

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE



**DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE UN ACUÍFERO
UTILIZANDO EL MODELO DRASTIC**

Por:

FELIPE ABDIEL CRUZ MORALES

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Diciembre del 2023.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIVERSIDAD DIVISIÓN DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE UN ACUÍFERO UTILIZANDO
EL MODELO DRASTIC

Por:

FELIPE ABDIEL CRUZ MORALES

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Aprobada por el Comité de Asesoría:

Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho
Asesor Principal

Dr. Luis Samaniego Moreno
Coasesor

Ing. Arturo Monroy Nieto
Coasesor

MC. Aaron Isaín Meléndres Álvarez
Coasesor



MC. Sergio Sánchez Martínez
Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE UN ACUÍFERO UTILIZANDO
EL MODELO DRASTIC

Por:

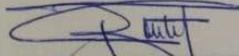
FELIPE ABDIEL CRUZ MORALES

TESIS

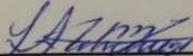
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

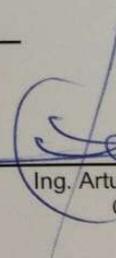
Aprobada por el H. Jurado Examinador:



Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho
Asesor Principal



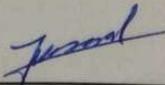
Dr. Luis Samaniego Moreno
Coasesor



Ing. Arturo Monroy Nieto
Coasesor



MC. Aaron Isaín Meléndres Álvarez
Coasesor



MC. Sergio Sánchez Martínez
Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo, Coahuila, México

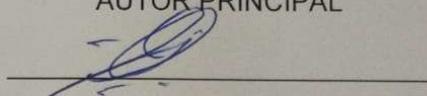
Diciembre, 2023

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

El autor quien es responsable directo, que no incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reducción de fragmentos o textos sin citar o autor original (copiado y pegado); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (autor plagiado); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como copia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin comillas; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original o fuente. En este sentido, lo anterior puede ser confirmado por el autor, estando consiente de que, en caso de comprobarse plagio en el texto, no respetar los derechos de autor, edición o modificación, será sancionado por las autoridades correspondientes. Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias generadas en caso de existir cualquier tipo de plagio y declaro que este trabajo es original.

AUTOR PRINCIPAL



FELIPE ABDIEL CRUZ MORALES

AGRADECIMIENTOS

A Dios:

Por haberme dado la vida y esos pequeños detalles que me forjaron hasta hoy, muchas gracias por darme la fe para seguir adelante y llegar hasta esta etapa de mi vida

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro:

Por darme el conocimiento, herramientas, una segunda casa y esta gran oportunidad de superarme profesionalmente.

Al Departamento de Riego y Drenaje:

Profesores, amigos y compañeros que me dieron un poco de enseñanzas en alguna parte de mi camino.

al Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho

Por apoyarme de la manera más desinteresada y dedicar parte de su valioso tiempo, recursos y experiencia, fue un orgullo conocer a una gran persona y mentor.

A mis Coasesores de tesis:

Por la invaluable atención y disponibilidad que me brindaron, el apoyo para seguir adelante en esta etapa de mi vida

DEDICATORIAS

A mi madre Carmen Morales

Que siempre me acompañe, cuidado y sobre todo apoyo en este gran proceso llamado vida.

A mi compañera de vida Nayeli Ramírez

Muchas gracias por siempre estar conmigo y apoyarme en las buenas y malas, por comprenderme y siempre motivarme a seguir adelante.

A mi hija Karla Vianney

Eres la bendición que dios me regalo, ojalá algún día te sientas orgullosa de tu padre que con esfuerzo ha tratado de darte lo mejor mientras se supera día a día.

A mi hermana Celeste Cruz

Sé que no somos los mejores hermanos, pero siempre estaremos para apoyarnos te quiero.

A la Rondalla de Saltillo

Gracias por las amistades y excelentes experiencias que marcaron mi vida para siempre, a todos mis compañeros les agradezco infinitamente su apoyo y comprensión.

ÍNDICE

	Página
1. INTRODUCCIÓN	12
2. OBJETIVOS	13
3. REVISIÓN DE LITERATURA	14
3.1 ESTUDIOS PREVIOS	14
3.2 VULNERABILIDAD EN ACUÍFEROS	15
3.3 FISIOGRAFÍA	16
3.4 GEOLOGÍA	18
3.5 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	23
3.6 GEOLOGÍA DEL SUBSUELO	24
3.7 HIDROGEOLOGÍA	24
3.8 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	25
4. MATERIALES Y MÉTODOS	27
4.1 LOCALIZACIÓN DEL LUGAR DE ESTUDIO	27
4.2 METODOLOGÍA DRASTIC	29
4.2.1 PARÁMETROS DE PONDERACIÓN DRASTIC	31
4.2.1.1 PROFUNDIDAD DEL ACUÍFERO	31
4.2.1.2 RECARGA	32
4.2.1.3 ACUÍFERO	33
4.2.1.4 TIPO DE SUELO	34
4.2.1.5 TOPOGRAFÍA	35
4.2.1.6 IMPACTO EN LA ZONA NO SATURADA	36
4.2.1.7 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	38
4.3 FUENTE DE DATOS Y METODOLOGÍA	39
5. RESULTADOS	40
5.1 PROFUNDIDAD DEL ACUÍFERO	40
5.2 RECARGA	41
5.3 ACUÍFERO	41
5.4 TIPO DE SUELO	43
5.5 TOPOGRAFÍA	45
5.6 IMPACTO EN LA ZONA NO SATURADA	46
5.7 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	47
5.8 MAPA DE VULNERABILIDAD DRASTIC	49
6. CONCLUSIONES	51
7. RECOMENDACIONES	52
8. BIBLIOGRAFÍA	53

ÍNDICE DE CUADROS

	PAGINA
CUADRO 1. FORMACIONES GEOLÓGICAS	20
CUADRO 2. POLIGONAL DEL ACUÍFERO SALTILLO-RAMOS ARIZPE	28
CUADRO 3. VALORES DE PONDERACIÓN PARA LOS PARÁMETROS DRASTIC	30
CUADRO 4. VALORES DE VULNERABILIDAD DRASTIC	31
CUADRO 5. VALORES DE PONDERACIÓN INTERNA PARA EL PARÁMETRO D_R	32
CUADRO 6. VALORES DE PONDERACIÓN INTERNA PARA EL PARÁMETRO R_R	33
CUADRO 7. VALORES DE PONDERACIÓN INTERNA PARA EL PARÁMETRO A_R	34
CUADRO 8. VALORES DE PONDERACIÓN INTERNA PARA EL PARÁMETRO S_R	35
CUADRO 9. VALORES DE PONDERACIÓN INTERNA PARA EL PARÁMETRO T_R	36
CUADRO 10. VALORES DE PONDERACIÓN INTERNA PARA EL PARÁMETRO I_R	37
CUADRO 11. VALORES DE PONDERACIÓN INTERNA PARA EL PARÁMETRO C_R	38
CUADRO 12. FUENTE DE CONSULTA PARA PARÁMETROS DRASTIC	39
CUADRO 13. VALORES DE PONDERACIÓN INTERNA PARA A_R	42
CUADRO 14. VALORES DE PONDERACIÓN INTERNA PARA EL FACTOR S_R	44
CUADRO 15. VALORES DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SEGÚN EL MATERIAL	48

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pagina
FIGURA 1. PERIMETRAL DEL ACUÍFERO SALTILLO-RAMOS ARIZPE	29
FIGURA 2. PROFUNDIDAD DEL NIVEL ESTÁTICO	40
FIGURA 3. NATURALEZA DEL ACUÍFERO (LITOLOGÍA)	43
FIGURA 4. TIPO DE SUELO	45
FIGURA 5. TOPOGRAFÍA (PORCENTAJE DE PENDIENTE)	46
FIGURA 6. IMPACTO EN LA ZONA NO SATURADA	47
FIGURA 7. MAPA DE VULNERABILIDAD DRASTIC	50

RESUMEN

En años recientes muchos países han experimentado el problema de la escases y contaminación en el agua subterránea, México no es la excepción ya que la problemática existe por la gran demanda agrícola, industrial y socioeconómica; lo que ha encaminado a plantear metodologías para la identificación de mecanismos que identifiquen o ayuden a prevenir la contaminación de los acuíferos. Dentro de estas metodologías se encuentra el método DRASTIC que mediante sus siete parámetros hacen un análisis cartográfico de la vulnerabilidad en acuíferos.

La finalidad del presente trabajo es utilizar la metodología DRASTIC para analizar el acuífero Saltillo-Ramos Arizpe y generar un mapa de vulnerabilidad mediante los Sistemas de Información Geográfica.

Palabras Clave: **Hidrogeología, Mapa, ArcGIS, Agua Subterránea**

Summary

In recent years, many countries have experienced the problem of cases and contamination in groundwater, Mexico is no exception since the problem exists due to the great agricultural, industrial and socioeconomic demand; which has led to proposing methodologies for the identification of mechanisms that identify or help prevent contamination of aquifers. Within these methodologies is the DRASTIC method, which uses its seven parameters to carry out a cartographic analysis of the vulnerability of aquifers.

The purpose of this work is to use the DRASTIC methodology to analyze the Saltillo-Ramos Arizpe aquifer and generate a vulnerability map using Geographic Information Systems.

Keywords: Hydrogeology, Map, ArcGIS, Groundwater

1. INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos subterráneos desempeñan un papel esencial en la satisfacción de las necesidades de agua dulce a nivel global. Los acuíferos, en particular, representan una fuente vital de agua potable, irrigación agrícola y soporte ecológico. Sin embargo, la gestión sostenible de estos recursos subterráneos se ha convertido en un desafío apremiante en un mundo caracterizado por el crecimiento poblacional, la urbanización y el cambio climático.

Por ello la falta de planeación adecuada sobre el aprovechamiento del agua necesita plantear modelos hidrológicos representativos de un sistema subterráneas, que aporten un entendimiento de los componentes físico, tecnológico y socioeconómico (Cortés, 1999).

Uno de los aspectos críticos de la gestión de acuíferos es la evaluación de su vulnerabilidad a la contaminación. Desde que Margat (1968) introdujera el término “vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación” se han propuesto definiciones y metodologías, en muchos casos orientadas a su representación cartográfica.

Entre las diferentes metodologías se encuentra el método DRASTIC (acrónimo de Depth to water, Net recharge, Aquifer media, Soil media, Topography, Impact of vadose zone, and hydraulic Conductivity) desarrollado por Aller (1993) que se ha destacado como una herramienta eficaz para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos.

El método DRASTIC, basado en un enfoque multicriterio, considera una serie de parámetros hidrogeológicos y geográficos para evaluar la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación. Estos parámetros incluyen la profundidad del nivel freático, la recarga

neta, las características del acuífero y el suelo, la topografía, la zona vadosa y la conductividad hidráulica. Al combinar estos factores, DRASTIC proporciona una evaluación integral de la vulnerabilidad, permitiendo a los gestores de recursos hídricos tomar decisiones informadas sobre la protección y conservación de los acuíferos (Troldborg 2010).

La protección de los acuíferos es esencial para garantizar un suministro continuo de agua limpia y segura para las generaciones presentes y futuras. La aplicación de métodos como DRASTIC se presenta como una herramienta valiosa en la preservación de este recurso natural invaluable haciéndolo adecuado para el análisis de la región (Rahmna 2008).

Este trabajo se enfoca en explorar la aplicación del método DRASTIC en la evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos, considerando su relevancia en el contexto de la gestión sostenible de los recursos hídricos. A través de la revisión de la literatura, la recopilación de datos y el análisis del área de estudio, se pretende explicar sobre la utilidad de esta metodología en la identificación y priorización de áreas críticas en términos de vulnerabilidad a la contaminación.

2. OBJETIVOS

- Determinar la vulnerabilidad a la contaminación en el acuífero Saltillo-Ramos evaluando los parámetros del modelo DRASTIC y generando un mapa de vulnerabilidad bajo un Sistema de Información Geográfica.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Estudios Previos

Según CONAGUA (2013) se han realizado estudios previos en el área de interés, algunos son a nivel regional mientras que otros son más específicos al área de estudio, entre los más significativos están:

- ❖ Estudio geohidrológico cuantitativo de la zona Saltillo-Ramos Arizpe, Coahuila. realizado en 1981 por Ingeniería Integral, S.A. de C.V. (ININSA), para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH)

- ❖ Estudio geohidrológico de la zona Saltillo Ramos-Arizpe, Coahuila. realizado por Lesser y Asociados, S.A. de C.V., para la Comisión Nacional del Agua, en 1996.

- ❖ Estudio geohidrológico (recopilación, análisis y depuración de la información, procesamiento, interpretación de imágenes, levantamiento geológico regional, calidad del agua subterránea, procesamiento e interpretación de información y elaboración de informe final), en Saltillo Coahuila. realizado por la Comisión Estatal de agua y Saneamiento de Coahuila (CEASC), en 2002.

- ❖ Actualización geohidrológica de los acuíferos Monclova y Saltillo-Ramos Arizpe, localizados en el estado de Coahuila, realizado por GEOPSA S.A de C.V., en el 2007 para la Comisión Nacional del Agua.

- ❖ Estudio geohidrológico del acuífero Saltillo-Ramos Arizpe (0510), en el estado de Coahuila. realizado en 2014 por consultoría BETSCO S.A de C.V. para la Comisión Nacional del Agua.

3.2 Vulnerabilidad en Acuíferos

Foster y Hirata (1991) define el término vulnerabilidad del acuífero como la sensibilidad que este tiene para ser afectado por una carga contaminante impuesta. El riesgo de contaminación se evidencia en las concentraciones que superan los valores establecidos por la OMS (Organización Mundial de la Salud).

La contaminación en los acuíferos está principalmente determinada por la inaccesibilidad de la zona saturada en términos hidráulicos a la penetración de contaminantes, así como por la capacidad de atenuación de los estratos por encima de la zona saturada del acuífero. Esto se debe a su retención física y a la reacción química con los contaminantes.

EPA (1993) hace referencia a la vulnerabilidad subterránea en relación con un plaguicida, describiéndola como la facilidad con la que un contaminante aplicado en la superficie puede llegar al acuífero, dependiendo de las prácticas agrícolas utilizadas, las características del plaguicida y la susceptibilidad hidrogeológica. Esta definición abarca no solo las condiciones del entorno, sino también las propiedades específicas del contaminante y las prácticas de cultivo (vulnerabilidad específica).

Carbonell (1993) y Martínez (1998) definen la vulnerabilidad a la contaminación como la propensión de los contaminantes a concentrarse en el sistema de agua subterránea después de haber sido introducidos por encima del acuífero más superficial. En este contexto, el autor se centra exclusivamente en la acción de los contaminantes.

3.3 Fisiografía

Según CONAGUA (2013) la Subprovincia Pliegues Saltillo-Parras presenta un conjunto de sistemas de topoformas que varían desde las llanuras, valles extendidos, lomeríos suaves, abruptos y pequeñas sierras que están orientadas en dirección este-oeste. Por estar enclavada en una zona árida, su paisaje es típico del desierto, aunque es fácil observar en las cumbres topográficas bosques de pinos y encinos. Dentro de ella se asienta la ciudad de Saltillo y las localidades importantes de esta región del estado de Coahuila. Se trata de un conjunto de valles orientados de este a oeste y limitados al norte y al sur por flancos residuales de anticlinales erosionados, incluye además la Sierra de Parras con elevaciones que sobrepasan los 3,000 msnm, que es una sucesión de flancos truncados de un gran anticlinal plegado hacia el sur.

La Subprovincia Gran Sierra Plegada es la región flexionada que se ubica al este de Saltillo y sur de Monterrey, conocida también como Anticlinorio de Arteaga; es la sucesión estructural de pliegues, que juntos integran un anticlinal general. La porción occidental de este anticlinorio es lo que de esta subprovincia corresponde a Coahuila.

Su extensión abarca varios estados de territorio nacional, forma un gran arco de orientación general este-oeste, transversal respecto de toda la sierra en la que se presentan las mayores elevaciones topográficas que alcanzan hasta 3,700 msnm,

alternándose con valles profundos y estrechos, limitados por laderas con pendientes muy abruptas.

3.3.1 Hidrografía

Como menciona CONAGUA (2013) el acuífero se localiza en su totalidad en la Región Hidrológica 24 denominada Río Bravo-Conchos, en el límite con la Región Hidrológica 37 El Salado, Subregión Hidrológica Río San Juan, Cuenca Río Bravo-San Juan, subcuencas de los Ríos San Miguel y Pesquería. Los escurrimientos superficiales están representados por una serie de arroyos intermitentes, con descargas torrenciales en época de lluvias, que se originan en las sierras que circundan al valle Saltillo-Ramos Arizpe; algunos de los cuales desaparecen por infiltración en los depósitos de pie de monte y otros continúan, recargando al acuífero a lo largo de su cauce, antes de entrar a la zona urbana.

La corriente principal es el Arroyo del Pueblo o Arroyo La Encantada, ubicado en la porción occidental del valle, que fluye en dirección sur-norte. Este arroyo es afluente del Arroyo Patos, al cual confluye aproximadamente 40 km al norte, fuera del valle, pasando la población de Paredón, Coahuila.

3.3.2 Geomorfología

CONAGUA (2013) describe a esta región como una secuencia de sierras y valles semicerrados rodeados por los escarpados flancos de los anticlinales que forman a las sierras, que dan paso a una depresión (Cuenca de Parras) que se extiende desde Saltillo hasta Torreón. Las elevaciones varían de 1,100 a 3,350 msnm. La naturaleza de las

rocas y estructuras existentes conforman un drenaje muy bien desarrollado, que descarga hacia el norte; no obstante, la escasez de lluvias refleja la ausencia de ríos perennes.

En la superficie cubierta por el acuífero se puede distinguir 3 unidades geomorfológicas:

- Cuerpos anticlinales y sinclinales calcáreos
- Valle de Saltillo
- Grupo Difunta

Geomorfológicamente, el valle está labrado sobre la Formación Parras, constituidas por lutitas y su baja resistencia a la erosión, favoreciendo un relieve suave, sobre el cual se acumularon depósitos aluviales en las regiones topográficamente más bajas.

Otras formas del relieve de origen fluvial son una serie de abanicos aluviales desarrollados sobre el flanco noroccidental de la Sierra Zapalinamé. En la porción nororiental del valle resalta una amplia meseta aluvial antigua, que se extiende hacia el norte, que está disectada por el Arroyo La Boca y su continuación que es el Arroyo El Jaral.

En la zona de sierras ubicadas al occidente, existe una morfología típica originada por la erosión diferencial que afecta a las formaciones del Grupo Difunta, el cual está constituido por areniscas y lutitas, dando lugar, las primeras, a prominencias y escarpes topográficos y las segundas, a formas de erosión suave. Todas las formas topográficas están sujetas desde luego al patrón estructural regional, dominado por plegamientos, cuyos ejes están orientados en dirección este-oeste (CONAGUA, 2013).

3.4 Geología

Según Padilla y Sánchez (1985) Los patrones que presenta el noreste de México, así como su fisiografía están directamente ligados a un grupo de altos estructurales desarrollados antes del Triásico, relacionado con la apertura del Golfo de México que empezó a formarse durante el Triásico Tardío.

El terreno debe su origen a la deformación de rocas mesozoicas que fueron depositadas sobre un complejo basal consiste de un caleidoscopio de rocas que varían en litología y edad. (Padilla y Sánchez, 1982)

3.4.1 Estratigrafía

La columna estratigráfica presente en la región está representada por rocas, principalmente sedimentarias correspondientes a rocas cuyas edades varían desde el Jurásico superior hasta el reciente.

El Jurásico está representado por las formaciones: Zuloaga y La Casita, el Cretácico Inferior por las formaciones: Taraises, Cupido, La Peña, Aurora y Cuesta del Cura, para el Cretácico Superior lo conforman las formaciones Indidura y Parras, y en el Holoceno se depositan sedimentos sueltos, (limos, arcillas, arenas, grava y bloques). (Santiago, 2012)

Cuadro 1. Formaciones geológicas (CONAGUA, 2013)

Periodo	Formación	Descripción
Cuaternario		Corresponden principalmente a arenas, gravas y cantos rodados de calizas y conglomerados polimícticos que constituyen los pies de monte y los valles
Cretácico superior	Indidura	Generalmente aflora en las laderas de las sierras; consiste principalmente de dos series diferentes que están formadas en la parte inferior, de caliza arcillosa dispuesta en capas delgadas y lajeadas, con numerosas capas medianas o gruesas de caliza laminar color gris oscuro y de limolita calcárea que es de color amarillento.
	Parras	Secuencia de 1,200 m de lutitas carbonosas negras con escasas intercalaciones de areniscas. Está constituida por una litología muy homogénea de lutitas calcáreas y calizas arcillosas.
	Grupo Difunta	Constituido por una secuencia monótona de areniscas, lutitas y limolitas, de edades que varían del Cretácico Superior al Terciario Inferior, cuyo espesor conjunto supera los 1,000 m en algunas zonas.
	Cerro del pueblo	Esta unidad está compuesta por una secuencia de lutitas, areniscas y limonitas.
	Cerro huerta	Secuencia de areniscas, lutitas, limonitas rojas y verdes que afloran en la porción central y occidental de la zona de estudio.

	Cañon del tule	Secuencia de sedimentos arcillosos que sobreyace concordantemente a la Formación Cerro de Huerta y subyacen a la Formación Imágenes.
	las imágenes	Constituida por rocas arcillo-calcáreas que afloran en la porción central de la Cuenca de Parras, sobreyaciendo a la Formación Cañón del Tule y subyaciendo a la Formación Cerro Grande.
	Cerro Grande	Está integrada por grauvacas calcáreas cuya localidad tipo se encuentra en el Cerro Grande, aproximadamente a 20 km de Saltillo.
	Las encinas	Alternancia de capas delgadas, medias y gruesas de lutitas, areniscas y limonitas.
	Rancho nuevo	Corresponde a una alternancia de estratos delgados a medios de lutitas, areniscas y limonitas que subyacen a la Formación.
Cretácico inferior	Taraises	Está constituida de caliza con cantidades menores de limolita, que descansan sobre sedimentos arcillosos de la Formación La Caja.
	Cupido	Una sección calcárea que descansa sobre la Formación Taraises y subyace a la Formación La Peña, representada por rocas muy resistentes y homogéneas constituidas principalmente por calizas de estratificación mediana a gruesa.

	La peña	Compuesto por dos miembros: El inferior constituido por calizas y el superior por lutitas y calizas, que estratigráficamente se ubica entre la Caliza Cupido y la Caliza Aurora.
	Aurora	Está representada por calizas de aguas profundas (mudstone y wackstone), de estratificación mediana a gruesa, en ocasiones masiva con nódulos de pedernal y en otras con delgadas capas del mismo material.
	Cuesta del Cura	Su litología consiste principalmente de capas medianas a delgadas y onduladas de caliza de color gris a negra, compacta y un poco arcillosa. Contiene además nódulos, lentes y bandas de pedernal negro, ocupa generalmente las partes bajas de las sierras, aflorando como una banda de lomeríos alineados.
Jurásico superior	Minas Viejas	Unidad evaporítica constituida por anhidrita, yeso y halita, con intercalaciones aisladas de lutitas, calizas y areniscas que subyacen a la Caliza Zuloaga en varios anticlinales de Coahuila y en particular en el anticlinal Minas Viejas.
	Zuloaga	Secuencia de calizas dispuestas en estratos gruesos, con nódulos de pedernal negro y contenido fósil de bivalvos y gasterópodos.
	La Casita	Sedimentos de aguas someras del Jurásico Superior limitados en la parte inferior por la Formación La Gloria del Jurásico Superior o Zuloaga y arriba por la Formación Taraises.

3.5 Geología Estructural

CONAGUA (2013) menciona que las estructuras predominantes corresponden a dos grandes tipos de plegamiento. El primero consiste en anticlinales alargados, relativamente angostos, de flancos asimétricos, algunos recostados y afallados, con buzamientos suaves en ambos extremos cuyos ejes son burdamente paralelos a los bordes de los antiguos elementos paleogeográficos del Jurásico Tardío.

El segundo tipo de plegamientos se caracteriza por anticlinales amplios, ligeramente cóncavos, a veces bifurcados, de rumbo preferencial NW-SE. La deformación de estas estructuras está relacionada con el movimiento vertical de sal o anhidritas que es evidente en el núcleo erosionado de varias estructuras observadas en la porción sureste de la cuenca (Potrero Chico, Las Ánimas y Baluartes).

La región se ubica en la convergencia de los Terrenos Sierra Madre y Coahuila. Se considera que la carpeta sedimentaria mesozoica se depositó sobre los basamentos de dichos terrenos, que evolucionaron durante el Paleozoico Tardío, cuando ocurrió el cierre del océano Proto-Atlántico. Tectónicamente, las estructuras desarrolladas en la Sierra Madre Oriental y en la Cuenca de Parras, están afectadas por fallas inversas de bajo ángulo, inclinadas en la misma dirección de transporte tectónico.

Este arreglo morfoestructural permitió el desarrollo de un corredor tectónico ubicado al sur del Terreno Coahuila, en donde el estilo de deformación se caracteriza por el desarrollo de fallas profundas y anticlinales de bajo relieve, cuyos ejes coinciden con los bordes paleogeográficos de la Sierra Madre Oriental y la Cuenca de Parras.

3.6 Geología del subsuelo

De acuerdo con CONAGUA (2013), es posible definir que en el subsuelo se presentan lutitas, areniscas y calizas “sobreyacidas” por delgados espesores de depósitos aluviales y coluviales, así como de piedemonte hacia los flancos de las sierras que delimitan el acuífero.

El acuífero se encuentra alojado y constituido por dos medios, uno granular en su porción superior, conformado por una delgada capa de sedimentos aluviales y coluviales producto de la erosión de las partes altas de las sierras, que han sido transportados por abanicos aluviales, por escurrimientos superficiales para ser depositados en los cauces de los arroyos y las planicies, así como por conglomerados polimícticos.

La porción inferior es un medio fracturado que está constituido por lutitas y lutitas calcáreas alteradas de la Formación Parras, que junto con la unidad superior forman un acuífero de baja permeabilidad y de reducida capacidad de almacenamiento. La mayor parte del subsuelo de la región está conformada por las lutitas calcáreas de la Formación Parras cubierta en ocasiones por la secuencia de lutitas y areniscas.

3.7 Hidrogeología

CONAGUA (2013) define la presencia de un acuífero de tipo libre, heterogéneo y anisótropo, constituido por un medio granular y otro fracturado. La porción superior está conformada por sedimentos aluviales, de granulometría variada, así como conglomerados polimícticos, cuyo espesor puede alcanzar algunas decenas de metros en el centro de los valles; la porción inferior se aloja en una secuencia de rocas

sedimentarias, principalmente lutitas de la Formación Parras, cuando presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

Esta es la unidad que se explota para satisfacer las necesidades del uso doméstico y pecuario. Las calizas cretácicas y jurásicas representan un acuífero de buen potencial que presenta condiciones de semiconfinamiento y confinamiento, debido a que están sobreyacidas por lutitas y limolitas. Por su posición estratigráfica y ubicación forman las principales sierras que limitan al valle, constituyendo las zonas de recarga. En el subsuelo conforman el acuífero que representa actualmente la principal fuente de abastecimiento de agua potable para abastecimiento de Saltillo.

3.8 Conductividad Hidráulica

Los valores de conductividad hidráulica son escritos por Lewis (2006) de acuerdo con las propiedades intrínsecas de los materiales desarrollando rangos típicos de conductividad para las rocas más comunes.

Según Lewis (2006) el movimiento vertical del fluido a través de la zona no saturada es en muchos sentidos análogo al movimiento del fluido. movimiento a través de la zona saturada. Se producen altas tasas de viajes en la zona saturada de alta depósitos permeables (como gravas limpias y bien clasificadas) o rocas que poseen alta capacidad hidráulica valores de conductividad (como las calizas kársticas

También se puede esperar que ocurra una zona no saturada en estos estratos, aunque esto es predominantemente orientado verticalmente en lugar de orientado horizontalmente, como sería generalmente el caso del flujo en la zona saturada. Por el

contrario, los caudales saturados serán lentos en estratos que poseen bajos valores de permeabilidad o conductividad hidráulica y este también será generalmente el caso para el flujo a través de la zona no saturada en las mismas rocas.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Localización del lugar de estudio

El acuífero Saltillo-Ramos Arizpe, definido con la clave 0510 de la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción suroriental del estado de Coahuila, entre los paralelos 25° 16' y 25° 44' de latitud norte y los meridianos 100° 34' y 101° 12' de longitud oeste abarca una superficie de 1,446 km².

Limita al norte con el acuífero Paredón, al oeste con General Cepeda-Sauceda, al sur con Cañón del Derramadero, al sureste con Región Manzanera-Zapalinamé, pertenecientes al estado de Coahuila; al noreste limita con el acuífero Campo Durazno y al este con Campo de Buenos Aires, pertenecientes al estado de Nuevo León.

La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la Cuadro 2.

Cuadro 2. Poligonal del acuífero Saltillo-Ramos (DOF, 2011)

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	100	49	7.8	25	43	17.7
2	100	41	6.9	25	36	46.1
3	100	35	11.1	25	28	18.5
4	100	38	41.7	25	28	57.3
5	100	41	40.4	25	29	0.9
6	100	44	16.6	25	28	22.8
7	100	48	5.4	25	27	53
8	100	49	32.6	25	26	42.1
9	100	49	55.6	25	23	29.3
10	100	56	29.9	25	18	51.8
11	101	2	41.7	25	16	37.1
12	101	8	20.2	25	20	47.9
13	101	11	32.6	25	22	48.6
14	101	12	11.4	25	28	29.9
15	101	3	23.3	25	33	8.4
1	100	49	7.8	25	43	17.7

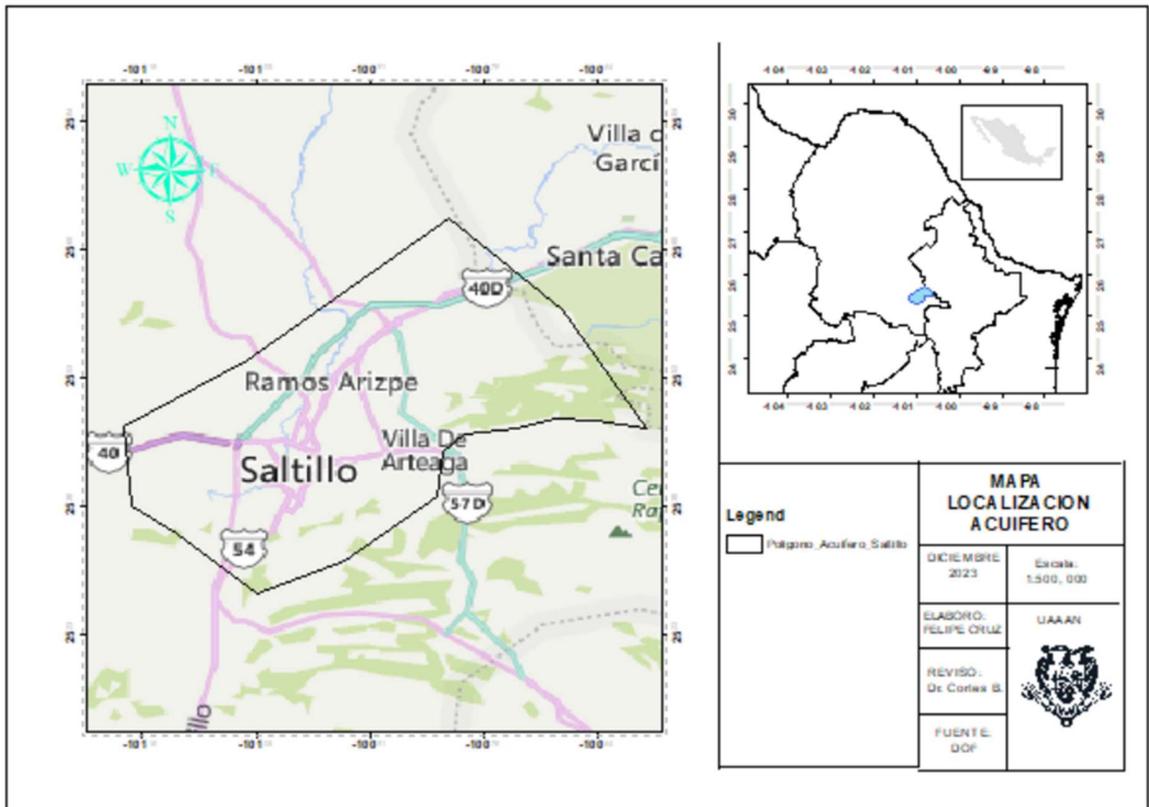


Figura 1. Perimetral del acuífero Saltillo-Ramos (DOF 2011).

4.2 Metodología DRASTIC

El método DRASTIC es un método empírico desarrollado por Aller (1987) y patrocinado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés). Este método busca sistematizar la determinación del potencial de los contaminantes de alcanzar la zona saturada.

Esta técnica es denominada así por los siete factores que se toman en cuenta para la determinación de la vulnerabilidad por sus siglas en inglés. Estos factores son:

- Profundidad del agua subterránea (Depth)
- Tasa de recarga (Recharge)
- Tipo de acuífero (Aquifer media)
- Tipo de suelo (Soil media)
- Topografía (Topography)
- Impacto en la zona no saturada (Impacto of vadose zone)
- Conductividad hidráulica (Hydraulic Conductivity)

El índice DRASTIC es calculado con estos factores de la siguiente forma:

$$DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + Irlw + CrCw = \text{Contaminación Potencial}$$

Donde:

- Dw, Rw, Aw, Sw, Tw, lw y Cw corresponden a la ponderación de cada uno de parámetros o factores señalados anteriormente.
- Dr, Rr, Ar, Sr, Tr, Ir y Cr corresponden a la reclasificación o valoración interna de cada parámetro de acuerdo a la variabilidad de la propiedad.

4.2.1 Factores de Ponderación

Cuadro 3. Valores de ponderación para los parámetros DRASTIC

Tipo	Variable						
	D_w	R_w	A_w	S_w	T_w	l_w	C_w
Intrínseca	5	4	3	2	1	5	3

Una vez conocidos los valores de ponderación intrínseca podemos cambiar los valores por:

$$\text{Contaminación potencial} = (5D_r) + (4R_r) + (3A_r) + (2S_r) + (1T_r) + (5I_r) + (3C_r).$$

Esta ecuación permite obtener valores de vulnerabilidad que van de 23 a 230 según se muestra en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Valores de Vulnerabilidad DRASTIC

Grado vulnerabilidad	Valor DRASTIC	Calificación
Muy bajo	23-64	1
Bajo	64-105	2
Moderado	105-146	3
Alto	146-187	4
Muy alto	187-230	5

4.2.1.1 Profundidad Del Agua Subterránea

La distancia que existe entre la superficie del suelo y el nivel estático es uno de los factores que determinan el tiempo en que un agente contaminante pueda llegar hasta la zona saturada del medio.

Aller (1987) diseñó esta metodología para su aplicación en acuíferos con niveles freáticos muy cercanos a la superficie, sin embargo, si deseamos utilizarla para acuíferos de zonas áridas en donde la distancia a los niveles piezométricos es mayor, se tendría que hacer una clasificación acorde a la zona de estudio, y se deberían disminuir los valores de vulnerabilidad, tomando como principio que a mayor profundidad menor vulnerabilidad.

Aunque haya acuíferos con profundidades significativas hasta el nivel estático, esto no descarta por completo la posibilidad de que aún pueda haber contaminación, ya que el proceso podría ocurrir.

Cuadro 5. Valores de ponderación interna para el parámetro D_r

Profundidad (m)	Clasificación 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

4.2.1.2 Tasa De Recarga

El método considera que la principal fuente de recarga se da por la precipitación, en menor proporción puede haber otras fuentes como la excesiva irrigación en áreas agrícolas, pero ambas siguen el mismo principio de infiltración que empieza en la superficie del suelo y culmina en la zona saturada (Aller, 1987)

Cuadro 6. Valores de ponderación interna para el parámetro R_r

Recarga (mm)	Clasificación R_r
0 – 50	1
50 – 103	3
103 – 178	6
178 – 254	8
>254	9

4.2.1.3 Tipo De Acuífero (Litología del acuífero)

El material litológico que compone el subsuelo afecta de manera directa el curso de un contaminante, la cantidad de porosidad primaria y porosidad secundaria (fracturas) determinara la capacidad de atenuación que posee el acuífero frente a la intrusión de sustancias.

El tipo de roca existente determina el sistema de flujo subterráneo, y por lo tanto la ruta y la longitud de la ruta que debe seguir el contaminante, siendo esta última la que determina el tiempo disponible para poder atenuarlo.

Cuadro 7. Valores de ponderación interna para el parámetro A_r

Tipo de Acuífero	Rango de clasificación A_r	Valor típico A_r
Lutita masiva	1 - 3	2
Metamórfica ígnea	2 - 5	3
Metamórfica ígnea meteorizada	3 - 5	4
Till 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	2 - 10	8
Basaltos	9 - 10	9
Caliza Karstica		10

4.2.1.4 Tipo De Suelo

Las características de la capa más superficial de la corteza determinan significativamente la proporción de agua que puede infiltrarse, influyen en el desplazamiento vertical y en los procesos de atenuación. La textura y el espesor del suelo influyen directamente en los procesos de contaminación por lixiviados, ya sea absorbiéndolos y fijándolos entre los primeros horizontes impidiendo su avance. La actividad microbiológica (bacterias principalmente) que existe en suelos orgánicos puede inmovilizar y desintegrar sustancias como fertilizantes, pesticidas y otros contaminantes.

Cuadro 8. Valores de ponderación interna para el parámetro S_r

Tipo de suelo	Clasificación S_r
Delgado ausente	10
Grava	10
Arena	9
Agregado arcilloso o compactado	7
Arenisca margosa	6
marga	5
Limo margoso	4
Arcillosa margosa	3
Estiércol cieno	2
Arcilla no compactada y no agregada	1

4.2.1.5 Topografía

Este parámetro determina el flujo de la escorrentía e influye en los patrones de infiltración. La pendiente del terreno influye directamente en el flujo de cualquier líquido que sea vertido en la superficie del suelo, condicionando su flujo en las partes inclinadas o su respectivo estancamiento en áreas planas (Aller, 1987).

Cuadro 9. Valores de ponderación interna para el parámetro T_r

Pendiente %	Clasificación T_r
0 – 2	10
2 – 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
18	1

4.2.1.6 Impacto en la Zona no Saturada (Zona vadosa)

El impacto que genera la zona no saturada en la atenuación de contaminantes depende del tipo de material que la componga, aspectos como la existencia de capas o formaciones confinantes pueden limitar el avance e intrusión de sustancias.

Cuadro 10. Valores de ponderación interna para el parámetro I_r

Tipo de medio	Rango de clasificación I_r	Valor típico 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
Arena y grava	6 – 9	8
Basalto	2 – 10	9
Caliza kárstica	8 – 10	10

4.2.1.7 Conductividad Hidráulica

Este parámetro indica la capacidad que tienen los materiales que conforman al acuífero para dejar pasar agua o mejor dicho transmitirla en cualquier dirección, también determina la velocidad a la que fluye el agua bajo un determinado gradiente hidráulico.

Dicha característica de los acuíferos está controlada por la proporción y la conexión que guardan los espacios vacíos, determinados por los niveles de porosidad granular y fracturamiento. Como consecuencia la conductividad hidráulica determinará la velocidad a la que los contaminantes fluyen y se disipan en el medio subterráneo. Acuíferos con altos valores de conductividad hidráulica serán altamente vulnerables porque permitirán que cualquier sustancia disuelta en sus aguas se propague rápidamente en todo el medio.

Cuadro 11. Valores de ponderación interna para el parámetro C_r

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

4.3 Fuente de Datos

El desarrollo cartográfico de cada uno de los factores del modelo DRASTIC se realizó con ayuda de la herramienta Reclasificación y el Algebra de Mapas del programa ArcGIS 10.8 de ESRI ®. En el Cuadro 12 se desglosa las fuentes de datos usadas para la obtención de la información y desarrollo de cada factor del índice DRASTIC.

Cuadro 12. Fuente de consulta para parámetros DRASTIC

Factor	Fuente de Datos
Profundidad del Nivel del Agua	Bases de datos piezométricos de CONAGUA correspondientes al año 2011
Recarga	Archivos formato shape Escala 1:200, 000 de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)
Naturaleza del Acuífero	Cartas Geológicas-Litológicas y Archivos formato shape Escala 1:200, 000 de CONABIO
Tipo de Suelo	Carta de Edafología y Archivos formato shape Escala 1:200, 000 de CONABIO
Topografía	Modelo Digital de Elevación (MDE) del INEGI Resolución 15m
Conductividad	Valores de conductividad hidráulica descritos por Lewis según el tipo de material existente en el acuífero.

5. RESULTADOS

5.1 Profundidad del nivel del agua

Este parámetro es de suma importancia ya que determina el nivel de dificultad para que los contaminantes lleguen al acuífero, los resultados de la piezometría muestran que hay una media de profundidad entre 2.5 m como mínimo especialmente en las zonas urbanas de Saltillo y Ramos Arizpe o valles formados por las sierras; mientras que los valores pueden superar los 200 m en zonas altas o con pendientes pronunciadas.

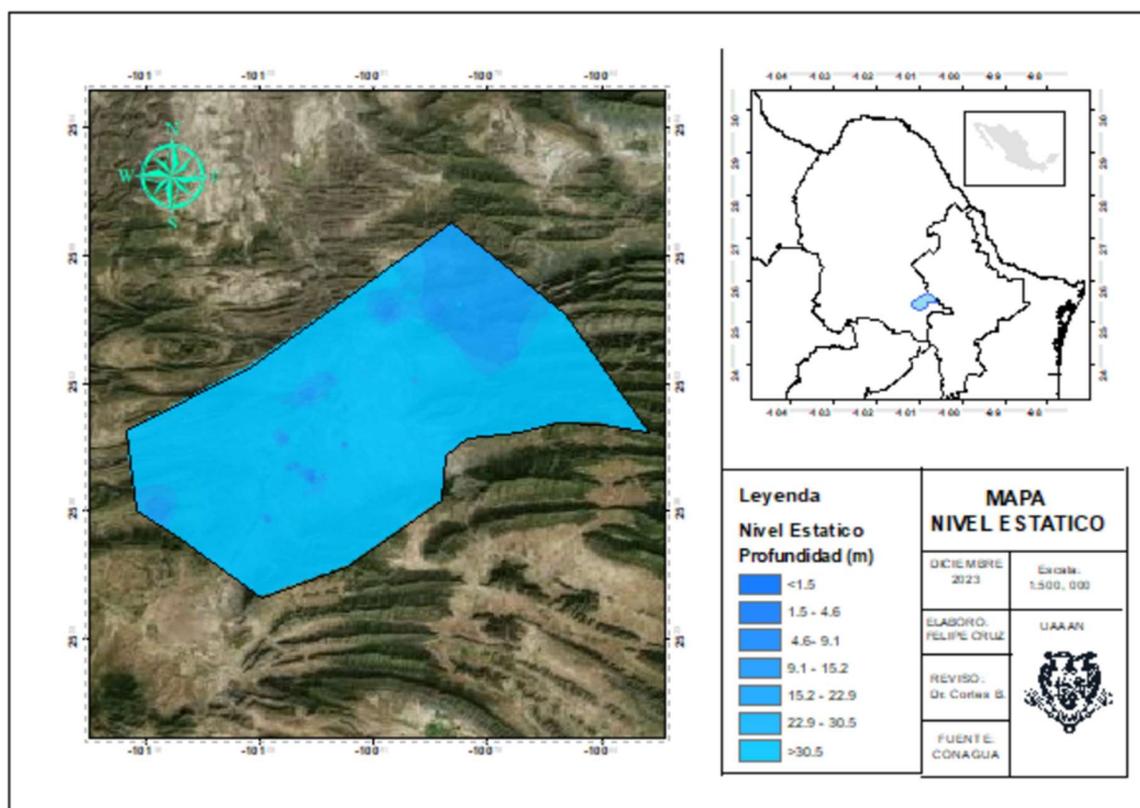


Figura 2. Profundidad del nivel estático elaboración propia con datos de CONAGUA (2011).

5.2 Recarga

Según CONAGUA (2013) la recarga total media anual que recibe el acuífero (R_t), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso, su valor es de $86.7 \text{ hm}^3/\text{año}$, de los cuales 75.0 hm^3 son recarga natural y 11.7 hm^3 recarga inducida.

5.3 Naturaleza del acuífero

De acuerdo con los mapas litológicos consultados para el tipo de acuífero, se reportan variaciones en toda la región, predominando las siguientes clasificaciones: en primer término, se encuentran; las lutitas, limonitas y calizas arcillosas, en segundo término; calizas y areniscas y, por último; gravas, arenas y limos presentándose estos últimos en escasa proporción.

Cuadro 13. Valores de ponderación interna para A_r

Litología	Valor A_r
Aluvial	8
Arenisca-Lutita	4
Caliza	4
Caliza-Limolita	7
Caliza-Lutita	7
Caliza-Pedernal	8
Coluvial	6
Lutita-Arenisca	7
Lutita-Caliza	6
Yeso-Caliza	6

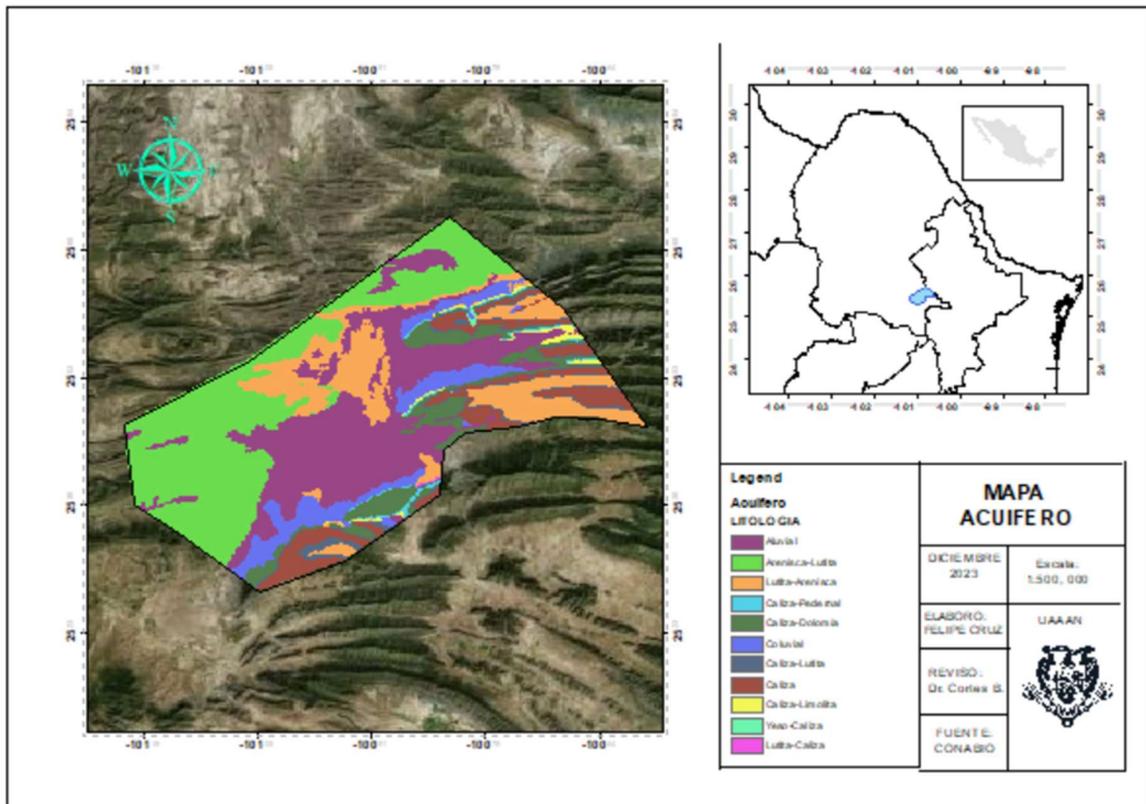


Figura 3. Naturaleza del acuífero (Litología) (CONABIO 2023)

5.4 Tipo de suelo

El suelo es un medio donde el agua puede o no absorber un medio contaminante o que promueva la penetración a estratos inferiores, como es en el caso de algunos lugares del área de estudio, donde el suelo es escaso o ausente, aumentando la probabilidad de quedar expuesto y por consiguiente ser vulnerable.

Cuadro 14. Valores de ponderación interna para el factor S_r

Tipo de suelo	Descripción	Valor S_r
Xerosol Calcico	Son suelos por lo general fuertemente calcáreos, poco pedregosos, básicos, saturados en base, con claro dominio del calcio sobre los demás cationes de cambio.	9
Litosol	Suelos muy delgados, pedregosos y poco desarrollados que pueden contener una gran cantidad de material calcáreo.	10
Regosol Calcarico	Suelos jóvenes que se desarrollan sobre material no consolidado. Su potencial para atenuar contaminantes es bajo	10
Xerosol Haplico	Suelos con textura media	8
Feozem Calcarico	Suelos porosos, oscuros y ricos en materia orgánica	9

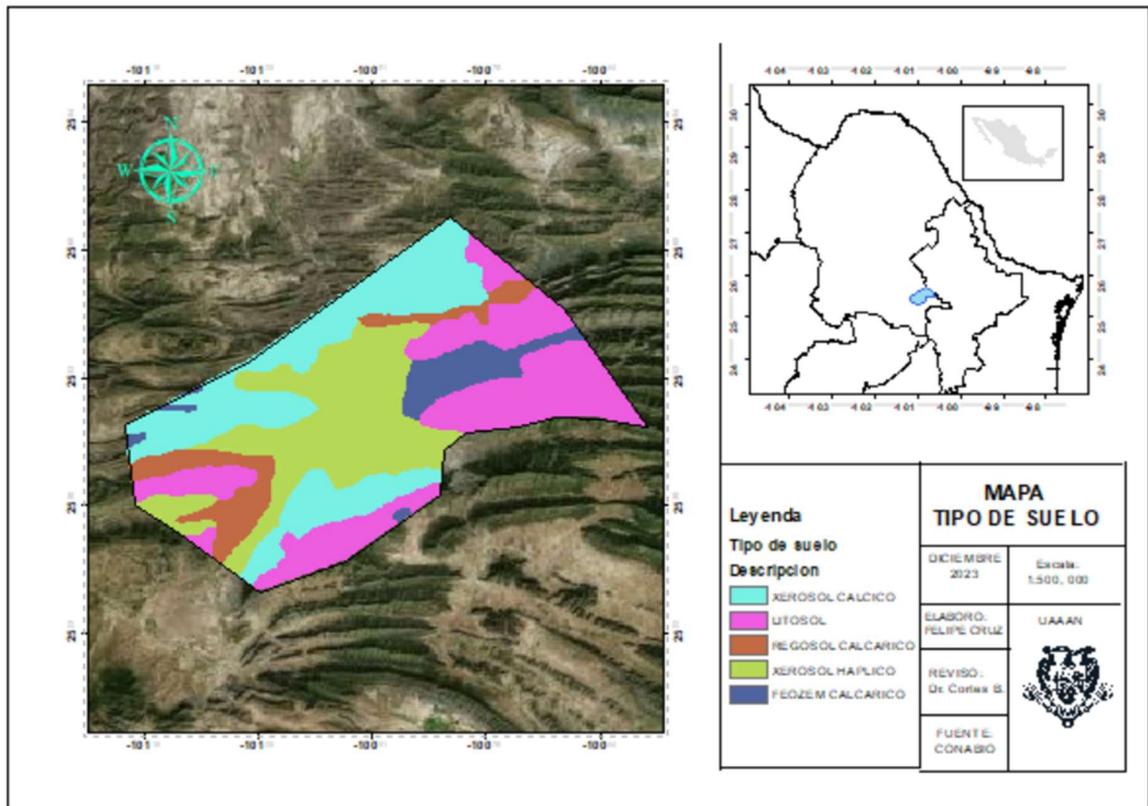


Figura 4. Tipo de suelo (CONABIO 2023)

5.5 Topografía

La topografía es muy variante, encontrándose con pendientes poco pronunciadas en las regiones urbanas de Saltillo y Ramos Arizpe, así como los valles que se forman en la sierra de Zapáliame, aumentando considerablemente la pendiente cada que se avanza a la sierra.

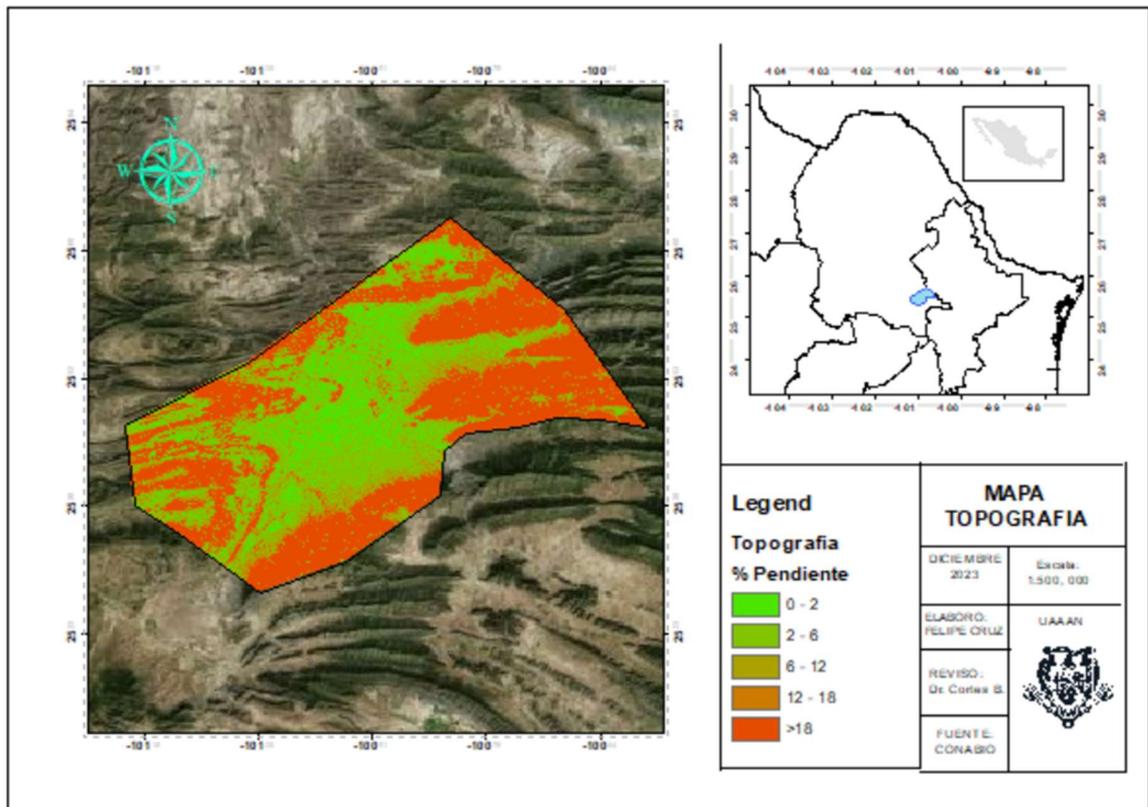


Figura 5. Topografía (Porcentaje de pendiente)

5.6 Impacto en la zona no saturada

Se reconocen tres zonas dentro de la región los cuales se reportan en la figura 6, donde se nota claramente una parte denominada cretácico medio caracterizado por rocas sedimentarias marinas, predominando calizas y areniscas; seguido de pleistoceno y reciente que se caracteriza por contener terrazas marinas, gravas, arenas y limos; y por último cretácico superior caracterizado por ser rocas marinas predominando lutitas, limolitas y calizas.

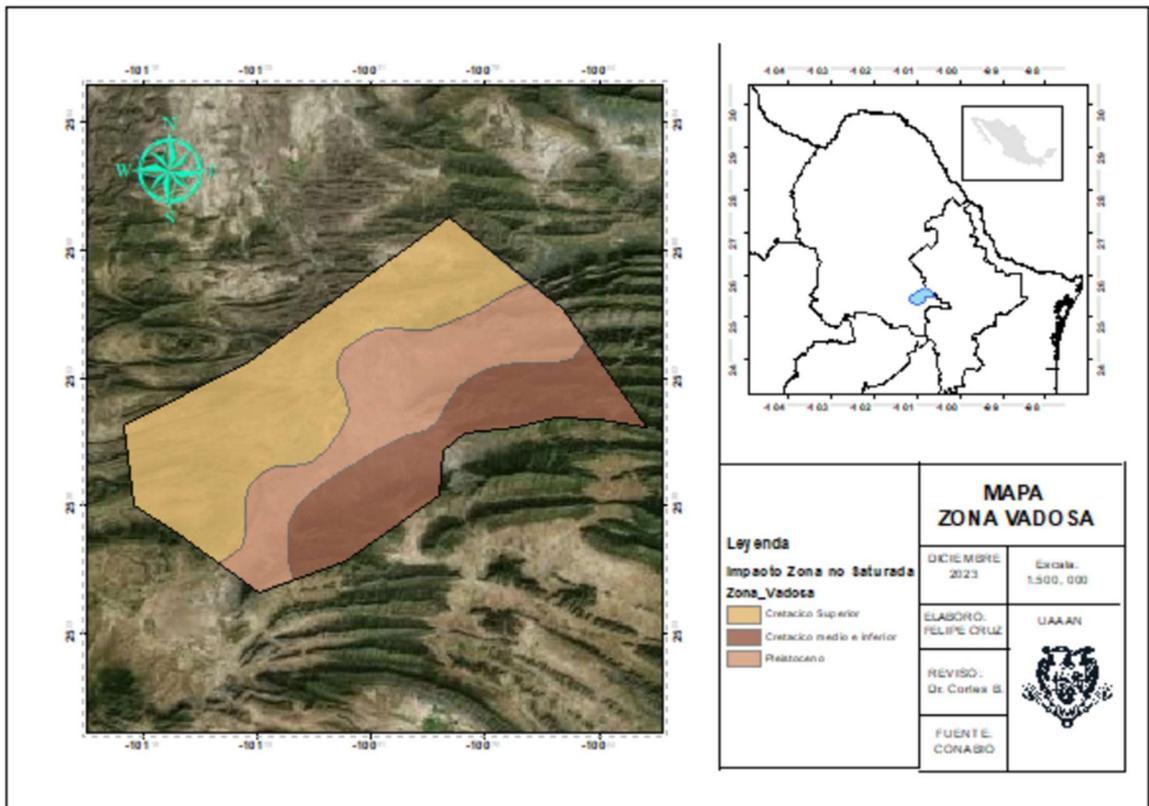


Figura 6. Impacto en la zona no saturada

5.7 Conductividad hidráulica

Para la asignación de valores de conductividad hidráulica en el acuífero del valle con secuencias de lutita-arenisca, se designó como unidad más importante a las areniscas, debido a que son el medio con mayor espesor, posee mayor permeabilidad y por consecuencia es más vulnerable. Se consideró un valor pequeño porque la existencia de capas de lutita puede llegar a ralentizar o evitar la infiltración y con eso la lixiviación de sustancias.

Para el caso de los medios calizos, Lewis (2006) considera que tienen el potencial de dejar pasar hasta 100 metros de agua por día, en este sentido estos acuíferos son

muy capaces de almacenar y transmitir grandes cantidades de agua, la única limitante será el patrón de precipitaciones que gobierne la región.

Cuadro 15. Valores de conductividad hidráulica según el material

Sistema Acuífero	Consideraciones	Conductividad Hidráulica (m/día)	Valor C _r
Acuífero de Lutitas	Se considero el medio arenisco como el principal sistema para agregarle el índice de permeabilidad	< 20	3
Acuífero Calizas	Las calizas tienen un alto índice de conductividad debido a las existentes fisuras y cavidades de disolución, así como la interconexión que estas presentan	< 100	10

5.8 DRASTIC

Con ayuda de la reclasificación de mapas con el programa ArcMap se procesaron cada una de los raster asignándoles valores según el peso de la metodología DRASTIC, y una vez asignados se realizó un algebra de mapas esto con el propósito de unir cada uno de los parámetros en un solo mapa llamado Mapa de vulnerabilidad.

Los valores del índice de vulnerabilidad DRASTIC variaron entre 87 y 147. En el mapa se puede observar las áreas clasificadas con vulnerabilidad mínima que ocupan la mayor parte de la superficie total del acuífero; esto se debe en medida a la topografía y profundidad de los acuíferos, mientras que los valores altos de vulnerabilidad se encuentran en las zonas urbanas de saltillo y ramos las cuales se encuentran en “valles” o depresiones productos de la geografía del lugar, así como también una actividad industrial alta.

Los valores predominantes muestran que el acuífero en su 90% de su área no es susceptible a la contaminación mientras que el resto del área representa una contaminación alta a la cual debe prestar atención.

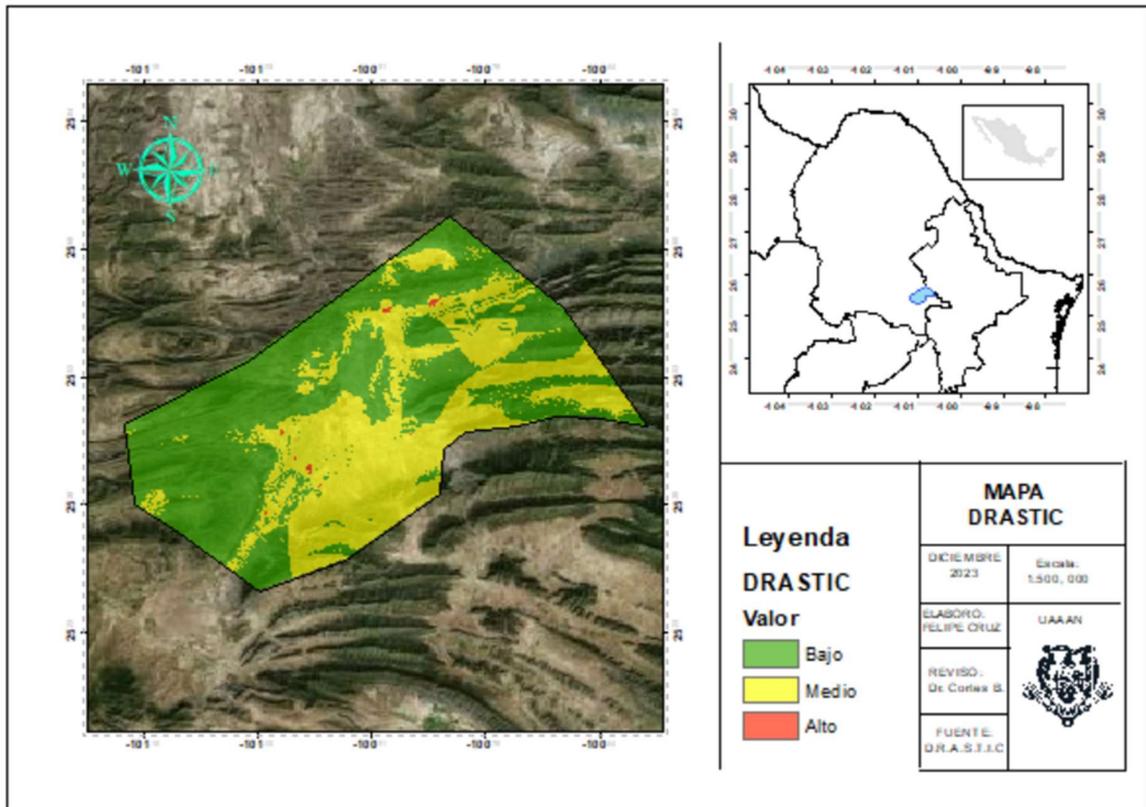


Figura 7. Mapa de vulnerabilidad DRASTIC

6. CONCLUSIONES

El método DRASTIC ofrece una metodología robusta con cada uno de sus parámetros resultando una metodología práctica y eficaz. Aunque existan otros métodos, DRASTIC involucra los parámetros necesarios para considerar si un acuífero tiende a ser vulnerable o no.

Es esencial comprender que el comportamiento del flujo hidráulico en los acuíferos tiende a ser altamente heterogéneo y complejo. Esta complejidad impacta el estudio de las relaciones entre los valores de vulnerabilidad y la calidad del agua subterránea. La presencia de contaminantes en un punto o pozo puede deberse directamente a la lixiviación vertical desde ese mismo punto en la superficie. Alternativamente, los contaminantes pueden haber migrado a ese punto desde otro lugar más distante, influenciados por el flujo horizontal que sigue la interconexión de grietas o vacíos y el gradiente de altitud. Este fenómeno subraya la necesidad de abordar la variabilidad del flujo hidráulico al analizar la vulnerabilidad y la calidad del agua subterránea.

7. RECOMENDACIONES

Una evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación debe contar con elementos sólidos para asegurar un grado de confiabilidad. La presencia de información precisa, detallada y actualizada es fundamental para determinar si un acuífero puede estar expuesto a la contaminación.

La disponibilidad de datos geohidrológicos es esencial para realizar estudios más exhaustivos sobre la contaminación de las aguas subterráneas.

Dada la importancia significativa de estos estudios, se recomienda que la evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación se integre como parte de un plan previo para la gestión de los recursos acuíferos. Esto contribuirá a una toma de decisiones más informada en la explotación de los acuíferos.

Tomando en cuenta la importancia del recurso hídrico subterránea en la región como su principal y más importante fuente de abastecimiento es crucial continuar realizando estudios de vulnerabilidad en regiones donde aún no se han llevado a cabo, con el objetivo de comprender mejor y gestionar de manera más efectiva los acuíferos en esas áreas.

8. BIBLIOGRAFÍA

Aller L. B. T. Lehr J. Petty R. & G. Hackett. (1987). DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. U.S. EPA /600/2-87-036: 1-455. Oklahoma.

Carbonell A. (1993). Groundwater vulnerability assessment: predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty. National Research Council. National Academy Press: 1-204. Washington DC.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2013). Determinación de la disponibilidad del agua en el acuífero Saltillo-Ramos Arizpe, <http://www.cna.gob.mx>

Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO). Geoinformación (2023). metadatos y cartografía en línea. <http://www.conabio.gob.mx>

Cortés, B. J. (1999). Simulación del flujo de agua subterránea en un medio fracturado de calizas. Tesis de doctorado. Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León P35-39

EPA. (1991). A review of methods for assessing the sensitivity of aquifers to pesticide contamination. Preliminary document: 1-21. Washington DC.

Foster, S e Hirata R. (1988). Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. CEPIS/PAHO-WHO Technical Report. Lima (Perú). 81 pp.

Foster S. e Hirata R. (1991). Determinación del Riesgo de contaminación de aguas subterráneas, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Lima, Perú.

INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2011. Conjunto de datos vectoriales de Cuencas hidrológicas de México. Escala 1:250 000. Recorte para el estado de Coahuila de Zaragoza, México.

Lewis M. A, Cheney C. S., Ódochartaig High B. É. (2006). Guide to Permeability Indices. British Geological Survey, Open Report, CR/06/160N. 29pp.

MARTÍNEZ, M.; DELGADO, P.; FABREGAT, V. 1998. Aplicación del Método DRASTIC para la evaluación del riesgo de afección a las aguas subterráneas por una obra lineal. Jornadas sobre la contaminación de aguas subterráneas: un problema pendiente. Valencia IH-GE. pp. 413-420

Padilla y Sánchez, R. J. (1982): Geologic Evolution of the Sierra Madre Oriental between Linares, Concepción del Oro, Saltillo and Monterrey, México.- Ph. D. Dissertation, University of Texas at Austin, p. 217.

Padilla y Sánchez, R. J., (1985): Implicaciones estructurales de los arrecifes en el desarrollo de pliegues: Bol. Asoc. Mex. Geol. Petrol., v. 34 n° 2, p. 43-90.

Santiago, C. B. (2012) Estudio Hidrogeológico de la región agua nueva, estado Coahuila. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León P19

Troldborg M. (2010). Risk assessment models and uncertainty estimation of groundwater contamination from point sources. PhD Thesis. Technical University of Denmark.