 2018).

1.3 Método DRASTIC

Los desbalances hidrológicos en los acuíferos, los hacen vulnerables a los efectos de contaminación, por tal motivo es necesario la implementación de metodologías que determinen el grado de vulnerabilidad para proteger y gestionar el recurso. En América Latina, se han aplicado metodologías intrínsecas para estimar la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación (Neshat et al., 2014).

Los métodos indirectos utilizados para estimar la vulnerabilidad espacial a la contaminación de un acuífero se basan en índices, estadísticas y geoprocesos

(Agüero-Valverde & Pujol-Mesalles, 2000), (MADS, 2014), (Mfonka et al., 2018); por ejemplo, el método GOD utiliza tres parámetros: la presencia de agua subterránea (G), la litología general del acuífero (O) y la profundidad del agua subterránea (D) (Foster, 1987). SINTACS utiliza la profundidad hasta el nivel freático (S), la infiltración neta (I), el efecto de purificación de la zona no saturada (N), el medio del suelo (T), las características hidrogeológicas del acuífero, la conductividad hidráulica (C) y la pendiente (S) (Civita, 1994). EPIK estima la vulnerabilidad intrínseca considerando la profundidad al agua, las características de la zona no saturada y las características kársticas (Doerfliger et al., 1999), AVI también es un índice propuesto para identificar la vulnerabilidad de los acuíferos, el cual se basa en el material de la zona vadosa y un método multiparamétrico flexible (Van Stempvoort et al., 1993). El método más utilizado en todo el mundo es DRASTIC, que evalúa la vulnerabilidad utilizando siete parámetros: profundidad a las aguas subterráneas (D), recarga neta (R), medio acuífero (A), suelo (S), topografía (pendiente; T), impacto de la zona vadosa (I) y conductividad hidráulica (C). Cada parámetro tiene clases con un valor de clasificación y un peso basado en la importancia de sus características, lo que puede indicar diferentes niveles de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos (Aller et al., 1987). Estas metodologías, consideran las características del ambiente acuífero e incorporan factores relacionados con las características del transporte de contaminantes a través de zonas no saturadas y saturadas (Ahamad et al., 2018). Permiten una evaluación integral de la vulnerabilidad, proporcionando datos críticos para la gestión y protección de los recursos hídricos subterráneos.

En el estado de Oaxaca se encuentra el acuífero “Etna”, en donde se aplicó el método de vulnerabilidad “DRASTIC” y se calibró con los contenidos de nitrato como indicadores de contaminación, mediante la correlación de Pearson para modificar los pesos del método y así adaptar mejor las condiciones del sitio de estudio (Aragón et al., 2012).

También se han aplicado modelos matemáticos de simulación, que proporcionan herramientas para la elaboración de mapas de vulnerabilidad de acuíferos, así como

el análisis y procesamiento de datos cartográficos y geoestadísticos. Aller et al. (1987) mencionan que los principales indicadores de equilibrio en un acuífero son parámetros como: profundidad del acuífero, recarga neta, litología del acuífero, tipo de suelo, topografía, litología de la zona no saturada y conductividad hidráulica.

La modelación numérica y cartográfica son herramientas para la evaluación de la vulnerabilidad, es precisamente que en el presente trabajo se implementará la metodología DRASTIC desarrollada por Aller et al. (1987), ya que sus parámetros se consideran adecuados para las características hidrogeográficas del acuífero en estudio, por integrar las condiciones naturales expuestas del acuífero, con el objetivo de identificar qué áreas son más o menos propensas a contaminarse y se validará con análisis hidrogeoquímicos de nitratos.

El desarrollo económico y social del Valle de Guadalupe, cada vez es más demandante, pero se ve afectado por la variabilidad climática y características físico-geográficas y socioeconómicas en la región, que a su vez influyen en la disponibilidad y calidad del agua subterránea en el acuífero (Salgado Tránsito et al., 2018).

Por lo anterior, es importante realizar estudios hidrogeológicos de evaluación, que estimen la vulnerabilidad de los acuíferos con el fin de crear propuestas de planes de manejo sostenible, como apoyo a los tomadores de decisiones, empleando técnicas de teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG), para crear modelos integradores, espaciales y temporales, que permitan el almacenamiento, procesamiento y análisis de los diferentes tipos de datos hidrogeológicos, que interactúan en el acuífero.

1.4 Propósito y organización

Los objetivos se centran en la identificación del grado de vulnerabilidad intrínseca y específica del acuífero del Valle de Guadalupe, implementando el método DRASTIC, aplicando un ajuste en algunos indicadores para mejorar y validar su confiabilidad. Estas modificaciones incluyen anexar información sobre datos hidrogeoquímicos, los cuales servirán para tener datos de calidad de agua y uso de

la tierra, para contribuir a la detección de zonas más precisas ante la vulnerabilidad. Aunado a esto se implementa el análisis de la cobertura del suelo, así como su cambios, persistencias, ganancias y pérdidas a través del tiempo (periodo 1980 – 2020).

Los resultados de esta investigación proporcionan información en el acuífero donde el comportamiento de sus elementos indicarán su grado de vulnerabilidad intrínseca y específica (muy baja a muy alta). Como medida de divulgación científica se genera un StoryMaps con los principales temas y resultados de acuerdo a la vulnerabilidad del acuífero. Esta investigación podrá servir de apoyo para propuestas de planes de manejo, o medidas de mitigación y gestión a la contaminación del acuífero.

2. Preguntas de investigación

- ¿Cómo afectan los cambios en la cobertura del suelo a la contaminación del acuífero en regiones mayormente agrícolas, y qué papel juegan estos cambios en la alteración de la cantidad y calidad del agua subterránea a lo largo del tiempo?
- ¿Cómo evaluar la vulnerabilidad del acuífero en una zona semiárida mediterránea utilizando métodos geoestadísticos, en función de diferentes escenarios y qué implicaciones tiene esta variabilidad para la gestión sostenible de los recursos hídricos?
- ¿Cómo influyen las diferentes zonas de vulnerabilidad intrínseca del acuífero evaluada mediante el método DRASTIC, el tipo de cobertura del suelo y la concentración de nitratos en aguas subterráneas, y de qué manera se puede identificar la relación entre su comportamiento, en pro de la gestión del acuífero en zonas de vulnerabilidad específica?
- ¿Cómo se podría mejorar la divulgación científica y la comprensión sobre la contaminación del acuífero, y cuáles herramientas ayudarían en la sensibilización y participación local sobre la gestión de recursos hídricos en la región?

3. Planteamiento del problema

Los acuíferos son vulnerables ante la sobreexplotación, la contaminación y la modificación hidroquímica por procesos naturales y/o antropogénicos; sus efectos pueden ser perjudiciales en ámbitos físicos, económicos, sociales y medio ambientales (Heath, 1987)

La región del Valle de Guadalupe se caracteriza por su actividad vitivinícola, un clima semiárido con baja disponibilidad de agua superficial (Del Toro-Guerrero et al., 2014), y su única fuente de abastecimiento constante de agua es del subsuelo. El Acuífero Guadalupe abastece a las actividades agrícolas y a la población local. A través del tiempo, las áreas agrícolas se han extendido y el crecimiento poblacional se encuentra en ascenso (SEFOA, 2015). Este crecimiento demanda cada vez más agua, generando que el acuífero sea afectado por la extracción de un mayor volumen de agua del que se recarga naturalmente y sin medidas de gestión adecuadas (Valdés, 2014).

A partir de 1999, mediante un estudio de simulación hidrodinámica del acuífero, se determinó el estado de sobreexplotación del acuífero. Posteriormente en el 2007 se realizó una propuesta de plan de manejo integrado del agua subterránea (CONAGUA, 2020), con el fin de estabilizar el acuífero, reducir gradualmente la sobreexplotación y preservar la calidad del agua, así mismo prevenir o minimizar la contaminación. En ese plan federal, como medidas de acción se contemplaron estudios de monitoreo de las condiciones geohidrológicas e hidrogeoquímicas del acuífero, para recabar información y calcular su comportamiento hidrodinámico. Además, se buscó determinar las causales de interés y de utilidad pública señaladas en la Ley de Aguas Nacionales (promulgada desde diciembre de 1992 y actualizada el 08 de mayo de 2023), para establecer medidas regulatorias, identificar y proponer medidas correctivas y de operación.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Evaluar la vulnerabilidad específica del acuífero del Valle de Guadalupe, mediante la modelación y el análisis geoestadístico de la vulnerabilidad intrínseca y del cambio de cobertura de uso de suelo, a fin de proporcionar insumos para un manejo integral de acuíferos.

4.2 Objetivos particulares

- Modelar la dinámica espacio - temporal de los usos de suelo, mediante un análisis de ganancias - pérdidas y persistencias de las coberturas entre el periodo de 1980 a 2020, para estimar la distribución espacial de diferentes zonas que actúan como un tipo presión antropogénica en el Valle de Guadalupe.
- Implementar el método geoestadístico DRASTIC, a través de la asignación de rangos y pesos específicos para un acuífero de una región semiárida caracterizada por una escurrimiento limitada, con el fin de integrar zonas de vulnerabilidad intrínseca del acuífero.
- Integrar zonas de vulnerabilidad específica, mediante la sobreposición espacial de capas de vulnerabilidad intrínseca y de coberturas de suelo, y comparación con datos de concentración de nitratos en pozos de abastecimiento agrícola, para establecer criterios de priorización de la problemática, mediante situaciones de escenarios específicos.
- Poner a disposición de la sociedad y en particular de los actores del acuífero los resultados obtenidos en la presente investigación, mediante el diseño y construcción de StoryMaps, para garantizar el acceso universal al conocimiento humanístico y científico.

5. Caracterización físico – geográfica de la zona de estudio

5.1 Localización, límites y extensión

El Estado de Baja California se localiza en el noroeste de la República Mexicana y está conformado por siete municipios que son: Ensenada con una superficie de 1,353,376 ha y una población total de 443,807 habitantes; Mexicali con una superficie de 995,391 ha y una población total de 443,807 habitantes; Tecate con una superficie de 285,911 ha y una población total de 108,440 habitantes; Tijuana con una superficie de 107,538 ha y una población total de 1,922,523 habitantes; Playas de Rosarito con una superficie de 50,628 ha y una población total de 126,890 habitantes; San Quintín con una superficie de 3,413,415 ha y una población total de 117,568 habitantes y San Felipe con una superficie de 1101689 ha (INEGI. Censo de Población y Vivienda 2020).

La zona de estudio “Acuífero Guadalupe”, pertenece a la Región Hidrológica No. 1 de la vertiente del Océano Pacífico y a la cuenca hidrográfica de Guadalupe. Limita entre los paralelos 32°00'00" y 32°15'00" de latitud norte y entre los meridianos 116°45'00" y 116°20'00" de longitud oeste, la cual colinda con el acuífero de La Misión, por sus límites político-administrativos, publicados en el Diario Oficial de la Federación 2018 y desemboca en el océano Pacífico (Figura 1).

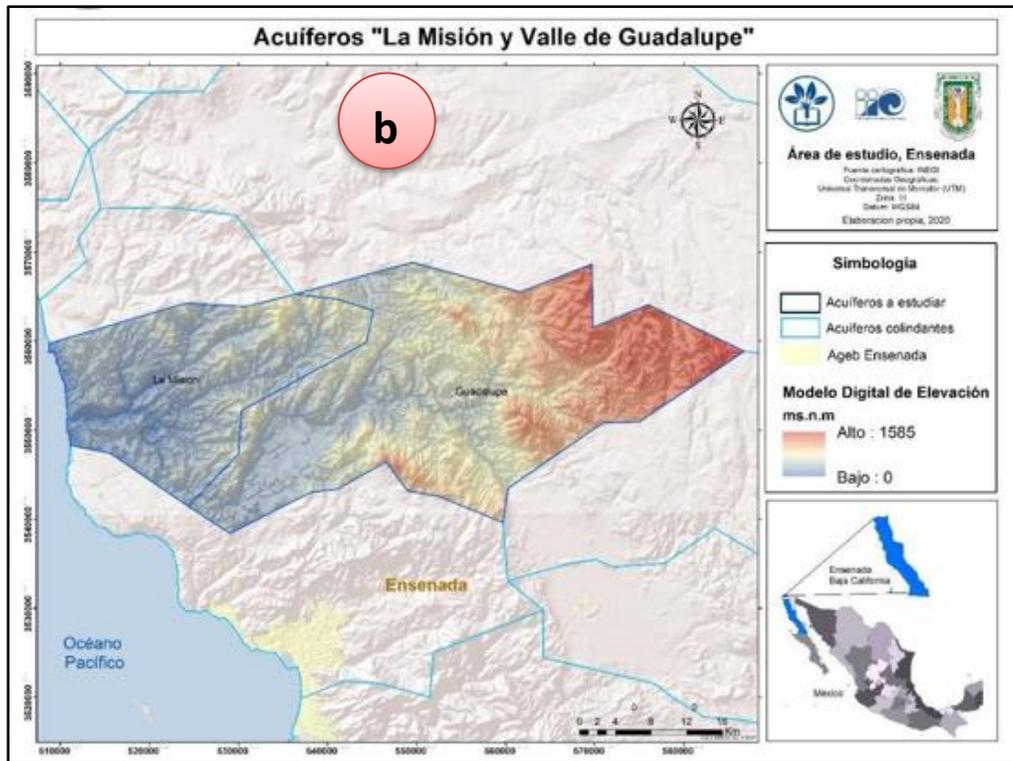


Figura 1.1 (a) Límites político-administrativos de los acuíferos La Misión, Guadalupe.

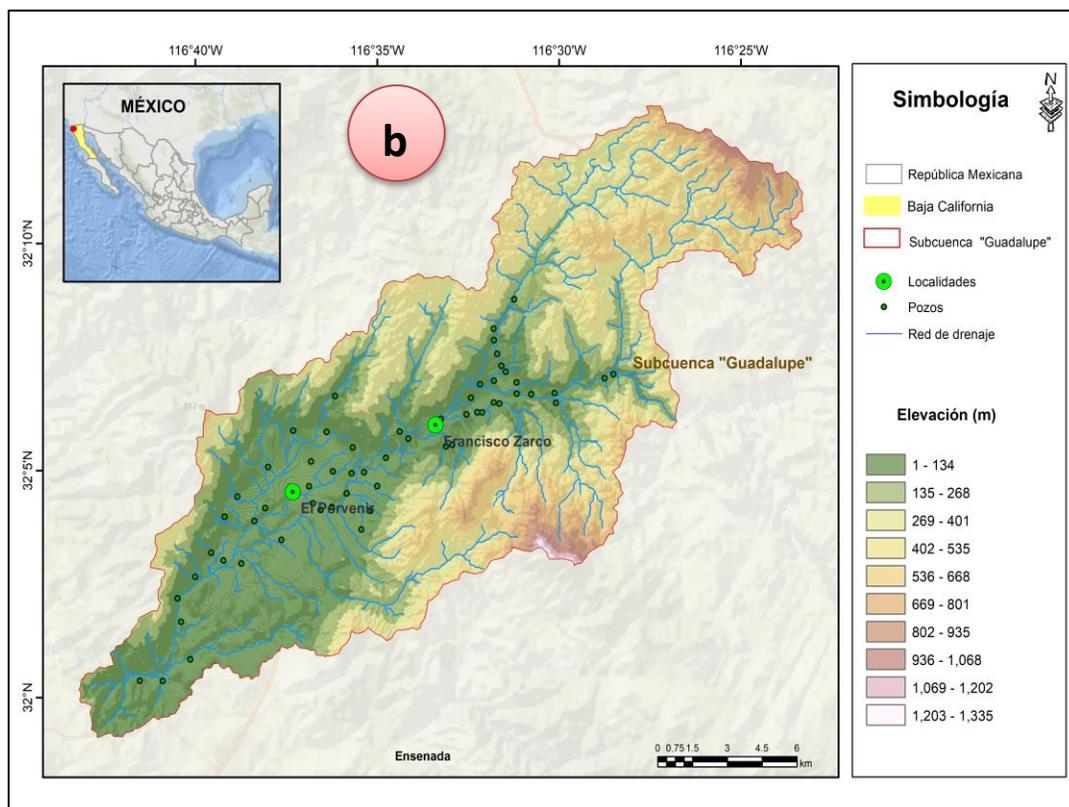


Figura 1.2 (b) Localización de la subcuenca Guadalupe, en la que se encuentra el Acuífero Valle de Guadalupe.

En Acuífero Guadalupe se ubica a 18 km al norte de la ciudad de Ensenada, ocupa en su totalidad al Valle de Guadalupe, el cual está definido por una superficie de forma alargada orientada de noreste a suroeste (Andrade, 1992), localizado en un valle intermontano con una superficie aproximada de 80 km² (Del Toro-Guerrero y Kretschmar, 2016), como se muestra en la Figura 2.

En la Tabla 1, se identifica la disponibilidad media anual del Acuífero Guadalupe, conforme a los lineamientos que considera la “NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, sobre la conservación del recurso agua, que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales” (CONAGUA, 2024).

Tabla 1. Disponibilidad media anual (CONAGUA, 2024)

CLAVE	ACUÍFERO	R	EXTRACCIÓN POR BOMBEO	DMA	VEAS	DÉFICIT CONCESIONAL	DNC
CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES							
ESTADO DE BAJA CALIFORNIA							
0207	Guadalupe	18.8	21.70	17.958130	36,658,130	-18.229948	0.1

R: recarga total media anual, DMA: disponibilidad media anual, VCAS: volumen concesionado / asignado de aguas subterráneas, VEAS: volumen de extracción de aguas subterráneas, DNC: descarga natural comprometida. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales “3” (fracciones 3.10, 3.12, 3.18 y 3.25) y “4” (fracción 4.3), de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.

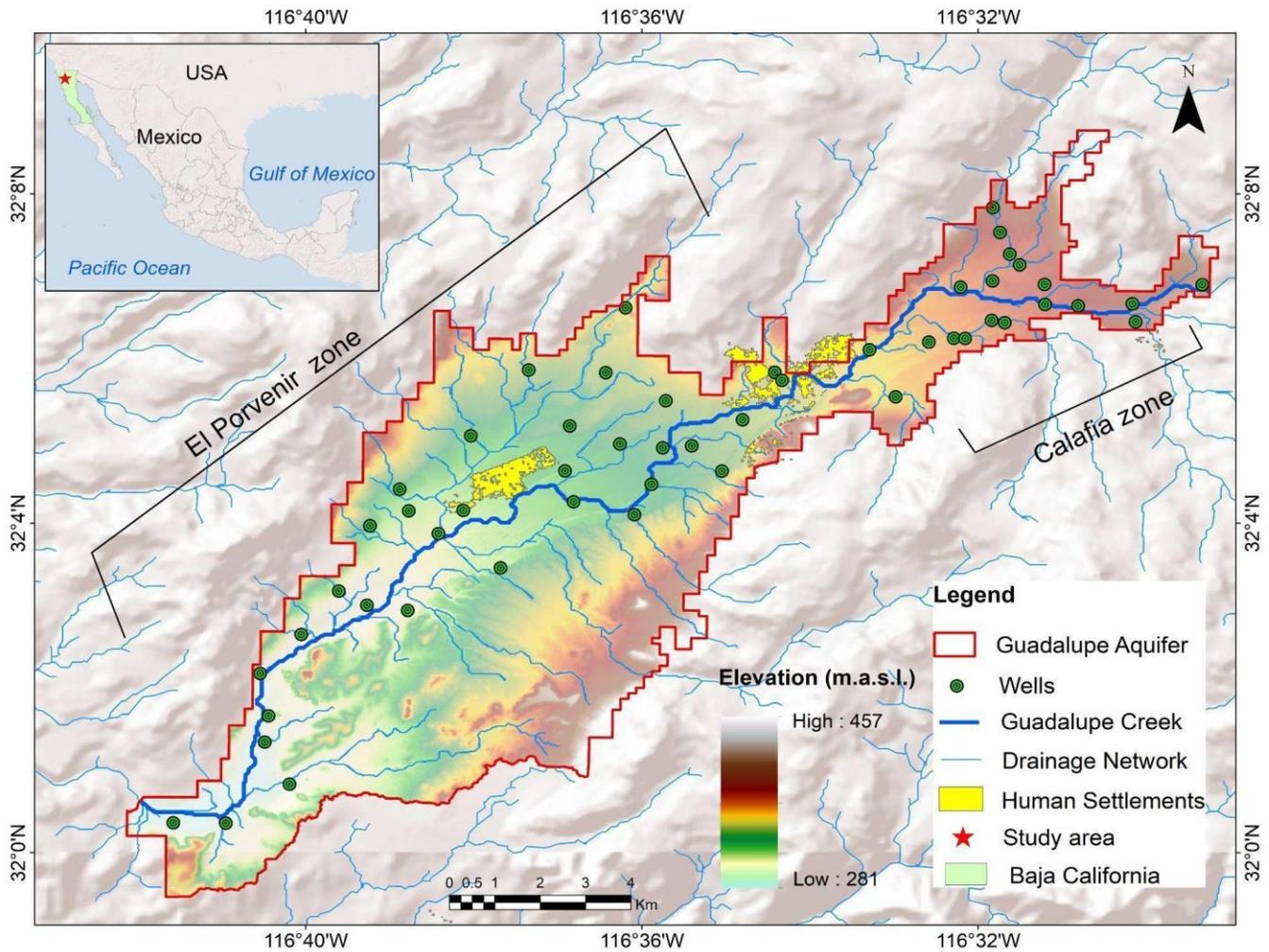


Figura 2. Localización del Acuífero Guadalupe, correspondiente a la zona de estudio.

5.2 Caracterización físico-geográfica del acuífero

5.2.1 Provincias fisiográficas

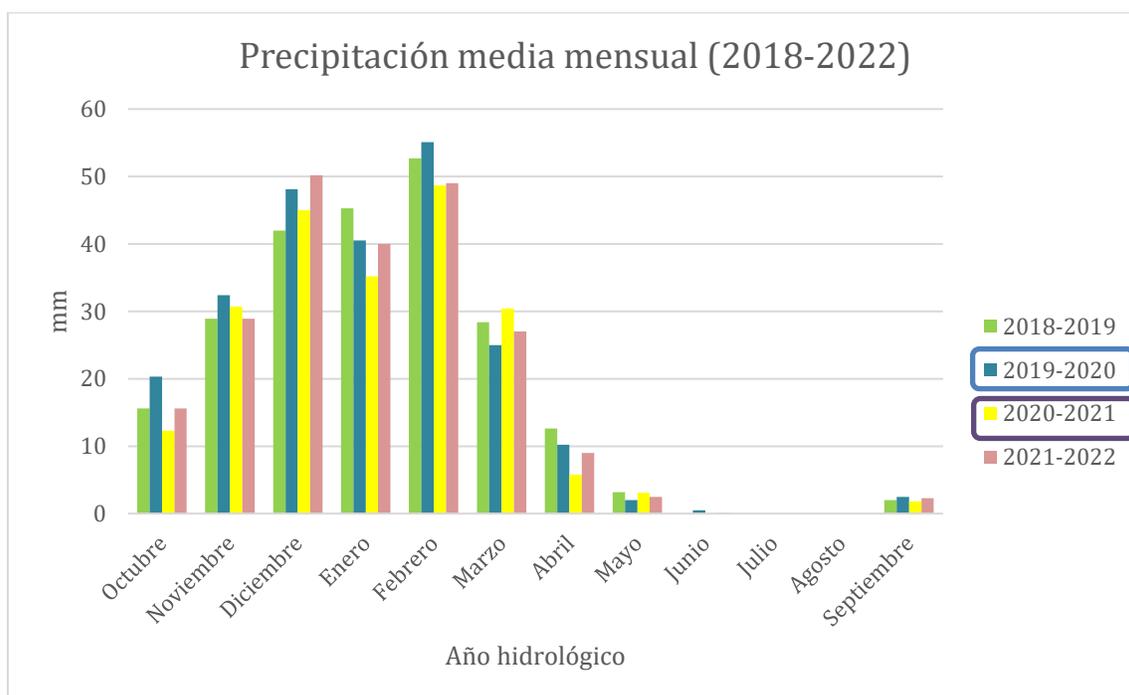
De acuerdo a la clasificación de las provincias fisiográficas, realizadas por INEGI (1997), el acuífero pertenece a la provincia fisiográfica península de Baja California, y subprovincia Sierras de Baja California norte, la cual está representada en su conjunto por la provincia geológica Batolito de Juárez – San Pedro Mártir, de origen

intrusivo, edad mesozoica y evolución geológica de raíz de arco volcánico, asociada a la subducción de la extinta placa tectónica de Farallón (Ortega et al., 1992).

5.2.2 Clima

Según la clasificación climática de Köppen modificada por García en 2004 El clima predominante es de tipo seco-mediterráneo-templado (BSks) y en las zonas de mayor elevación topográfica el clima es templado-subhúmedo (Cs). Con lluvias durante el invierno, y verano cálido poco extremo (Gráfica 1). Obtenido con datos meteorológicos de las estaciones Olivares Mexicanos, Agua caliente, Boquilla Santa Rosa y Ejido el porvenir (clave 2164) (periodo 1955 – 2012).

La temperatura media anual es de 16.8 °C, con una mínima de -3°C y una máxima de 24°C. La precipitación media anual es de 300 mm y la mayoría de las precipitaciones ocurren en los meses de noviembre, diciembre y enero. La evaporación media potencial es de 1618 mm anuales (CONAGUA, 2024).



Gráfica 1. Precipitación media mensual en el periodo (2018-2022).

5.2.3 Hidrografía

El acuífero pertenece a la región hidrológica No.1 Baja California Noroeste. El área del acuífero se integra por arroyos de tipo intermitente que tiene su origen en las montañas que rodean al valle. La red de drenaje forma tributarios de primer y segundo orden, los cuales contribuyen al cauce principal del arroyo Guadalupe, que continúa su curso en el acuífero La Misión para finalmente desembocar en el Océano Pacífico, con una longitud total de 115 km, desde su origen hasta su desembocadura. Sus principales tributarios son los arroyos El Barbón, Cañón del Burro y Agua Escondida (CONAGUA, 2024).

En la Figura 3, se observa la subcuenca Valle de Guadalupe. Tiene una superficie de 31,569 hectáreas, el área del Acuífero Guadalupe una superficie de 9,493 hectáreas aproximadamente, y específicamente la longitud que comprende el área de Acuífero Guadalupe tiene una longitud aproximada de 31.7 km de este a oeste. Se observan las principales entradas de recarga del acuífero en la zona Calafia, donde los tributarios se alinean en un flujo de agua que va de noreste a suroeste.

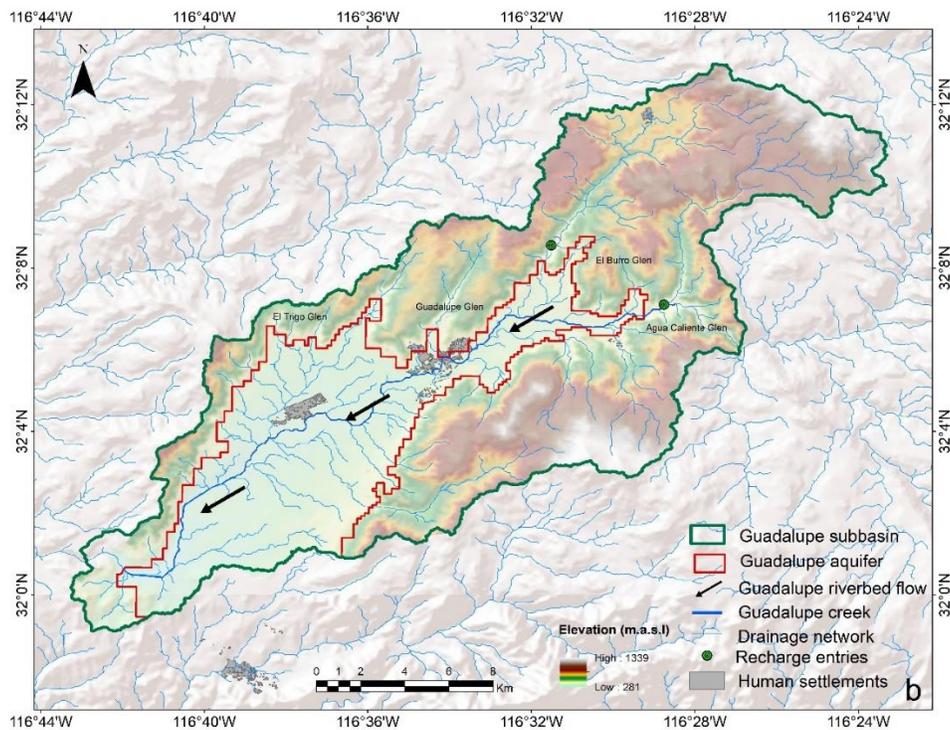


Figura 3. Localización del Acuífero Guadalupe, correspondiente a la zona de estudio.

5.2.4 Geomorfología

El acuífero se ubica en un valle intermontano próximo al Océano Pacífico, con elevaciones que varían entre los 281 y 457 msnm, rodeado por montañas cuyas alturas varían entre los 268 y los 700 msnm, la cadena montañosa con mayor altura, al oriente tiene elevaciones de hasta 1335 msnm y a sur se ubican los cerros Pedregoso y el Mogor que tiene elevaciones máximas de 700 msnm. Las rocas ígneas intrusivas (Granodiorita-Tonalita) presentan patrones de tipo subparalelo y subdentritico (CONAGUA, 2017).

Existe intemperismo y erosión sobre los sistemas de fracturas que se presentan en las rocas volcánicas y metamórficas, producen patrones de tipo dendritico, subdentritico y subparalelos.

5.2.5 Geología

Las formaciones geológicas expuestas en el acuífero están representadas por rocas ígneas intrusivas (tonalitas, granodioritas, gabros), rocas metamórficas (gneis, esquistos y pizarras), tobas de composición riolítica, así como depósitos sedimentarios granulares de origen aluvial, fluvial y lacustre.

El material granular está representado por sedimentos de granulometría variada, depositados sobre los cauces de los arroyos y la planicie, producto de la erosión e intemperismo de las rocas preexistentes que circundan el acuífero de acuerdo con la carta I11-11 1:250 000 serie 1 del INEGI, (2014).

5.2.6 Estratigrafía

En el acuífero aflora una variedad de rocas sedimentarias, metamórficas e ígneas intrusivas y extrusivas, cuyo rango estratigráfico varía del Triásico al Reciente. En la porción central y oriental del acuífero afloran rocas ígneas intrusivas como granitos y granodioritas, consideradas parte de la Franja Batolítica Transpeninsular, a la cual se le atribuye una edad Cretácico Superior. Sobre estas rocas sobreyace

una serie de derrames de composición basáltica y un grupo de rocas andesíticas. Las rocas metamórficas afloran en la porción norte y suroriental. Las rocas en general se encuentran moderadamente fracturadas y cizalladas (deformación homogénea), (CONAGUA, 2017).

5.2.7 Hidrogeología

Se trata de un acuífero de tipo libre, heterogéneo y anisotrópico, constituido en su porción superior por sedimentos aluviales, de granulometría variada y conglomerados, cuyo espesor puede alcanzar 350 m en la “fosa Calafia” y 100 m en la “fosa El Porvenir” (Figura 4).

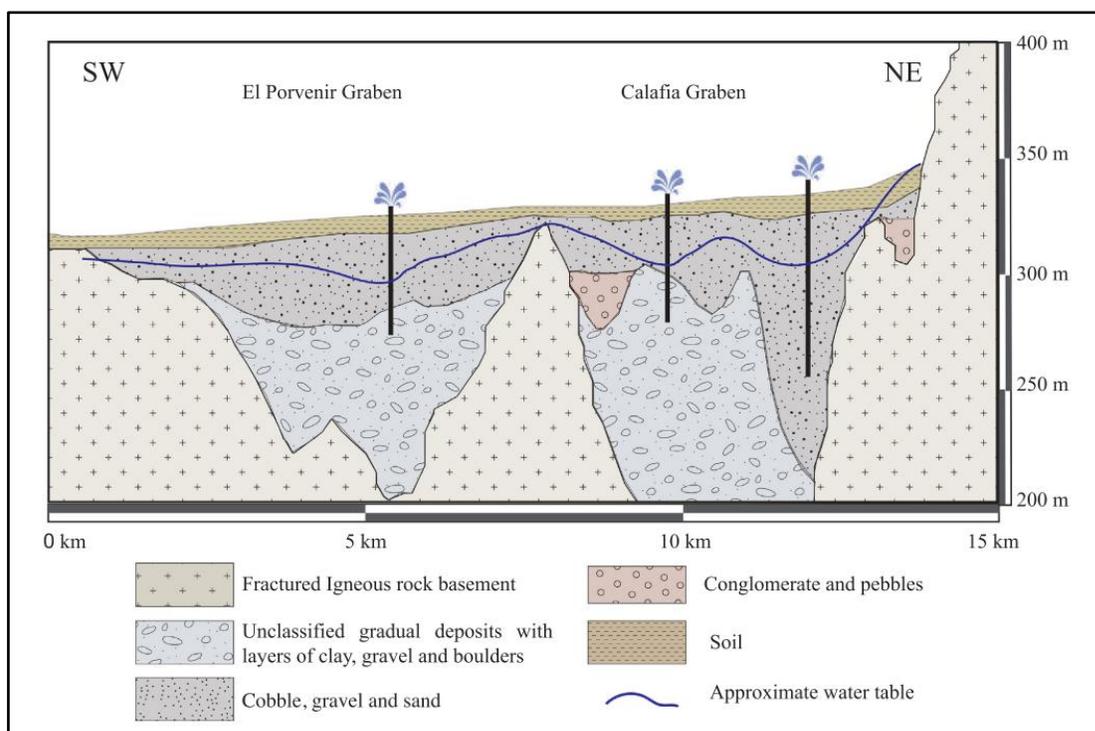


Figura 4. Sección hidrogeológica esquemática del Acuífero Guadalupe, que muestra las principales características litológicas de las fosas “Porvenir y Calafia”. Fuente: Modificado de CONAGUA (1999), Daesslé et al. (2020).

Se identifica la presencia de tres unidades hidrogeológicas: materiales granulares no consolidados, conglomerados semiconsolidados y macizos rocosos, que por su permeabilidad se consideran permeables, semipermeables e impermeables, respectivamente.

Unidades hidrogeológicas, caracterizadas por la porosidad y permeabilidad del suelo para poder describir el subsuelo, que se describen en el siguiente listado (CONAGUA., 2020).

1. Pleistoceno y Reciente. terrazas marinas, gravas, arenas y limos. Depósitos aluviales y lacustres. Permeabilidad media a alta (generalizada).
2. Cenozoico Superior volcánico (mioceno a reciente). Rocas volcánicas (lavas, brechas y tobas). principalmente basálticas y andesíticas. Permeabilidad media a alta (localizada).
3. Cenozoico, Mesozoico y Paleozoico intrusivo. Rocas intrusivas graníticas, granodioritas y doleritas. Permeabilidad baja (localizada).
4. Mesozoico, paleozoico y precámbrico. Rocas metamórficas: esquistos, cuarcitas y gneis. Permeabilidad baja (localizada).

5.2.8 Conductividad hidráulica

El área de estudio, conserva subáreas de acuerdo con las características del medio asociadas a la conductividad. De acuerdo con Campos-Gaytán (2014), los valores aproximados de la conductividad hidráulica para el AG oscilan entre 41 m/día en la parte norte del porvenir a 110 m/día para toda el área del cauce del arroyo incluyendo cuando pasa por el área de Calafia.

5.2.9 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con información piezométrica anual. Actualmente se tiene una red de pozos para el monitoreo de los niveles del agua subterránea. Para fines del balance de aguas subterráneas se consideró el periodo marzo 2009 a noviembre 2017, ya que tiene la mayor cantidad de información y se una buena distribución espacial.

En 2020 se realizaron mediciones in situ de conductividad eléctrica, pH y concentración de sólidos totales disueltos (STD), temperatura del agua, alcalinidad en distintos aprovechamientos distribuidos en toda la zona de explotación.

5.2.10 Censo de aprovechamientos e hidrometría

De acuerdo con los censos realizados como parte de estudios previos, complementados con el realizado en 2013 y la base de pozos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), se identificaron la existencia de 1,355 aprovechamientos del agua subterránea, 348 pozos y 983 norias y 24 manantiales, de los cuales 794 están activos y 561 están inactivos. De los aprovechamientos activos, 481 son para uso agrícola; 254 para uso público-urbano, 42 para uso pecuario, 10 para uso industrial y 7 para otros usos.

Según CONAGUA (2024), el volumen total estimado de extracción es de 21.7 hm³/año, de los cuales 13.1 hm³ /año (60.4 %) son utilizados en la agricultura (principalmente para el cultivo de uva que se utiliza en la elaboración de vinos), 7.5 hm³ /año (34.6%) para uso público-urbano, y 1.1 hm³ /año (5.0%) para otros usos.

5.2.11 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual (R) corresponde a la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como de recarga incidental. Para este caso, su valor es de 18.8 hm³ /año (CONAGUA, 2024).

5.2.12 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de 36.6 hm³ anuales, que reporta el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA), de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del 30 de diciembre de 2022.

6. Marco Teórico – metodológico

6.1 Marco metodológico general

Dentro de los materiales y métodos empleados, en el proceso de evaluación de la vulnerabilidad del Acuífero Guadalupe, se siguieron cuatro etapas generales para el desarrollo del proyecto. En la Figura 5, se expone el procedimiento general

seguido en esta investigación según las siguientes etapas. Este procedimiento permitió asegurar el cumplimiento de los objetivos de la tesis.

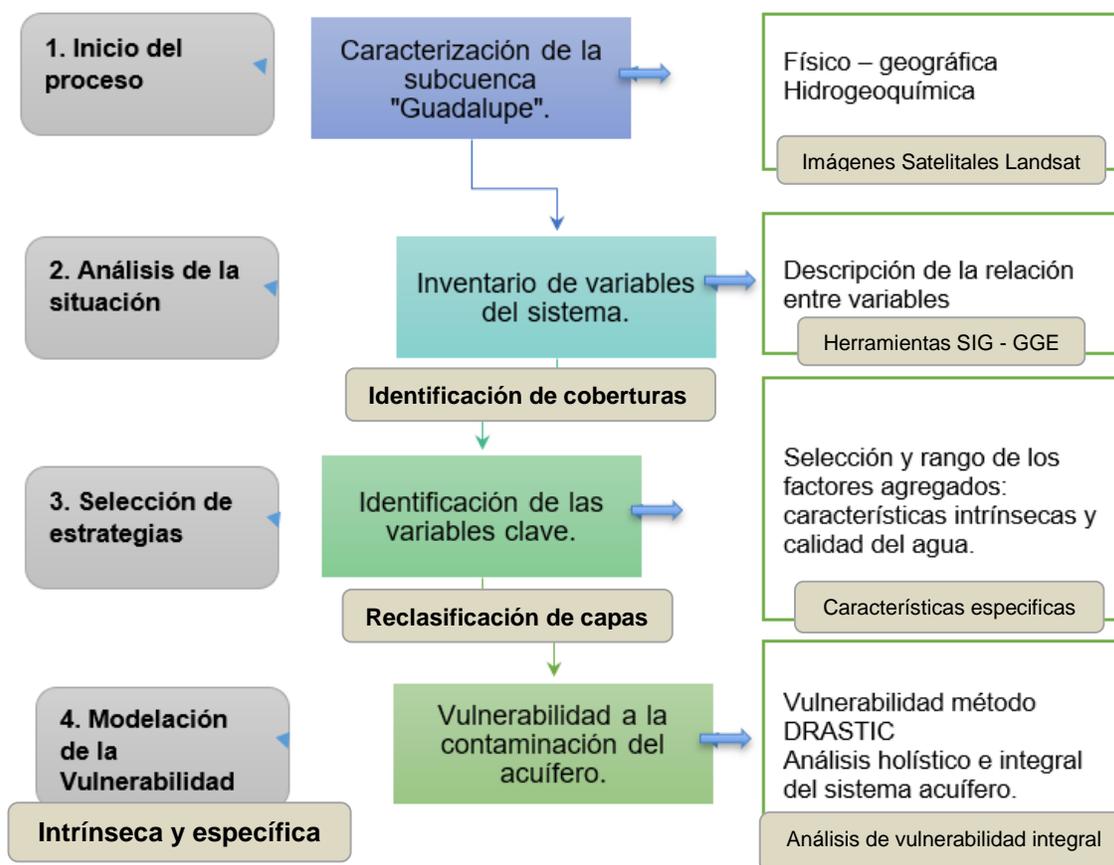


Figura 5. Procedimiento general para desarrollar la investigación.

6.2 Inicio del proceso: Caracterización de la subcuenca Guadalupe

Se elaboró la caracterización físico – geográfica de la subcuenca, considerando la localización, topografía, hidrología, geología, edafología, cobertura vegetal, flora y fauna, climatología y las características hidrogeoquímicas (nitratos).

Los datos e información para elaborar la caracterización se obtuvieron de instituciones oficiales, en tipo de formato alfanumérico o cartográfico. Se emplearon los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como herramienta integradora de la base de geodatos estandarizados, la cual se organizó por categorías temáticas en proyectos de SIG, haciendo uso del software ArcGIS 10.8. (Esri, 2024).

La delimitación de la subcuenca se realizó con la paquetería de ArcMap 10.8, empleando el modelo digital de elevación de 30 m del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM GL₁) en la plataforma de OpenTopography. Identificando el parteaguas y los puntos de salida de la subcuenca. Para la localización geográfica del área de estudio, se obtuvieron las capas vectoriales correspondientes a Baja California, del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). En la Tabla 2. se muestra el listado de datos de tipo ráster, vectoriales o alfanuméricos que se necesitaron para cumplir los objetivos descritos.

Tabla 2. Capas base de SIG para generar la caracterización físico-geográfica de la subcuenca.

Capa	Formato	Fuente	Procesos de SIG para estandarizar
División política estatal	Vectorial	Marco Geoestadístico (MG) Nacional del INEGI 2024.	Selección de los estados de la República Mexicana.
División política municipal	Vectorial	Capa de división política municipal del MG, 2024	Se disolvieron los límites municipales correspondientes a BC.
Modelo digital de elevación	Ráster	SRTM GL ₁ , en la plataforma OpenTopography (30 metros).	Recorte de la zona de estudio.
Sombreado del relieve	Ráster	Modelo numérico de altitud, (30 metros).	Sombreado para edición de mapas.

Localidades rurales	Vectorial	Marco Geoestadístico (MG) Nacional del INEGI.	Selección de localidades rurales de BC.
Localidades urbanas	Vectorial	Marco Geoestadístico (MG) Nacional del INEGI.	Selección de localidades urbanas de BC.
Cuencas	Vectorial	Cartografía temática del INEGI.	Recorte a la zona de estudio.
Subcuencas de la Región hidrológica 1 de Baja California.	Vectorial	SRTM GL ₁ , en la plataforma OpenTopography.	Delimitación en base a la acumulación, fluidez y salida del flujo superficial.
Escurrimientos	Vectorial	SRTM GL ₁ , en la plataforma OpenTopography.	Identificación del flujo superficial. Asignación de orden de corrientes.
Uso de suelo	Vectorial	Capa de uso de suelo del INEGI, serie VI.	Recorte de la zona de estudio.
Textura del suelo	Vectorial	Trabajo de campo, (2020 – 2022).	Recolección en campo de muestras de suelo, aleatorias a lo largo del acuífero.
Población	Tabular	Censo de población y vivienda del 2020 del INEGI.	Estructuración de la base de datos, espacialización y creación de capa vectorial.
Servicios de agua, sanitario y drenaje	Tabular	Censo de población y vivienda del 2015 del INEGI.	Estructuración de la base de datos, espacialización

		y creación de capa vectorial.
Grado de marginación	Tabular	Indicadores de marginación de CONAPO
Aprovechamientos	Tabular	Registro público de aguas (REPDA) de la CONAGUA. COTAS Daesslé et al, 2002.
Datos hidrogeoquímicos	Tabular	Daesslé et al, 2020. Trabajo de campo
		Trabajo de campo y laboratorio. Estructuración de la base de datos, modelación y creación de capa vectorial.

Para los datos climáticos se utilizaron las series temporales de las dos estaciones climatológicas de CONAGUA cercanas al área de estudio, las cuales son Agua Caliente y El Porvenir, las cuales se encuentran ubicadas dentro del área de estudio. empleando datos mensuales, estacionales y anuales de precipitación, de la temperatura media y evapotranspiración potencial. También se revisó información del sistema “Climate Computing Program” (CLICOM).

La información para caracterizar la cobertura vegetal en la subcuenca Guadalupe, se obtuvo de la serie VI del INEGI en 2017, más datos locales publicados (Andrade, 2019; Del Toro-Guerrero et al., 2018). Posteriormente se realiza esta caracterización actualizada al año 2021, con Google Earth Engine, para el AG.

La información de aprovechamientos subterráneos del acuífero Valle de Guadalupe, se obtuvo de COTAS (2018), se identificaron espacialmente aprovechamientos registrados en el Registro Público de Aguas (REPDA) de la CONAGUA, y actualización con datos de campo realizados dentro del proyecto IRADES.

Además, en todos los rubros considerados de la caracterización de la cuenca, se incluyó información que fue recabada durante los recorridos en trabajo de campo y de las pláticas con autoridades y ejidatarios de la zona de estudio.

6.3 Análisis de la situación

El procedimiento que siguió este trabajo para realizar el análisis estructural del método general, del sistema vulnerable se realizó con base en las tres fases propuestas por Godet (1994, 2000 y 2009) y Godet & Durance (2011):

1. Inventariado de las variables del sistema.
2. Descripción de la relación entre variables.
3. Identificación de las variables clave.

6.4 Inventario de las variables del sistema

Inicio con la identificación de las problemáticas, respecto a la temática de recursos hídricos, que aquejan al área de estudio. Para ello se realizó Investigación documental de gabinete (análisis de datos y estadísticas) y de campo, respecto a los usos del agua (agrícola y doméstico), por ejemplo, dentro del proyecto IRADES, se visitaron lugares que corresponden a zonas agrícolas, y donde se ubican los principales pozos para riego y consumo humano.

La estructura del inventario se diseñó considerando un análisis de causa raíz (Okes, 2009; McMahan, 2011). A partir de esta estructuración se obtuvo el listado de variables del sistema vulnerable del acuífero, que se muestran en la Tabla 3.

Unos de los requisitos preliminares a la evaluación de las relaciones entre variables dentro de un proceso de análisis estructural de sistemas, es ofrecer una definición

de las variables para que el concepto entre los lectores sea homogéneo dentro del sistema específico que se está evaluando.

Tabla 3. Listado de variables.

Variables	
1	Profundidad del agua subterránea
2	Recarga Neta
3	Litología del acuífero
4	Tipo de suelo
5	Topografía
6	Naturaleza de la zona no saturada
7	Conductividad hidráulica del acuífero
8	Cobertura del suelo
9	Calidad del agua (nitratos)

6.5 Descripción de la relación entre variables

Esta etapa se realizó con el software MICMAC (Matriz de Impactos Cruzados, Multiplicación Aplicada a una Clasificación). Donde el primer paso es evaluar la relación entre variables, con el apoyo de expertos en el tema, con el objetivo de identificar componentes en el proceso. Eduardo-Cevallos et al., (2015) hicieron uso del análisis estructural; mediante la conformación y opinión de expertos en el tema, para identificar un conjunto de 81 variables del sistema, la lista se redujo a solo 16 variables tras la aplicación de una encuesta y opinión de actores de interés locales, estas variables fueron empleadas en el análisis estructural mediante MICMAC, donde los resultados fueron categorizados según umbrales, donde destacaron variables determinantes (altamente influyentes pero no dependientes) las cuales tienen una influencia en el tiempo y destacaron que son útiles para la planeación a largo plazo. Sus variables objetivo (altamente influyentes y dependientes) las cuales permiten la planeación a corto y mediano plazo. Y sus variables resultado (poco

influyentes, pero altamente dependientes), estas últimas pueden servir como indicadores que expresen el resultado de las acciones tomadas en las variables previas.

Se evaluó la relación entre variables del sistema acuífero, a través de una matriz de análisis estructural propuesta por (Godet y Durance, 2011). Este método busca identificar cuáles son las variables más importantes y determinantes del sistema. Donde las filas y columnas enlistan las variables, ejecutando una evaluación por pares, idealizando en cada caso si un cambio en la primera variable (fila), implicaría de forma directa que cambiara la segunda variable (columna).

Con base en la propuesta de Godet (1994) para el llenado de la matriz de análisis estructural, si la respuesta era afirmativa se colocaba el número uno en la celda correspondiente. En cambio, si la respuesta era negativa, entonces se calificaba con cero, dicha relación.

Este paso destaca la existencia de la relación de influencia directa entre variables, sin embargo, no especifica la magnitud de la relación. El resultado fue la obtención de la Matriz de influencia directa (MID).

6.6 Identificación de las variables clave.

Las variables clave son aquellas que permiten reducir la complejidad del sistema ante un amplio número de variables involucradas, pero teniendo una estructura que permita analizar la dinámica del sistema acuífero. Para Godet (1994) las variables clave son aquellas que son más influyentes sobre el sistema y aquellas que son más dependientes de la dinámica de este.

Una vez teniendo las variables, el siguiente paso es crear un indicador (o índice). La finalidad de obtener indicadores es obtener una valoración cuantitativa o cualitativa del tema que representa la variable y darle un contexto espacial sobre la subcuenca.

De esta forma facilita evaluar de forma integral el análisis de la situación de la cuenca, al conocer el comportamiento y su distribución. con base a la selección de estrategias para identificar la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero.

Es importante mencionar que, para la selección final de indicadores, se buscó que éstos cumplieran una serie de criterios para asegurar su aplicación práctica como:

- Disponibilidad de datos
- Validez y precisión
- Escala espacial y temporal
- Fiabilidad
- Interpretación útil

6.7 Marco metodológico del modelo hidrogeomático

Para desarrollar el modelo hidrogeomático de la subcuenca, con los indicadores sistémicos que la conforman, se trabajó aplicando el método de cascada para la elaboración de sistemas de gestión, mismo que ha sido implementado con éxito por varios autores para el desarrollo de aplicaciones hidrogeomáticas (ESRI, 2007; Franco, 2008; Manzano, 2007; Manzano et al., 2010; Manzano y Franco, 2009; Miranda y solares, 2009).

Dicho método consiste en cinco pasos: (a) Análisis de requerimientos, (b) Diseño conceptual, (c) Diseño lógico, (d) Diseño físico y (e) Realimentación.

- Análisis de requerimientos: en esta etapa se identificaron los requerimientos para la caracterización sistémica del acuífero, es decir las especificaciones de los datos de entrada para el modelo.
- Diseño conceptual: se documentó cada uno de los indicadores en cuanto a los conceptos y variables que involucran, así como su expresión conceptual y matemática
- Diseño lógico: en el diseño lógico se prepararon los datos que requieren los indicadores, se generaron diagramas de flujo con operaciones espaciales y tabulares para obtener los indicadores en un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

- Diseño físico: Implementación de los indicadores y álgebra de mapas en ambiente de Sistemas de Información Geográfica.

6.8 Modelación de la vulnerabilidad: Método DRASTIC

Para esta etapa se estimaron sitios propensos de vulnerabilidad, implementando el método DRASTIC, el cual es un modelo empírico desarrollado por Aller et al., (1987) para la Environmental Protection Agency, EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos), este método es de los más populares y se ha aplicado en algunos casos de estudio en México y en otros países de Latinoamérica y el mundo (Pérez, Pacheco, 2004), (Jia et al., 2019), (Mfonka et al., 2018), (Prashant Kumar, 2020), (Parizi et al., 2019), (Nadiri et al., 2018), (Bhuvaneshwaran & Ganesh, 2019), (Barzegar et al., 2020).

Se consideró este método como el más adecuado en cuanto a las variables e indicadores físicos que toma en cuenta para una modelación de zonas vulnerables a la contaminación en un acuífero, por ser uno de los métodos mejor considera las características asociadas al sistema integral del funcionamiento acuífero.

La elaboración de un mapa de vulnerabilidad implica integrar varios mapas temáticos, correspondientes a los diferentes factores hidrogeológicos elegidos para la evaluación. Los cambios en el sistema acuífero hacen que el mapa de vulnerabilidad no sea estático, sino que deba ser actualizado con el paso del tiempo (Foster et al., 1991).

El método DRASTIC permite evaluar el potencial relativo de contaminación del agua subterránea de forma vertical y determina la susceptibilidad a la que esta propenso el acuífero a la acción de una carga contaminante permanente, este modelo no fue diseñado para reemplazar las inspecciones en el sitio (Aller et al., 1987), si no para complementarlas.

Dicha metodología toma en cuenta 7 parámetros que son: la profundidad del agua subterránea, recarga neta (variación de nivel), litología y estructura del medio

acuífero, tipo de suelo, topografía, naturaleza de la zona no saturada y la conductividad hidráulica del acuífero (Figura 6).

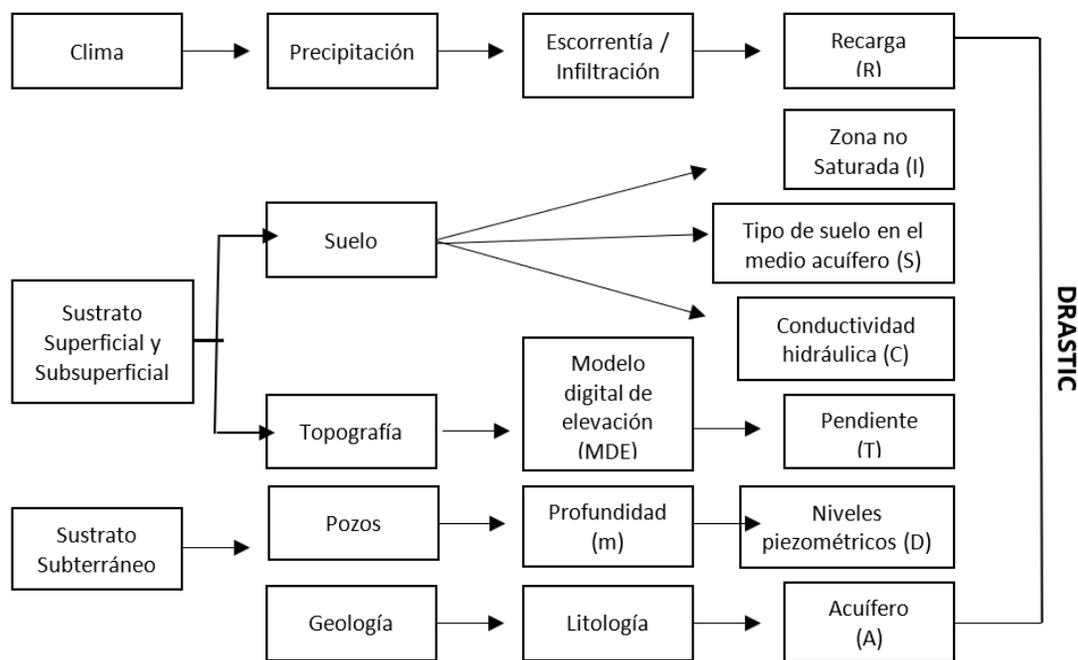


Figura 6. Variables de evaluación del método DRASTIC (Aller et al., 1987).

Algunos parámetros no se consideran estacionarios, ya que varían con el tiempo como es el caso de la profundidad del nivel estático, la recarga neta, como el tipo de acuífero y la zona vadosa; que dependen de la velocidad con la que evoluciona el nivel estático (Ramos, 2007).

Como primer paso, a cada factor se le asigna un peso relativo (W), que es la ponderación de su influencia dentro de la evaluación de vulnerabilidad, varía de 1 (menos significativo) a 5 (más significativo) (Tabla 4).

Posteriormente cada factor se clasifica con las características del acuífero (R) y se asigna un rango de acuerdo con el impacto que tiene en el potencial de contaminación entre 1 y 10 (Tablas 5 a 11), siendo el 10 el potencial de contaminación más alto y 1 el potencial de contaminación más bajo.

Tabla 4. Pesos asignados a los parámetros del método DRASTIC

Parámetro	Peso para índice general (<i>W</i>)
(D) Profundidad del agua subterránea	5
(R) Recarga neta	4
(A) Litología del acuífero	3
(S) Tipo de suelo	2
(T) Topografía	1
(I) Naturaleza de la zona no saturada	5
(C) Conductividad hidráulica del acuífero	3

Con esta asignación de valores se obtiene el índice de vulnerabilidad DRASTIC (*DVI*), obteniendo un valor numérico aplicando la siguiente ecuación (1).

$$DVI = \sum_{j=1}^7 (W_j \times R_j)$$

Donde *DVI*, es el índice DRASTIC, *W* indica factor de ponderación del peso y *R_j* indica factor de clasificación o valoración para la zona en cuestión.

La profundidad del agua subterránea (*D*) modula el espesor de la zona no saturada que es atravesado por las aguas de infiltración y que pueden traer consigo el contaminante, hasta alcanzar el acuífero (Tabla 5).

Tabla 5. Valoración del parámetro de profundidad para el método DRASTIC.

D (Profundidad m)	Valoración D_r
0 – 1.5	10
1.5 – 4.6	9
4.6 – 9.1	7
9.1 – 15.2	5
15.2 – 22.9	3
22.9 – 30.5	2
> 30.5	1

La recarga neta (R; variación de nivel) es la cantidad de agua temporal por unidad de superficie que contribuye a la alimentación del acuífero. La recarga resulta principalmente de la fracción de precipitación que no se pierde por evapotranspiración y escurrimiento superficial y se considera el principal vehículo transportador de los contaminantes (Tabla 6).

Tabla 6. Valoración del parámetro recarga.

R (Recarga mm)	Valoración R_r
0 - 50	1
50 - 103	3
103 - 178	6
178 - 254	8
> 254	9

Litología y estructura del medio acuífero, representa las características del acuífero, en particular la capacidad del medio poroso y/o fracturado para transmitir los contaminantes (Tabla 7).

Tabla 7. Valoración de Litología para el método DRASTIC.

A (Litología del acuífero)	Valoración Ar	Valor Típico Ar
Lutita masiva	1 - 3	2
Metamórfica/Ígnea	2 - 5	3
Metamórfica/Ígnea meteorizada	3 - 5	4
Arenas y gravas de origen glacial	4 - 6	5
Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	5 - 9	6
Arenisca masiva	4 - 9	6
Caliza masiva	4 - 9	6
Arena o grava	4 - 9	8
Basaltos	2 - 10	9
Caliza kárstica	9 - 10	10

El tipo de suelo representa la capacidad de los suelos para oponerse a la movilización de los contaminantes y corresponde a la parte de la zona vadosa o no saturada, que se caracteriza por la actividad biológica. En conjunto, con el parámetro A, determinan la cantidad de agua de percolación que alcanza la superficie freática (Tabla 8).

Tabla 8. Valoración de tipo de suelo para el método DRASTIC.

S (Tipo de suelo)	Valoración S_r
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Agregado arcilloso o compactado	7
Arenisca margosa	6
Marga	5
Limo margoso	4
Arcilla margosa	3
Estiércol-cieno	2
Arcilla no compactada y no agregada	1

La topografía representa la pendiente de la superficie del terreno e influye en la evacuación de aguas con contaminantes por escorrentía superficial y subsuperficial (Tabla 9).

Tabla 9. Valoración de pendiente para el método DRASTIC.

T (Pendiente %)	Valoración T_r
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
> 18	1

La naturaleza de la zona no saturada representa la capacidad del suelo para obstaculizar el transporte vertical (Tabla 10).

Tabla 10. Valoración de naturaleza de la zona no saturada para el método DRASTIC.

I (Naturaleza de la zona no saturada)	Valoración	Valor típico
	I_r	I_r
Capa confinante	1	1
Cieno-arcilla	2-6	3
Lutita	2-5	3
Caliza	2-7	6
Arenisca	4-8	6
Secuencias de arenisca, caliza y lutita	4-8	6
Arena o grava con contenido de cieno y arcilla significativo	4-8	6
Metamórfica/Ígnea	2-8	4
Grava y arena	6-9	8
Basalto	2-10	9
Caliza kárstica	8-10	10

La conductividad hidráulica del acuífero determina la cantidad de agua que atraviesa el acuífero por unidad de tiempo y por unidad de sección, es decir la velocidad (Tabla 11).

Tabla 11. Valoración de conductividad hidráulica para el método DRASTIC.

C (Conductividad hidráulica)		Valoración C_r
(m/día)	(cm/s)	
0.04 – 4.08	$4.6 \cdot 10^{-5} - 4.7 \cdot 10^{-3}$	1
4.08 – 12.22	$4.7 \cdot 10^{-3} - 1.4 \cdot 10^{-2}$	2
12.22 – 28.55	$1.4 \cdot 10^{-2} - 3.4 \cdot 10^{-2}$	3
28.55 – 40.75	$3.4 \cdot 10^{-5} - 4.7 \cdot 10^{-2}$	6
40.75 – 81.49	$4.7 \cdot 10^{-2} - 9.5 \cdot 10^{-2}$	8

> 81.49	> 9.5_10 ⁻²	10
---------	------------------------	----

Finalmente, los resultados de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero pueden variar de entre 23 (mínima) a 230 (máxima) de acuerdo al método, Tabla 12.

Tabla 12. Rangos de variación del DVI.

Grado vulnerabilidad	Valor DRASTIC
Muy bajo	23-64
Bajo	64-105
Moderado	105-146
Alto	146-187
Muy alto	187-230

Una vez asignando los valores a cada parámetro se realiza el análisis geoestadístico, utilizando el software ArcGIS 10.8 con los procesos de reclasificación, interpolación y álgebra de mapas.

7. Integración de zonas de vulnerabilidad específica

Se delimitan sitios vulnerables a la contaminación específica del acuífero, mediante la modelación espacial y geoestadística de zonas de vulnerabilidad baja, media, alta y muy alta, en respuesta de los indicadores integradores, considerando datos físicos, e hidrogeoquímicos (resultados DRASTIC), y se integró con las diferentes coberturas de suelo identificadas en la zona de estudio como; suelo desnudo, desprovisto de vegetación, vegetación natural, pastizal, urbano/cuerpos de agua, matorral, agricultura y vegetación urbana, mediante la sobreposición espacial de capas a nivel de pixel (30 x 30 m), mediante el álgebra de mapas, posteriormente se reclasificaron los resultados, para categorizar desde baja hasta muy alta a las zonas de vulnerabilidad específica (Figura 7).

Se realizó, el análisis espacial de las zonas vulnerables del acuífero a la contaminación integral de los resultados, y se relaciona espacialmente con la concentración de nitratos como elemento de calidad del agua y con la cobertura del suelo. Los cuales podrían servir como herramienta para propuestas de planes de manejo, con miras a la sostenibilidad del agua subterránea en la zona.

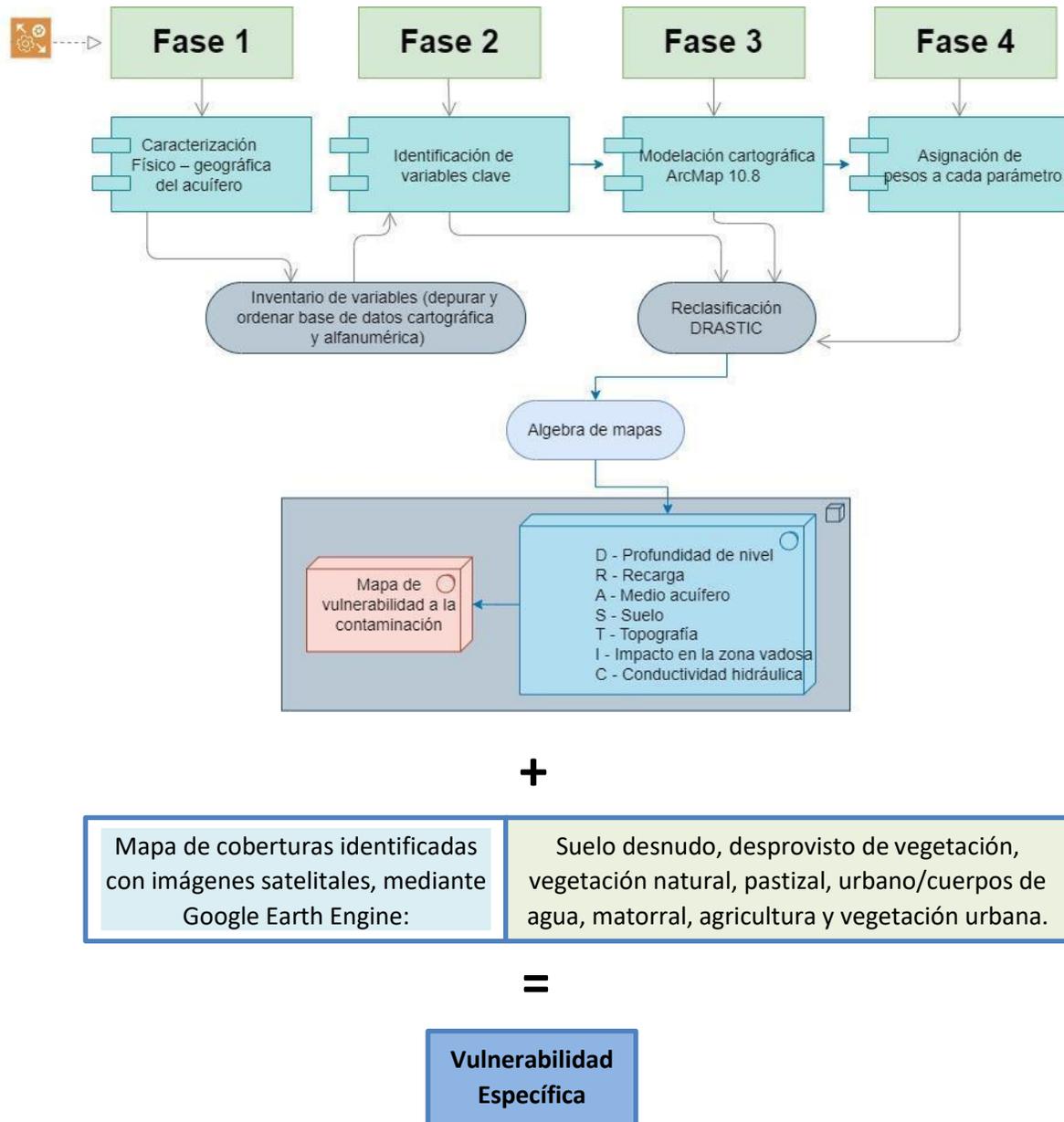


Figura 7. Esquema metodológico para la estimación de zonas vulnerables integrales a la contaminación de un acuífero.

7.1 Ponderación de capas

Para la vulnerabilidad específica se recategorizó desde muy baja a muy alta vulnerabilidad (se consideraron 4 clases por resultados DRASTIC), siguiendo la lógica de la vulnerabilidad intrínseca, siendo 1 baja y 4 muy alta, como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Pesos asignados de acuerdo a la categoría de vulnerabilidad

Categoría	Pesos Vulnerabilidad
Baja	1
Moderada	2
Alta	3
Muy Alta	4

Una vez identificadas las coberturas del suelo, se asigna un peso que va del 1 al 4 de acuerdo a su nivel de exposición, en la zona de estudio como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14. Pesos por tipo de cobertura

Indicador para vulnerabilidad específica por cobertura		
Coberturas	Nivel de exposición	Peso
1 SD SUELO DESNUDO	Alta	3
2 DV DESPROVISTO DE VEGETACION	Moderada	2
3 VN VEGETACIÓN NATURAL	Baja	1
4 PZ PASTIZAL	Baja	1
5 UR URBANO	Alta	3
6 MA MATORRAL	Baja	1
7 AG AGRICULTURA	Muy Alta	4
8 VU VEGETACIÓN URBANA	Moderada	2
9 CA CUERPOS DE AGUA	Alta	3

De acuerdo a la valoración del método DRASTIC, se le asigna un peso (1 al 4), por tipo de categoría resultante, dependiendo del escenario analizado húmedo o seco como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15. Peso asignado por categoría en el escenario húmedo y seco.

Vulnerabilidad Intrínseca			Vulnerabilidad Intrínseca		
DRASTIC WET	Exposición natural	Peso	DRASTIC DRY	Exposición natural	Peso
Mínimo resultante	Baja	1	Mínimo resultante	Baja	1
	Moderada	2		Moderada	2
	Alta	3		Alta	3
Máximo resultante	Muy Alta	4	Máximo resultante	Muy Alta	4

Para identificar zonas específicas de atención al tipo de vulnerabilidad, se identifican y analizan los sitios con baja o alta concentración de nitratos de acuerdo a los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1-2021 de los años 2020 y 2021 y se asigna un peso de acuerdo a su concentración (Tabla 16).

Tabla 16. Pesos asignados de acuerdo a la concentración de nitratos.

Concentración de Nitratos			
Min	Max	Nivel de concentración	peso
Rangos mínimos		Baja	1
		Moderada	2
		Alta	3
Rangos máximos		Muy Alta	4

7.2 Vulnerabilidad específica

Para definir la vulnerabilidad específica se suman las capas ráster categorizadas (1 al 4), del tipo de cobertura del suelo en la zona de estudio, más la capa ráster de los resultados DRASTIC, representando la vulnerabilidad intrínseca (Figura 8), y finalmente se recategoriza de baja a muy alta vulnerabilidad específica (Tabla 17).

Tabla 17. Obtención y categorías de la vulnerabilidad específica.

Vulnerabilidad Específica	Intrínseca + Coberturas del suelo	Reclasificación
Baja	0 - 2	1
Moderada	3 - 4	2
Alta	5 - 6	3
Muy Alta	7 - 8	4

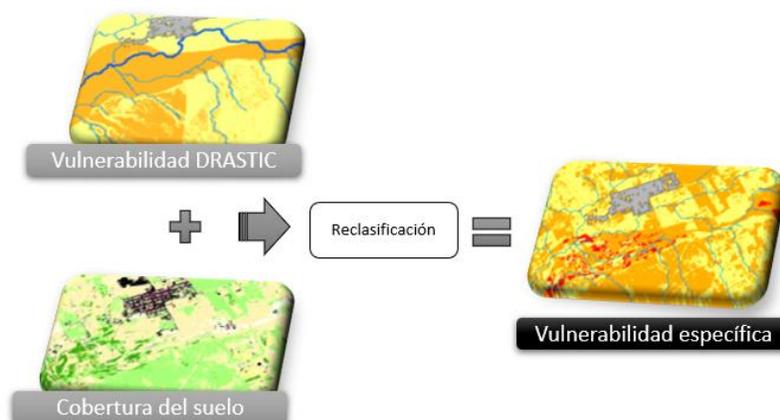


Figura 8. Procedimiento de álgebra de mapas para la vulnerabilidad específica.

8. StoryMaps como herramienta de divulgación científica.

Los StoryMaps son una valiosa herramienta para la divulgación científica, debido a su capacidad para combinar datos geoespaciales, visualizaciones interactivas y narrativas, aptas para cualquier tipo de usuario, o lector final (ESRI, 2020).

La visualización interactiva, puede incluir mapas dinámicos, que permiten a los usuarios explorar datos geográficos en un formato visual atractivo y fácil de entender. Los mapas interactivos pueden mostrar diferentes zonas de

vulnerabilidad, fuentes de contaminación y características hidrogeológicas, dependiendo de las capas de información disponibles.

La accesibilidad es eficaz y las narrativas claras ya que los StoryMaps utilizan texto simple y explicaciones claras para guiar a los usuarios a través de los datos, haciéndolos accesibles para personas con o sin formación científica. Incluyen diversidad de archivos multimedia, imágenes, videos y gráficos, los cuales facilita la comprensión de conceptos complejos y mantiene el interés del público (Haklay & Weber 2008). Proporcionan información educativa y de concientización a los principales actores o tomadores de decisiones, sobre temas relevantes que atañen a un sitio de estudio.

Además, permiten que los usuarios participen dinámicamente con las herramientas interactivas que se ponen a disposición con información complementaria, lo que fomenta un aprendizaje activo. Pueden incluir encuestas o formularios de comentarios, permitiendo a los usuarios contribuir con observaciones y preocupaciones, mejorando la participación comunitaria.

Los StoryMaps conllevan a una comunicación efectiva de resultados científicos, es decir, ayudan a traducir datos complejos en información fácilmente comprensible a cualquier público con el fin de divulgación efectiva.

Así es como esta herramienta, podría fomentar resultados de deserción del conocimiento y aplicación en acciones para problemáticas actuales, como planes de gestión, estrategias de mitigación de riesgos, o aplicación específica en proyectos educativos. En la Figura 9. se muestran los principales pasos y contenido indispensable para realizar un StoryMaps.

04/04/2024

Empecemos con un título llamativo

¿CÓMO REALIZAR UN STORY MAPS?

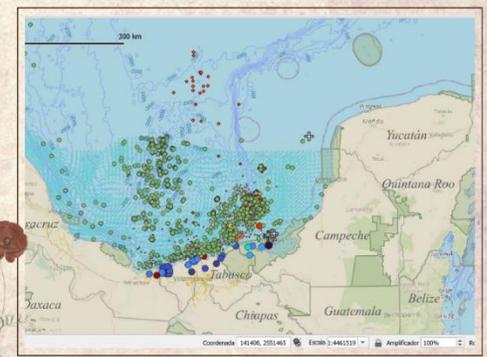


Plantilla temática acorde al tema presentado.

1. TEMA PRINCIPAL

Es una de las partes indispensables, aquí debes incluir el tipo de proyecto que expones, ¿A que lectores está dirigido? ¿Cuáles son tus objetivos?

Uso de Multimedia



2. FOCO DE LA HISTORIA

Es importante tener una lógica secuencial para contar un proyecto en forma de historia, involucrando todas las partes indispensables, es decir; agregar, resumen, palabras clave, descripción de la metodología, resultados y conclusiones.






Crear un listado con ideas principales y como representarlas (tipo de información de entrada y salida) .

(Investigación, escrito, edición)

3. RESULTADOS

- ¿Qué significan los datos?
- Agregar ejemplos que soporten las ideas.
- ...





4. CONCLUSIONES

¿Qué aportó nuestra investigación?
 ¿Análisis espacial? ¿Qué otras investigaciones involucra?
 Generar interés en los lectores
 Difundir en redes sociales (link).

5- Información adicional

Agregar información adicional: citas de referentes, publicaciones, información de contacto, entidades que colaboraron en la investigación, link dónde ampliar la información presentada.

Elaborado por: Guadalupe Díaz Gutiérrez



Figura 9. Pasos para la elaboración de un StoryMaps

9. Dinámica espacio - temporal de la cobertura de suelo en el Valle de Guadalupe; aplicación de la geointeligencia computacional, mediante sensores remotos.

Resumen

El desarrollo poblacional acelerado y las actividades socioeconómicas; provocan la intensificación de zonas productivas agrícolas en el Valle de Guadalupe, Ensenada, México. Al no contar con información de datos y cartografía actualizada, es necesario representar geoespacialmente estos cambios en el tiempo; además de predecir sus probabilidades de persistencia hacia el futuro permitiendo tomar mejores decisiones. Para obtener los usos de suelo en dos años (1984 y 2020); mediante Google Earth Engine se procesaron imágenes satelitales Landsat y tomando como clasificador a Random Forest. Se integraron como variables de apoyo a los índices espectrales, RGB, fisiográficas, variables de UNMIX (separabilidad espectral), la SNIC (segmentación) y el OBIA (Análisis de Objetos). Para cuantificar y caracterizar los cambios, persistencias y probabilidades se ejecutaron las herramientas de Land change model (LCM) en Terrset™. Se obtuvo que la cobertura agrícola hacia el año de 2020 ganó un 7.3 % y la zona urbana se incrementó un 2.1 % en comparación con 1984. Se identifica que la permanencia agrícola se ha consolidado e incrementado en el tiempo. Los principales patrones de cambio en los tipos de cobertura del suelo se dieron de perder importantes áreas de matorral y pastizal a ser nuevas áreas de uso agrícola, para la actividad vitivinícola de suma importancia económica en la región. La importancia de identificar la dinámica de cambios en la cobertura del suelo, es indispensable para analizar patrones espaciales, que pueden afectar a la dinámica ecosistémica. Este tipo de análisis ayudan a la gestión eficiente de los recursos naturales y del territorio. Se recomienda continuar con este tipo de estudios, para tener información actualizada de la cobertura del suelo, como herramienta para la toma de decisiones.

Palabras clave: Cobertura del suelo, Google Earth Engine, Análisis geoespacial, Sistemas de Información Geográfica, Sensores Remotos, Geoestadística.

9.1 Introducción

Desde que se inició la exploración espacial; el ser humano ha desarrollado una alta gama de tecnologías en sensores remotos que permiten la representación y captura de información de la superficie del espacio geográfico. La era espacial comenzó en 1946, la Unión soviética, lanzó el primer satélite artificial (Sputnik), el 4 de octubre de 1957, a partir de ahí se existió mayor investigación en el tema y se desarrollaron satélites de observación y satélites de comunicaciones (Smith, (2022).

Prueba de esto es la constelación de satélites artificiales que tiene el planeta orbitando con diferentes fines (Charca, 2011), ya sea, para monitoreo y observación de superficies terrestres (SPOT, TERRA, misiones Landsat, COPERNICUS, Galileo, entre otras), acuáticas (AQUA, MODIS, etc.), monitoreo del estado de la atmósfera y de eventos climatológicos o ambientales (ENVISAT, GOES, entre otros) (Mashala et al., 2023).

Esta gama de plataformas satelitales cuenta con sensores que permiten la obtención de información de la superficie terrestre a nivel multitemporal y a diferente escala geoespacial; lo que permite que los analistas en ciencias de la tierra puedan monitorear el estado de una superficie en determinado año, históricamente, así como información actual; incluso monitorear fenómenos en tiempo real (ESA, 2023).

A partir de estas misiones satelitales es posible generar estudios del monitoreo de la superficie terrestre, el espacio geográfico y específicamente del territorio; en donde, la relevancia recae en analizar el estado de las coberturas, naturales y antrópicas; coincidiendo con Aquino en la importancia de monitorear los cambios históricos que se han dado en el tiempo (Aquino, 2016)

Lo consecuente de este tipo de análisis; es que, a partir del análisis de la dinámica espacio – temporal del territorio es posible determinar los eventos que influyen sobre un cambio de cobertura a otra; determinar si los factores antrópicos son influyentes en este tipo de cambios y ayudar a los tomadores de decisiones a desarrollar planes de manejo del territorio (Gonzales, 2016).

Según Qu, Chen, Li, y Wang (2021), se han realizado mejoras en la precisión de la clasificación de uso y cobertura del suelo basada en píxeles y objetos utilizando conjuntos de datos auxiliares de Google Earth Engine (GGE).

Jansen & Turner (2019) mencionan que el desarrollo de tecnologías de percepción remota y las tendencias geoespaciales en los estudios de la dinámica del cambio y estado del territorio se han convertido en la herramienta esencial para el monitoreo terrestre; aportando así el conocimiento, las bases y las referencias necesarias para que las nuevas generaciones cuenten con el antecedente del monitoreo y análisis geoespacial para el análisis vinculado a la vulnerabilidad de los recursos naturales, específicamente en los recursos hídricos superficiales y sus consecuencias en los subterráneos.

9.2 Antecedentes

Con el desarrollo de las nuevas tecnologías en ramas de ciencias de la tierra y geoespaciales; empleando sistemas de información geográfica (SIG) y la percepción remota (RS, por sus siglas en inglés) a través de imágenes satelitales; diversos investigadores han realizado trabajos en los cuales generan cartografía de los usos de suelo y los procesos evolutivos que estos han tenido a lo largo del tiempo (Dávila et.al, 2021)

Existen trabajos de investigación donde muestran la contribución al análisis de cambio de uso de suelo y vegetación (1978 – 2000) en la península de Baja California, México. Con el uso de sistemas de información geográfica (SIG), elaboraron matriz de transición y agruparon cambios encontrados en tres procesos principales: pérdida de biomasa, recuperación y crecimiento de manchas urbanas. Concluyendo que en 22 años del periodo analizado se dan cambios en el 7.7 % del territorio peninsular. Rosete y colaboradores (2009), analizaron que la desmatorralización se debe principalmente a actividades agropecuarias.

Barradas (2010), analizó los cambios en la cobertura del suelo, demanda y variaciones climáticas dentro de la región de 1950 a 2006, así como las consecuencias hidrológicas. Tomando en cuenta los cambios antropogénicos

ocurridos en la zona de estudios, como un indicador en la demanda del recurso hídrico, y cambios en cobertura agrícola, encontrando durante este periodo temporal, un aumento en la demanda urbana de 2.07 a 27.81 hm³/año. Por otro lado, también se observa un aumento en la superficie agrícola en los primeros años y después una disminución donde se reflejan las variaciones climáticas y consecuencias de la sobreexplotación del recurso hídrico subterráneo.

Derivado de la evaluación del desempeño ambiental a lo largo del tiempo, se identificó la información del programa de Ordenamiento Ecológico Participativo del municipio de Ensenada (SEMARNAT, 2023) donde en la etapa de pronóstico, se analizan los conflictos ambientales por medio de la predicción del comportamiento de las variables naturales, sociales y económicas que intervienen en el cambio de uso y ocupación del territorio. Destaca la actividad de los sectores; agropecuario, urbano, turístico, industrial, forestal y de conservación. Estos procesos territoriales y sus procesos sobre los usos del suelo, evidencian el crecimiento demográfico, la demanda de infraestructura y servicios públicos, el deterioro de los servicios ecosistémicos y los conflictos ambientales. Este análisis de pronóstico, contempla el análisis de los escenarios tendencial, contextual y estratégico a partir de las condiciones actuales y futuras de los usos de suelo, la aptitud y los conflictos ambientales. Para analizar estos cambios territoriales, se emplearon las capas de uso del suelo (USyV) de la serie III y serie VII, publicadas por INEGI en el año 2006 y 2021 respectivamente. La superficie que más perdió cobertura espacial en el terreno, fue el chaparral (25, 029 ha) y matorral (2, 828 ha), dando pie a ganar área de cobertura el pastizal (15,017 ha). La cobertura urbana también aumentó, pero moderadamente, y finalmente la superficie agrícola aumentó poco (208 ha), pero es la que mantuvo el equilibrio entre pérdida y ganancia de superficie.

9.3 Justificación

Coincidiendo con lo que menciona la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), en la cumbre mundial sobre la alimentación; se enmarca que la presión y explotación excesiva y no regulada de los recursos naturales aunado al cambio climático han provocado que

en la actualidad los medios de **producción agrícola sean más intensivos** para satisfacer las necesidades alimenticias del ser humano; así como, la generación de materia prima para la producción y el procesamiento industrial. Esta demanda, intensifica la producción agrícola, gana área en la cobertura del suelo, perdiendo áreas de cobertura natural.

Por otro lado, es importante conocer la extensión de las diferentes coberturas de suelo; cuantificar su tasa de crecimiento exponencialmente, o su pérdida en zonas anteriores. Las zonas agrícolas que cuentan con un alto grado de rendimiento y de producción, repercuten en económicas del territorio, otras coberturas como pastizales y matorrales naturales también se pueden ver afectados, generando nuevas problemáticas ecosistémicas (Leija et.al., 2020).

Por lo anterior es necesario y de vital importancia identificar la dinámica de los procesos de cambio de uso de suelo en series temporales; con esto es posible analizar los cambios de pérdidas, ganancias, tendencias y predicciones a futuro que se dan o se puedan dar en el territorio y estimar las zonas de conflicto hídrico; así como, determinar el área de cambio y sobre qué coberturas están siendo afectadas o desplazadas en los diferentes periodos de tiempo. Con esto se puede identificar geoespacial y cartográficamente las zonas de interés y servir como una potente herramienta a los tomadores de decisiones para la gestión del territorio y problemas hídricos en la zona como la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero.

9.4 Problemática

No existen estudios actualizados que permitan determinar la dinámica espacial y temporal del uso de suelo en el Valle de Guadalupe, por lo que se desconocen las dimensiones de los cambios cuantitativos y cualitativos ocurridos en el uso de suelo agrícola, urbano, vegetación natural, suelo desnudo, o vegetación riparia; los cuales son factores asociados al uso de los recursos naturales del territorio (disponibilidad y calidad del agua, degradación del suelo, cambios urbanos, entre otros).

9.5 Materiales y métodos

9.5.1 Localización del área de estudio.

La zona de estudio corresponde al Valle de Guadalupe (VG), se ubica en el municipio de Ensenada, Baja California al norte del país (Figura 1). Es un valle Intermontano con un área total de 9,493 hectáreas, con los principales usos de suelo y vegetación en el valle, son agropecuario, matorral, pastizal y asentamientos humanos. Existe la agricultura, temporal y de riego, que se ha intensificado en las últimas décadas (INEGI, 2021). Cuenta con una población total de 9,810 habitantes (ITER, 2020), la mayoría concentrados en su dos principales centros de población que son Francisco Zarco (4334 habitantes, 45 %), El Porvenir (1806 habitantes, 18 %) y otros distribuidos (3670 habitantes, 37 %). Destacando por su actividad vitivinícola, la cual genera una fuente económica importante en la región.

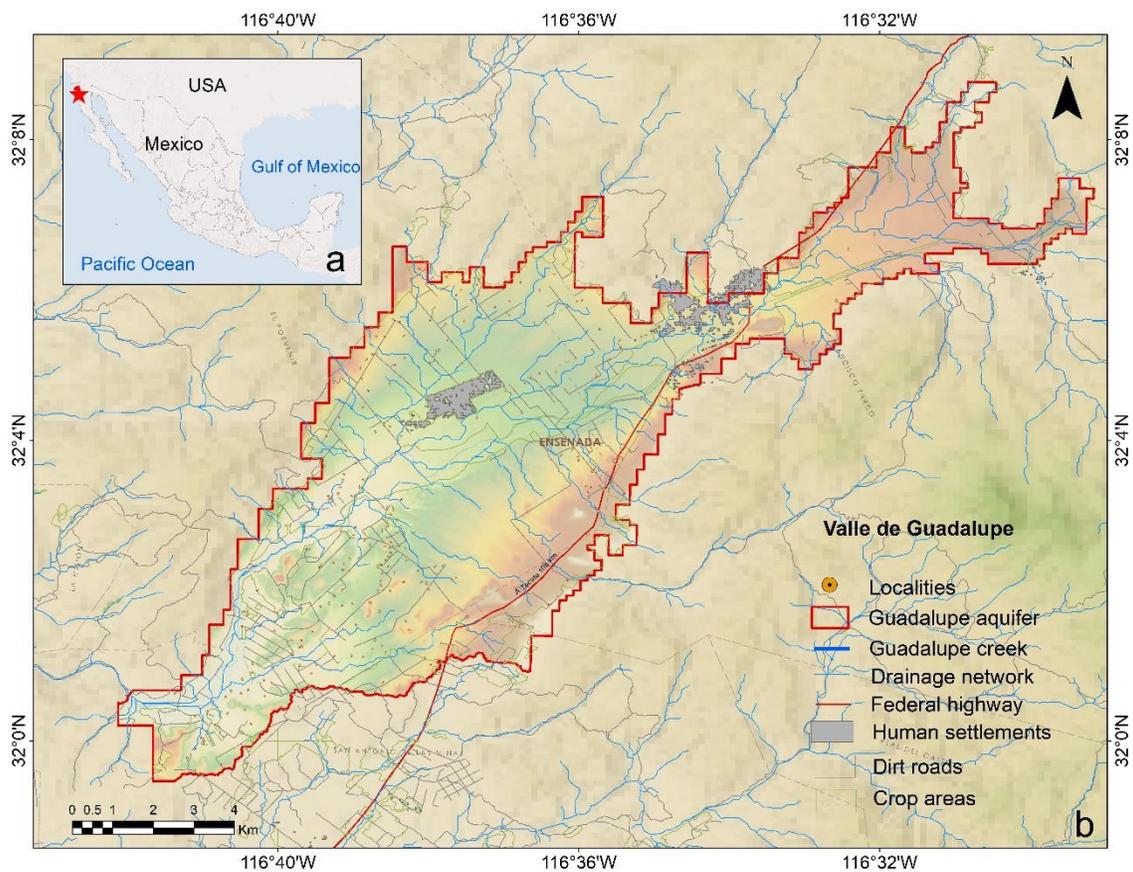


Figura 1. Localización del área de estudio

9.6 Obtención de la información

Para la generación de los procesos, se emplearon como insumos principales las imágenes satelitales alojadas el catálogo de datos de la plataforma de Google Earth Engine; visualizando y analizando imágenes Landsat TM, ETM+y OLI/TIRS (Developers, 2022).

Para la generación de los procesos se emplean como insumos principales las imágenes satelitales del catálogo de datos de la plataforma de Google Earth Engine™ (GEE), en cooperación por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés), entre otros; esta es una plataforma petabyte geomática que se basa en la nube permitiendo a los diferentes usuarios analizar y visualizar imágenes de las diversas plataformas satelitales como lo son Sentinel, MODIS, Terra, Aqua, y Landsat de los sensores TM, ETM+y OLI/TIRS (Developers, 2022).

Para la década del 1980 (específicamente en 1984), se emplearon las imágenes de la misión de Landsat 5 Collection 2 Tier 1 calibradas para el TOA (Top-of-Atmosphere) LANDSAT/LE07/C02/T1_TOA cortesía del U.S. Geological Survey); documentación que se encuentra disponible en [21] referenciado por la plataforma de GEE™. Las características técnicas de estas dos plataformas incluyen una resolución temporal de 16 días, la multiespectral es de 30 metros (USGS, 2022).

Para la década del 2020 se emplearon las imágenes de la misión de Landsat 8 OLI/TIRS Collection 2 Tier 1 calibradas para el TOA (Top-of-Atmosphere) (LANDSAT/LC08/C02/T1_TOA cortesía del U.S. Geological Survey); documentación que se encuentra disponible y referenciado por la plataforma de GEE. Las características técnicas de esta plataforma son de una resolución temporal de 16 días que opera bajo el mismo programa de adquisición de Landsat 5; la resolución espacial de las bandas multiespectrales es de 30 metros, la pancromática de Landsat 8 es de 15 metros y sus rangos espectrales van de los 443 a los 1375 nanómetros (USGS, 2022).

A continuación, se presentan las principales fases a seguir en esta investigación. Edición de la información (criterios de inclusión o exclusión de información, construcción de variables compuestas y/o indicadores).

- Fase 1: Extracción y depuración de la información
- Fase 2: Generación de variables espectrales e índices calculados
- Fase 3: Clasificación supervisada, análisis geoestadístico y validación

Fase 1. Extracción y depuración de la información

Para analizar la información (imágenes satelitales) multitemporal se desarrollaron algoritmos en la plataforma de GEE; donde se aplicaron filtros de fecha, límites y porcentaje de nube; posteriormente se seleccionaron las bandas multispectrales con una resolución espectral y espacial que se emplean para el desarrollo de clasificaciones supervisadas y no supervisadas.

Fase 2. Generación de variables espectrales y de apoyo.

Una clasificación basada sólo en variables espectrales inicialmente nos muestra el grado de confusión que pueden mostrar los objetos al momento de comparar las firmas espectrales de cada uno de ellos en relación a su reflectancia ya sea difusa o especular; en rangos de longitud de onda algunos objetos pueden tener la misma respuesta espectral; por lo que, el algoritmo de clasificación podría confundirlos; para ello se emplean índices espectrales (Santos et al., 2022) de vegetación, de suelo, agua o incluso, índices basados en las bandas RGB (Red, Green & Blue) empleados actualmente para imágenes de alta resolución como los son las de Dron o Vehículos aéreos no tripulados (Roque, 2021).

Dentro de los índices empleados para discriminar los píxeles que podrían entrar en conflicto en su respuesta espectral, se calcularon los de NDVI, GNDVI, EVI, AVI, SAVI, (University of Bonn, 2022); estos índices fueron calculados mediante álgebra de mapas empleando las bandas correspondientes; variando con relación a la longitud de onda que abarca cada banda por plataforma satelital, es decir, no es la

misma longitud de onda para la banda 1 (azul) Landsat 5, que para la banda 1 (aerosol costero) de Landsat 8; para los índices del RGB se calcularon los de NGRDI, GLI y VDVI (De Swaef et al., 2021).

Así mismo, como apoyo al clasificador se emplearon y generaron variables fisiográficas con el objetivo de indicar al píxel su posición topográfica o geográfica en el terreno (Beek 1978, Molina & Sharma 1993, INAB 1999; citados por Chinchilla et al., 2011); esto indica que al clasificador, si un píxel tiene la misma respuesta espectral y valor en un índice puede ser recategorizado en relación a sus píxeles vecinos por el valor de su posición topográfica; para esto se contempló un MDE (Modelo Digital de Elevación) obtenido de la NASA-USGS (USGS/SRTMGL1_003 cortesía del U.S. Geological Survey), este es un producto SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, Farr et al., 2007) con una resolución espacial de 30 metros; a partir de éste se generó la variable de pendientes y orientación de laderas en grados (Lara et al., 2012).

Fase 2.1. Variables de separabilidad y segmentación espectral a nivel super píxel.

Como primeras variables de entrenamiento y calibración se realizó una separabilidad espectral a nivel píxel a partir de un desmezclado con los miembros finales de cada clase; esto se calcula mediante una matriz pseudoinversa transpuesta que se multiplica por cada píxel obteniendo como resultado una imagen compuesta por cada clase con el mismo número de bandas, esta técnica es empleada cuando hablamos del OBIA (Object based image analysis) (Ela & Claire, 2019; Surya et al., 2019).

Fase 2.2. Clasificación no supervisada.

Para entrenar el algoritmo de clasificación se generaron puntos de entrenamiento por medio de interpretación visual y los valores correspondientes a las firmas espectrales que mejor representan a cada clase u objeto; las clases identificadas fueron las siguientes: Cultivos, Urbano, Suelo desprovisto de vegetación. Se empleó el algoritmo de predicción de Machine Learning de Random forest (Phan et al., 2020;

Amini et al., 2022) disponible en GEE; el cual, se ejecutó con un número de árboles de decisiones (Phan et al., 2020) y los puntos de entrenamiento generados para cada año y las variables o bandas integradas en una sola imagen.

Fase 3. Clasificación supervisada, análisis geoestadístico y validación

Este proceso consistió en comparar los resultados de las predicciones o clasificaciones contra un conjunto de datos independientes y se comprobó si se había obtenido lo esperado. Mediante muestreo se extrajeron los valores de predicción y se traslapan con los de la verdad verificada y se calcularon los estadísticos que corroboran la precisión de los resultados obtenidos. El índice Kappa, es un indicador empleado para validar resultados cartográficos de clasificaciones de cambio de uso de suelo; mediante una matriz de confusión, este mide el nivel de concordancia cuando empleamos datos categóricos y es empleado para conocer el grado en que los observadores tienen certeza en sus mediciones o predicciones; siendo en este trabajo el observador el modelo predictivo o clasificación y el otro un conjunto de datos o de sitios de entrenamiento conocidos (Torres, 2007).

9.7 Resultados

9.7.1 Coberturas en 1984 y 2020

Atendiendo los objetivos específicos descritos anteriormente, se presentan los resultados de clasificación no supervisada de los usos de suelo para los años 1980 y 2020 (Figura 2 y Figura 3).

La Figura 2 y 3 muestran la cartografía obtenida de las clasificaciones, donde se representan las coberturas de uso de suelo y vegetación base para los años de 1980 y 2020; los usos de suelo de importancia para este trabajo se muestran en verde que se refiere a la agricultura y vegetación natural, negro lo urbano construido en esa temporada. Las áreas por cada cobertura, se muestran en la Tabla 1.

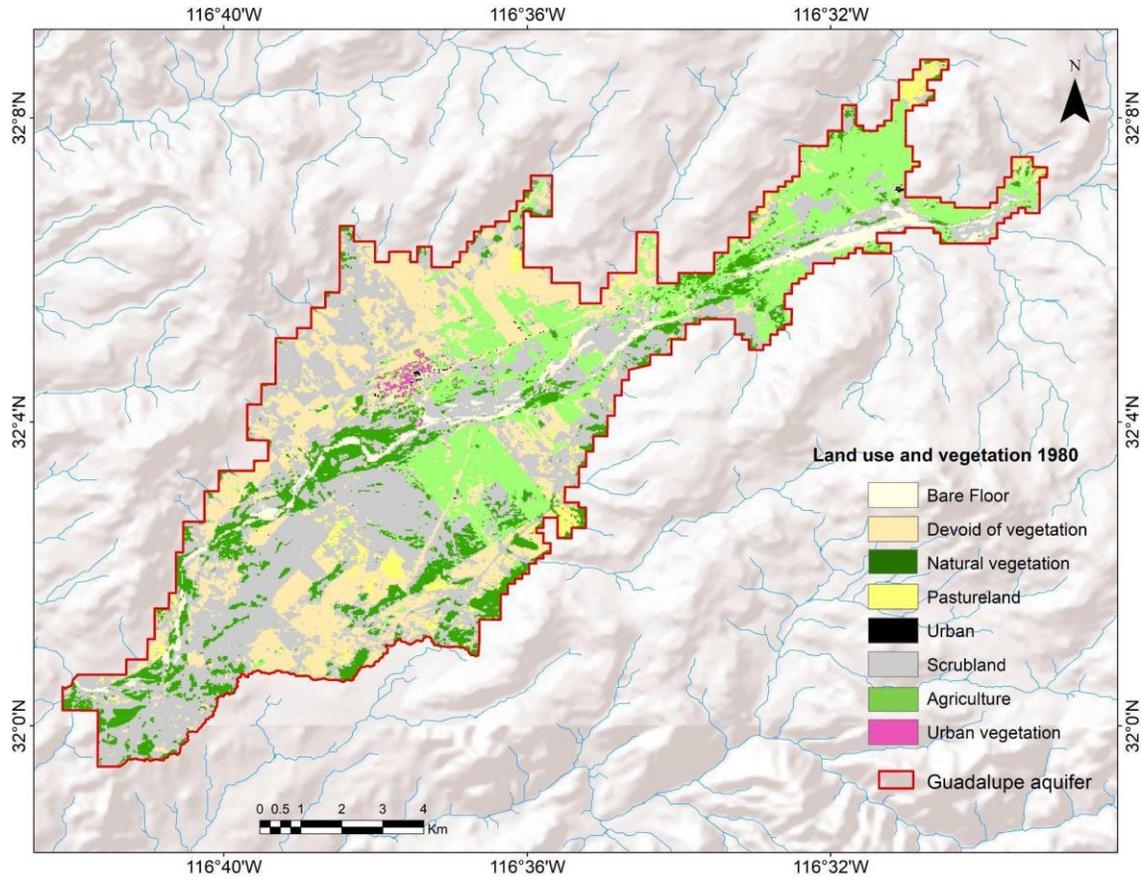


Figura 2. Clasificación de suelo y vegetación en el Valle de Guadalupe para los años de 1980. Fuente: elaboración propia con base a los resultados.

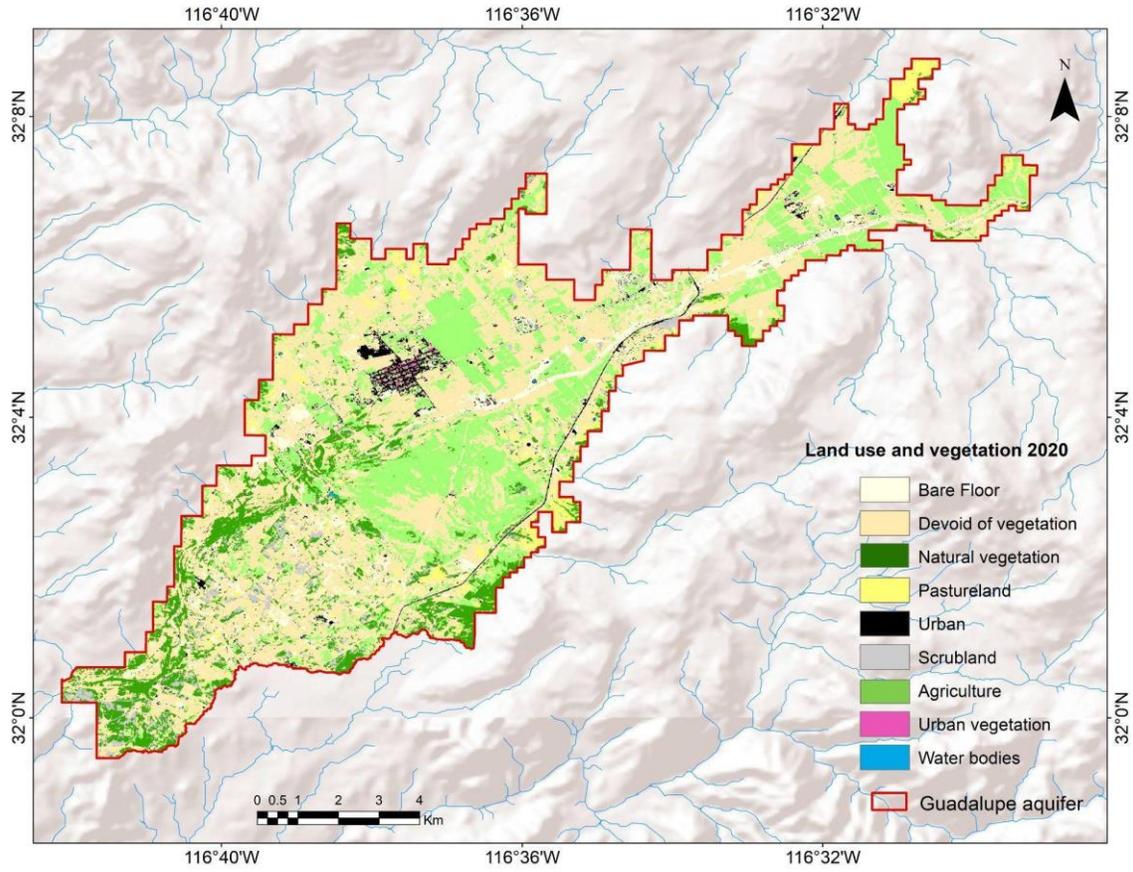


Figura 3. Clasificación de uso de suelo y vegetación en el Valle de Guadalupe para los años de 2020. Fuente: elaboración propia en base a los resultados.

Tabla 1. Coberturas y áreas para 1984 y 2020

Cla se	Cobertura	Área (ha) 1980	Porcentaje (%) 1980	Área (ha) 2020	Porcentaje (%) 2020	Incremento porcentual (%)
1	Suelo Desnudo	306.5	3.2	650.4	6.8	112.20
2	Desprovisto de vegetación	2122.8	22.2	4586.9	48.1	116.08
3	Vegetación Natural	1198.6	12.5	954.3	10.0	-20.38
4	Pastizal	285.3	3.0	364.6	3.8	27.80
5	Urbano / Cuerpos de agua	6.8	0.1	207.2	2.2	2947.06
6	Matorral	3849.6	40.2	305.4	3.2	-92.07
7	Agricultura	1765.3	18.4	2456.3	25.7	39.14
8	Vegetación Urbana	45.2	0.5	19.7	0.2	-56.42

Elaboración propia, con base a los resultados de detección de cambios.

9.7.2 Persistencias por tipo de coberturas entre 1980 y 2020

En la Figura 4, se muestran las persistencias de la cobertura del suelo en el rango de tiempo de 1980 al 2020, donde se determina que la agricultura fue la cobertura con mayor área de persistencia.

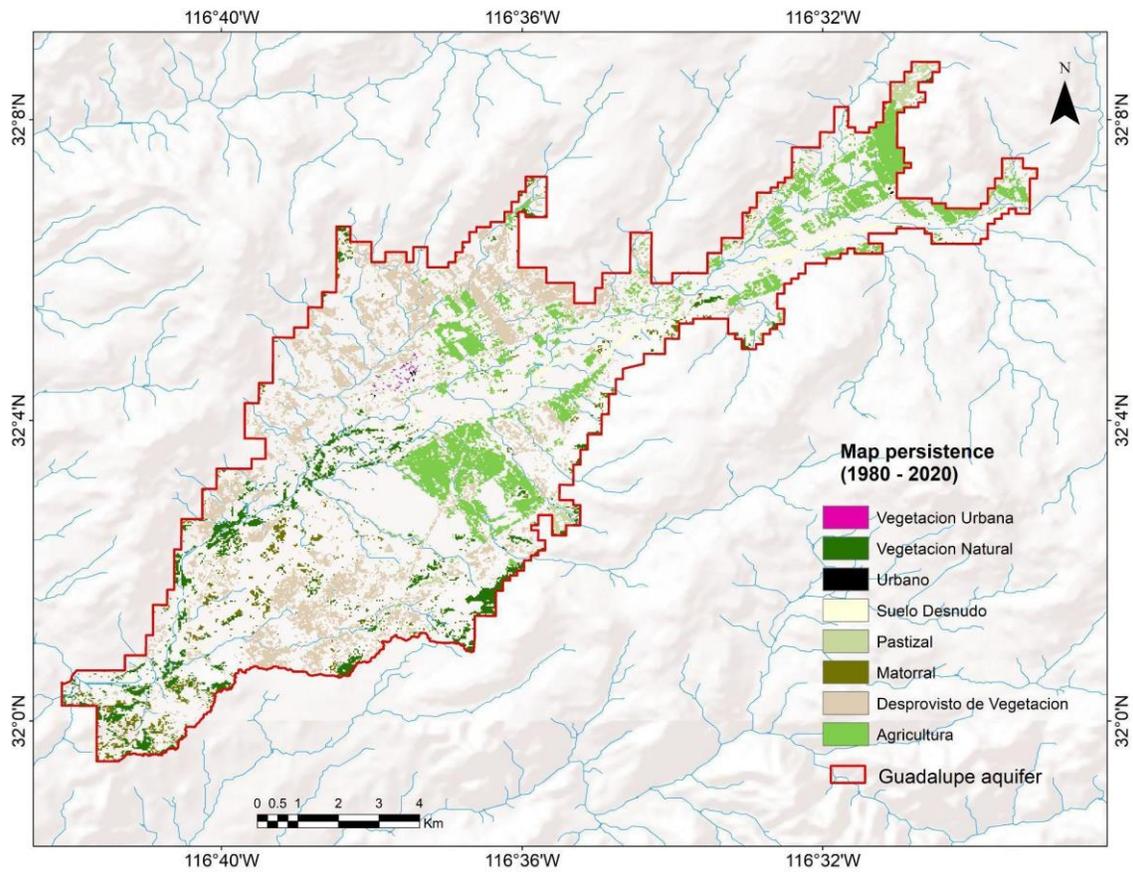


Figura 4. Persistencias de la cobertura a lo largo de los años 1984-2020.

9.7.3 Cambios entre tipos coberturas

En la Figura 5, se muestran los mapas de cambios ocurridos desde el año 1980 al 2020. En este mapa se observa que el pastizal fue el que perdió cobertura, asignándose al área agrícola.

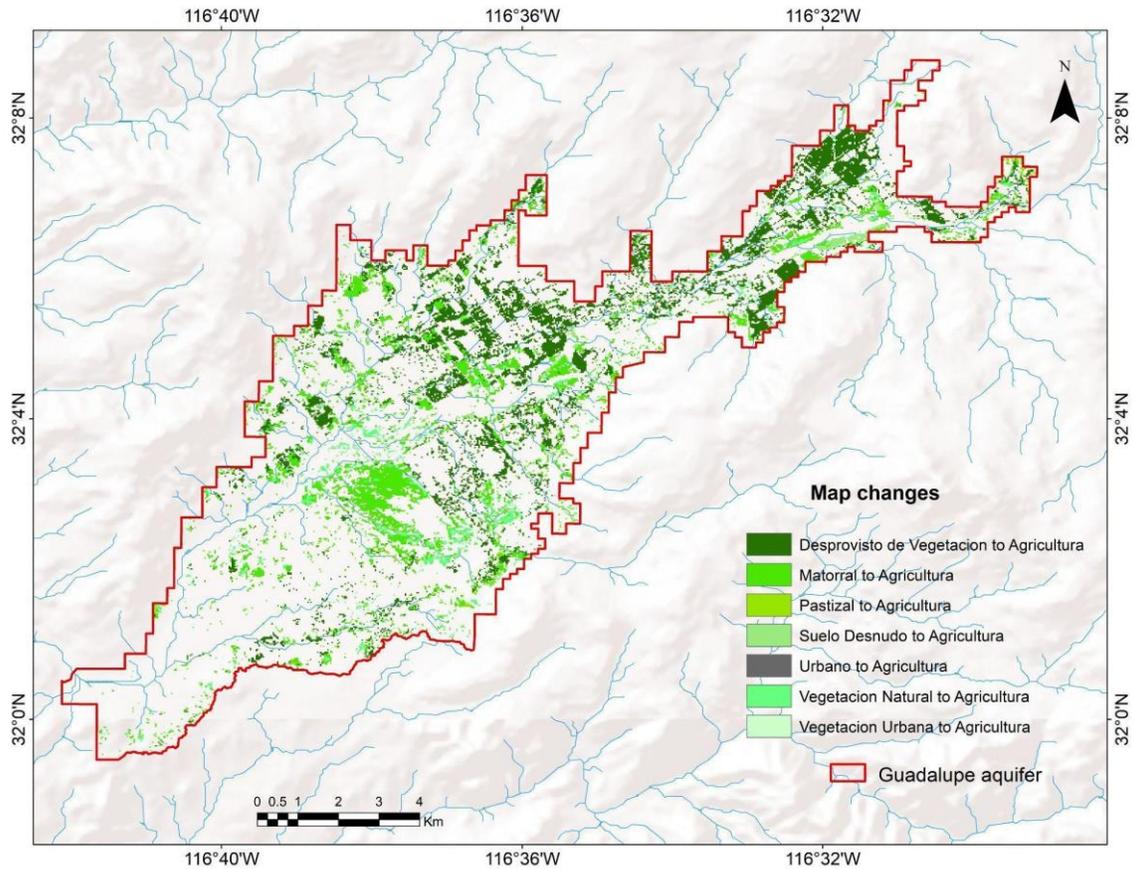


Figura 5. Mapa de cambios desde los años 1980-2020.

9.7.4 Ganancias, pérdidas y persistencias para la cobertura agrícola.

En la Figura 6, se muestran los mapas de ganancias, pérdidas y persistencias al año 2020. Específicamente en la agricultura se notan pérdidas en este periodo, pero en realidad sigue siendo área agrícola, solo en esa temporada (análisis de las imágenes satelitales 2020), no es una superficie cultivada, más bien se encuentra en reposo (áreas rojas), y al centro del valle se observan ganancias de zonas cultivadas, extendiéndose al sur de la zona de estudio (áreas verdes).

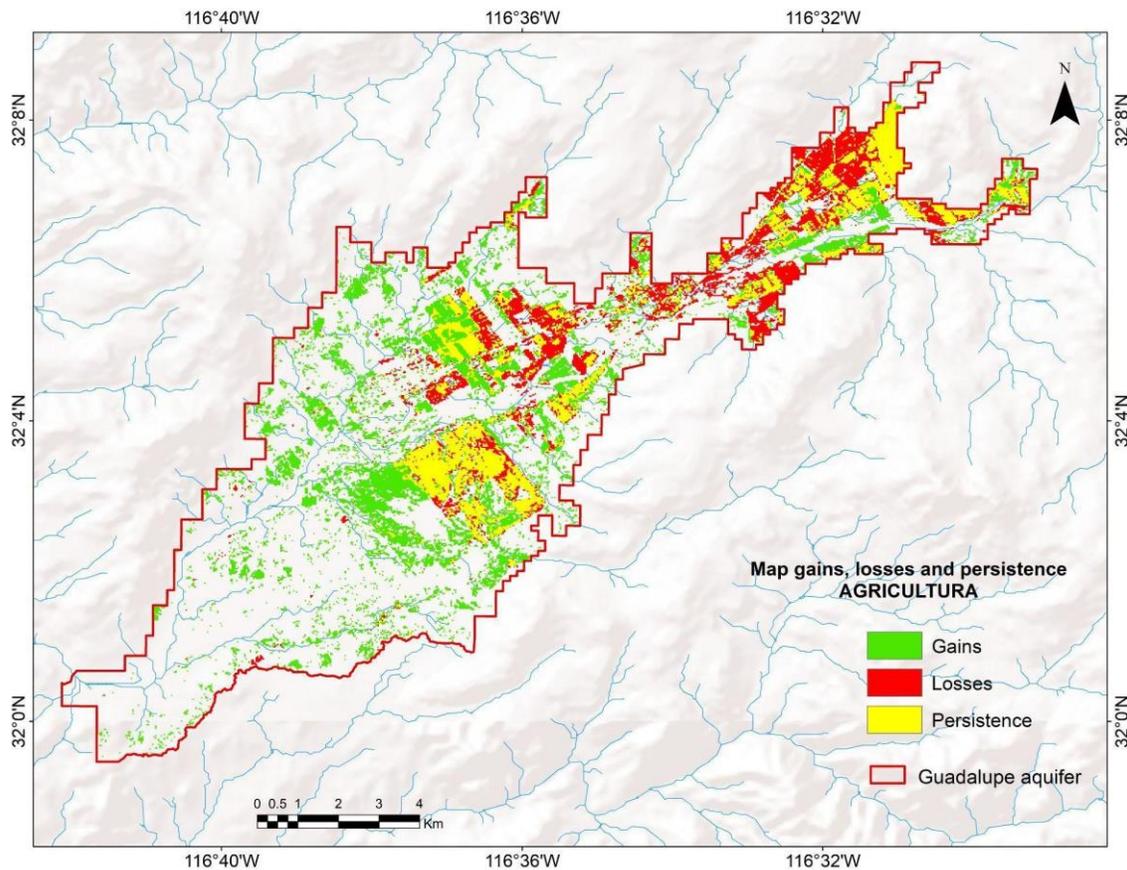


Figura 6. Mapa de ganancias, pérdidas y persistencias 2020.

9.7.5 Mapa de transición de matorral a agrícola.

Un tema que resulta sumamente importante es conocer espacial y temporalmente la transición que ocurre del matorral a la agricultura que se muestra en la Figura 7. Continuando con el análisis del mapa anterior, el área de ganancias de superficie agrícola que se observa, es porque perdió área de superficie que antes era ocupada por la cobertura de matorral.

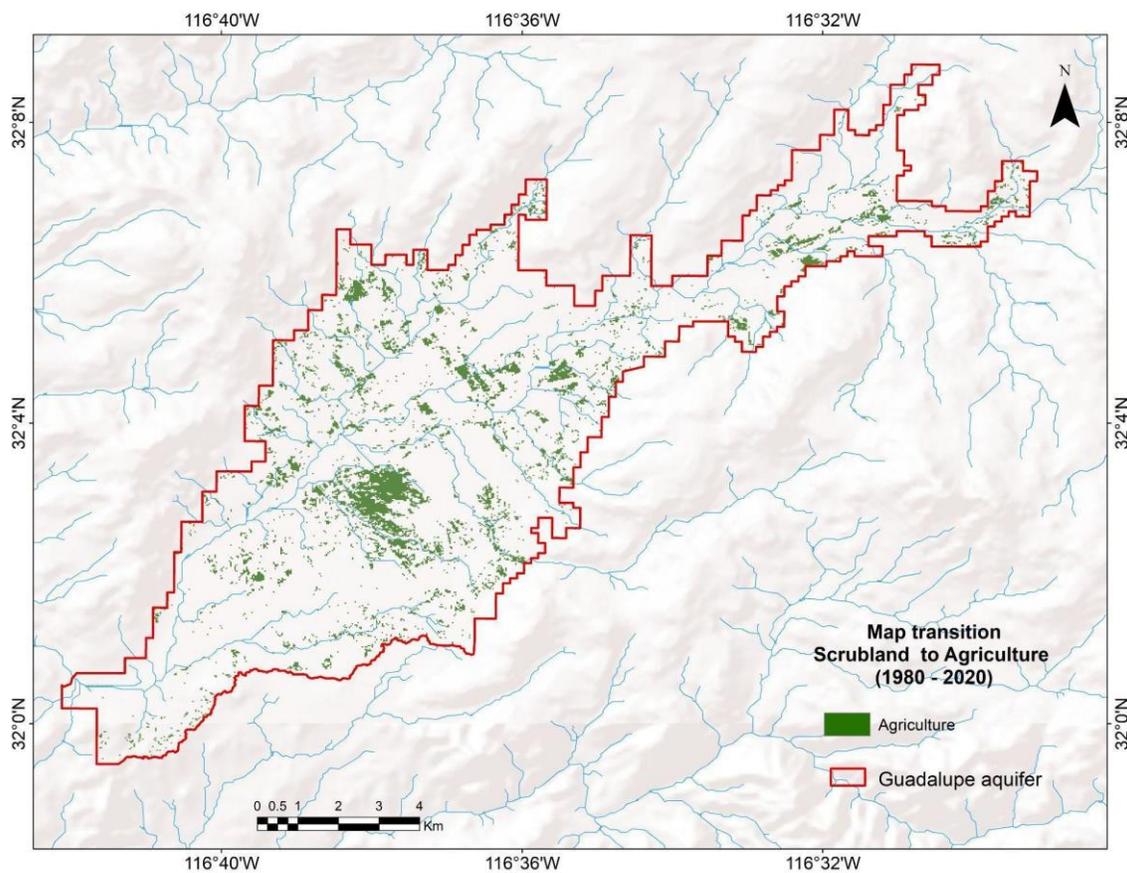


Figura 7. Mapa de transición de matorral a cobertura agrícola.

9.7.6 Intercambios entre desprovisto de vegetación a agrícola.

Las coberturas desprovistas de vegetación muestran también zonas agrícolas no sembradas en ese momento, solo están barbechadas sin embargo, son cultivadas en alguna otra temporada (Figura 8). Este es el mapa que mejor representaría el total de la cobertura destinada a la actividad agrícola en el Valle de Guadalupe.

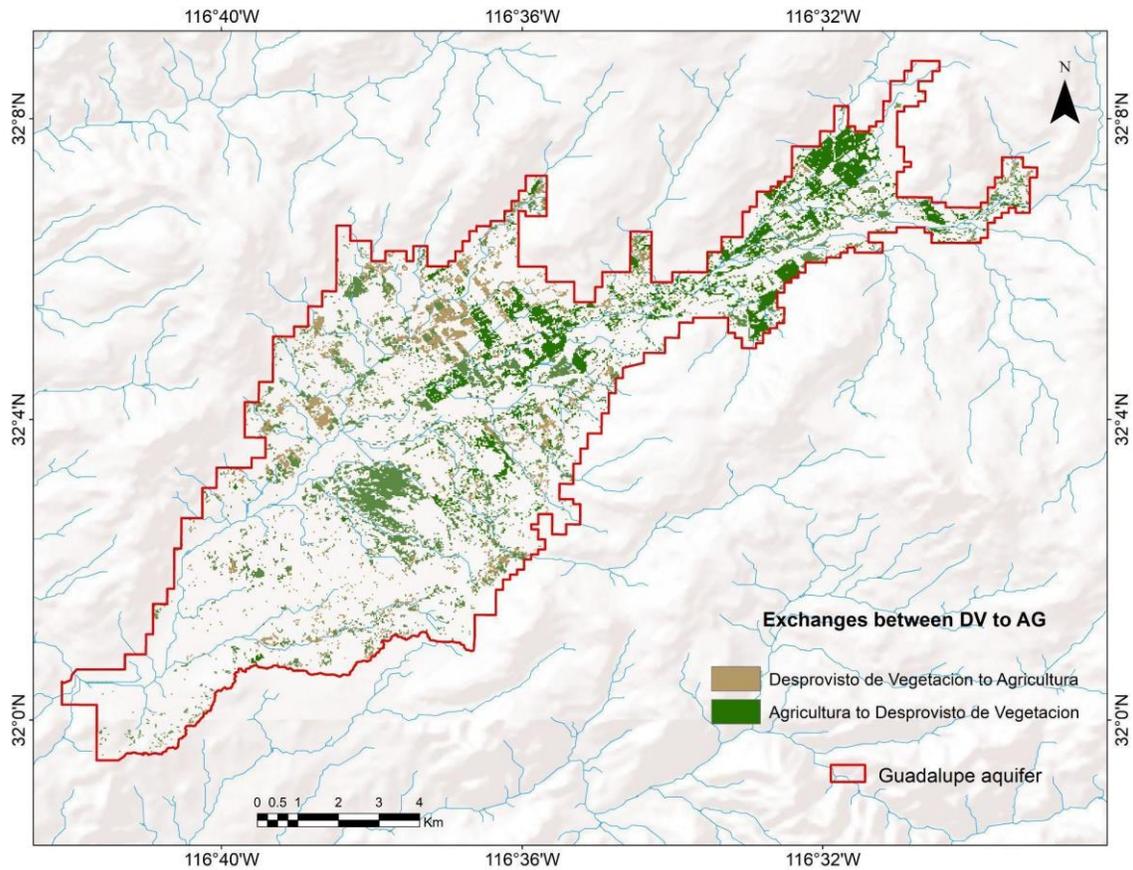


Figura 8. Mapa cobertura agrícola 2020.

9.7.7 Cobertura del suelo en 1980 y concentración de nitratos 2001

Y finalmente podemos observar en las Figuras 9 y 10, las zonas por una alta concentración de nitratos (puntos rojos) en ambas temporadas (1980 y 2020), los cuales se encuentran en las zonas agrícolas y muy cerca de la zona urbana.

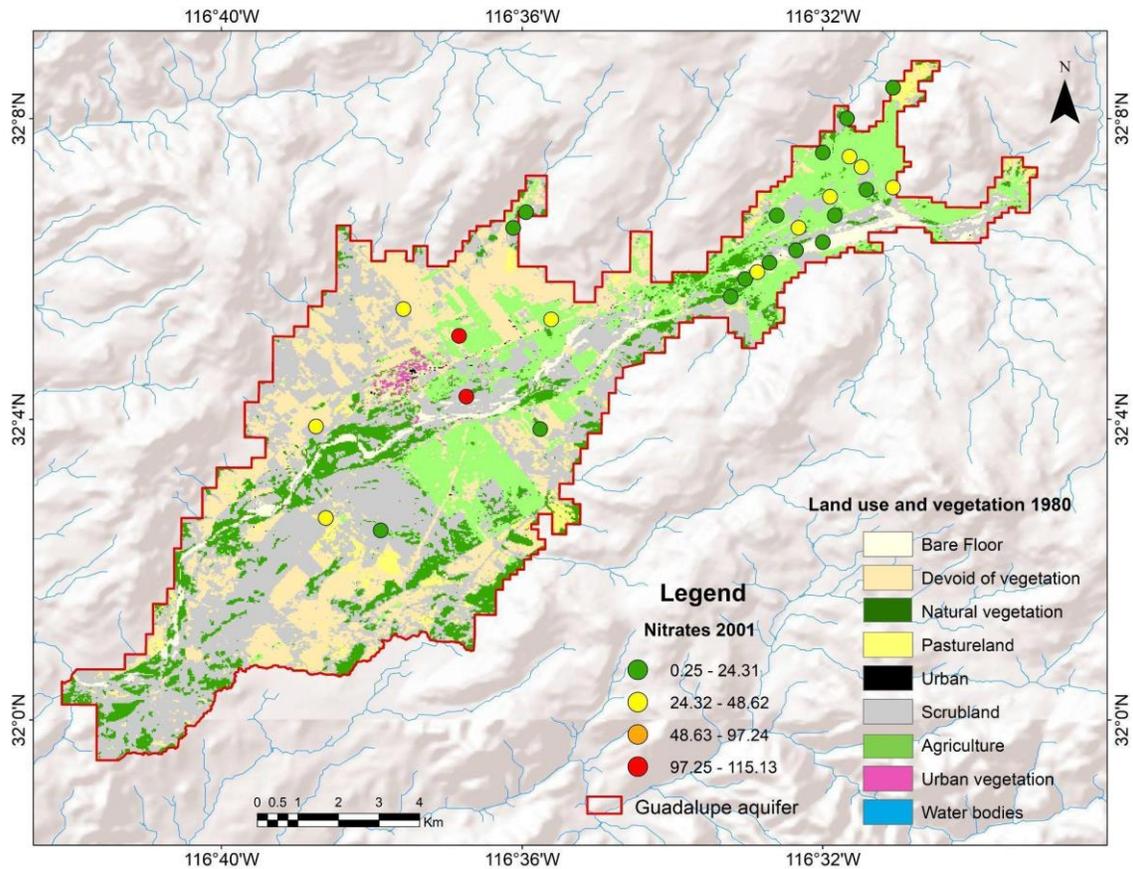


Figura 10. Mapa cobertura agrícola 1980 y concentración de nitratos 2001.

9.7.8 Cobertura del suelo en 1980 y concentración de nitratos 2001

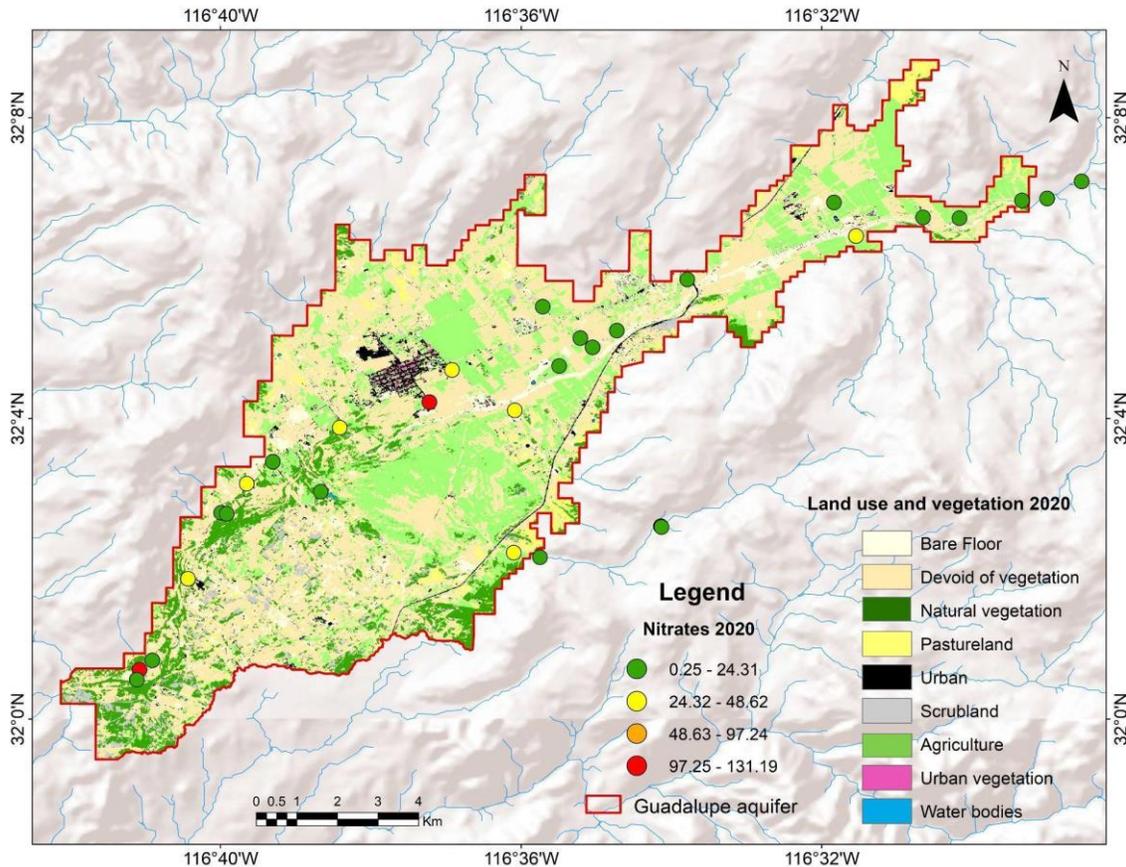


Figura 10. Mapa cobertura agrícola 2020 y concentración de nitratos 2020.

9.8 Discusión

El uso de los sistemas de información geográfica y los sensores remotos en plataformas alternas en la nube; son una importante herramienta de innovación en lo que se refiere al análisis geoespacial sobre un territorio; este tipo de geotecnologías aumentan la eficiencia y certeza de los analistas de las ciencias de la tierra obteniendo resultados que permiten actualizar la información generada en otros años. El uso de estas geotecnologías no solo permite eficientar el tiempo de proceso de la información; si no que, por ser algoritmos que se desarrollan, estos

pueden ser replicables en diversas zonas simplemente modificando o calibrando parámetros básicos; aumentando así, el conocimiento en áreas especializadas.

Warren, et. Al., (2010) demuestran la capacidad de examinar cada parcela en su contexto espacial, utilizando serie de datos satelitales temporales y validación de mapas mediante la herramienta de TimeSync. Para este trabajo se ha aplicado un análisis multitemporal empleando una compilación de imágenes de aproximadamente cada 16 días para cada año del periodo analizado simplificando el proceso; considerando que el procesado en la nube es la mejor opción cuando hablamos de estudios multitemporales.

Al emplear índices espectrales, variables fisiográficas, de separabilidad espectral y de OBIA como apoyo a un clasificador aumenta la certeza en que los pixeles de cada categoría van a ser recategorizados en relación a sus valores representativos por el índice, por su posición en el terreno fisiográfico, por forma, por conectividad, vecindad y contigüidad espacial; permitiendo así eliminar los errores de clasificación por posición al ubicar el punto de entrenamiento sobre los pixeles o de confusión que se dan por solo emplear bandas multispectrales. Ben DeVries, et.al., (2015), mencionan la importancia de considerar un método robusto de datos e índices como NDVI para la detección de perturbaciones en la cobertura vegetal.

Manjarrez-Domínguez et al., (2023), soportan este trabajo ya que muestran una clasificación basada en índices espectrales y recalculando con algebra de mapas utilizando las bandas correspondientes, esto con la finalidad de discriminar la confusión entre objetos con respuestas espectrales similares.

Si bien el uso de las plataformas en la nube como GEE para realizar predicciones de los modelos de cambio de uso de suelo; estos aún no se han perfeccionado; por lo que el emplear programas SIG en escritorio para la aplicación de este tipo de modelos, generan resultados de calidad que predicen certeramente los cambios que observamos en la verdad terreno y que podemos confirmar con el conocimiento experto; y que a partir de estos modelos podemos predecir la probabilidad a futuro

con un alto grado de confiabilidad el comportamiento y dinámica de las coberturas en el territorio.

Los modelos de cambio de cobertura de suelo empleados son resultados de suma importancia para el estudio, análisis y monitoreo de la dinámica de la superficie terrestre, así como sus cambios entre coberturas y estructurales. **El modelo LCM** permitió identificar las pérdidas, ganancias y persistencias para el periodo histórico y sus lapsos entre décadas. La aplicación de estos modelos nos muestra una perspectiva geográfica de la evolución del territorio a través del tiempo; lo que se convierte en herramientas que generan resultados con certidumbre, esenciales e importantes para los tomadores de decisiones; permitiendo así; darles continuidad a los estudios de la dinámica geoespacial de territorio empleando plataformas tecnológicas con una alta resolución temporal y espacial, además de la espectral y radiométrica.

9.9 Conclusiones

La disponibilidad de información satelital libre, de una resolución espacial media, permite realizar investigaciones sobre la detección de cambios, gracias a las series temporales que ofrecen diversos satélites (Landsat, Sentinel, Modis, entre otros).

En este trabajo se caracterizó espacialmente en el Valle de Guadalupe los principales cambios, ganancias, pérdidas y persistencias de las diferentes coberturas encontradas (principalmente agrícolas, matorral y pastizal), asociadas a la perturbación antropogénica que ha sufrido a lo largo de 40 años.

La zonas donde se detectaron mayores cambios, fue en la cobertura agrícola, la cual persistió en el tiempo, no tuvo pérdidas, al contrario ganancias significativas en superficie que antes eran ocupadas por matorral, la cual desde el punto de vista ecológico, podría causar pérdida de especies de flora y fauna propia del sitio y en cuanto a las nuevas áreas agrícolas, incrementa la extracción del agua subterránea y debió a la actividad puede incrementar la probabilidad de contaminación al acuífero por el uso de agroquímicos.

Se concluye también que a partir de esta investigación se puede abordar una nueva serie temporal de cambios, con la posibilidad de obtención y análisis de imágenes con una mejor resolución para detección de cambios más precisos, los cuales se pueden calibrar y validar con trabajo de campo en sitios específicos. Por ejemplo, en áreas de mayor pérdida de cobertura natural, que ahora es una zona de actividad agrícola, con alta vulnerabilidad a la contaminación por infiltración de contaminantes.

9.10 Recomendaciones.

Para un mejor análisis de cambios de coberturas, se recomienda, replicar el proceso para una serie de tiempo de 10 años anteriores al actual, mediante imágenes de alta resolución como lo son Planet y así poder hacer una proyección con escenarios futuros de posibles cambios, esto sería una herramienta útil para la toma de decisiones en torno a los problemas ambientales, ya sean de suelo, agua, incluso económicos, derivados de la actividad vitivinícola y turística de la región.

9.11 Referencias

1. Agencia Europea de Medio Ambiente. Available online: <https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2015/articulos/la-agricultura-y-el-cambio-climatico> (accessed on 20 January 2023).
2. Aquino, I.V. Análisis espacio-temporal del cambio de uso de suelo por expansión urbana-migración deforestación en el suelo de conservación del distrito federal. Master, Maestro en Geomática, Distrito Federal México, 6 de junio del 2016.
3. Ancira, S.L.; Treviño, G.E. Using satellite images for forest management in northeast Mexico. *Madera y Bosques* **2015**. 21, 77-91.
4. Ariza, A. *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8*; Landsat Data Continuity Mission versión 1.0; Publisher: Bogotá Colombia, 2013, 1-44.
5. Chander. G.; Markham, B.L.; Helder, D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote sensing of Environment* **2009**. 113, 893-903.
6. Cohen, W. B., Yang, Z., & Kennedy, R. E. (2010). Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 2. TimeSync—Tools for calibration and validation. *Remote Sensing of Environment*, 114(12), 2911-2924.
7. Estel, S., Kuemmerle, T., Levers, C., Baumann, M., & Hostert, P. (2016). Mapping cropland-use intensity across Europe using MODIS NDVI time series. *Environmental Research Letters*, 11(2), 024015.
8. González, G.S.; Nájera, G.O.; Murray, N.R.; Marcelleño, F.S. Dinámica espacio-temporal de la cobertura y uso del suelo en una cuenca hídrica. *CIBA* **2016**. 5.
9. Google Earth Engine. (n.d.). Google Earth Engine: A planetary-scale platform for Earth science data & analysis. Recuperado de <https://earthengine.google.com/>
10. Haklay, M., & Weber, P. (2008). How good are volunteered geographical information for informing sustainable urban planning and flood management? *Urban Studies*, 45(2), 241-261. <https://doi.org/10.1177/0042098007086423>
11. Jansen, L. J. M., & Turner, W. (2019). Remote sensing for land use change detection and monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 232, 111-125. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111125>
12. Leija, E.G.; Pavón, N.P.; Sánchez, G.R.; Ángeles, P.G. Dinámica espacio-temporal de uso, cambio de uso y cobertura de suelo en la región centro de la Sierra Madre Oriental: implicaciones para una estrategia REDD+ (Reducción de Emisiones por la Deforestación y Degradación). *Revista Cartográfica* **2020**. 102, 43-68.
13. Li, Z., Shao, G., Zhang, Y., Zhao, Y., Bai, Y., & Li, G. (2017). Mapping forest disturbance and recovery in the Adirondack Park using time series Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 189, 235-246.

14. Moya, Z.J. Procesamiento GNSS en el marco geodésico CR-SIRGAS: Influencia de las épocas de observación y referencia. *Revista de la Universidad de Costa Rica* **2022**. 32, 48-85.
15. Nasiri, V.; Deljouei, A.; Moradi, F.; Mohammad, S.; Alexandru, B.S. Land Use and Land Cover Mapping Using Sentinel-2, Landsat-8 Satellite Images, and Google Earth Engine: A Comparison of Two Composition Methods. *Remote sensing* **2022**. 14, 1977.
16. Peters, A. J., & Skakun, R. S. (2006). *Comparison of MODIS and AVHRR NDVI time series for monitoring agricultural drought in the Canadian Prairies. International Journal of Remote Sensing*, 27(3), 517-527.
17. Poveda, S.Y.; Bértudez, C.M.; Gil, L.P. Evaluación de métodos de clasificación supervisada para la estimación de cambios espacio-temporales de cobertura en los páramos de Merchán y Telecom, Cordillera Oriental de Colombia. *Boletín de ecología* **2022**. 44, 51-72.
18. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Available online: <https://sigagis.conagua.gob.mx/> (accessed on 16 November 2022).
19. The European Space Agency. Available online: https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/Constelacion_de_satelites (accessed on 20 January 2023).
20. Universidad de Murcia. online: <https://www.um.es/geograf/sig/teledet/fundamento.html> (accessed on 20 January 2023).
21. USGS. Available online: <https://www.usgs.gov/faqs/what-landsat-7-etm-slc-data> (accessed on 16 November 2022).
22. USGS. Available online: <https://www.usgs.gov/landsat-missions> (accessed on 09 November 2022).
23. Veneros, J.; García, L.; Morales, E.; Gómez, V.; Torres, M.; López, M.F. Application of remote sensors for the analysis of vegetation cover and water bodies. *IDESIA* **2020**. 38, 99-107.
24. Vidal, S.J.; Gallardo, C.J.; Peral, C.C. The potential of the available Landsat imagery in Google Earth Engine for the study of the Mexican territory. *Investigaciones geográficas* **2020**. 101.
25. Comparison of Two Composition Methods. *Remote sensing* **2022**. 14, 1977.
26. Peters, A. J., & Skakun, R. S. (2006). *Comparison of MODIS and AVHRR NDVI time series for monitoring agricultural drought in the Canadian Prairies. International Journal of Remote Sensing*, 27(3), 517-527.
27. Poveda, S.Y.; Bértudez, C.M.; Gil, L.P. Evaluación de métodos de clasificación supervisada para la estimación de cambios espacio-temporales de cobertura en los páramos de Merchán y Telecom, Cordillera Oriental de Colombia. *Boletín de ecología* **2022**. 44, 51-72.
28. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Available online: <https://sigagis.conagua.gob.mx/> (accessed on 16 November 2022).

29. Smith, J. A. (2022). *El desarrollo de los satélites para imágenes satelitales: Historia y evolución*. *Journal of Satellite Technology*, 15(3), 45-60.
<https://doi.org/10.1234/jst.2022.01503>
30. The European Space Agency. Available online: https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/Constelacion_de_satelites (accessed on 20 January 2023).
31. Universidad de Murcia. online: <https://www.um.es/geograf/sig/teledet/fundamento.html> (accessed on 20 January 2023).
32. USGS. Available online: <https://www.usgs.gov/faqs/what-landsat-7-etm-slc-data> (accessed on 16 November 2022).
33. USGS. Available online: <https://www.usgs.gov/landsat-missions> (accessed on 09 November 2022).
34. Veneros, J.; García, L.; Morales, E.; Gómez, V.; Torres, M.; López, M.F. Application of remote sensors for the analysis of vegetation cover and water bodies. *IDESIA* **2020**. 38, 99-107.
35. Vidal, S.J.; Gallardo, C.J.; Peral, C.C. The potential of the available Landsat imagery in Google Earth Engine for the study of the Mexican territory. *Investigaciones geográficas* **2020**. 101.

10. Artículo titulado " Vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos en el valle vitivinícola mexicano de Guadalupe, México " sometido en inglés a la revista "Hydrology"

Article

Vulnerability to Aquifer Pollution in the Mexican Wine Producing Valley of Guadalupe, México

Guadalupe Díaz-Gutiérrez ¹, Luis Walter Daesslé ^{2,*}, Francisco José Del-Toro-Guerrero ^{1,2}, Mariana Villada-Canela ¹ and Georges Seingier ³

¹ Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California, Carr. Transpeninsular 3917, Ensenada 22860, Baja California, Mexico; diazg9@uabc.edu.mx (G.D.-G.); francisco.deltoro@uabc.edu.mx (F.J.D.-T.-G.); mvilladac@uabc.edu.mx (M.V.-C.)

² Instituto de Ingeniería, Calle de la Normal, Insurgentes Este, Mexicali 21280, Baja California, Mexico

³ Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Carr. Transpeninsular 3917, Ensenada 22860, Baja California, Mexico; georges@uabc.edu.mx

* Correspondence: walter@uabc.edu.mx; Tel.: +52-646-1528222

Universidad Autónoma de Baja California (<https://ror.org/05xwcq167>) **Abstract:**

Groundwater pollution is one of the main challenges in our society, especially in semi-arid Mediterranean regions. This issue becomes especially critical in predominantly agricultural areas that lack comprehensive knowledge about the characteristics and functioning of their aquifer system. Vulnerability to groundwater pollution is defined as the sensitivity of the aquifer to being adversely affected by an imposed pollution load. For the Guadalupe aquifer, various indicators including water level depth, level variation, aquifer properties, soil composition, topography, impact on the vadose zone, and hydraulic conductivity were evaluated to establish spatial vulnerability categories ranging from very low to very high. Two pollution vulnerability scenarios (wet and dry) were studied. The results were compared with the analysis of nitrate concentration and distribution (2001, 2020, and 2021) from samples collected in the field. In the Calafia area, which predominantly relies on viticulture, the primary recharge inputs were identified in areas with a high vulnerability to pollution. Surprisingly, these vulnerable areas exhibited lower nitrate concentrations. This scenario underscores the need for effective management measures to safeguard aquifers in agricultural regions.

Keywords: vulnerability assessment; aquifer; nitrate; GIS; DRASTIC; geostatistics; groundwater management

1. Introduction

The forward-looking management and protection of groundwater resources and their protection from pollution represents a significant challenge for our society [1]. In developing countries, the rapid growth of population triggers urban expansion and the intensification of agricultural practices, posing a substantial risk of water resource pollution [2]. The quality and availability of water are inherently shaped by geographical, geological, and climatological characteristics, consequently creating conditions of scarcity or abundance of this vital resource [3]. Inadequate management of water resources, such as intensive groundwater extraction, can surpass the natural recharge capacity in arid and semi-arid areas [4], leading to the overexploitation of aquifers [5].

Aquifers are hydrogeological units that exhibit high vulnerability to pollution [6]. The chemical composition of groundwater can be influenced by both natural or anthropogenic factors [7]. Natural factors encompass climate, interactions, and the residence time of groundwater within the geological environment (dissolution of salts or minerals during its flow). Anthropogenic factors directly stem from human activities, such as the use of agrochemicals in agriculture (including fertilizers, herbicides, and pesticides) [8]. Agricultural irrigation exerts significant pressure, potentially leading to salinization and, in some cases, groundwater pollution when irrigation water has poor quality [9].

The quantity and quality of water are contingent upon land use in the areas responsible for capturing, conveying, storing, supplying, and replenishing the water resource [10]. Water quality is primarily determined by the presence of dissolved or suspended materials, substances, and organisms within it [11]. Water quality is not an absolute criterion; it can be deemed adequate or inadequate depending on its intended use [12]. Therefore, it is necessary to understand certain chemical characteristics that influence its quality and potential applications. These include parameters such as dissolved oxygen, suspended particles, dissolved salts, and the presence and concentration of toxic compounds, bacteria, and other microorganisms. Consequently, comprehending the potential and behavior of key pollutants from their source to the point of groundwater contact, along with understanding the characteristics of the aquifer system, becomes imperative [13].

There are several standardized methods available to assess the vulnerability of aquifers to pollution. Intrinsic vulnerability to pollution considers the physical properties of the aquifer system (e.g., inherent geological, hydrological, and hydrogeological characteristics) [14]. It is defined as the sensitivity of the aquifer to be adversely affected by an imposed pollutant load [15]. On the other hand, specific vulnerability is defined as the vulnerability of groundwater to particular pollutants, considering their properties, i.e., physical and biogeochemical attenuation processes (e.g., nitrate concentration) [16]. Indirect methods used to estimate the spatial vulnerability to pollution

Citation: Díaz-Gutiérrez, G.; Daesslé, L.W.; Del-Toro-Guerrero, F.J.; Villada-Canela, M.; Seingier, G. Vulnerability to Aquifer Pollution in the Mexican Wine Producing Valley of Guadalupe, México. *Hydrology* **2023**, *10*, x. <https://doi.org/10.3390/xxxxx>

Academic Editor(s): Name

Received: 8 November 2023

Revised: 3 December 2023

Accepted: 7 December 2023

Published: date



Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

of an aquifer rely on indices, statistics, and geological processes [17,18]. The most widely adopted method worldwide is DRASTIC [19,20], which assesses vulnerability using seven parameters: depth to groundwater (D), net recharge (R), aquifer medium (A), soil (S), topography (slope T), vadose zone impact (I), and hydraulic conductivity (C). Each parameter has classes with a ranking value and weight based on the importance of its characteristics, which can indicate varying levels of vulnerability to aquifer pollution. These indirect methods consider the characteristics of the aquifer environment and incorporate factors related to the characteristics of contaminant transport through unsaturated and saturated zones (e.g., morphological, hydrological, edaphological, hydraulic conductivity, water table) [14].

In different countries, research has validated and modified the intrinsic vulnerability methods (DRASTIC) [21]. For example, [22] assessed the vulnerability of an alluvial aquifer in a semi-arid environment in Algeria, where they determined zones from very low to very high vulnerability, mainly due to the urbanization of the area. They reclassified values in only three classes, to adopt protection measures in the most vulnerable area, and to have a tool for planning and water management [23]. In China [24], the DRASTIC method was applied as a nitrate pollution prevention tool, where they optimized the parameters by replacing them with quantitative information on aquifer thickness, nitrate attenuation intensity, hydraulic resistance, and groundwater velocity, and obtained improved results with a more uniform distribution of vulnerability classes in correlation to nitrate concentration, in order to formulate groundwater protection plans [25,26] and estimate specific vulnerabilities such as the risk of nitrate pollution [27,28]. In southern Mexico, [29] using DRASTIC and comparing with the spatial distribution of nitrate concentration, researchers showed that there was no relationship between nitrate and vulnerability at the site, recommending that more specific vulnerability methodologies had to be applied.

Indirect methods are sometimes complemented with site-measured hydrochemical data to analyze and validate the specific vulnerability of groundwater to a pollutant, depending on the level of accessibility of the information and the degree of analysis of the investigation [30]. Aquifer vulnerability assessment studies classify zones from negligible to very high pollution vulnerability, including sensitivity analysis and multivariate statistical tests [13,31]. Higher vulnerability zones indicate a higher susceptibility to pollution and pollutant infiltration that will negatively affect the aquifer. The outcomes produce aquifer vulnerability maps validated with the concentration of nitrates. The spatial distribution of nitrates reveals areas with high and low levels, which are subsequently correlated with moderate, high, and very high vulnerability zones, respectively [32].

Nitrates are naturally present in diverse ecosystems. Their presence in groundwater is mainly associated with sediment consolidation processes and anthropogenic activities such as agriculture and livestock farming [33,34]. The Mexican Official

Standard NOM-127-SSAI-2021 states that the maximum permissible levels of nitrate nitrogen in water for human consumption are 11 mg L⁻¹, or its equivalence to nitrates of 48.62 mg L⁻¹ [35]. Exceeding the permissible concentration limit can have severe and long-term detrimental effects on human health (e.g., methemoglobinemia in infants, congenital disabilities, health effects in adults such as stomach and liver damage, and can lead to cancer), depending on the exposure time [36–39]. Consequently, it is crucial to monitor concentration levels closely to prevent the consumption of contaminated water or, ideally, to take remedial measures at high concentration levels. Assessing the vulnerability of an aquifer to pollution is essential to develop strategies for management, remediation, and preventive actions in groundwater use.

Our study site in northwestern Mexico is the wine-producing Guadalupe Valley (GV). Here, the Guadalupe aquifer (GA) serves as the primary water source for the GV agricultural region and its surrounding areas. The GV is under tremendous pressure from land use change and emerging tourism, which generates a high demand for water resources and changes in its ecosystem balance. The (GA) has a contribution to natural recharge by surface runoff of ca. 40% [40] and approximately 10% of the volume of water used for agricultural irrigation returns to the aquifer through percolation [41]. These return flows from irrigation may significantly contribute to pollution of the aquifer, specially by fertilizers like nitrate, which is highly mobile in solution. Therefore, the objective of this study is to use the DRASTIC method to identify areas within the GA that are particularly vulnerable to pollution. The analysis considered two temporal scenarios spanning the period 2008 to 2017. The first scenario represented a period of higher rainfall (April 2011), while the second scenario represented a period of lower rainfall (December 2016). These periods were selected as they corresponded to the highest and lowest water availability in the GA, respectively, as indicated by the depth of groundwater. In the first scenario, the groundwater level approaches the natural ground level, while in the second scenario, there is a lower saturated zone thickness. By comparing these two scenarios it was possible to identify spatial variations in the vulnerability of the GA. Such analysis was accomplished by integrating the parameters of the DRASTIC method and the results were assessed in terms of the spatial concentration of nitrate in the aquifer.

2. Materials and Methods

2.1. Study Area

The GA is located 18 km north of Ensenada in the northwestern region of Baja California, Mexico (Figure 1), between parallels 32°0' and 32°8' N latitude and meridians 116°28' and 116°45' W longitude, 115 km south of the USA border. It is a geologic formation in an intermontane valley (GV) close to the Pacific Ocean, covering an area of ~80 km² [42].

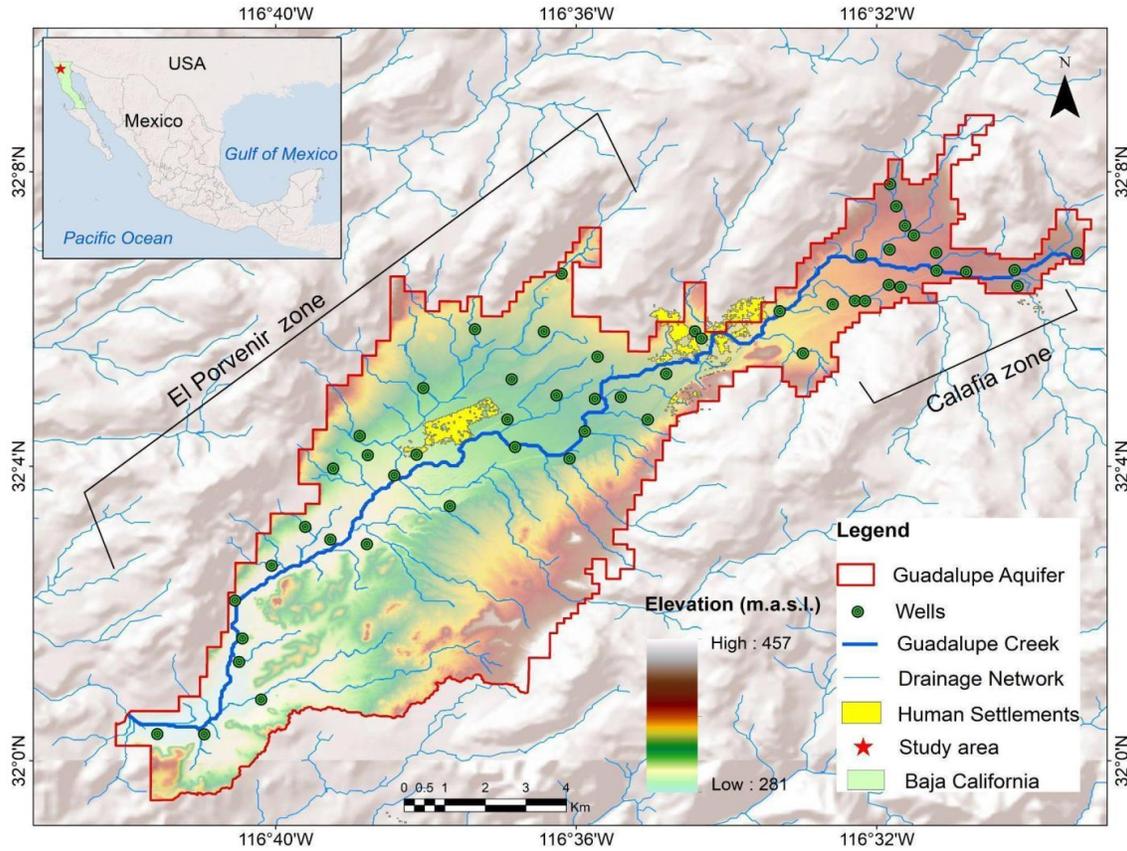


Figure 1. Location of the study area and well samples for nitrate concentrations in three different years (2001, 2020, and 2021).

Geologically, the GA is an unconfined heterogeneous aquifer formed by two tectonic grabens, which resulted from normal faults, filled by unconsolidated Quaternary sediments (gravels, sands, clay lenses, and silts) [43]. The geology and geomorphology are described in [44]. The Calafia graben (located in northeast GV) has a maximum depth of 350 m, and the Porvenir graben (located in southwest GV) reaches a maximum depth of 100 m [11]. In total, the potential storage capacity of the GA is $\sim 340 \text{ hm}^3$ [45]. Surface runoff, seepage from ephemeral Arroyo Guadalupe runoff, is the primary main source of GA's recharge, followed by vertical recharge associated with faults and fractures on the flanks of the valley, and percolation of agricultural irrigation [46]. Previous studies mention that recharge occurs mainly in the winter season, with events more significant than 50 mm/month, indicating that soil depth and lack of vegetation cover play a critical role in recharge. GA has a total recharge of $18.8 \text{ hm}^3 \text{ yr}^{-1}$ [42]. Land use in GV is mainly agricultural [40]. Vine and olive crops are the most representative and suitable for development in the semi-arid Mediterranean climate of the region [47].

Four hydrological seasons have been identified in the region: a winter wet season (WS; January–March), a dry season (DS; June–September), and two transitional seasons of WS-DS (April–May) and DS-WS (October–November) [48]. Mean annual precipitation is 298

mm, and most precipitation events occur during WS, with some sporadic precipitation events the rest of the year. Historically, the main interannual precipitation contribution originates during WS (77%), with February and January being the wettest months. The DS season contributes only 2% of the precipitation, and the remaining 21% occurs in the transitional seasons. The mean annual temperature is ~ 17.9 °C, and the WS temperature is ~ 13.4 °C, during DS it is ~ 23.1 °C, and in the transition months it ranges between ~ 15 – 20 °C. Historically, August has been the warmest month, with an average of 24.7 °C. The only source of recharge of the GA is precipitation and in turn, the GA is the only direct source of water supply to meet the region's water demands. The average annual recharge is $18.8 \text{ hm}^3 \text{ yr}^{-1}$ (calculated from 2010 to 2013), and the volume of groundwater extraction amounts to $37.1 \text{ hm}^3 \text{ yr}^{-1}$, generating a deficit of $-18.4 \text{ hm}^3 \text{ yr}^{-1}$ [42] as it is an overexploited aquifer.

2.2. DRASTIC Method

The DRASTIC method employs a numerical ranking system, assigning relative weights to assess an aquifer's intrinsic vulnerability to pollution [19]. This method was developed by the United States Environmental Protection Agency (USEPA). The method traditionally considers and weighs seven parameters in assessing vulnerability to groundwater pollution (Table 1).

The application of the DRASTIC method assumes the following: (a) the contaminant is introduced from the soil surface, (b) the contaminant reaches the water table by precipitation/infiltration processes, and (c) the contaminant has the same mobility as water.

Table 1. Description of the DRASTIC method parameters (modified from [19]).

Parameter	Description
D (Depth to Water Table)	The depth to water table indicates the thickness of the unsaturated zone, which is the length through which water travels by infiltration transporting the pollutant until it reaches the saturated zone of the aquifer [49]. The saturated zone is dynamic in unconfined aquifers, fluctuating with the seasons, extractions, and water availability. The deeper the groundwater level, the greater the probability of natural attenuation.
R (Recharge)	Recharge indicates the amount of water that infiltrates from the soil surface to the water table, increases the saturated thickness, and is the main transport of potential contaminants [18].
A (Aquifer Media)	The aquifer media represents the lithology and structure of consolidated or unconsolidated sediments, in particular, the capacity of the porous and/or fractured medium to retain and transport water. A is

	<p>considered a potential pathway for contaminant transport depending on its porosity (primary or secondary) [31]. Overall, the larger the size of the sediment or the more fractures it has, the higher the permeability, the lower the contaminant attenuation capacity, and the higher the probability of pollution.</p>
<p>S (Soil)</p>	<p>Soil type represents the uppermost layer of the aquifer, characterized by biological activity and exposure to erosion, where its thickness and texture are significant for attenuation, biodegradation, sorption, and volatilization processes.</p> <p>The S parameter impacts the amount of water that infiltrates into the soil, and its texture modulates the vertical movement of a pollutant to be transported by water through the space between the particles (depending on the size) in the vadose zone [50].</p> <p>Anthropogenic practices on the land surface such as agricultural applications, can be a potential source of pollution.</p>
<p>T (Topography)</p>	<p>In this context, topography represents the slope and controls of surface and subsurface runoff velocity. In the case of a potential pollutant, the effect may be accumulation; for example, in agricultural areas with a lower slope percentage, nitrate concentration may accumulate due to the intensive use of fertilizers [50].</p>
<p>I (Impact of the Vadose Zone)</p>	<p>The impact on the vadose zone corresponds to the site above the water table, controlling the length and time travel of water towards the saturated zone, thus influencing the available time for pollutant transport attenuation processes [51].</p>
<p>C (Hydraulic Conductivity)</p>	<p>Hydraulic conductivity measures the speed with which water can pass through the porous or fractured medium of the aquifer [31]. Specifically, it measures the movement of water flowing through a porous medium.</p> <p>This parameter is controlled by the amount and interconnectedness of voids within the aquifer as a consequence of intergranular porosity and fracturing.</p>

2.3. Sampling and Measurements

Two temporal scenarios, one with higher and one with lower water availability (WS and DS), were analyzed to identify the degree of vulnerability of the aquifer to pollution. The parameters of depth to groundwater level (D) and recharge (R) vary in both scenarios, while

aquifer media (A), soil (S), topography (T), impact on the vadose zone (I), and hydraulic conductivity (C) parameters are constant in both scenarios.

Hydrogeological, geological, soil texture, and topographical data were used to classify the parameters. Parameters were calculated from databases and thematic maps and transformed in integer value raster format with a 5 m spatial resolution in ArcGIS 10.8 and QGIS 3.24.2 [52,53]. Then, the results were classified following the DRASTIC method to create pollution vulnerability thematic maps.

Parameters

The analysis used groundwater level depth data from 52 wells for the wet scenario (April 2011) and 49 wells for the dry scenario (December 2016). The monitoring wells are distributed along the GA surface, from southwest to northeast (Figure 1).

In this research, for a semi-arid Mediterranean environment, the recharge parameter was represented by the variation in groundwater levels observed in the monitoring wells under both scenarios (April 2010, wet and November 2009, dry). The groundwater level measurements provide insights into the recharge process in the GA.

The aquifer media parameter was derived through georeferencing the “Francisco Zarco I11-D82” Baja California 1:50,000 geological map [54]. Lithology was digitized and classified based on the geological formation types within the study area.

The soil parameter was obtained during field visits from 31 soil samples (0–15 cm depth) collected systematically along the GV. We calculated the relative sand and silt–clay content in the laboratory (soil and sediment laboratory) following the granulometric analysis method and defined the soil texture. The topography parameter was derived from a 5 m resolution LiDAR Digital INEGI Elevation Model (DEM) and the slope calculation in QGIS 3.24.2. We define the impact on the unsaturated zone parameter from a 1:50,000 geology map from the Mexican Geological Service (SGM). The hydraulic conductivity parameter was represented following the results of [55]. However, qualitative modifications were applied to the data to identify distinct zones on the aquifer surface, e.g., to differentiate the Calafia zone from the Porvenir zone.

Different interpolation methods (Kriging/Cokriging, Inverse Distance Weighting) were tested, but the “Empirical Bayesian Kriging” proved to be the most accurate to generate the prediction maps of the depth to groundwater and recharge from the monitoring sites (wells) and soil parameter from relative sand content in field sites. A logarithmic transformation and a circular smoothed neighborhood type with a factor of 0.5 were applied.

Cross-validation was applied to the prediction maps resulting from modeling in the ArcGIS 10.8 program. The root means square error (*RMSE*) was calculated to assess the quality of the interpolations [56] as follows:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (1)$$

where $RMSE$ is the root mean squared error, P_i is the predicted value, O_i is the observed value, and n is the sample size.

2.4. Application of the DRASTIC Vulnerability Index (DVI)

To model the DVI of the GA, the weighted indices of each parameter were superimposed using the spatial analysis tool “weighted sum” available in ArcMap, and equation 2 was applied. The numerical ranking factor (R_j) in each parameter varies according to the specific characteristics of the study area. R_j is based on the ratio of impact, significance, and potential pollution to an aquifer and is represented by values ranging from 1 (least vulnerable) to 10 (most vulnerable). Each parameter is assigned a relative weight (W_j) to calculate the DRASTIC vulnerability index (DVI), whose values range from 1 (least significant) to 5 (most significant), as shown in Table 2 [19].

Table 2. Weighting parameter and relative weight of the DRASTIC vulnerability index.

Parameter	DRASTIC Weight
D	5
R	4
A	3
S	2
T	1
I	5
C	3

The following equation calculates the DVI using map algebra in ArcGis 10.8 (for all parameters).

$$DVI = \sum_{j=1}^7 (W_j * R_j) \quad (2)$$

Typically, the DRASTIC results range from 23 (minimum) to 230 (maximum) (Table 3) [19].

Table 3. Aquifer pollution vulnerability classes according to the DRASTIC method, following the World Bank Guide to Methodological Proposals for Groundwater Protection [14].

Class	Rating	Definition
Very low	23–64	Presence of confining layers where vertical flow (percolation) is negligible.
Low	65–105	Vulnerable only to conservative pollutants (not commonly affected by chemical reactions in natural processes) when discharged or leached continuously over long periods.
Moderate	106–146	Vulnerable to some contaminants only when continuously discharged or leached.
High	147–187	Vulnerable to many pollutants (except those that are strongly absorbed or easily transformed) in numerous pollution scenarios.
Very high	188–230	Vulnerable to most pollutants with rapid impact in many pollution scenarios.

2.5. Nitrate Analysis NO_3^-

Groundwater samples were collected from 27 wells in 2001, 33 in 2020, and 28 in 2021. Water samples were filtered with 0.45-micron filters, collected in polyethylene bottles, and stored at 4 °C until anion concentration analysis was carried out using the Ion Chromatography System-Dionex Aquion (Thermo Scientific) with the software tool Chromeleon Console 7.2.9, by ion chromatography with chemical suppression [57].

Concentration of nitrate NO_3^- was analyzed with Geographic Information Systems for the graphic representation and construction of spatial distribution maps and temporal behavior.

Finally, the independent parameter of nitrates was validated as a potential pollution factor in the aquifer, depending on the concentrations in the study area, giving a high and very high vulnerability assessment to data exceeding the permissible limits (11 mg L⁻¹) for human consumption of the Mexican Official Standard NOM-127-SSA1-2021 [35]. Grain size analyses of 29 soil samples was carried out by means of a laser particle distribution analyzer HORIBA LA910

The samples collected in the field and processed in the laboratory were helpful for the optimization of the research, which aims to obtain a point spatial distribution and concentration in the GA.

3. Results and Discussion

The study's findings present two distinct hydrological scenarios (wet and dry) characterized by differences in groundwater depth and groundwater level. The groundwater depth in the wet scenario ranges from 0.8 to 33.9 m (Figure 2a) and in the dry scenario, groundwater depth varies from 4.4 to 57.3 m (Figure 2b). The groundwater level variation is influenced by various factors such as precipitation, surface

runoff, and irrigation water return. The groundwater level variation in the wet scenario ranges from 0.7 to 30.0 m (Figure 2c) and in the dry scenario, from 0 to 5.0 m (Figure 2d). The results of the granulometric analysis revealed that the study site is dominated by sandy soils up to a depth of 30 cm. Approximately 76% of the surface has medium sands and 24% coarse sands located in the El Porvenir zone (Figure 2e). According to Kurczyn-Robledo [58], flat slopes slow down the runoff in the study area. The flat slopes range from 0 to 6% (Figure 2f) and cover 66% of the area, leading to infiltration and possible pollutants transport toward the aquifer.

In the study area (Figure 2g), low hydraulic conductivity is observed between the intersection of the zones (Calafia and El Porvenir) and to the south of the aquifer, representing 34.5%. Moderate conductivity extends over a large part of the center of El Porvenir with 40.5%, high hydraulic conductivity is located in the Calafia zone with 11.5% of the total study area, and finally, very high hydraulic conductivity is located in the course of the Guadalupe stream representing 13.5%.

According to [19], the lithology influences the infiltration and transport of potential contaminants from the surface to the saturated zone of the aquifer. In the study site, low permeable rocks cover 38% of the study area and are formed by granodiorite, andesite, diorite, and dacite, located towards the southwest and at the aquifer boundaries; the remaining area is covered by sands and silts constituting the permeable material [48], therefore, 62% of the surface is susceptible to the infiltration of contaminants (Figure 2h).

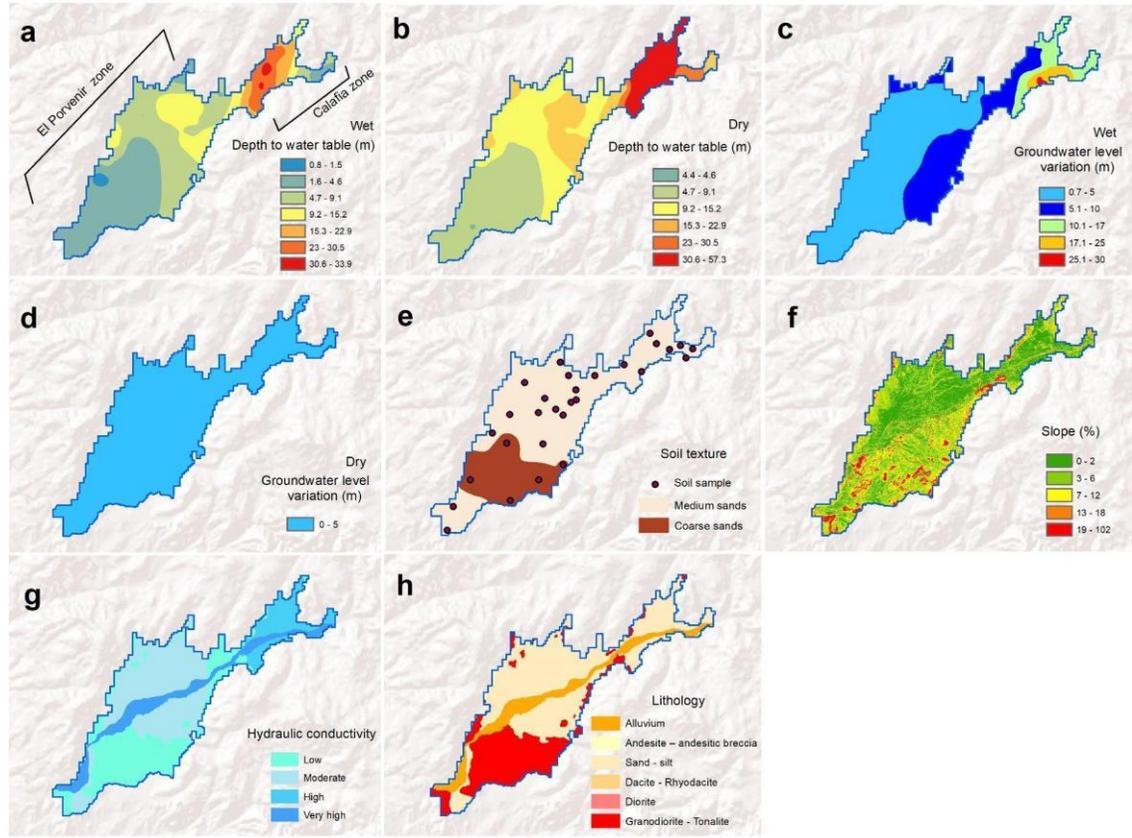


Figure 2. Characteristics of the study area. (a) = depth to water table in wet scenario, (b) = depth to water table in dry scenario, (c) = groundwater level variation in wet scenario, (d) = groundwater level variation in dry scenario, (e) = soil texture, (f) = slope, (g) = hydraulic conductivity, (h) = lithology.

3.1. Vulnerability Ranking

In terms of area coverage, the depth to groundwater level (D) was classified into seven rankings: (1) <30.5 m; (2) 23–30.5 m; (3) 15.3–22.9 m; (5) 9.2–15.2 m; (7) 4.7–9.1 m; (9) 1.6–4.6 m; (10) 0–1.5 m (Table 4), covering about 1%, 6%, 5%, 16%, 34%, 37%, and 1%, respectively, of the total study area in the wet scenario (Figure 3a).

On the other hand, in the dry scenario, D was classified into six rankings: (1) <30.5 m; (2) 23–30.5 m; (3) 15.3–22.9 m; (5) 9.2–15.2 m; (7) 4.7–9.1 m; (9) and 1.6–4.6 m (Table 4), covering about 12%, 3%, 18%, 31%, 35%, and 1%, respectively, of the total study area in the dry scenario (Figure 4a).

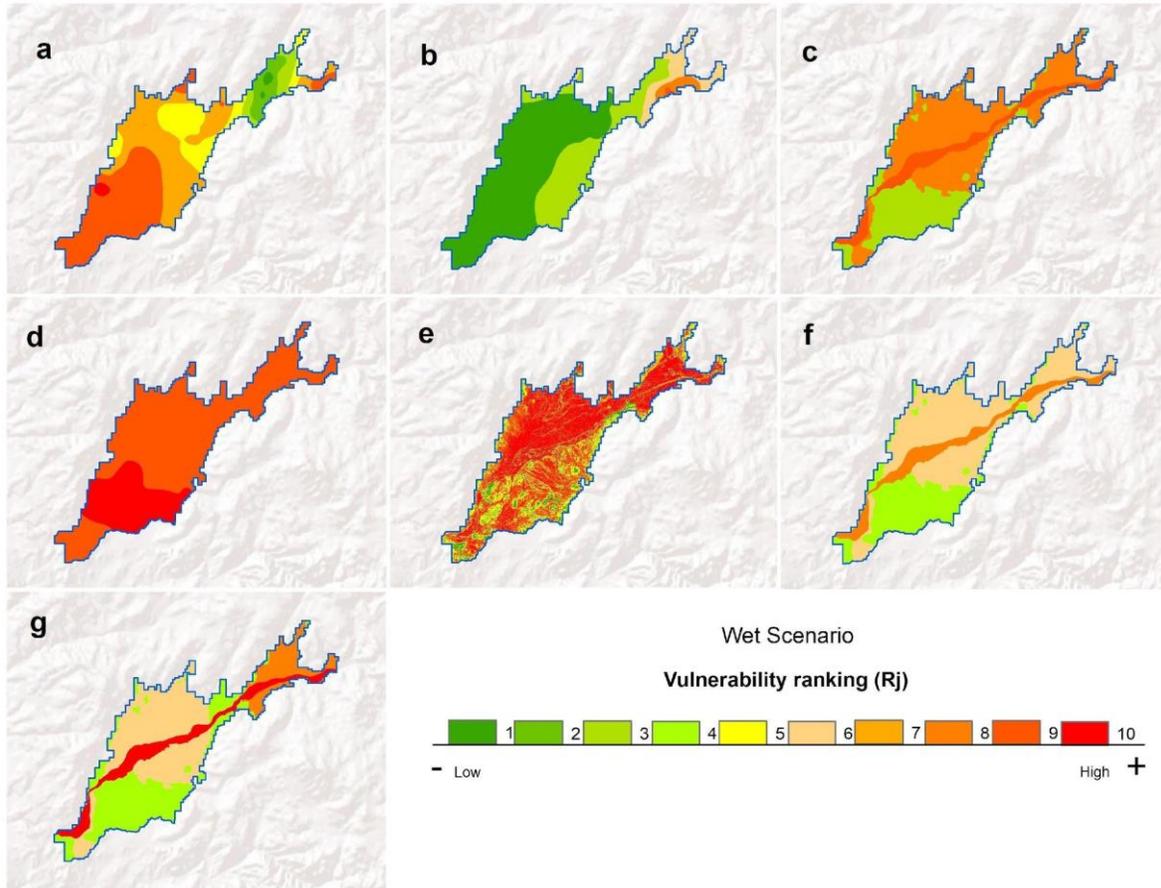


Figure 3. DRASTIC parameters during the wet scenario. (a) = depth to water table, (b) = recharge–water level variation, (c) = aquifer media, (d) = soil, (e) = topography, (f) = impact of the vadose zone, (g) = hydraulic conductivity.

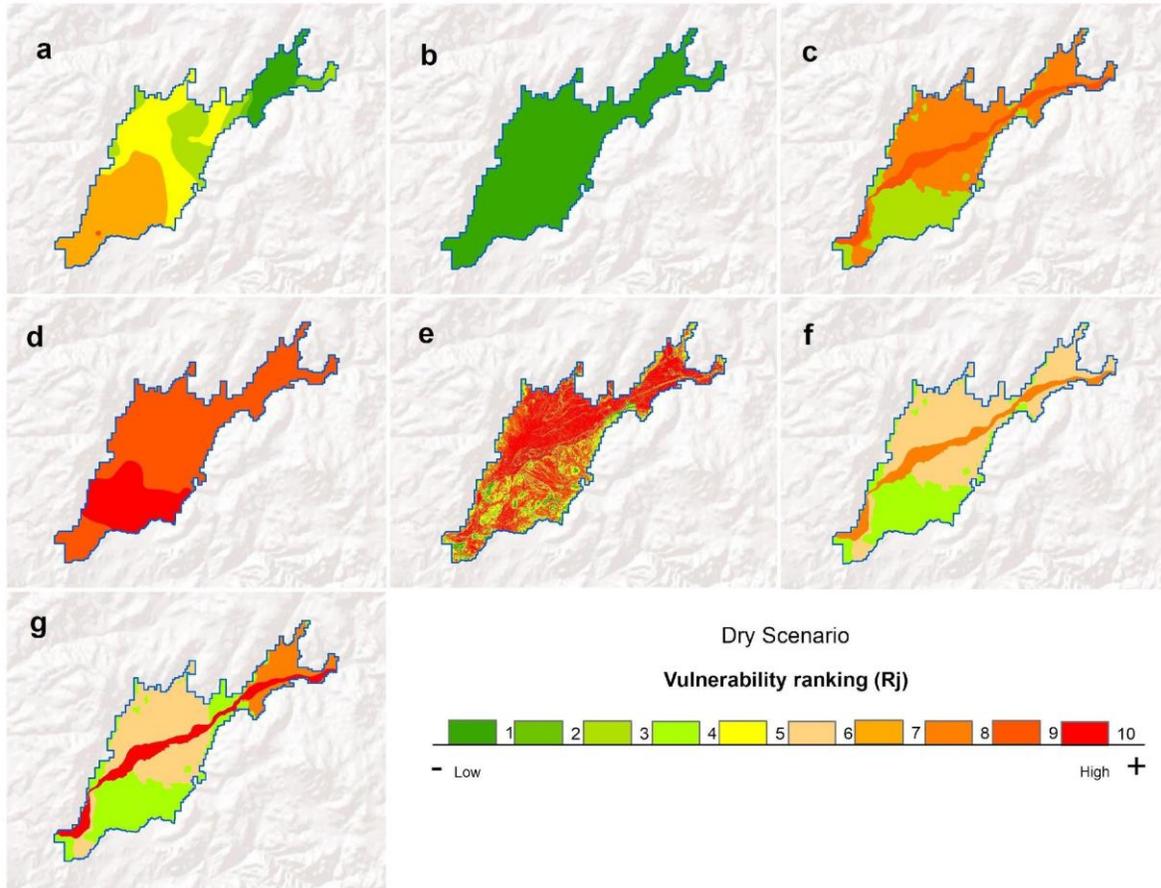


Figure 4. DRASTIC parameters during the dry scenario. (a) = depth to water table, (b) = recharge–water level variation, (c) = aquifer media, (d) = soil, (e) = topography, (f) = impact of the vadose zone, (g) = hydraulic conductivity.

Table 4. Numerical ranking factors (R_j) for each parameter used to calculate the DRASTIC vulnerability index (DVI) [23].

Depth to Water Table (D)		Recharge–Water Level Variation (R)		Aquifer Media (A)		Soil (S)	
Range (m)	R_j	Range (m)	R_j	Type	R_j	Texture	R_j
0–1.5	10	0–5	1	Granodiorite–Tonalite	3	Middle sands	9
1.6–4.6	9	5.1–10	3	Greenstone	3	Coarse sands	10
4.7–9.1	7	10.1–17	6	Dacite–Rhyodacite	3		
9.2–15.2	5	17.1–25	8	Andesite	4		

15.3–22.9	3	>25	9	Sand—Silt	8
23–30.5	2			Alluvium	9
>30.5	1				

Topography (T)		Impact of the Vadose Zone (I)		Hydraulic Conductivity (C)	
Range (%)	Rj	Type	Rj	Category	Rj
0–2	10	Granodiorite—Tonalite	4	Low	4
2–6	9	Diorite		Moderate	6
6–12	5	Dacite—Rhyodacite	4	High	8
12–18	3	Andesite	4	Very High	10
> 18	1	Sand—Silt	4		
		Alluvium	6		
			8		

The level of variation (R) was classified into five rankings: (1) 0–5 m; (3) 5.1–10 m; (6) 10.1–17 m; (8) 17.1–25 m; (9) 4.7–9.1 m; (9) >25 m (Table 4), covering about 61%, 27%, 8%, 3%, and 1%, respectively, of the total study area in the wet scenario (Figure 3a) and 100% for ranking (1) in the dry scenario (Figure 4a).

The following parameters in both scenarios have the same categories, as they are constant over time. The aquifer environment (A) was classified into four rankings: (3) Granodiorite—Tonalite, Greenstone, and Dacite—Rhyodacite; (4) Andesite; (8) Sand—Silt; (9) Alluvium (Table 4), covering about 30%, 1%, 56%, and 13%, respectively, of the total study area (Figures 3c and 4c).

Soil texture (S) was classified into only two rankings: (9) Middle sands and (10) Coarse sands (Table 4), covering about 76% and 24%, respectively, of the total study area (Figures 3d and 4d).

Topography (T) was classified into five rankings by percentage: (10) 0–2%; (9) 2–6%; (5) 6–12%; (3) 12–18%; (1) >18% (Table 4), covering about 33%, 38%, 8%, 10%, and 11%, respectively, of the total study area (Figure 3a).

The impact in the vadose zone (I) was classified into three rankings: (4) Granodiorite—Tonalite, Diorite, and Dacite—Rhyodacite; (6) Andesite; (8) Sand—Silt and Alluvium (Table 4) covering about 31%, 56%, and 13%, respectively, of the total study area (Figures 3f and 4f).

Hydraulic conductivity (C) was classified into four rankings: (4) low; (6) moderate; (8) high; and (10) very high (Table 4), covering about 34%, 41%, 12%, and 13%, respectively, of the total study area (Figures 3g and 4g).

The DRASTIC method was applied to create seven maps for wet and dry scenarios (Figures 3 and 4) with rankings of each parameter of Table 4.

3.2. Vulnerability to Pollution of the Guadalupe Aquifer, Application of the DRASTIC Method

Figures 5 and 6 show the vulnerability level maps of the GA aquifer using the DRASTIC method. The vulnerability level scores in the wet scenario, obtained from the model, showed a unimodal distribution from 82 to a maximum of 202 and those in the dry scenario from a minimum of 69 to 176. The ranges in these scenarios go from 69–105 (low), 106–146 (moderate), 147–187 (high), and 188–202 (very high). The area corresponding to each vulnerability class is shown in Table 5.

Table 5. Area under vulnerability to groundwater pollution in the Guadalupe Aquifer. DVI results in the wet and dry scenarios.

Class Number	Vulnerability	DRASTIC Index Value	Dry Scenario Area (%)	Wet Scenario Area (%)
1	Low	65–105	19	3
2	Moderate	106–146	72	72
3	High	147–187	9	24
4	Very high	188–230	0	1

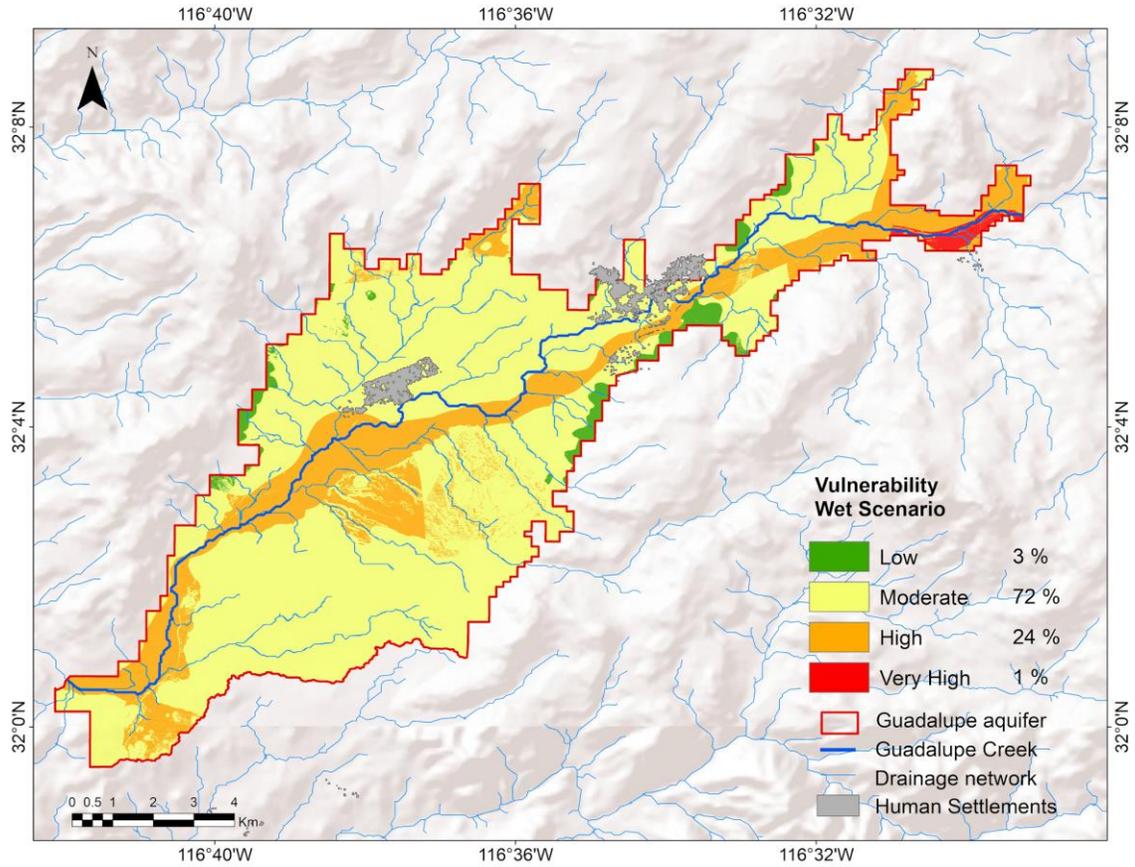


Figure 5. Vulnerability to pollution level in the wet scenario, application of the DRASTIC method.

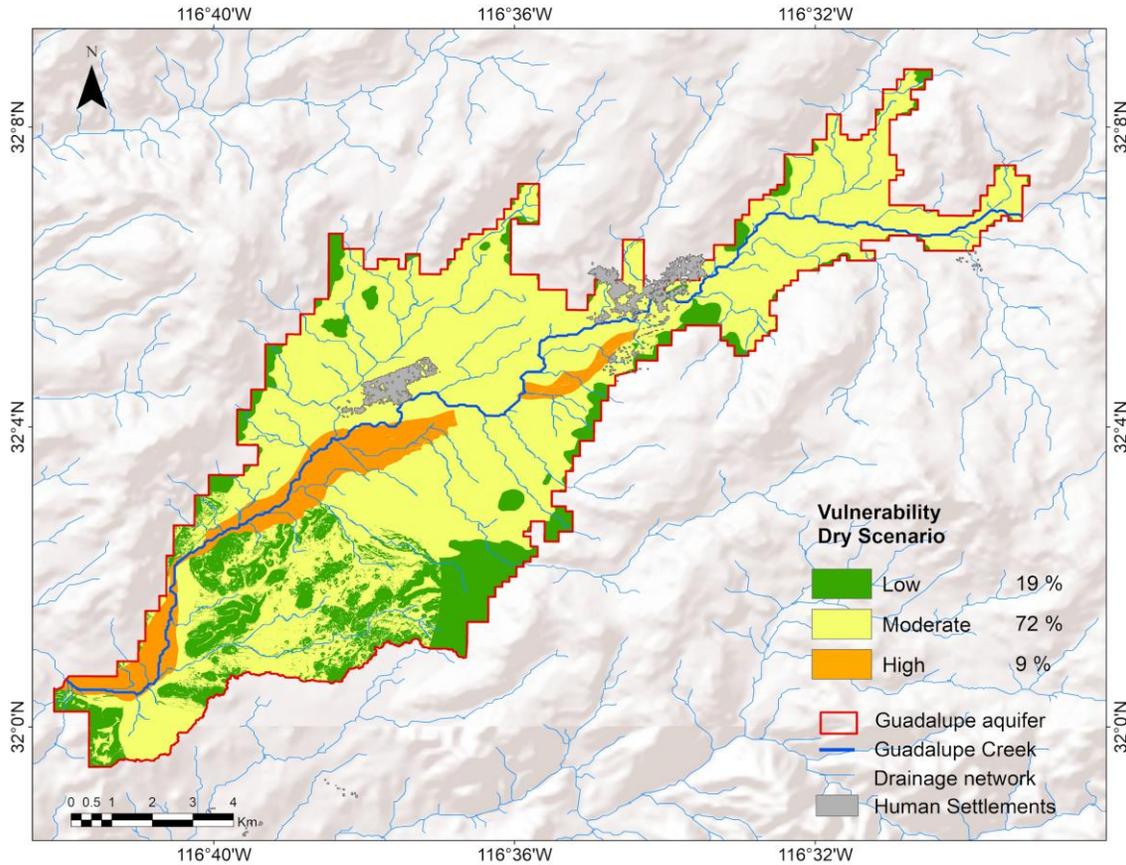


Figure 6. Vulnerability to pollution level in the dry scenario, application of the DRASTIC method.

3.2.1. Wet Scenario

In the wet scenario (Figure 5), the predominant vulnerability zones are classified as moderate according to the resulting map, representing 72% of the GA area (yellow). The depth and water level variation were important parameters for the application of the method, as they are dynamic over time. The results show a range of very high and high vulnerability (red and orange) in the northeastern Calafia area due to the greater water level depth. Likewise, vulnerability is high along the stream bed, considering that this is where the significant accumulation of water and higher hydraulic conductivities are found compared to the rest of the area. It should also be considered that important wells for water extraction for agricultural irrigation are located near these areas' streams. The green areas represent a low vulnerability; mainly due to the type of semi-permeable to impermeable geological material (granodiorite, tonalite, or diorite), they are located at the extremes of the study area.

3.2.2. Dry Scenario

According to the resulting map (Figure 6), only three vulnerability classes are shown, explained by the fact that the unsaturated zone is

quite thick. The low vulnerability category (19%) is mainly distributed in the south of the aquifer (green color) and in the extreme zones of the GA, where the geological material of granodiorite and diorite is found and is absent in the central area of the “El Porvenir and Calafia” zone. However, more than half of the study area (72%) is classified as moderately vulnerable (yellow color); this category is distributed along the aquifer but predominates most of the center of “El Porvenir”, except some areas of the stream. In “Calafia” the moderate category covers the whole center of the zone. The highest indices are calculated for some parts of the center following the course of the stream to the south, which are therefore considered to be of high vulnerability (9%, orange color) due to very permeable areas of coarse sands, high hydraulic conductivity, and smaller level depths (maximum of 5.8 m for the El Porvenir area) concerning the other areas.

3.3. Nitrate Concentration (NO_3^-)

In a pollution vulnerability model, analyzing its results with a parameter representing a potential pollutant is essential. In the present study, groundwater nitrate concentration data from different sites for the years 2001, 2020, and 2021 were used to validate the vulnerability of the aquifer based on the application of the DRASTIC method. Table 6 shows the descriptive statistics of the nitrate concentration results.

Table 6. Nitrate concentration (NO_3^- in the Guadalupe Aquifer.

Year	Number of Samples	Concentration NO_3^- (mg L^{-1})			
		Min	Max	Mean	Standard Deviation
2001 [44]	27	0.44	115.13	26.56	26.29
2020	33	0.25	131.19	19.90	30.82
2021	28	0.08	128.95	30.74	34.76

At some points of the groundwater samples from wells, the spatial distribution of nitrate concentrations exceeds the values recommended by the Mexican Official Standard for water for human consumption NOM-127-SSA1-2021. Concentrations reach maximum values of up to $131.19 \text{ mg L}^{-1} \cdot \text{NO}_3^-$).

A spatial distribution analysis was carried out, where nitrate concentrations were classified in categories using the traffic light technique. The criteria used for the creation of categories were empirically based on the nitrate concentration thresholds established by the permissible limits for drinking water by the NOM-127-SSA1-2021, half of this limit, and the minimum detected in the samples analyzed. Table 7 shows the different categories: good—green from 0.44 to 24.31 mg L^{-1} (indicates a state of equilibrium and compliance with the permissible limits established by the standard), regular—yellow from 24.32 to 48.62 mg L^{-1} (complies with the maximum

permissible limits), bad—orange from 48.63 to 97.24 mg L⁻¹ (exceeds the quality indicators for human use and consumption) and very bad—red from 97.25 to 131.19 mg L⁻¹ (exceeds the permissible limits, in a critical state).

The observed high nitrate concentrations in specific sampled sites are likely attributed to the infiltration of water combined with fertilizers from the agricultural areas and their expansion in the Guadalupe Valley and probably also urban wastewaters near the settlements. Further assessment with nitrogen stable isotopes would be required to further assess the sources of nitrate.

Table 7. Nitrate concentration categories according to NOM-127-SSA1-2021 [35].

	Color	Categories	Min	Max
	Green	Good	0.44	24.31
	Yellow	Fair	24.32	48.62
	Orange	Bad	48.63	97.24
	Red	Very bad	97.25	131.19

Areas of high and very high vulnerability indicate groundwater contamination and could be further worsened by agrochemicals as it is an important agricultural area. Nitrates naturally occur at very low concentrations in groundwater, but an increasing trend indicates pollution.

To compare the groundwater system's pollution state with the vulnerability zones, we used the concentration of nitrate (NO₃⁻). After overlaying the concentrations with the vulnerability map for 2001 (Figure 7), only two sites with a "very bad" concentration (red) are present, i.e., exceeding the permissible limits for water for human use and consumption, according to NOM-127-SSA1-2021. These sites are located in the center of the El Porvenir area, where the most predominant activity is agriculture and where, according to the aquifer contamination vulnerability analysis, it is of moderate vulnerability, bordering the high vulnerability zone. For the same year, there are ten sites with "fair" nitrate concentrations (yellow); six in the Calafia area and four in El Porvenir, where three coincide with high vulnerability zones. Fifteen of them are in the "good" (green) category, and eleven are located in the Calafia zone, in moderate and high vulnerability areas.

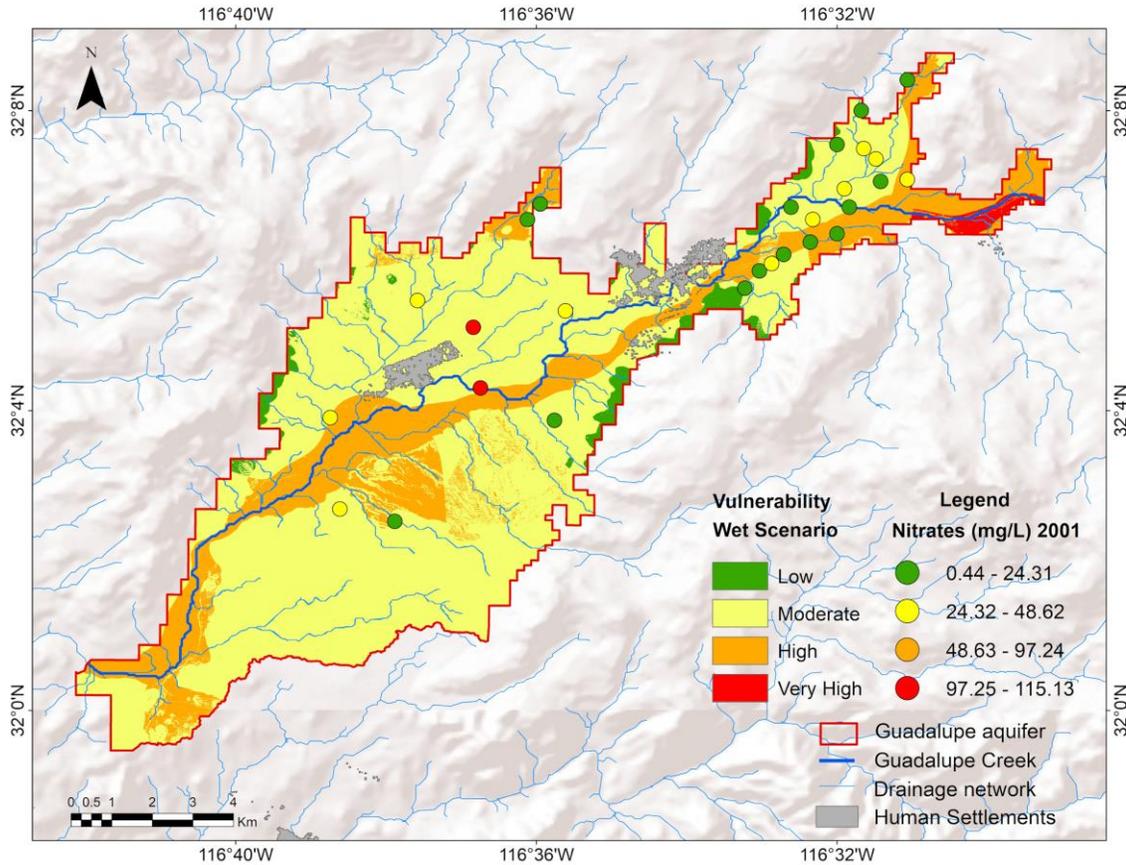


Figure 7. Nitrate concentration 2001 with areas of vulnerability levels to aquifer pollution.

The distribution and concentration of nitrate in 2020 (Figure 8) show in the center and southwest of the aquifer, the concentrations of two sites in the “very bad” category (red), which indicate very high nitrate concentration levels; and one of them is located in the southwest zone of the Guadalupe stream with a high vulnerability type, and the other is located between the urban zone and the stream, in the center of the El Porvenir zone, falling in a moderate vulnerability type. This year there are no nitrate concentrations in the “bad” category (orange) and seven sites in the regular category (yellow); of these seven, five are in areas of high vulnerability to pollution, following the course of the stream, and two fall into moderate vulnerability. The remaining twenty-four samples correspond to the good category; three of them fall in zones of very high vulnerability to the northeast of the Calafia zone, twelve samples fall on or near high vulnerability zones, and the rest randomly fall in moderate vulnerability zones.

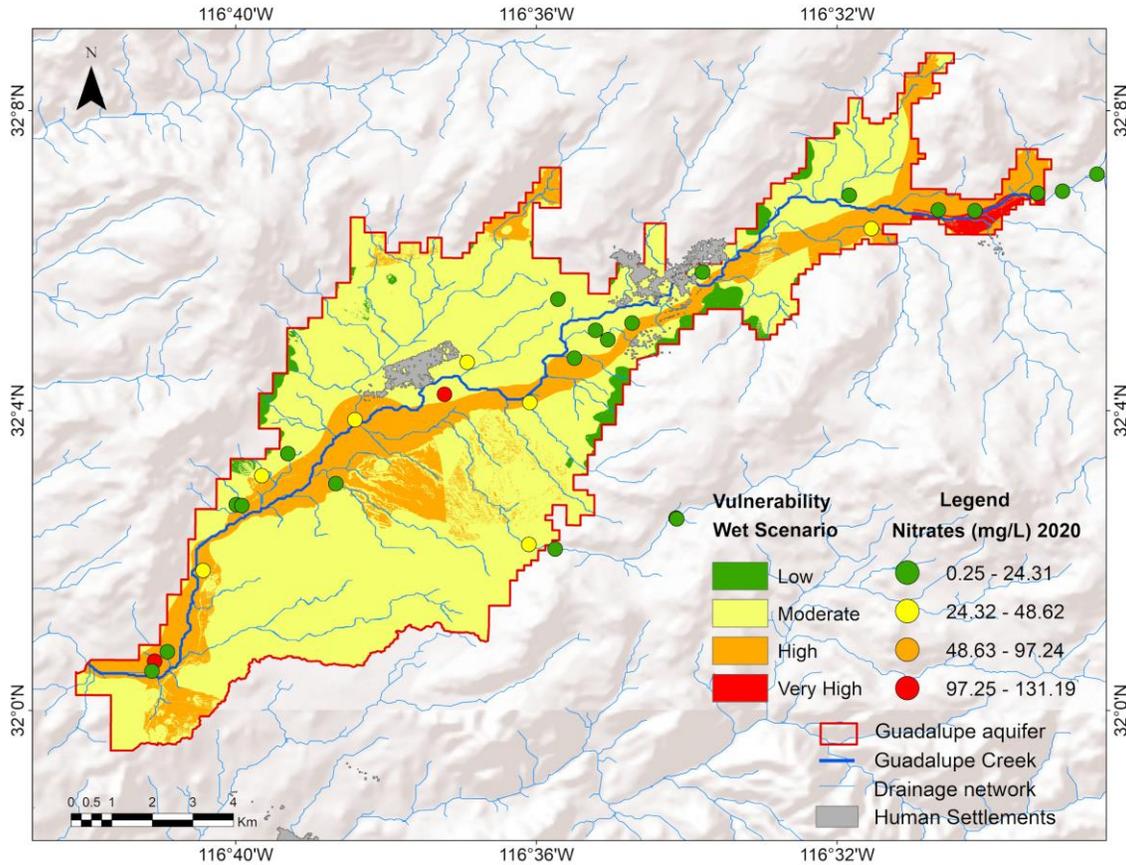


Figure 8. Nitrate concentration 2020 with areas of vulnerability levels to aquifer pollution.

For 2021 (Figure 9), the four categories assigned to nitrate concentration were detected. Three samples are in the “very bad” category (red); the first is located in the center, between the stream and the urban area, in an area of moderate vulnerability, and the other two are located southwest of the stream in an area of high vulnerability, coinciding with some of them changing negatively in category over time, starting in the area of El Porvenir, until the end of the stream channel shown in the map, exceeding the permissible limits and coinciding with a high vulnerability to pollution of the aquifer. Three samples in the “bad” concentration category (orange) are in or very close to the stream’s course, with a moderate vulnerability type and one in high vulnerability. On the other hand, seven samples were found in the “regular” category (yellow); five fall into moderate vulnerability zones and two are in high vulnerability. Finally, the remaining 15 nitrate concentration samples that are in the “good” (green) category, which is equivalent to an acceptable nitrate concentration for the site, are distributed along the course of the stream, located between the moderate and high vulnerability zones, and two samples at the limits of very high vulnerability.

The resulting groundwater vulnerability zones were verified using the AUC (area under the curve) [59] based on nitrate concentration data for the year 2021. Figure 10 shows the estimated AUC validation curve for the DRASTIC vulnerability map. The AUC values were 0.597 on the vulnerability category scale. The highest values of the AUC curve demonstrated that the method applied to predict the moderate category vulnerability of aquifers has an acceptable fit to the results. However, this is not the case for high-vulnerability areas. According to information published by [11], water flow direction in the GA has a general direction from NE to NW, with a focused N-S direction in the Porvenir zone regions caused by a steep decrease in water table levels due to intense pumping. In this specific site, categories of moderate and high vulnerability to contamination were observed (on the course of the Guadalupe stream), as well as high levels of nitrate concentration. Furthermore, a land use and vegetation map of the GV (Figure 11) shows that there is now evident correlation between land use and nitrate concentrations for the same year, as well as the regional distribution of nitrate concentrations for the same year. A much higher resolution of water samples is required to fully assess factors influencing the distribution of nitrate concentrations.

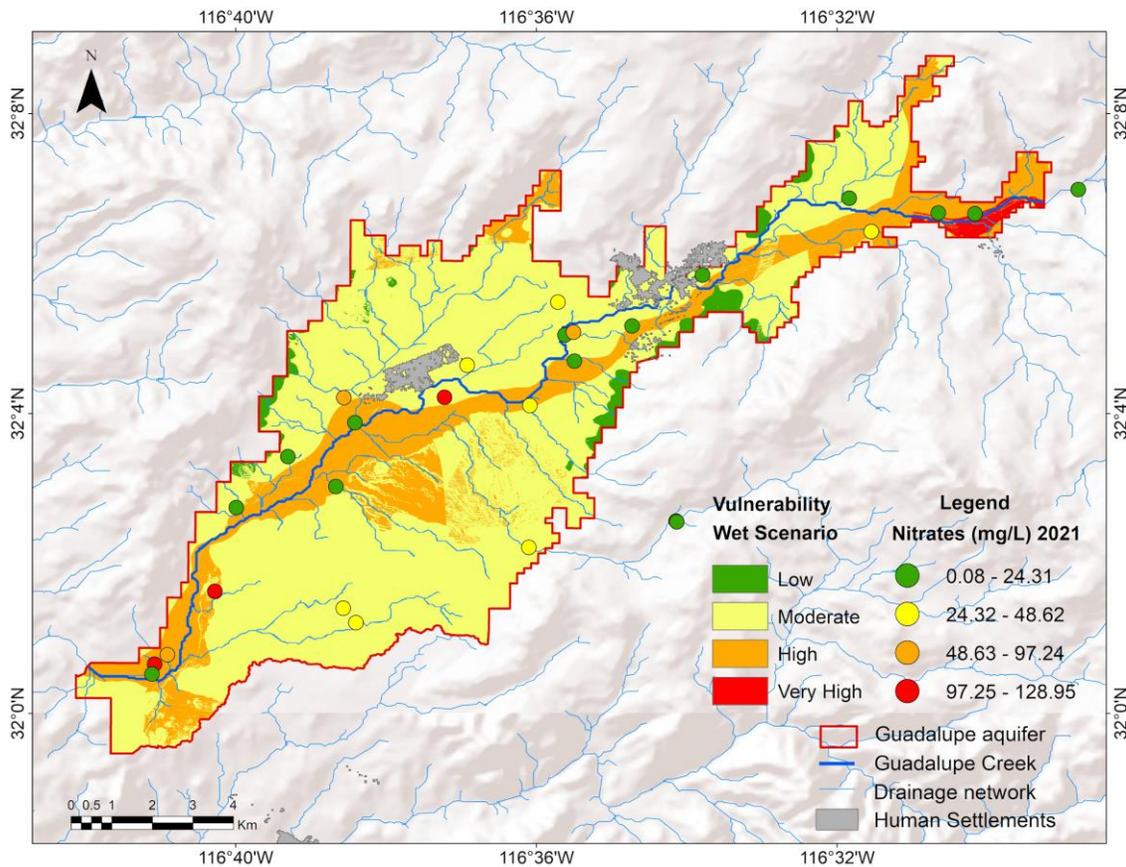


Figure 9. Nitrate concentration 2021 with areas of vulnerability levels to aquifer pollution.

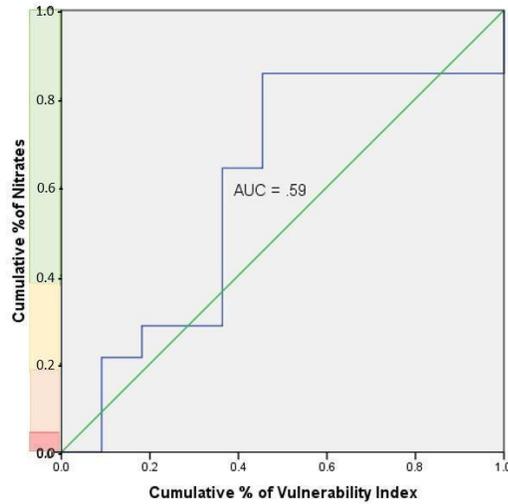


Figure 10. DRASTIC vulnerability index using nitrate concentrations for 2021. The blue line refers to the ROC (Receiver Operating Characteristics) curve and the green line is a reference to obtain the AUC (area under the curve).

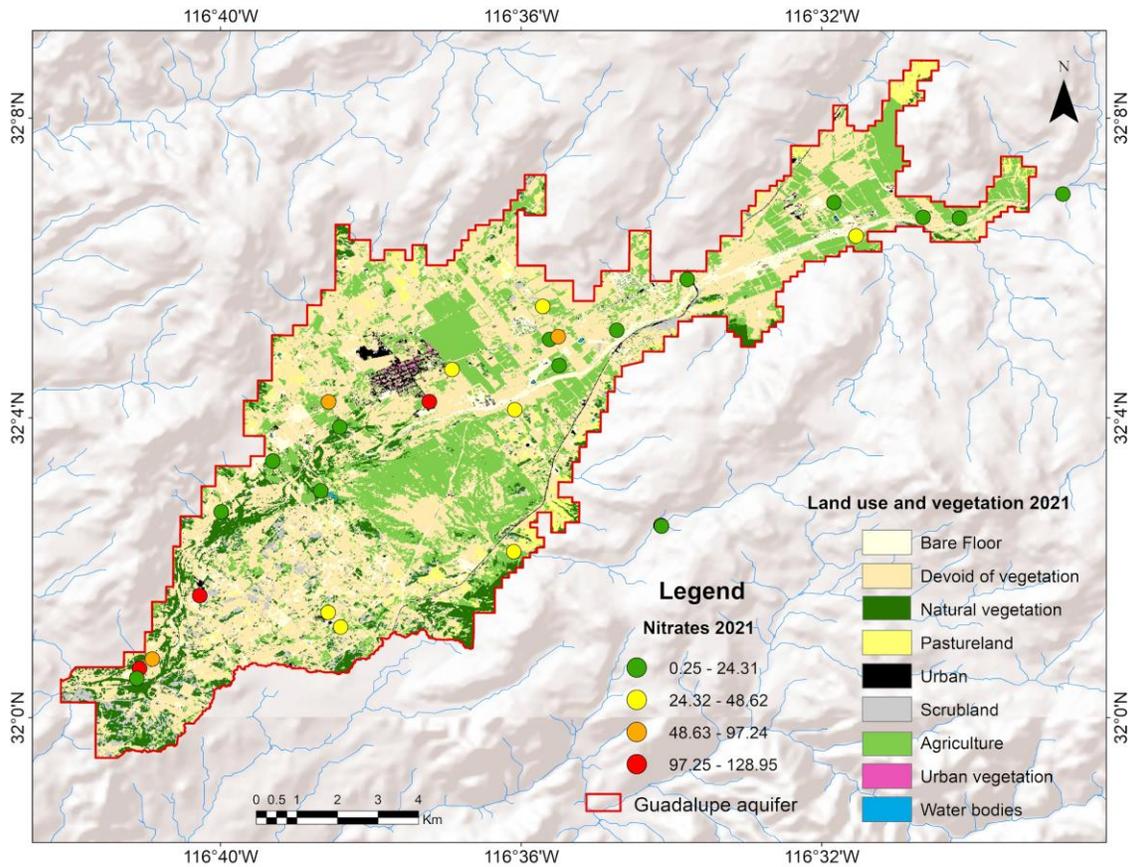


Figure 11. Land use and vegetation in the Guadalupe Valley with nitrate concentrations in 2021. Prepared by the authors with Google Earth Engine, based on [60].

4. Limitations and Recommendations

Despite its advantages as an integrated approach to assess groundwater vulnerability across multiple layers, the DRASTIC method has challenges. A significant limitation emerges when essential data for aquifer assessment, such as precise aquifer lithology and vertical hydraulic conductivity, are unavailable. Information is necessary to ensure the accuracy of the DRASTIC assessment. Another consideration is the method's reliance on assigned weights and numerical values for each indicator, introducing subjectivity into the results. The method's applicability is context-dependent, demanding a nuanced understanding of site-specific characteristics, particularly the primary activities in the area that could influence the aquifer. In our specific case, a key constraint lies in the availability of up-to-date hydrogeological data. Emphasizing these limitations underscores the need for continuous efforts to enhance data quality and availability in the GA. Furthermore, the transport of contaminants, like nitrate, can be influenced by microbial activity, geochemical reactions, and/or subsurface heterogeneity, and their possible sources such as fertilizers, wastewater, or manure need to be assessed in more detail. All these biases and gaps in information need to be considered in order to increase the reliability on vulnerability methods used for management purposes. Future research should focus on monitoring and mitigating sources of nitrate pollution and exploring additional parameters to improve the accuracy of vulnerability assessments. In potentially vulnerable locations, preventive and management measures must be taken in the aquifer through restrictions on groundwater abstraction and moderation of agrochemical use in predominantly agricultural regions. It is also essential to closely monitor groundwater quality (on a higher resolution) and variation to generate detailed information for further studies in the AG.

5. Conclusions

The resulting DRASTIC map of vulnerability to groundwater pollution of the study area for two scenarios (wet and dry) revealed that there are different zones of vulnerability. depending mainly on the depth of groundwater level and the variation of groundwater level from one season to another, also obtaining a significant variation in the values of the index when the zones have different geological, sedimentological, slope, and conductivity characteristics. Specifically, the pollution vulnerability map in the wet scenario revealed that alluvial areas with shallow depths (where groundwater is closer to the land surface) have the highest vulnerability indices. In contrast, areas with steeper slopes, less porosity, or shallower permeable material and deeper depths have the lowest vulnerability indices.

With the application of the DRASTIC method, "very high" vulnerabilities were found in the northwest area of Calafia with dimensionless values from 188 to 202. According to the method, the maximum possible value would be 230. Although the maximum value of 230 was not reached in any scenario, a worse scenario (more areas of "very high" vulnerability) could still occur if groundwater levels were

to increase, resulting in a lower thickness in the vadose zone. The results indicate varying degrees of vulnerability in the Guadalupe Valley aquifer. High vulnerability zones were identified in areas with shallow groundwater depth, permeable soils, and high nitrate concentrations. These zones coincide with regions of intense agricultural activity, suggesting a direct relationship between anthropogenic practices and aquifer contamination. In contrast, low-vulnerability areas were characterized by deep groundwater levels, impermeable soils, and minimal nitrate concentrations. According to the method and the results of the vulnerability map, the determining indicators to indicate possible areas prone to contamination are the depth level and the geology in the vadose zone.

In the Calafia zone, to the northeast of the aquifer, zones of “very high” vulnerability to pollution were found; however, high concentrations of nitrates were not found because it is one of the leading recharge zones with greater level variation, which allows the available water to serve for the diffusion and dilution of contaminants by a greater flow velocity, as it has high hydraulic conductivity and short residence times. The zones with very high vulnerability have a shallower depth (0.8 to 4.6 m), shallow slopes (0 to 6%), and alluvial material to the northeast of the aquifer.

The vulnerability maps of the GA provide information on the areas susceptible to pollution, considering the scenarios (wet and dry), which coincide mostly in the areas of high and very high vulnerability, with a tendency to increase in areas of vulnerability. As for water quality, which was compared taking into account the concentration of nitrate, its behavior is increasing over time, significantly increasing in areas of high and moderate vulnerability, which indicates the presence of pollutants of anthropogenic origin. The site with the highest nitrate concentrations for the years 2020 and 2021 (131.19 and 128.95 mg L⁻¹, respectively) is located in the center of the aquifer, very close to the stream, where there are maximum water table depths of 9 m and minimal level variation, in the porous medium there is alluvium, medium to coarse sands and silt, and topographic slopes of 0 to 6% predominate. These characteristics indicate a site prone to high infiltration of pollutants and long residence times.

Integrating the DRASTIC method with nitrate analysis provided a local understanding of the aquifer’s vulnerability to pollution. The results can be relevant inputs for land-use planning, groundwater management strategies, and the implementation of preventive measures to safeguard the water resources of the Guadalupe Valley.

Author Contributions: Conceptualization, G.D.-G., F.J.D.-T.-G., and L.W.D.; methodology, G.D.-G.; investigation, G.D.-G.; resources, L.W.D.; data curation, G.D.-G.; writing—original draft preparation, G.D.-G.; writing—review and editing, L.W.D., F.J.D.-T.-G., M.V.-C. and G.S.; funding acquisition, L.W.D. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) Project Number: A1-S 22656, IRADES.

Data Availability Statement: The data presented in this study are available on request from the corresponding author.

Acknowledgments: We thank the National Council for Humanities, Science and Technology (CONAHCYT) for the support provided to this research, through the project grant A1-S 22656, IRADES and a scholarship to G.D.G for her PhD studies. We thank PRODEP and CONAHCYT for postdoctoral grants for F.T.G at UABC. Also, J. Lafarga for sharing the groundwater depth information collected by COTAS Guadalupe.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Paris, M. *La Seguridad Hídrica y Los Objetivos de Desarrollo Sostenible Manual de Capacitación Para Tomadores de Decisión. La Seguridad*; UNESCO: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation: Montevideo, Uruguay, 2020; Volume 53.
2. FAO. *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture (SOLAW)*; FAO: Rome, Italy, 2011; ISBN 9781849713269.
3. Havryliuk, R.; Savchenko, S. Water Resources Assessment. In *Clean Water and Sanitation*; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2022, pp. 871–883. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95846-0_102.
4. Gale, I.; Dillon, P. *Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in Semi-Arid Areas*; Gale, I., Ed.; United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization (UNESCO): Paris, France, 2005; pp. 1–33.
5. Hernández, R.; Martínez, L.; Peñuela, L.; Rivera, S. Gestión Del Agua Subterránea En Los Acuíferos de La Cuenca Del Río Ayuquila-Armería En Jalisco y Colima, México. *Región Y Soc.* **2019**, *31*, 26. <https://doi.org/10.22198/rys2019/31/1093>.
6. Foster, S.; Hirata, R. Determinación Del Riesgo de Contaminación de Aguas Subterráneas: GOD. *Cent. Panam. Ing. Sanit. y Ciencias del Ambient./Organ. Mund. la Salud* **1991**, *2*, 80.
7. Su, C.; Li, Z.; Wang, W.; Cheng, Z.; Zheng, Z.; Chen, Z. Key Factors Dominating the Groundwater Chemical Composition in a Grain Production Base: A Case Study of Muling–Xingkai Plain, Northeast China. *Water* **2022**, *2222*, 14. <https://doi.org/10.3390/w14142222>.
8. Merem, E.; Yerramilli, S.; Twumasi, Y.; Wesley, J.; Robinson, B.; Richardson, C. The Applications of GIS in the Analysis of the Impacts of Human Activities on South Texas Watersheds. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2011**, *8*, 2418–2446. <https://doi.org/10.3390/ijerph8062418>.
9. Bortolini, L.; Maucieri, C.; Borin, M. A Tool for the Evaluation of Irrigation Water Quality in the Arid and Semi-Arid Regions. *Agronomy* **2018**, *8*, 23. <https://doi.org/10.3390/agronomy8020023>.
10. Huang, T.; Pang, Z.; Edmunds, W.M. Soil Profile Evolution Following Land-Use Change: Implications for Groundwater Quantity and Quality. *Hydrol. Process.* **2012**, *27*, 15. <https://doi.org/10.1002/hyp.9302>.
11. Daesslé, L.W.; Andrade-Tafoya, P.D.; Lafarga-Moreno, J.; Mahlkecht, J.; van Geldern, R.; Beramendi-Orosco, L.E.; Barth, J.A.C. Groundwater Recharge Sites and Pollution Sources in the Wine-Producing Guadalupe Valley (Mexico): Restrictions and Mixing Prior to Transfer of Reclaimed Water from the US-México Border. *Sci. Total Environ.* **2020**, *713*, 136715. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136715>.
12. Rakotondrabe, F.; Ngoupayou, J.; Mfonka, Z.; Rasolomanana, E.H.; Nyangono Abolo, A.J.; Asone, B.L.; Ako Ako, A.; Rakotondrabe, M.H. Assessment of Surface Water Quality of Bétaré-Oya Gold Mining Area (East-Cameroon). *J. Water Resour. Prot.* **2017**, *09*, 960–984. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2017.98064>.
13. Gogu, R.; Dassargues, A. Current Trends and Future Challenges in Groundwater Vulnerability Assessment Using Overlay and Index Methods. *Environ. Geol.* **2000**, *39*, 549–559. <https://doi.org/10.1007/s002540050466>.
14. Foster, S.; Hirata, R.; Gomes, D.; D'Elia, M.; Paris, M. *Groundwater Quality Protection: A Guide for Water Utilities, Municipal Authorities, and Environment Agencies*; Washington, D.C., 2003; ISBN 84-8476-146-0.
15. Orellana, J.; Perles, M.; Causapé, J. A Methodology for Assessing Groundwater Pollution Hazard by Nitrates from Agricultural Sources: Application to the Gallocanta Groundwater Basin (Spain). *Sustainability* **2021**, *13*, 6321. <https://doi.org/10.3390/su13116321>.

16. Nadiri, A.A.; Norouzi, H.; Khatibi, R.; Gharekhani, M. Groundwater DRASTIC Vulnerability Mapping by Unsupervised and Supervised Techniques Using a Modelling Strategy in Two Levels. *J. Hydrol.* **2019**, *574*, 744–759. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.039>.
17. Elçi, A. Calibration of Groundwater Vulnerability Mapping Using the Generalized Reduced Gradient Method. *J. Contam. Hydrol.* **2017**, *207*, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2017.10.008>.
18. Bhuvaneswaran, C.; Ganesh, A. Spatial Assessment of Groundwater Vulnerability Using DRASTIC Model with GIS in Uppar Odai Sub-Watershed, Nandiyar, Cauvery Basin, Tamil Nadu. *Groundw. Sustain. Dev.* **2019**, *9*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100270>.
19. Aller, L.; Bennett, T.; Lehr, J.H.; Petty, R.J.; Hackett, G. *DRASTIC: A Standardized Method for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings*; Environmental Research Laboratory Office of Research and Development U.S.: Dublin, Ohio, 1987.
20. Bai, L.; Wang, Y.; Meng, F. Application of DRASTIC and Extension Theory in the Groundwater Vulnerability Evaluation. *Water Environ. J.* **2012**, *26*, 381–391. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2011.00298.x>.
21. Meng, L.; Zhang, Q.; Liu, P.; He, H.; Xu, W. Influence of Agricultural Irrigation Activity on the Potential Risk of Groundwater Pollution: A Study with Drastic Method in a Semi-Arid Agricultural Region of China. *Sustainability* **2020**, *12*, 1954. <https://doi.org/10.3390/su12051954>.
22. Abdeslam, I.; Fehdi, C.; Djabri, L. Application of Drastic Method for Determining the Vulnerability of an Alluvial Aquifer: Morsott—El Aouinet North East of Algeria: Using Arcgis Environment. *Energy Procedia* **2017**, *119*, 308–317. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.114>.
23. Neshat, A.; Pradhan, B.; Dadras, M. Groundwater Vulnerability Assessment Using an Improved DRASTIC Method in GIS. *Resour. Conserv. Recycl.* **2014**, *86*, 74–86. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.02.008>.
24. Jia, Z.; Bian, J.; Wang, Y.; Wan, H.; Sun, X.; Li, Q. Assessment and Validation of Groundwater Vulnerability to Nitrate in Porous Aquifers Based on a DRASTIC Method Modified by Projection Pursuit Dynamic Clustering Model. *J. Contam. Hydrol.* **2019**, *226*, 103522. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2019.103522>.
25. Hernández, A.; Reyna, A.; Sánchez, E.; Cabral, E.; Carrera, J.; Martínez, P.; Macías, S.; Falorni, G.; Colombo, D. The DRASTIC-Sg Model: An Extension to the DRASTIC Approach for Mapping Groundwater Vulnerability in Aquifers Subject to Differential Land Subsidence, with Application to Mexico City. *Hydrogeol. J.* **2014**, *22*, 1469–1485. <https://doi.org/10.1007/s10040-014-1130-4>.
26. Franco Plata, R. Adecuación del Método de Evaluación de Vulnerabilidad de Acuíferos (DRASTIC), Mediante El Uso Del Trazado de Partículas en El Acuífero del Curso Alto Del Río Lerma, Estado de México. Master's Thesis, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, Mexico, 2002.
27. Hasan, M.; Islam, M.A.; Aziz Hasan, M.; Alam, M.J.; Peas, M.H. Groundwater Vulnerability Assessment in Savar Upazila of Dhaka District, Bangladesh—A GIS-Based DRASTIC Modeling. *Groundw. Sustain. Dev.* **2019**, *9*, 100220. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100220>.
28. Pacheco, F.A.L.; Martins, L.M.O.; Quinha, M.; Oliveira, A.S.; Sanches Fernandes, L.F. Modification to the DRASTIC Framework to Assess Groundwater Contaminant Risk in Rural Mountainous Catchments. *J. Hydrol.* **2018**, *566*, 175–191. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.013>.
29. Ceballos, R.P.; Ávila, J.P. Vulnerabilidad Del Agua Subterránea a La Contaminación de Nitratos En El Estado de Yucatán. *Ingeniería* **2004**, *8*, 33–42.
30. Liang, J.; Li, Z.; Yang, Q.; Lei, X.; Kang, A.; Li, S. Specific Vulnerability Assessment of Nitrate in Shallow Groundwater with an Improved DRSTIC-LE Model. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **2019**, *174*, 649–657. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.03.024>.
31. Mfonka, Z.; Ndam Ngoupayou, J.R.; Kpoumie, A.; Ndjigui, P.D.; Zammouri, M.; Ngouh, A.N.; Mouncherou, O.F.; Mfochivé, O.F.; Rakotondrabe, F. Hydrodynamic and Groundwater Vulnerability Assessment of the Shallow Aquifer of the Foumban Locality (Bamoun Plateau, Western-Cameroon). *Arab. J. Geosci.* **2019**, *12*, 165. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4328-x>.
32. Pórcel, R.A.D.; Schüth, C.; De León-Gómez, H.; Hoppe, A.; Lehné, R. Land-Use Impact and Nitrate Analysis to Validate DRASTIC Vulnerability Maps Using a GIS Platform of Pablillo River Basin, Linares, N.L., Mexico. *Int. J. Geosci.* **2014**, *05*, 1468–1489. <https://doi.org/10.4236/ijg.2014.512120>.

33. Singh, S.; Anil, A.G.; Kumar, V.; Kapoor, D.; Subramanian, S.; Singh, J.; Ramamurthy, P.C. Nitrates in the Environment: A Critical Review of Their Distribution, Sensing Techniques, Ecological Effects and Remediation. *Chemosphere* **2022**, *287*, 131996. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131996>.
34. Böhlke, J.K. Groundwater Recharge and Agricultural Contamination. *Hydrogeol. J.* **2002**, *10*, 153–179. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0183-3>.
35. Gómez, H.; Del Campo, M.; Esteller, M.; Velasco, F.; Alva, E.; Cruz, A. Assessment of Nitrate and Heavy Metal Contamination of Groundwater Using the Heavy Metal Pollution Index: Case Study of Linares, Mexico. *Environ. Earth Sci.* **2020**, *79*, 433. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09164-3>.
36. California Water Boards. Recursos Para Agricultores: Nitrato En El Agua Potable. *Programa Regul. Agrícola* **2013**, 1–4.
37. Su, X.; Wang, H.; Zhang, Y. Health Risk Assessment of Nitrate Contamination in Groundwater: A Case Study of an Agricultural Area in Northeast China. *Water Resour. Manag.* **2013**, *27*, 3025–3034. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0330-3>.
38. Ward, M.H. Too Much of a Good Thing? Nitrate from Nitrogen Fertilizers and Cancer. *Rev. Environ. Health* **2009**, *24*, 357–363. <https://doi.org/10.1515/REVEH.2009.24.4.357>.
39. Figueroa-Núñez, A.; Campos-Gaytán, J.R. Simulación Numérica Del Agua Subterránea En El Acuífero Guadalupe, Ensenada, Baja California, México: Caso de Estudio, Condiciones Estacionarias y Transitorias. *Investig. y Cienc. la Univ. Autónoma Aguascalientes* **2018**, *75*, 46–54.
40. CONAGUA. Actualización de La Disponibilidad Media Anual de Agua En El Acuífero Guadalupe (0207). 2015. Available online: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103407/DR_0207.pdf (accessed on 15 may 2023).
41. CONAGUA. Actualización de La Disponibilidad Media Anual de Agua En El Acuífero Guadalupe (0207). 2020. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/BajaCalifornia/DR_0207.pdf (accessed on 15 may 2023).
42. CONAGUA Actualización Hidrogeológica Del Acuífero Guadalupe (0207), Estado De Baja California. 2017. Available online: https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Disponibilidad_Acuiferos.html (accessed on 27 october 2023).
43. Daesslé, L.W.; Mendoza-Espinosa, L.G.; Camacho-Ibar, V.F.; Rozier, W.; Morton, O.; Van Dorst, L.; Lugo-Ibarra, K.C.; Quintanilla-Montoya, A.L.; Rodríguez-Pinal, A. The Hydrogeochemistry of a Heavily Used Aquifer in the Mexican Wine-Producing Guadalupe Valley, Baja California. *Environ. Geol.* **2006**, *51*, 151–159. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0318-x>.
44. Andrade, D.P. Zonificación Hidrogeológica e Hidrogeoquímica Del Acuífero de Valle de Guadalupe, B.C., Universidad Autónoma de Baja California. Master's Thesis, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada Mexico, 2019.
45. Del Toro Guerrero, F.J.; Kretzschmar, T.; Hinojosa Corona, A. Estimacion del Balance Hidrico en Una Cuenca Semiarida, El Mogor, Baja California, México. *Tecnol. y Ciencias del Agua* **2014**, *5*, 69–81.
46. Saiz-Rodríguez, J.A.; Lomeli Banda, M.A.; Salazar-Briones, C.; Ruiz-Gibert, J.M.; Mungaray-Moctezuma, A. Allocation of Groundwater Recharge Zones in a Rural and Semi-Arid Region for Sustainable Water Management: Case Study in Guadalupe Valley, Mexico. *Water* **2019**, *11*, 1586. <https://doi.org/10.3390/w11081586>.
47. Del Toro-Guerrero, F.J.; Vivoni, E.R.; Kretzschmar, T.; Runquist, S.H.B.; Vázquez-González, R. Variations in Soil Water Content, Infiltration and Potential Recharge at Three Sites in a Mediterranean Mountainous Region of Baja California, Mexico. *Water* **2018**, *10*, 7–9. <https://doi.org/10.3390/w10121844>.
48. Doerfliger, N.; Jeannin, P.; Zwahlen, F. Water Vulnerability Assessment in Karst Environments: A New Method of Defining Protection Areas Using a Multi-Attribute Approach and GIS Tools (EPIK Method). *Environ. Geol.* **1999**, *39*, 165–176.
49. Chamanehpour, E.; Sayadi, M.H.; Yousefi, E. The Potential Evaluation of Groundwater Pollution Based on the Intrinsic and the Specific Vulnerability Index. *Groundw. Sustain. Dev.* **2020**, *10*, 100313. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100313>.
50. Khosravi, K.; Sartaj, M.; Tsai, F.T.C.; Singh, V.P.; Kazakis, N.; Melesse, A.M.; Prakash, I.; Tien Bui, D.; Pham, B.T. A Comparison Study of DRASTIC Methods with Various Objective Methods for Groundwater Vulnerability Assessment. *Sci. Total Environ.* **2018**, *642*, 1032–1049. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.130>.

51. Puerta, R.; Rengifo, J.; Bravo, N. ARCGIS BÁSICO 10, ESRI, Universidad Nacional Agraria De La Selva, 2011. Available online: <https://geoinnova.org/libro/manual-de-arcgis-10-basico/> (accessed on 14 february 2022).
52. QGIS Development Team QGIS Desktop 3.22 User Guide. 2022, 1393. Available online: <https://docs.qgis.org/3.22/pdf/en/QGIS-3.22-DesktopUserGuide-en.pdf> (accessed on 16 July 2023).
53. Servicio Geológico Mexicano Carta Geológico-Minera Francisco Zarco I11-D82, Baja California. 2001. Available online: <https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/#>. (accessed on 28 January 2022).
54. Campos-Gaytan, J.R.; Kretschmar, T.; Herrera-Oliva, C.S. Future Groundwater Extraction Scenarios for an Aquifer in a Semiarid Environment: Case Study of Guadalupe Valley Aquifer, Baja California, Northwest Mexico. *Environ. Monit. Assess.* **2014**, *186*, 7961–7985. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3980-6>.
55. Esteller, M.; Quentin, E.; Díaz, C. Uso De Sistemas de Información Geográfica (SIG) Para la Determinación de Parámetros Utilizados en La Construcción de Mapas de Vulnerabilidad de Acuíferos. *Rev. Latino-Americana Hidrogeol.* **2002**, *2*, 17–30. <https://doi.org/10.5380/hg.v2i0.2631>.
56. Thermo Fisher Scientific Inc. *Thermo Scientific Dionex Aquion Ion Chromatography System Operator's Manual*; Thermo Fisher Scientific Inc.: Munich, Germany, 2016; pp. 1–3. Available online: <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/CMD/manuals/man-22176-97006-aquion-rfic-man2217697006-en.pdf> (accessed on 14 March 2022).
57. Kurczyn-Robledo, J.A.; Kretschmar, T.; Hinojosa-Corona, A. Evaluación del Escurrimiento Superficial en el Noreste del Valle de Guadalupe, B.C., México, Usando el Método de Curvas Numeradas y Datos de Satélite. *Rev. Mex. Ciencias Geol.* **2007**, *24*, 1–14.
58. Umar, M.; Khan, S.N.; Arshad, A.; Aslam, R.A.; Khan, H.M.S.; Rashid, H.; Pham, Q.B.; Nasir, A.; Noor, R.; Khedher, K.M.; et al. A Modified Approach to Quantify Aquifer Vulnerability to Pollution towards Sustainable Groundwater Management in Irrigated Indus Basin. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2022**, *29*, 27257–27278. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17882-9>.
59. Manjarrez-Domínguez, C.; Uc-Campos, M.I.; Esparza-Vela, M.E.; Baray-Guerrero, M. del R.; Giner-Chávez, O.; Santellano-Estrada, E. Geospatial-Temporal Dynamics of Land Use in the Juárez Valley: Urbanization and Displacement of Agriculture. *Sustainability* **2023**, *15*, 8499. <https://doi.org/10.3390/su15118499>.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

11. Integración de zonas de vulnerabilidad específica

La sobreposición espacial de zonas de vulnerabilidad intrínseca (resultado de la aplicación de método DRASTIC), con los tipos de cobertura del suelo identificados en la zona del acuífero dieron como resultado, un nuevo escenario de análisis específico sobre la vulnerabilidad a la contaminación a la que está expuesta el acuífero, ya que combina sus características físico geográficas naturales, con un tipo de presión antropogénica como es la actividad agrícola en el Valle de Guadalupe.

Los resultados de la aplicación del método DRASTIC, se categorizaron de acuerdo a los rangos y se asignó un peso que caracteriza la vulnerabilidad intrínseca tanto en el escenario húmedo como en el escenario seco, como se observa en el Tabla 11.1

Tabla 11.1 Pesos de la vulnerabilidad intrínseca como acuerdo del método DRASTIC.

Vulnerabilidad Intrínseca WET			Vulnerabilidad Intrínseca DRY		
DRASTIC_WET	Exposición natural	Peso	DRASTIC_DRY	Exposición natural	Peso
82-105	Baja	1	69-105	Baja	1
106-146	Moderada	2	106-146	Moderada	2
147-187	Alta	3	147-176	Alta	3
188-202	Muy Alta	4		Muy Alta	4

11.1 Ponderación por tipo de cobertura

En la Figura 11.1 se muestran espacialmente las categorías de vulnerabilidad de acuerdo al tipo de cobertura del suelo identificado en la zona de estudio.

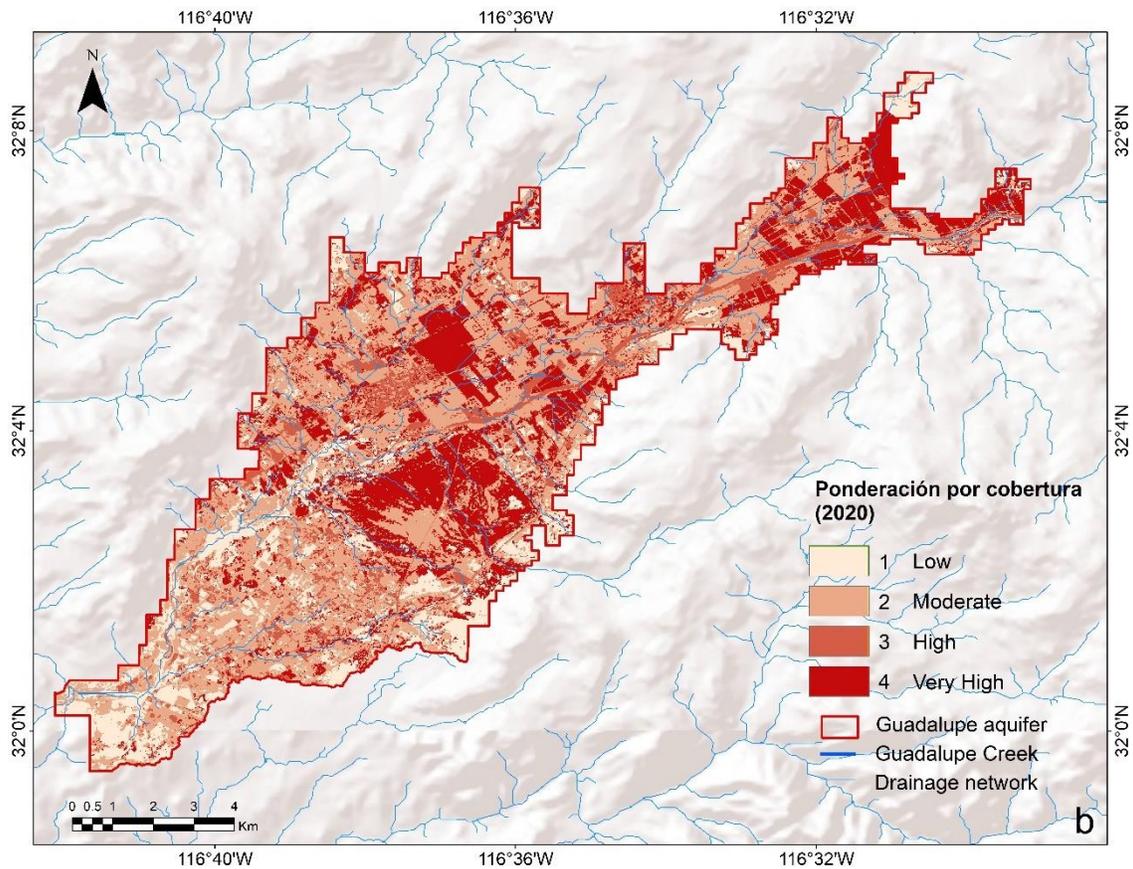


Figura 11.1 Ponderación por tipo de cobertura del suelo en temporada húmeda.

11.2 Vulnerabilidad específica

En la Tabla 11.2. Se muestran los resultados en porcentaje de área, de acuerdo a las categorías de vulnerabilidad específica, donde se observa que la mayor cobertura se centra en tipo de vulnerabilidad moderada, seguida de la vulnerabilidad alta, para ambos escenarios (Figura 11.2 y 11.3).

Tabla 11.2 Resultados de la vulnerabilidad específica.

Vulnerabilidad Específica	Vulnerabilidad Intrínseca + Coberturas del suelo	Reclasificación específica	WET (%) área	DRY (%) área
Baja	1 - 2	1	1	7
Moderada	3 - 4	2	53	55
Alta	5 - 6	3	39	37
Muy Alta	7 - 8	4	7	1

11.3 Concentración de nitratos

Los rangos de concentración de nitratos en los sitios muestreados se muestran en la Tabla 11.3 con 33 muestras para el año 2020, teniendo mayores concentraciones en comparación del año 2021, con 28 muestras (Tabla 11.4).

Tabla 11.3 Concentración y peso de nitratos para el año 2020

Concentración de Nitratos 2020 (33 muestras)					
Min	Max	Nivel de concentración	Conteo	peso	
0.25	24.31	Baja	24	1	
24.32	48.62	Moderada	7	2	
48.63	97.24	Alta	0	3	
97.25	131.19	Muy Alta	2	4	

Tabla 11.4. Concentración y peso de nitratos para el año 2021

Concentración de Nitratos 2021 (28 muestras)					
Min	Max	Nivel de concentración	Conteo	peso	
0.08	24.31	Baja	15	1	
24.32	48.62	Moderada	7	2	
48.63	97.24	Alta	3	3	
97.25	128.95	Muy Alta	3	4	

En la siguiente tabla se muestran los 21 sitios muestreados que coinciden espacialmente en los años 2020 y 2021 en la zona de estudio, donde se observa que 14 de ellos, se encontraron con un bajo nivel de concentración y solo 2 en muy alta concentración para el año 2021 y se identifican en la Tabla 11.6, donde se pueden leer su principal uso.

Tabla 11.5 Coincidencia espacial de sitios muestreados para 2020 y 2021

Concentración de Nitratos 2020 Y 2021 (21 muestras)						
Min	Max	Nivel de concentración	peso	2020	2021	
0.08	24.31	Bajo	1	14	13	
24.32	48.62	Moderado	2	5	5	
48.63	97.24	Alto	3	0	1	
97.25	131.19	Muy Alto	4	2	2	

Tabla 11.6 identificación de sitios muestreados.

Sitios de muestras coincidentes espacialmente			
N.º	Sitio	Tipo	Observaciones
1	G-14	Pozo	Pozo de uso agrícola
2	G-4	Pozo	Pozo cerca de un invernadero abandonado
3	G-22	Pozo	Conecta con un reservorio localizado a 700 m.
4	G-16	Pozo	Localizado junto al cauce principal. Uso agrícola para hortalizas y vid.
5	G-29	Pozo	Sin observaciones
6	G-15	Pozo	Pozo con sistema para abastecimiento de pipas
7	G-13	Pozo	Pozo con sistema para abastecimiento de pipas
8	G-12	Noria	Noria localizada en un sembradío de pasto
9	G-28	Pozo	Sin observaciones
10	G-8	Noria	Noria sin ningún tipo de protección
11	G-23	Pozo	Conecta con un reservorio localizado a 1800 m.
12	G-5	Noria	Abandonada debido a la reducción en la producción de agua
13	G-11	Noria	Noria agrícola
14	G-24	Pozo	Pertenece al grupo Cetto, tienen uso agrícola y los cultivos son de vid
15	G-30	Pozo	Pozo con uso agrícola y doméstico, además abastece un restaurante
16	G-31	Pozo	Pertenece al grupo Cetto, tienen uso agrícola y los cultivos son de vid
17	G-6	Pozo	De acuerdo al propietario, el espesor saturado es somero (~9 m).
18	G-21	Pozo	Pozo ubicado en un terreno arenoso, muy cerca al arroyo
19	G-20	Noria	Noria con elevada conductividad
20	G-18	Manantial	Manantial con un flujo constante durante todo el año
21	G-17	Noria	Localización intermedia de la subcuenca. Zona arbolada (encinos).

11.4 Identificación de sitios muestreados

De esos 21 sitios muestreados, se identificaron que en el escenario húmedo 12 de ellos coinciden con una alta vulnerabilidad específica, y 11 para el caso del escenario seco, sin embargo, en zonas de vulnerabilidad muy alta encontramos 3 sitios muestreados (Tabla 11.7).

Tabla 11.7 Correspondencia espacial de los sitios muestreados en dos distintos escenarios de vulnerabilidad específica.

Correspondencia espacial de sitios muestreados (concentración de Nitratos)					
Vulnerabilidad Específica		Escenario WET área (%)	Número de muestras (NO ₃ ⁻)	Escenario DRY área (%)	Número de muestras (NO ₃ ⁻)
Baja	1	1	0	7	0
Moderada	2	53	4	55	7
Alta	3	39	12	37	11
Muy Alta	4	7	3	1	1
		Externos	2	Externos	2

En la siguiente Tabla se muestran los 21 sitios de muestra, coincidentes en el área de estudio para las capas de interés, y se recategorizan los tipos de cobertura del suelo, que son más propensos a la contaminación, donde se consideran las características del tipo de cobertura y su interacción con la infiltración de agua y la contaminación, y los resultados fueron los siguientes (11.8).

11.5 Análisis por tipo de cobertura

Agricultura (categoría 4): Muy alta, debido a la utilización de pesticidas, herbicidas y fertilizantes que pueden infiltrarse en el suelo y llegar a la zona saturada del acuífero.

Desprovisto de Vegetación (categoría 3): Similar a suelo desnudo, propenso a la contaminación debido a la falta de barreras naturales para la filtración.

Cuerpo de agua (categoría 3): Alta, ya que el agua puede actuar como un medio de transporte para los contaminantes y estos pueden fácilmente infiltrarse en los acuíferos.

Urbano (categoría 2): Moderada propensidad a la contaminación debido a aguas residuales, químicos industriales, y escorrentía de superficies impermeables (como vías de comunicación terrestres). La falta de vegetación en espacios construidos, puede limitar la filtración y aumentar la escorrentía superficial.

Suelo Desnudo (categoría 2): Moderada, dependiendo de la fuente de contaminación, el suelo desnudo expuesto puede permitir la infiltración de contaminantes sin filtración biológica.

Vegetación Natural (categoría 1): Baja, ya que la vegetación natural y el suelo generalmente sin perturbar, actúan como un filtro natural, reteniendo y descomponiendo muchos contaminantes antes de que puedan llegar a los acuíferos.

En la Tabla 11.8 se caracterizan los 21 sitios muestreados, las zonas de vulnerabilidad específica y el tipo de cobertura correspondiente a ellos, y se comparan con datos de concentración de nitratos en dos escenarios húmedo y seco, para identificar la correlación entre variables por medio de los colores caracterizados desde muy alta hasta baja vulnerabilidad / concentración (rojo, naranja, amarillo, verde).

11.6 Relación de variables de acuerdo a su ponderación.

Tabla 11.8 Extracción de sitios espacialmente coincidentes de diferentes capas.

N.º	Sitio	Tipo	Observaciones	Cob_2020	Vul_cob	N2020	N2021	VE_DRY	VE_WET	CN20_D	CN21W
1	G-14	Pozo	Pozo de uso agrícola.	Urbano.	2	131.19	118.94	3	3	4	4
2	G-4	Pozo	Pozo cerca de un invernadero abandonado.	Suelo Desnudo.	2	125.16	128.95	3	3	4	4
3	G-22	Pozo	Conecta con un reservorio localizado a 700 m.	Desprovisto de Vegetación.	3	43.10	38.59	2	3	2	2
4	G-16	Pozo	Localizado junto al cauce principal. Su uso es agrícola para hortalizas y vid.	Agricultura.	4	40.88	34.26	3	3	2	2
5	G-29	Pozo	Sin observaciones.	Desprovisto de Vegetación.	3	37.86	35.87	2	3	2	2
6	G-15	Pozo	Pozo con sistema para abastecimiento de pipas.	Suelo Desnudo.	2	34.25	31.07	3	3	2	2
7	G-13	Pozo	Pozo con sistema para abastecimiento de pipas.	Agricultura.	4	26.36	20.7	4	4	2	1
8	G-12	Noria	Noria localizada en un sembradío de pasto.	Desprovisto de Vegetación.	3	22.86	9.96	3	3	1	1
9	G-28	Pozo	Sin observaciones.	Desprovisto de Vegetación.	3	21.01	19.46	2	2	1	1
10	G-8	Noria	Noria sin protección.	Vegetación Natural.	1	19.35	0.08	2	2	1	1
11	G-23	Pozo	Conecta con un reservorio localizado a 1800 m.	Urbano.	2	18.75	25.04	3	3	1	2
12	G-5	Noria	Abandonada debido a la reducción en la producción de agua.	Desprovisto de Vegetación.	3	13.25	11.69	3	3	1	1
13	G-11	Noria	Noria agrícola.	Desprovisto de Vegetación.	3	6.55	16.88	2	2	1	1
14	G-24	Pozo	Pertenece al grupo Cetto, tienen uso agrícola y los cultivos son de vid.	Agricultura.	4	5.95	2.92	3	4	1	1
15	G-30	Pozo	Pozo con uso agrícola y doméstico, además abastece un restaurante.	Agricultura.	4	3.77	0.97	3	4	1	1
16	G-31	Pozo	Pertenece al grupo Cetto, tienen uso agrícola y los cultivos son de vid.	Desprovisto de Vegetación.	3	3.24	10.4	2	3	1	1
17	G-6	Pozo	De acuerdo al propietario, el espesor saturado es somero (~9 m).	Vegetación Natural.	1	1.76	57.18	2	2	1	3
18	G-21	Pozo	Pozo ubicado en un terreno arenoso, muy cerca al arroyo.	Desprovisto de Vegetación.	3	1.63	4.46	3	3	1	1
19	G-20	Noria	Noria con elevada conductividad.	Agricultura.	4	1.15	0.12	3	3	1	1
20	G-18	Manantial	Manantial con un flujo constante durante todo el año.	Cuerpo de agua.	3	0.48	0.97	0	0	1	1
21	G-17	Noria	Localización intermedia de la subcuenca. Zona arbolada (encinos).	Cuerpo de agua.	3	0.32	0.55	0	0	1	1

* Cobertura para el año 2020 (Cob_2020), categoría de vulnerabilidad por cobertura (Vul_cob), concentración de nitratos para (N2020), concentración de nitratos para (N2021), vulnerabilidad específica en un escenario seco (VE_DRY), vulnerabilidad específica en un escenario húmedo (VE_WET), categoría de vulnerabilidad-nitratos 2020 seco (CN20_D) y categoría de vulnerabilidad-nitratos 2021 húmedo CN21W.

11.7 Vulnerabilidad específica para el escenario seco

En la Figura 11.2 se muestran los resultados espaciales de la vulnerabilidad específica, en un escenario seco.

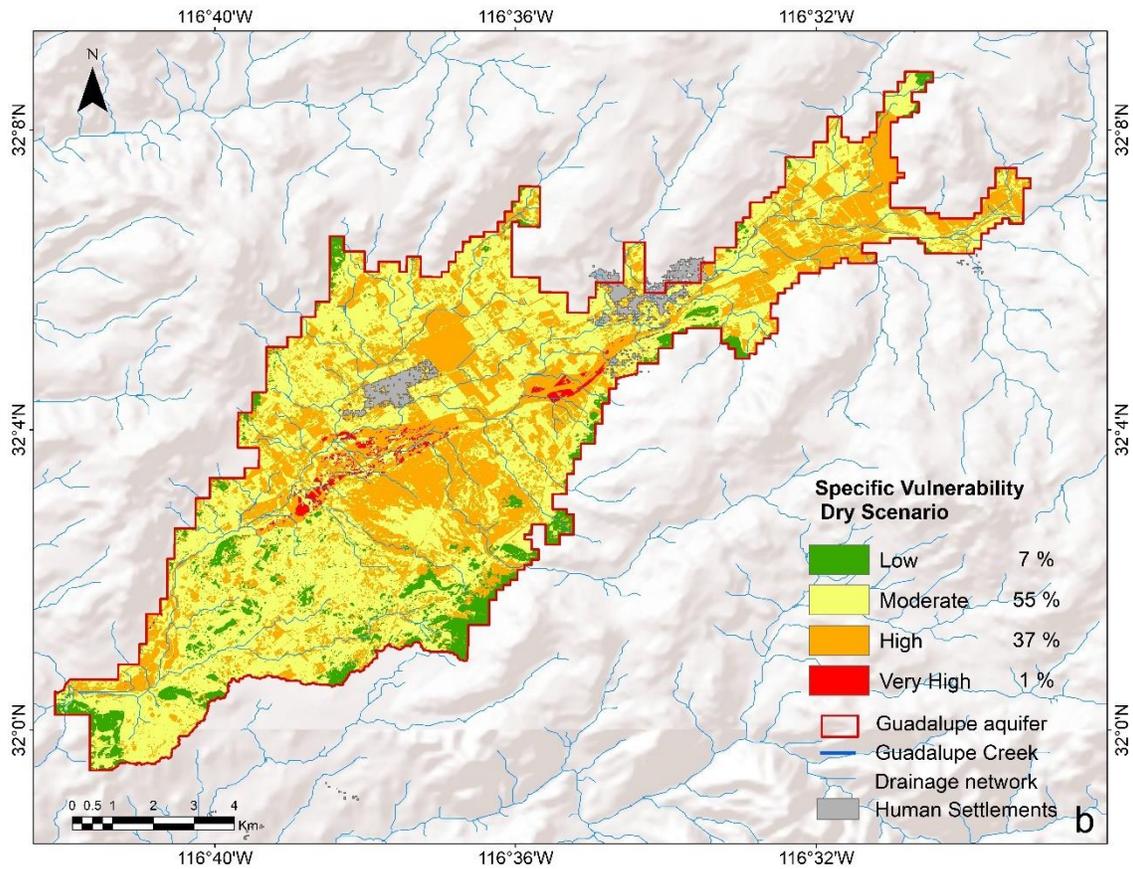


Figura 11.2 Vulnerabilidad específica en un escenario seco

11.8 Vulnerabilidad específica para el escenario húmedo

En la Figura 11.3 se muestran los resultados espaciales de la vulnerabilidad específica, en un escenario húmedo.

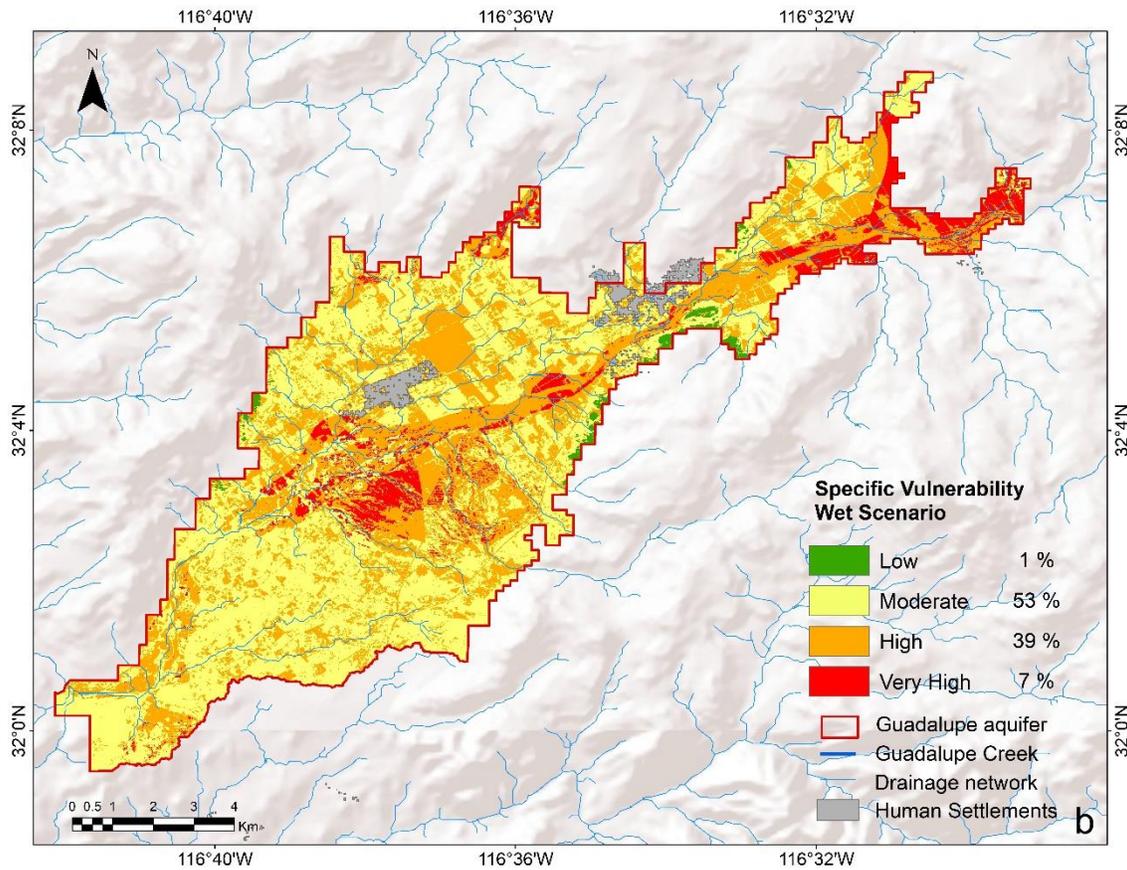


Figura 11.3 Vulnerabilidad específica en un escenario húmedo.

11.9 Sitios de atención, ante la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero

Finalmente, en la Figura 11.4 se muestran los resultados de 3 sitios de atención, de acuerdo los resultados de la vulnerabilidad específica, a sus características y comportamiento con base a la cobertura del suelo y concentración de nitratos.

Situación 1: Existe una zona de muy alta vulnerabilidad a la contaminación de acuífero, pero no existe alta concentración de nitratos, a pesar de ser una zona

mayormente agrícola, sin embargo, se encuentran las principales entradas de recarga de agua al acuífero, lo que hace que un gran o constante volumen de agua, diluya los nitratos o sigan fluyendo sin concentrarse en la zona. También podrían atribuirse procesos naturales de atenuación importantes.

Situación 2: En esta zona existe una alta vulnerabilidad y una concentración de nitratos muy alta, lo cual indican que los fertilizantes o productos químicos agrícolas se están infiltrando en el suelo y llegando a la zona saturada del acuífero. Especialmente esta zona es de alta y muy alta vulnerabilidad, coincide con la cercanía del arroyo principal, el cual podría tener escorrentía superficial intermitente y subsuperficial cargada de nitratos, lo cual tiende a dispersarse en dirección del flujo y afectar la calidad del agua en áreas mayores a lo largo del tiempo, coincidiendo en estas zonas de material aluvial. Esta zona es de atención prioritaria ya que está cerca de la zona urbana, al tener altas concentraciones de nitratos, afectan la calidad de agua para uso y consumo humano, lo cual genera riesgos a la salud.

Situación 3: Este sitio presenta vulnerabilidad moderada a la contaminación (según el modelo DRASTIC) y alta concentración de nitratos en una cobertura de suelo desnudo, al suroeste del acuífero. La situación se refiere a la infiltración directa de nitratos, ya que, al tener un suelo desnudo, tiene poca resistencia a la infiltración de agua y contaminantes, sin vegetación para absorber y filtrar los nitratos, estos pueden moverse con mayor facilidad al acuífero.

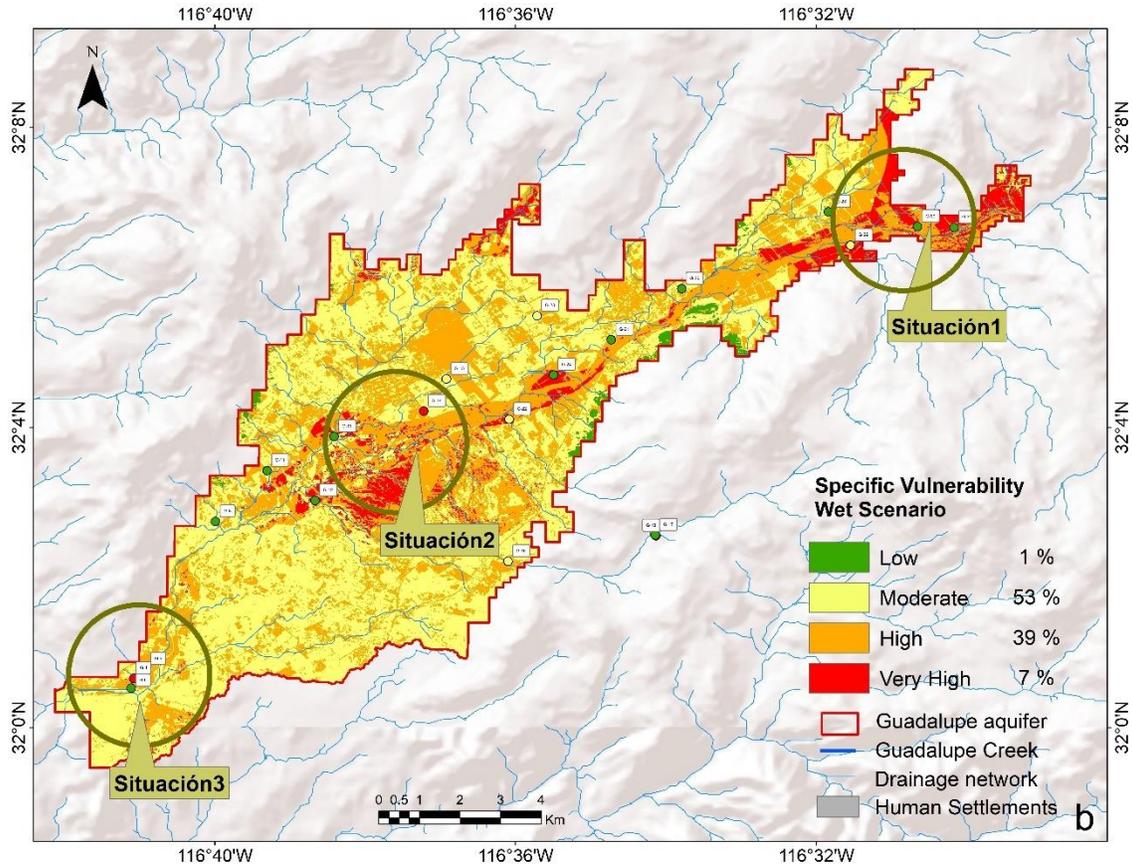


Figura 11.4 Sitio de atención prioritaria en un escenario de vulnerabilidad específica.

En la gráfica 1, Se muestra la serie de precipitación media mensual en el periodo de 2018 al 2020, destacando que el año hidrológico 2019-2020 fue el de mayor precipitación con 236.6 mm anuales en este periodo (CMN, 2023).

Puede acceder mediante el siguiente código URL.



13.- Conclusiones generales

El objetivo principal de la presente investigación fue evaluar el estado de vulnerabilidad del acuífero “Guadalupe”, perteneciente a la Región Hidrológica No. 1 de la vertiente del Océano Pacífico y a la subcuenca hidrográfica “Guadalupe”, en el estado de Baja California, mediante el análisis de cambio de uso y cobertura del suelo, y la aplicación del método de análisis de vulnerabilidad intrínseca (DRASTIC).

La metodología empleada permitió generar mapas de vulnerabilidad con escenarios de vulnerabilidad, en una temporada húmeda y una temporada seca, para tener una mayor confiabilidad del comportamiento hidrológico en una zona semiárida mediterránea, los cuales podrán ser utilizados como herramientas para la gestión y el manejo sustentable de los recursos hídricos subterráneos y el ordenamiento territorial del área de estudio.

El método DRASTIC para evaluar la vulnerabilidad, se considera adecuado, por ser una metodología que utiliza factores físicos y características intrínsecas del acuífero, dando una valoración específica de acuerdo a la importancia (1 a 10) en cuanto al comportamiento de los posibles contaminantes que podrían estar interactuando, para obtener una modelación numérica mediante el uso de sistemas de información geográfica. Derivado de la implementación, se logró identificar que en un escenario húmedo el 24 % del área se encuentra con una vulnerabilidad alta y solo el 1 % en muy alta, quiere decir que hay sitios especialmente vulnerables por sus características naturales.

El uso de conceptos y definiciones en torno a la vulnerabilidad, permitió crear la base conceptual para llevar a cabo las adecuaciones realizadas al mapa de vulnerabilidad generado a partir de la metodología DRASTIC específico para la zona de estudio, mediante el uso de la modelación numérica en formato ráster. El uso de los indicadores se eligió con base principalmente a la disponibilidad de datos, validez y precisión, escala espacial y temporal.

El análisis de cambio de coberturas y uso de suelo, nos permite identificar áreas susceptibles a la contaminación, debido a las actividades antropogénicas en el área, como un tipo de presión ante la probabilidad de contaminación, por ejemplo, destacando las zonas de actividad agrícola (cultivos de vid). Se detectó que este tipo de coberturas, superpuestas con los mapas de vulnerabilidad DRASTIC, coinciden con áreas de mayor grado de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación.

Aunado a esto, en el análisis de cambio de uso y coberturas de suelo para 1980-2020, se concluye que; en el mapa de persistencias, las coberturas con la mayor área conservadas a lo largo del tiempo, es las zonas agrícolas; el mapa de cambios demuestra que la cobertura que ha sufrido mayor modificación, fue en la cobertura de matorral, que su transformación paso a ser de cobertura agrícola; obteniendo así mayores ganancias en el tiempo.

La cobertura agrícola en comparación con las otras coberturas estudiadas, no tiene pérdidas (a menos los campos se encuentren en descanso intermitente) y sigue persistiendo en el tiempo. Por otro lado, el matorral perdió grandes coberturas en área, que ahora se convierten en zonas agrícolas nuevas.

Al hacer uso de las herramientas geotecnológicas, este análisis de vulnerabilidad, cambio de usos y cobertura de suelo puede ser dinámico y replicable, considerando escenarios de cambio caso de las coberturas del suelo, recarga y abatimientos en los niveles piezométricos del acuífero a lo largo del tiempo.

La modelación cualitativa y cuantitativa del mapa generado por la metodología DRASTIC permitió comparar y analizar la calidad el agua subterránea mediante la concentración de nitratos en distintos puntos del acuífero, además la identificación de zonas de posible contaminación lo cual en tiempo progresivo podría provocar el deterioro de la calidad del agua subterránea en aquellas fuentes de abasto, que de acuerdo al área de estudio son zonas de gran importancia para el desarrollo socioeconómico de la región.

El análisis de las muestras de agua para identificar la concentración de nitratos y validar la coincidencia en las zonas de vulnerabilidad, sirvieron para modelar espacialmente zonas puntuales de atención prioritaria.

Los puntos con alta concentración de nitratos fueron incorporados al mapa DRASTIC y al mapa de vulnerabilidad específica, coincidiendo con las zonas de alta y moderada vulnerabilidad. A excepción de la zona norte del acuífero, ya que se detectó zonas de alta vulnerabilidad, pero con baja concentración de nitratos, esto debido a que justo ahí se encuentran las principales entradas de recarga al acuífero.

La superposición de capas DRASTIC más cobertura de suelo, permitió estimar un nuevo escenario de vulnerabilidad y obtener un nuevo mapa donde se demuestra que; en las zonas de alta concentración de nitratos, también se ubican las grandes áreas de producción agrícola en el valle, concluyendo que un contaminante persistente a lo largo del tiempo en estas zonas, podría pasar por la zona vadosa y llegar a la zona saturada del acuífero, potencializando la contaminación del acuífero.

Los resultados de esta modelación pueden ser una herramienta útil para los tomadores de decisiones; para identificar situaciones de riesgo, elaboración de planes de monitoreo en torno a la calidad de agua, generación de políticas públicas, o estrategias de mitigación.

Los principales resultados de la investigación, se divulgan mediante la creación y distribución de un StoryMaps, como herramienta de información a los usuarios o actores principales en la región, y a su vez ayuda a concientizar, sobre la importancia de proteger los recursos hídricos e influir positivamente en los tomadores de decisiones y en las redes de investigación con finalidad en la gestión del agua subterránea.

14.- Recomendaciones

Una vez definidas las conclusiones del presente trabajo, se presentan las siguientes recomendaciones en atención a los resultados de esta investigación:

Aplicar la metodología generada periódicamente con datos actualizados, con el fin de gestionar el agua subterránea del valle, considerando que es la principal fuente de suministro de agua para las actividades socioeconómicas.

Se recomienda realizar estudios de la zona no saturada, donde el objetivo sea cuantificar el tiempo de tránsito de un contaminante a través de ella, lo que permitirá contemplarlo específicamente en la modelación numérica y adaptar el rango específico.

Tomando de referencia la metodología, se podrían integrar nuevos indicadores de evaluación, dando un peso de influencia a la fórmula original, como por ejemplo el uso y cobertura del suelo, parámetros específicos de calidad de agua, etc., para una mayor precisión de zonas vulnerables.

En los sitios de atención prioritaria donde existe una alta vulnerabilidad a la contaminación y además una alta concentración de nitratos, se pueden implementar regulaciones ambientales y prácticas de manejo sostenible que pueden reducir la carga de nitratos. Por ejemplo, promoviendo e implementando políticas de uso de fertilizantes y prácticas de conservación de suelo sano.

Con la ayuda de las herramientas geotecnológicas, se recomienda hacer una prospección a futuro de los cambios que han tenido las diferentes coberturas en el suelo (diagnóstico de años consecutivos), para tener un pronóstico de cambio en un futuro, y poder zonificar nuevas zonas de atención prioritaria.

15.- Referencias

1. Aller, L.; Bennet, T.; Lehr, J. H.; Petty, R. J. y Hackett, G. (1987). DRASTIC, A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic setting. U.S. Environmental Protection Agency, Ada, OK, EPA, Report 600/2-87-035; 1-455.
2. Andrade M. 1992. Actualización geohidrológica del Valle de Guadalupe, Municipio de Ensenada, Baja California. Secretaria de Asentamientos Humanos y Obras Publicas de Ensenada (SAHOPE) y CESPE. Ensenada, Baja California. 69 pp.
3. Andrade M. 1997. Actualización geohidrológica del Valle de Guadalupe, Municipio de Ensenada, Baja California. Grupo Agroindustrial del Valle de Guadalupe, Ensenada, Baja California. 60 pp.
4. Aragón Sulik, M. D., Navarro Mendoza, S., Belmonte Jiménez, S., & Torres, G. (2012). Calibración del método DRASTIC en acuíferos utilizando nitratos como indicador. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 33(2), 21-30.
5. Ballesteros et.al. (2016). A standardized INDEX for assessing seawater intrusion in coastal aquifers: THE SITE INDEX. Geological survey of Spain. Valencia, Spain.
6. Buzai, Gustavo (1998). Impacto de la Geotecnología en el desarrollo teórico-metodológico de la ciencia geográfica. Hacia un nuevo paradigma en los albores del siglo XXI. Tesis doctoral. Fac. de Filosofía y Letras. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza, Argentina.
7. Buzai, Gustavo (1999). Geografía Global. El Paradigma Geotecnológico y el Espacio Interdisciplinario en la Interpretación del Mundo del Siglo XXI. Lugar Editorial, 1º Edición. Buenos Aires, Argentina.
8. Buzai, Gustavo (2011). Geografía y Sistemas de Información Geográfica. Revista Geográfica de América Central. Número Especial. Editorial de la Universidad Nacional de Costa Rica. Iº Semestre. San José, Costa Rica.
9. Campos, R. (2008). Simulación del flujo de agua subterránea en el acuífero del Valle de Guadalupe, Baja California, México (220 pp.). Tesis de doctorado. Ensenada, México: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE).
10. Civita, M. (1994). Las tarjetas de vulnerabilidad de las compras basadas en agua. Teoría y práctica (mapas de vulnerabilidad del acuífero a la contaminación). Pitagora, Bologna.
11. Charca Choque (2011). Ronald. SATÉLITE ARTIFICIAL. RITS, n.6 [citado 2024-02-17], pp. 64-67. Disponible en línea:

- http://revistasbolivianas.umsa.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S199740442011000100016&lng=es&nrm=iso. ISSN 1997-4044.
12. CONAGUA. 2013. Determination of water availability in the Guadalupe Aquifer (0207). State of Baja California. Technical Sub-Directorate General. Groundwater Management. Sub-Management of Aquifer Evaluation and Management. México.
 13. CONAGUA (2015). Atlas del agua en México. Comisión Nacional de Agua. México. Obtenido de <http://agua.org.mx/cono/multimedia/mapas/1131-mapas/38767-atlas-del-agua-en-mexico-2015>.
 14. CONAGUA (2018). Estadísticas del agua en México, Comisión Nacional del Agua 2018. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales; Obtenido de http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf (consultado el 24 Abril 2020).
 15. CONAGUA (2018). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en Ensenada, Estado de Baja California. In Diario Oficial de la Federación; Secretariat of the Interior: Mexico City, Mexico, 2018; Obtenido de https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/BajaCalifornia/DR_0207.pdf (consultado el 23 Marzo 2020).
 16. CONAGUA. 2020. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el Acuífero Guadalupe (0207). Estado de Baja California. Subdirección general técnica. Gerencia de Aguas Subterráneas, México. Publicado en el Diario Oficial de la Federación. 31.
 17. Daesslé L.W., Sánchez EC, Camacho VF, Mendoza LG, Carrquiry JD (2005). Geochemical evolution of the coastal Maneadero aquifer during a dry year in Baja California. *Hydrogeology Journal* 13, 584-595.
 18. Daesslé, L.W., Pérez-Flores, M. A., Serrano-Ortiz, J., Mendoza-Espinosa, L., Manjarrez-Masuda, E., Lugo-Ibarra, K. C. y Gómez-Treviño, E. (2014). A geochemical and 3D-geometry geophysical survey to assess artificial groundwater recharge potential in the Pacific coast of Baja California, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 71(8), 3477-3490.
 19. Daesslé, L. W., Andrade-Tafoya, P. D., Lafarga-Moreno, J., Mahlkecht, J., van Geldern, R., Beramendi-Orosco, L. E., & Barth, J. A. C. (2020). Groundwater recharge sites and pollution sources in the wine-producing Guadalupe Valley (Mexico): Restrictions and mixing prior to transfer of reclaimed water from the US-México border. *Science of The Total Environment*, 713, 136715. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136715>.
 20. Del Toro-Guerrero, F. J.; Kretschmar, T. and Hinojosa-Corona, A. 2014. Estimación del balance hídrico en una cuenca semiárida, El Mogor, Baja California, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 5 (6): 69- 81.
 21. Del Toro-Guerrero, F.J. and Kretschmar, T. 2016. Identifying periods of historical drought in a region of semiarid mediterranean climate type. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 7(6): 1311-1320.

22. Del Toro-Guerrero, F.J. 2019. Implicaciones en la variación de la morfología, la vegetación y la climatología en la recarga potencial de bloque de montaña en una región semiárida mediterránea. Tesis de Doctorado en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 100 pp.
23. Doerfliger, N. y F. Zwahlen (1998). Groundwater vulnerability mapping in Karstic regions (EPIK). Practical guide. Berna: Swiss Agency for the Environment, Forest and Landscape, 56 p.
24. DOF. (2018). Administración del agua subterránea, Diario Oficial de la Federación. México: DOF. Obtenido de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5510042&fecha=04/01/2018 (consultado el 24 abril 2020)
25. Estuardo-Cevallos, Gabriel; Roldan-Ruenes, Amílcar y Gómez-Luna, Liliana María (2015). Identificación prospectiva de componentes en el proceso de gestión ambiental del Cantón la Concordia, Ecuador. En: Ciencia en su PC. Núm. 3. Págs. 16-33.
26. Emilia, B. (2011). La exploración de acuíferos costeros como base de su gestión sustentable. Aguas subterráneas, superficiales y la aplicación de los SIG. Mar de plata, Argentina.
27. Esri. (2020). Story Maps for Science Communication. Esri White Paper. Retrieved from <https://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/story-maps-for-science-communication.pdf>
28. FAO (2011). The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture (SOLAW) Managing Systems at Risk; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy.
29. FAO. (2013). Afrontar la escasez de agua Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. *Informe sobre temas hídricos*. Rome, Italy.
30. Foster, S.S.D., Hirata R.C.A. (1991). Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas, una metodología basada en datos existentes. Organización Panamericana de la salud. Perú. (CEPIS), 74 pp.
31. Foster, S.S.D and Hirata R.C.A. (1991). Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data. <http://www.bvsde.paho.org/bvsaca/i/fulltext/risk/risk.pdf>.
32. Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., & D'Agostino, S. (2003). Protección de la calidad del agua subterránea: guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales (Informe No. 25071). Banco Mundial. <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/859971468743688795/proteccion-de-la-calidad-del-agua-subterranea-guia-para-empresas-de-agua-autoridades-municipales-y-agencias-ambientales>
33. Gilabert-Alarcón C, Daessle LW, Salgado-Méndez S, Pérez-Flores MA, Knöller K, Kretzschmar T, Stumpp C (2018) Effects of reclaimed water discharge in the Maneadero

- coastal aquifer, Baja California, Mexico. *Applied Geochemistry*.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.03.006>.
34. Glover, R.E., (1964). Dispersion of dissolved or suspended materials in flowing streams, U.S. Geological Survey Professional, núm, 433-B, United States Government Printing Office, Washington.
 35. INEGI. (2014). Sistemas de Información Geográfica . Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
<https://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/internet/sistemainformaciongeografica.pdf>
 36. Huaico-Malhue, A., Pérez-Morales, A. y Daessle, L. W. Propuesta metodológica prospectiva para la elaboración de un índice sintético de vulnerabilidad hidrogeológica: el caso de estudio de Maneadero en México. *Ambiente y Desarrollo*, 21(41), 107-121.
 37. Kurczyn-Robledo, J.A.; Kretzschmar, T.; Hinojosa-Corona, A. (2007). Evaluación del escurrimiento superficial en el noreste del Valle de Guadalupe, BC, México, usando el método de curvas numeradas y datos de satélite. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 24 (1): 1–14.
 38. Kardan Moghaddam, H., Jafari, F. y Javadi, S. (2017). Vulnerability evaluation of a coastal aquifer via GALDIT model and comparison with DRASTIC index using quality parameters. *Hydrological Sciences Journal*, 62(1), 137-146.
 39. Mundial, P. D. M. A. (2007). Perspectivas del Medio Ambiente Mundial GEO4. Medio Ambiente para el Desarrollo. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Dinamarca 1-574.
 40. Margat, J. (1968). Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero. Bases de la cartografía, (DOC.) Orléans, France: BRGM, 68 SGL, 198 pp.
 41. Neri, I. (2007). *Identificación de zonas vulnerables a intrusión salina en una zona costera de Veracruz*. México: UNAM.
 42. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD)/EU/JRC. (2008). Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide París: OECD Publishing.
 43. Oropeza, M; Díaz, N. (2007) La geotecnología y su inserción en el pensamiento geográfico. *Terra Nueva Etapa*. XXIII (julio-diciembre). ISSN 10127089. Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src.html>.
 44. Popolizio, Eliseo (1987). El enfoque sistémico en la enseñanza de la Geografía. *Boletín GAEA* N° 106. Buenos Aires, Argentina.
 45. SEMARNAT. (2013). Estadísticas del Agua en México. Secretaria de medio ambiente y recursos naturales. México. Obtenido de SEMARNAT:
http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen14/06_agua/6_1_2.html.
 46. UNDP. (2000). Human Development Report 2000: Human Rights and Human Development. <http://www.hdr.undp.org/en/content/human-development-report-2000>.
 47. WHYMAP. (2001). World Hidrogeological Mapping Evaluacion Program. Obtenido de http://www.whymap.org/whymap/EN/Home/whymap_node.html.

48. World Health Organization. (2017). 2017 annual report WHO/UNICEF joint monitoring programme for water supply, sanitation and hygiene. In 2017 annual report WHO/UNICEF joint monitoring programme for water supply, sanitation and hygiene (pp. 20-20).