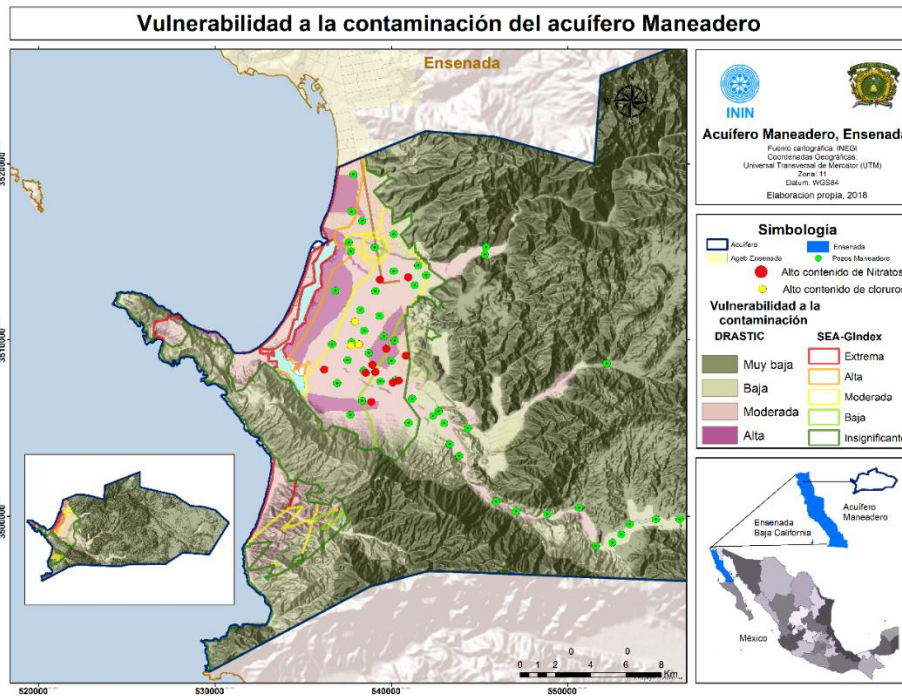


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO  
FACULTAD DE GEOGRAFÍA  
Maestría en Análisis Espacial y Geoinformática

Vulnerabilidad a la contaminación del Acuífero Maneadero, Ensenada Baja California, aplicando los métodos DRASTIC y SEA-GIndex



PRESENTA:

Guadalupe Díaz Gutiérrez

Comité

Dr. Alexis Ordaz Hernández  
Dr. L. Ricardo Manzano Solís  
Dr. Miguel Balcázar García

TOLUCA, MÉXICO OCTUBRE 2018



## INDICE

### Introducción

<b>Capitulo I. Introducción .....</b>	<b>6</b>
1.1 Planteamiento del problema.....	12
1.2 Justificación .....	14
1.3 Objetivos.....	17
1.3.1 Objetivo principal.....	17
1.3.2 objetivos específicos.....	17
<b>Capitulo II. Marco referencial .....</b>	<b>18</b>
2.1 Antecedentes.....	18
2.1.1 Antecedentes internacionales.....	18
2.1.2 Antecedentes nacionales.....	22
2.1.3 Antecedentes locales .....	25
2.2 Marco teórico .....	27
2.3 Marco conceptual.....	42
2.4 Marco legal .....	44
<b>Capitulo III. Caracterización físico geográfica del área de estudio .....</b>	<b>48</b>
3.1 Localización, límites y extensión.....	48
3.1.1 Valle de Maneadero .....	50
3.2 Topografía.....	52
3.3 Hidrografía.....	54



3.3.1 Densidad de drenaje.....	55
3.4 Clima.....	56
3.4.1 Precipitación .....	57
3.4.2 Evapotranspiración.....	58
3.4.3 Temperatura.....	58
3.5 Geología.....	59
3.5.1 Hidrogeología.....	60
3.6 Edafología.....	62
3.7 Uso de suelo y vegetación .....	64
3.8 Demografía.....	65
3.8.1 Actividades agrícolas.....	68
3.9 Proyectos sustentables .....	70
<b>Capítulo IV. Materiales y métodos .....</b>	<b>75</b>
4.1 Etapas metodológicas .....	76
4.1.1 Análisis de requerimientos.....	78
4.1.2 Caracterización físico geográfica y socioeconómica.....	80
4.1.3 Validación de información .....	82
4.1.4 Integración de base de datos y análisis geoestadístico .....	82
4.1.5 Modelado DRASTIC.....	84
4.1.6 Modelado SEA-GIndex.....	92



<b>Capitulo V. Resultados .....</b>	<b>96</b>
5.1. Análisis espacio temporal de la piezometría en el acuífero Maneadero.....	97
5.2 Análisis espacio temporal del contenido de nitrato (N-NO <sub>3</sub> ) en Maneadero.....	102
5.3. Análisis espacial de los niveles piezométricos para el año 2016, mediante el método Kriging.....	108
5.4 Zonificación de la vulnerabilidad por intrusión salina en el acuífero maneadero, método SEA-GIndex.....	113
5.4.1 Distancia a la línea de costa .....	113
5.4.2 Litología .....	114
5.4.3 Piezometría .....	115
5.4.4 VULNERABILIDAD A LA INTRUSIÓN SALINA .....	117
5.5 Aplicación de la metodología DRASTIC.....	120
5.5.1 Profundidad al nivel freático.....	121
5.5.2 Recarga neta.....	125
5.5.3 Litología del acuífero.....	128
5.5.4 Tipo de suelo.....	129
5.5.5 Topografía .....	131
5.5.6 Litología de la zona no saturada.....	133.
5.5.7 Conductividad hidráulica del acuífero.....	135



5.6 VULNERABILIDAD ACUÍFERO MANEADERO MEDIANTE EL MÉTODO DRASTIC.....	137
5.7 Validación con contenido de nitratos .....	141
5.8 Validación con contenido de cloruros .....	144
5.9 Usos potenciales de la estimación a la vulnerabilidad del acuífero.....	149
<b>Conclusiones .....</b>	<b>151</b>
<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>155</b>



## **Capítulo I. INTRODUCCIÓN**

Los acuíferos son unidades hidrogeológicas altamente vulnerables, y su explotación puede generar efectos perjudiciales, por ejemplo, el agotamiento de manantiales, desaparición de lagos y humedales, afectación en los ecosistemas, pérdida de vegetación, etc. La vulnerabilidad de los acuíferos costeros se ve incrementada por la extracción del agua del subsuelo (Ferguson y Gleeson, 2012).

Las actividades humanas modifican y afectan los recursos naturales, específicamente hablando de los recursos hídricos subterráneos, que actualmente se han visto severamente afectados disminuyendo su calidad y cantidad en disponibilidad debido a la falta de conciencia ante un uso sustentable.

Un aspecto importante a considerar en la disponibilidad de agua es el incremento de la población, aunado a lo anterior es el desarrollo territorial no planificado, crecimiento descontrolado y el aumento de la demanda de servicios en zonas urbanas.

En la actualidad es común la alteración de las características del agua subterránea, llevando a la contaminación y afectando la calidad del agua y los descensos piezómetros en acuíferos sobreexplotados. Los Sistemas de Información Geográfica son muy utilizados en la resolución de problemas ambientales, esto ha llevado a considerar al SIG como soporte para entender y analizar cómo se relacionan los aspectos físico geográficos y socioeconómicos con las ciencias ambientales y sobre la importancia de la percepción de la realidad actual.

Los SIG son una herramienta de predicción mediante hipotéticos escenarios, importantes para el análisis espacial y de apoyo para la toma de decisiones en cuanto al adecuado manejo de los acuíferos permitiendo un desarrollo social y económico prospero, sin afectar los recursos naturales.



Dentro de la hidrología los SIG se han utilizado para la caracterización de los sistemas de agua subterránea, asimismo en el manejo de datos en mapas temáticos y el modelado matemático. En cuanto a la aplicación de los SIG en estudios de intrusión salina se ha utilizado principalmente para la determinación de zonas vulnerables a la contaminación de este tipo (Neri, 2007).

Según la UNESCO hasta el momento en el mundo se encuentran localizados 273 acuíferos transfronterizos (figura y tabla 1), los cuales representan casi un 96 por ciento de agua dulce del planeta. En México existen 18 acuíferos incluidos en esta categoría, no existiendo un conocimiento detallado de su geometría. Según el informe de la UNESCO, los acuíferos proporcionan más del 70 por ciento del agua utilizada, y son una fuente de abastecimiento de agua en muchas regiones áridas o semiáridas del planeta. Un 65 por ciento de los recursos hídricos de los acuíferos se destinan para el regadío, un 25 por ciento a la alimentación humana en agua potable y un 10 por ciento a la industria (UNESCO, 2008).



Figura 1. Elaboración propia en base a UNESCO, 2008.

Cuadro 1. Elaboración propia en base a (UNESCO, 2008)

Número de acuíferos transfronterizos	
América	68
África	38
Europa Oriental	65
Europa Occidental	90
Asia	12



Existen medidas de protección de aguas subterráneas en varios países, entre ellas destacan las que van dirigidas a los pozos de captación, donde se establecen perímetros de protección definidos a partir de los tiempos de tránsito, distancia de la fuente o del comportamiento hidráulico del acuífero, otra de las medidas es específicamente dirigida al acuífero, donde se definen las restricciones de uso de la tierra frente a la vulnerabilidad de la contaminación en el acuífero y a la importancia del recurso como fuente de abastecimiento público (Alvarado, 2000; Hirata y Rebuocas, 1999 y 2001).

La extensión y diversidad geográfica del territorio nacional dan como resultado una distribución irregular del recurso hídrico en México, podemos decir que aproximadamente la mitad norte del país experimenta un déficit constante de precipitaciones, mientras que en el sur y sureste son más abundantes en cuanto a la disponibilidad del agua subterránea.

México posee aproximadamente el 0.1 % del total de agua dulce disponible a nivel mundial, lo que determina que buena parte del territorio nacional está catalogado como zona semidesértica, por lo que el agua constituye un factor no solo de seguridad nacional sino además un factor estratégico para el desarrollo del país (CONABIO, 2012). México recibe alrededor de 1,489 mil millones de metros cúbicos al año de agua en forma de precipitación, de los cuales el 67% cae entre junio y septiembre. De este total 73% se evapotranspiración y regresa a la atmósfera, 22% escurre por los ríos o arroyos y 6% se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos.

Existen diferencias muy grandes en cuanto a la disponibilidad del agua en el territorio mexicano, las zonas centro y norte son, en su mayor parte áridas o semiáridas: los estados del norte, apenas reciben 25% de agua de lluvia; ya en el caso de las entidades del sureste (Chiapas, Oaxaca, Campeche, Quintana Roo, Yucatán, Veracruz de Ignacio de la Llave y Tabasco) es lo contrario, éstas reciben casi la mitad del agua de lluvia (49.6%) y en las del sur llueve bastante cómo



podemos observar en la figura 2, sin embargo, tienen menor acceso al vital líquido, pues no cuentan con los servicios básicos de infraestructura hidráulica que llegue a sus viviendas para una óptima distribución.

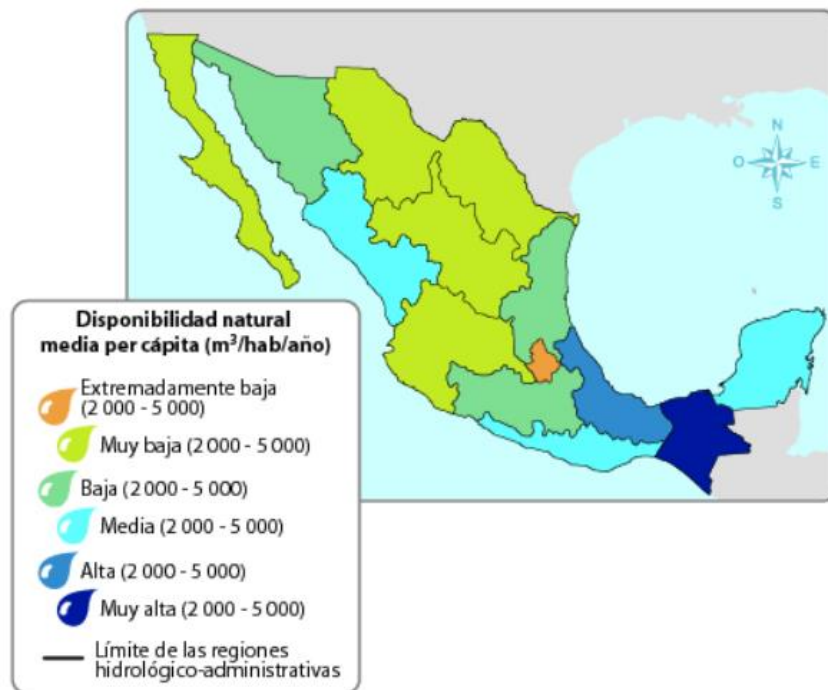


Figura 2. Disponibilidad natural media per cápita del agua en México. SEMARNAT (2008).

En el cuadro 2 podemos observar la disminución a lo largo del tiempo, sobre la adquisición general per capital del agua en el territorio mexicano.

Cuadro 2. Elaboración propia en base a (UNESCO, 2008)

Año	m <sup>3</sup> /habitante/año
1910	31 000
1950	18 000
1970	10 000
2005	4 573
2010	4 230
2015	3 692



A partir del 5 de diciembre de 2001 en México, para fines de administración del agua subterránea, el país se ha dividido en 653 acuíferos, cuyos nombres oficiales fueron publicados en el Diario Oficial de la Federación (DOF, 2001).

Para finales del año 2010 se habían identificado 32 acuíferos con presencia de suelos salinos, localizados principalmente en la península de Baja California y en el altiplano mexicano, en estas regiones convergen condiciones de poca precipitación pluvial, altos índices de radiación solar y por lo tanto de evaporación. Para este mismo año se presentaba intrusión marina en 17 acuíferos costeros a nivel nacional (CONAGUA, 2010).

A partir de la década de los setentas el 16% se encuentra sobreexplotado (Figura 3) es decir la extracción de agua de 105 acuíferos superan los niveles de recarga, al 31 de diciembre de 2015 se reportan 32 con presencia de suelos salinos y agua salobre y 18 con intrusión salina (CONAGUA, 2015).

Según datos publicados en el DOF, de la extracción total del agua subterránea, 3% es para uso doméstico, 6% para la industria, 20% de uso público urbano, y 71% para la agricultura.

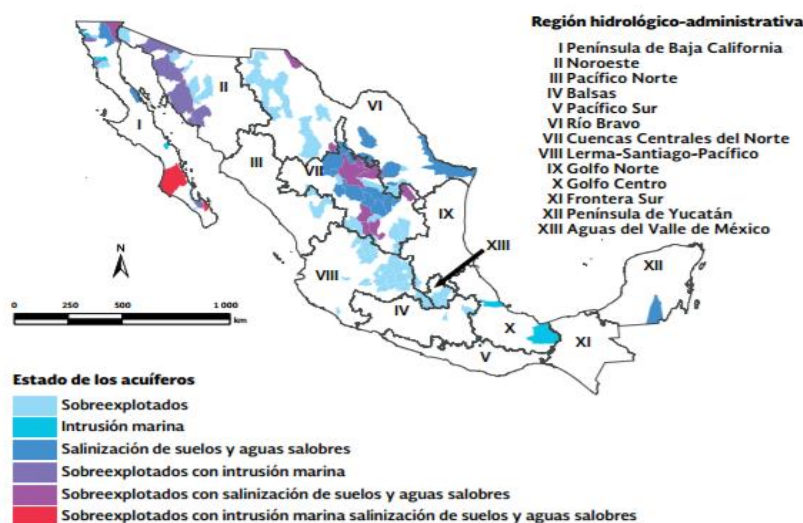


Figura 3. Acuíferos sobreexplotados, con intrusión marina y salinización de suelos (CONAGUA, 2015).



En el caso de los acuíferos costeros, uno de los procesos de contaminación más frecuentes es la salinización, por el avance del agua de mar tierra adentro al continente. El uso de agua subterránea es fuente para abastecer la demanda poblacional y especialmente agrícola; sin embargo, los acuíferos costeros son altamente sensibles a la sobreexplotación, como es el caso del acuífero del Maneadero, debido a que presenta un alto riesgo de contaminación con agua del mar, tanto por la cercanía a él, como por la baja recarga de agua dulce.

La disponibilidad y calidad del agua son problemas que se presentan y han aumentado en las últimas décadas en el municipio de Ensenada, ya que el agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento y es importante contar con herramientas que ayuden y orienten a la definición y alcance de acciones de protección a este recurso.

El estudio identifica las zonas vulnerables a intrusión salina y su evolución espacio-temporal en el acuífero Maneadero, Ensenada Baja California. Empleando como información primaria, bases de datos hidroquímicos de los pozos situados dentro del límite del acuífero, utilizando los datos proporcionados por el Instituto de Investigaciones Oceanológicas de Baja California (UABC) y datos cartográficos tomados de dependencias gubernamentales oficiales.



## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Aproximadamente el 94% de las reservas del agua se encuentran en océanos y mares, el 4% en agua subterránea, el 1.98% en hielos y glaciares y el 0.02% en ríos y arroyos. Los datos anteriores muestran un escenario de incertidumbre en el abastecimiento de agua, que puede empeorar con los futuros efectos del cambio climático, la distribución y gestión hídrica mal planificada, aunado también a la extracción del agua sin un plan sustentable. En la república mexicana los acuíferos se ven afectados principalmente por la sobreexplotación, extracción de agua dulce a causa de la demanda poblacional que ha sido mayor en los últimos años (Castillo 2003).

Es verdad que un estudio hidrológico no se debe tratar de manera espacial con límites políticos administrativos, porque los de la propia naturaleza son otros, pero también es cierto que para una buena gestión se deben establecer límites para en cada estudio aportar los conocimientos necesarios y toma de decisiones sobre un espacio determinado ya que se requiere de un conocimiento estricto del panorama y conocer las condiciones de todos los factores naturales y antrópicos que intervienen en el comportamiento del acuífero.

De acuerdo a la Encuesta Intercensal 2015 de INEGI, Baja California cuenta con 3,315,766 habitantes, es una de las entidades con mayor dinamismo demográfico en los últimos años, hablando específicamente del municipio de Ensenada; para el año 2015 su población total se registra con 486,639 habitantes, como es de saber; el aumento de población genera una mayor necesidad de extracción de agua, lo cual a su vez proyecta una sobreexplotación del acuífero (INEGI, 2015).

La sobreexplotación de los acuíferos costeros es una de las principales causas de la intrusión salina. Según datos de CONAGUA, en el estado de Baja California, de un total de 48 acuíferos, 7 clasifican como “sobreexplotados” (Cuadro 2).



Cuadro 2. Acuíferos sobreexplotados en el Estado de Baja California (CONAGUA, 2001)

No.	Clave	Nombre del acuífero
1	208	Ojos Negros
2	0210	Valle De Mexicali
<b>3</b>	<b>0212</b>	<b>Maneadero</b>
4	0217	San Rafael
5	0218	San Telmo
6	0221	San Quintín
7	0246	San Simón

El municipio de Ensenada, es uno de los centros vinícolas más importantes de México, en este sentido el agua subterránea es un factor primordial para esta actividad, donde los pozos de extracción son fundamentales para abastecer las necesidades agrícolas. Sin embargo, la intensidad de bombeo y el crecimiento poblacional ha tenido consecuencias como el descenso progresivo de los niveles piezométricos e infiltración de contaminantes.

Específicamente el acuífero del maneadero ha experimentado aumento en la demanda de sus recursos para satisfacer las necesidades antes mencionadas, principalmente del sector agrícola, generando la aparición de procesos de salinización en diferentes sectores del acuífero y mala calidad del agua sobrepasando los límites permisibles establecidos en la NOM 127. En este acuífero actualmente existe el proceso de intrusión salina, afectando a la población, pero también dañando al ecosistema de la región. Existe una actual exigencia de analizar las condiciones actuales del agua, para poder proponer gestiones de carácter sustentable, permitiendo así dar un uso sostenible. Para ello se debe conocer el tema holística e integralmente para planificar y gestionar adecuadamente con los conocimientos interdisciplinarios requeridos; sin embargo, la información sigue siendo endeble, aun sabiendo que el agua subterránea es la mayor reserva de agua dulce accesible.



## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

El agua en general es un recurso no renovable, y específicamente el agua dulce hoy en día presenta una situación crítica, ya que se enfrenta al problema de escases, debido principalmente a la sobreexplotación y a la contaminación. Los datos estadísticos anticipan que para 2025, 40 países en diferentes regiones experimentarían estrés por falta de agua (Graf, 2007).

La combinación de los dos factores antes mencionados, por un lado, la demanda de agua dulce, y por otro, la alta sensibilidad del sistema, es la que hace que el estudio de contaminación vertical o lateral en los acuíferos ya sea por la intrusión salina o por contaminantes químicos, sea de gran importancia en México, al igual que en muchos otros lugares del mundo; donde las investigaciones se han afrontado la problemática desde el monitoreo, la prevención y la recuperación.

La falta de información actualizada y detallada afecta a los modelos socioeconómicos e hidrológicos, por lo tanto, limitan su utilidad para la toma de decisiones, formulación de políticas y gestión sustentable. Cabe resaltar que el presente es un trabajo conjunto entre el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Universidad Autónoma del Estado de México y el Instituto de Investigaciones Oceanológicas para obtener una investigación holística e integral.

A partir de los antecedentes descritos anteriormente y del problema planteado se hace evidente la necesidad de esta investigación con el uso de herramientas SIG, donde se representen los factores naturales y antrópicos que influyen en el proceso de intrusión salina en el acuífero Maneadero perteneciente a Ensenada Baja California.

Este análisis comprende un estado hidrológico a nivel acuífero respecto a la problemática del agua enfatizado a la contaminación vertical y lateral, que puede servir para los tomadores de decisiones, por otra parte, también brinda una



aportación al conocimiento geográfico del estado respecto a los resultados en la cartografía

Dicha investigación alcanza mayor relevancia, para el caso de estudio seleccionado, pues se ha de comprobado, mediante análisis hidroquímicos, altos contenidos de salinidad para el acuífero Maneadero y alta concentración de nitratos, por tanto, fue necesario obtener una cartografía, que, por un lado, delimito las zonas hasta ahora afectadas y que por otro lado muestra los sitios que potencialmente pueden ser afectados a corto y largo plazo. La investigación pretendió integrar información en el SIG, que permitió establecer correlaciones entre capas para el adecuado análisis espacial.

El análisis de la variabilidad espacio-temporal de la piezometría permite caracterizar modificaciones temporales y espaciales de la profundidad de nivel, que resultaría ser de gran interés para la administración del recurso a nivel municipal.

Se presenta un análisis geo estadístico de la piezometría del acuífero Maneadero en un periodo de los años 2009, 2014, 2015 y 2016. Los resultados obtenidos se interpretan desde el punto de vista hidrodinámico relacionando comportamientos observados en los variogramas con el tiempo en que estos se modifican.

La integración y análisis de los datos ayudaron a construir la base de datos cartográfica y alfanumérica para ampliar la comprensión en conocimientos de esta temática, por ejemplo, los sistemas de información geográfica, proporcionan datos en las áreas que actualmente no se han estudiado o bien no se pudieron recorrer en campo. Este tipo de investigaciones requieren datos sobre las condiciones de las cuencas hidrológicas y los recursos de aguas subterráneas, también de los indicadores correspondientes a la demanda hídrica, las extracciones y el consumo. Por ello es que se necesitan urgentemente nuevos enfoques para llevar a cabo evaluaciones exhaustivas de los recursos hídricos para ayudar a la toma de decisiones, desde locales, estatales, nacionales e internacionales.



Uno de los resultados fue estimar sitios vulnerables a la contaminación, los cuales se pueden observar en el mapa de vulnerabilidad mediante el método DRASTIC y el método SEA-GIndex, los resultados podrán tener distintas utilidades, algunas de ellas en apoyo a la toma de decisiones sobre la protección y manejo de los recursos hídricos subterráneos, o bien en los Planes de Ordenamiento Territorial –POT, los cuales permiten identificar zonas donde se prohíben o restringen determinados usos del suelo, que representen una amenaza para la calidad de las aguas subterráneas, también podría impulsar el diseño, desarrollo e implementación de proyectos de educación relacionados con la necesidad de proteger los acuíferos y evitar la contaminación del agua subterránea.





### 1.3 OBJETIVOS

#### General

- Estimar zonas vulnerables a la contaminación hídrica subterránea del acuífero Maneadero, Ensenada Baja California, ya sea por intrusión salina (contaminación lateral) y por contaminación vertical (contenido de nitratos), empleando herramientas de Sistemas de Información Geográfica.

#### Específicos

- Elaborar mapas temáticos sobre plataforma de SIG de las características físico – geográficas del acuífero
- Identificar los factores condicionantes de la contaminación del agua subterránea en el acuífero Maneadero.
- Emplear el método SEA-Gindex en el acuífero para estimar la contaminación lateral mediante álgebra de mapas.
- Emplear el método DRASTIC en el acuífero para estimar la contaminación vertical mediante álgebra de mapas.



## **CAPITULO II. MARCO REFERENCIAL**

### **2.1. ANTECEDENTES**

#### 2.1.1 Antecedentes internacionales

La vulnerabilidad de un acuífero está relacionada a su capacidad para resistir el impacto antropogénico y natural (Foster e Hirata, 1991). En algunos países de África, Asia, Australia y Europa se ha detectado el acelerado avance de intrusión salina. El término vulnerabilidad a la intrusión salina se define como “la sensibilidad de la calidad del agua subterránea debido a un bombeo excesivo o a una elevación del nivel medio del mar o ambos sobre la franja costera, que es determinado por las características intrínsecas del acuífero” (Duijvenbooden, et. al, 1987).

La utilización de mapas de vulnerabilidad en hidrogeología se ha empleado junto con los SIG, como herramientas para el análisis y procesamiento de información para la toma de decisiones (AVR, 2003).

En el 2000 se puso en marcha el programa de evaluación y cartografía hidrogeológica en el mundo (WHYMAP) con el fin de proporcionar datos e información sobre los principales recursos de agua subterránea del mundo, el cual pretende hacer una contribución de su gestión y protección de manera razonable. Dicho programa recopila datos sobre las aguas subterráneas a partir de fuentes nacionales, regionales y globales, y los visualiza en mapas, los productos generados proporcionan información sobre la calidad y la vulnerabilidad de este recurso para apoyo a los tomadores de decisiones.

El World Hidrogeological Mapping Evaluacion Program (WHYMAP, 2001) es un programa conjunto de un consorcio conformado por:

- UNESCO: Naciones unidas para la educación, la ciencia y la cultura
- PHI: Programa hidrológico internacional
- PICG: Programa internacional de Geo ciencias



Facultad De Geografía

- IAH: Asociación internacional de hidrogeólogos
- CGMW: Comisión del mapa geológico del mundo
- OIEA: Organismo internacional de energía atómica
- BGR: Instituto federal de geo ciencias y recursos naturales
- CMDE: Centro mundial de datos de escurrimiento
- CMCP: Centro mundial de climatología y precipitación
- IGRAC: Centro internacional de evaluación de recursos de aguas subterráneas

En el 2002 se estableció un grupo de expertos internacionales de mapeo, la Universidad Frankfurt proporciona tasas de recarga de aguas subterráneas derivadas del modelo hidrológico global WaterGAP, otras aportaciones son también la de institutos académicos internacionales y expertos.

Sus objetivos son proporcionar información a escala mundial de las aguas subterráneas, mostrar datos y visualizarlos en mapas, también tener un intercambio de información con otros proyectos de investigación y desarrollo. Cabe mencionar que cuenta con aplicaciones y servicios de mapas en línea.

En el 2008 la UNESCO presentó el primer mapa mundial de acuíferos a una escala 1: 25 000 000, en el cual se encuentran exactamente las aguas subterráneas fronterizas, así como la calidad del recurso y el índice de carga hidráulica. En marzo 2012 durante el foro mundial del agua se dio a conocer el mapa “Río y el agua subterránea, cuencas del mundo” (escala 1: 50 000 000). Posteriormente en abril del año 2015 se presentó el mapa de vulnerabilidad mundial del agua subterránea a inundaciones y sequias a escala 1: 25 000 000 (Figuras 4 y 5).

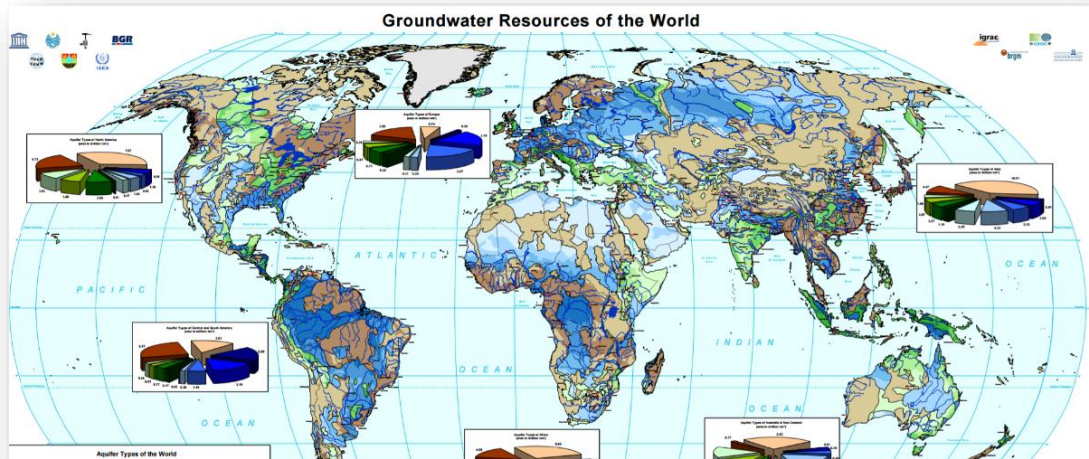


Figura 4. Recurso de agua subterránea en el mundo (WHYMAP, 2001)

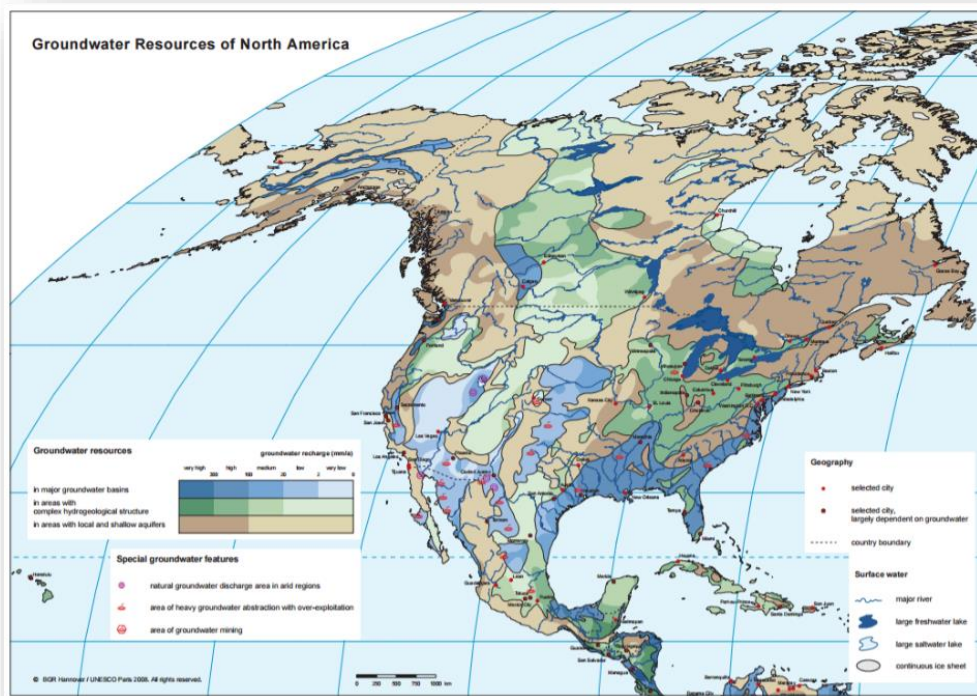


Figura 5. Recurso de agua subterránea en América Latina (WHYMAP, 2001)



Algunos de los principales riesgos para las aguas subterráneas son la explotación excesiva y la contaminación, especialmente en las zonas costeras, ya que se suelen explotar a un ritmo mayor al de su recarga. Tal es el ejemplo de los acuíferos situados en las zonas costeras del Mediterráneo, y al contrario de los acuíferos de África que siguen sin explotarse lo suficiente para satisfacer las necesidades de los pobladores.

Pese a la importancia estratégica de las aguas subterráneas, hasta la fecha no habían sido objeto de un inventario a escala mundial. El Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la UNESCO, que ha venido participando desde el año 2000 en la creación de una base de datos sobre las aguas subterráneas, presenta hoy un mapa detallado –accesible en línea– de los acuíferos transfronterizos, en el que se señala su localización, la calidad de sus aguas y su índice de carga hidráulica. En el siguiente listado se citan los Acuíferos transfronterizos para el continente americano.

- Acuífero Toba-yrenda'- chaco tarijeño (Argentina, Bolivia y Paraguay)
- Acuífero Cucutasan antonio (Colombia y Venezuela)
- Acuífero Ostuametapan (El Salvador y Guatemala)
- Acuífero Ciudad Juárez-el paso (México y EE.UU.)
- Acuífero Machalatumbes (Ecuador y Perú)
- Acuíferos Artibonito y masacre (República Dominicana y Haití)
- Acuífero Pantanal (Brasil y Bolivia)
- Acuífero Sixaola (Panamá y Costa Rica)
- Acuífero Salto-salto chico (Argentina y Uruguay)

Según Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) el aumento del nivel del mar sería uno de los efectos más importantes del cambio climático global y la intrusión salina en los acuíferos costeros representaría un impacto significativo, así es como en países como Alemania, Argentina, Chile se han reportado



observaciones de alteración en los acuíferos costeros asociados a la intrusión salina debido a la explotación intensiva del agua subterránea.

Debido a esto fenómeno se han realizado una serie de estudios para cuantificar el avance salino en los acuíferos costeros utilizando diversas metodologías, una de ellas es la propuesta por Werner y Simmons (2009) a partir de Custodio (1987) utilizada en el acuífero costero del partido de la costa, Buenos Aires, Argentina tomando en cuenta parámetros hidrogeológicos y estimando el crecimiento de la población se calculó la magnitud del avance de la futura intrusión salina con diferentes valores del aumento del nivel del mar.

Green y MacQuarrie (2014) realizaron una evaluación de la importancia relativa de los efectos del cambio climático y de la extracción de agua subterránea en la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros de Canadá atlántico, utilizando como principal método escenarios de simulación con datos hidrogeológicos desarrollando un modelo conceptual y numérico de flujo de agua subterránea de densidad variable y transporte de solutos.

### 2.1.2 Antecedentes nacionales

México enfrenta grandes problemas de contaminación y sobreexplotación de aguas subterráneas, a lo anterior se le suma la falta de implementación de planes y programas para la gestión de protección hacia la calidad hídrica.

En México hay mayor cantidad de agua en el sureste donde los factores como densidad de población y actividades económicas, específicamente industriales son relativamente bajas. A comparación del norte donde la disponibilidad del recurso agua es escasa y hay mayor concentración de poblacional y actividades industriales con mayores actividades agropecuarias.

Para el análisis de vulnerabilidad a intrusión salina se han realizado una serie de trabajos, tal es el caso en México, que a partir de los años setenta este problema se ha presentado en diversos acuíferos, principalmente en aquellos con una



excesiva explotación en estados como Sonora, Veracruz, Baja California y Oaxaca. Dichos estados sufren este fenómeno debido a que la demanda de agua de los acuíferos ha estado en constante crecimiento, producto del rápido aumento de la población, así como al incremento de las actividades industriales y agropecuarias (Chávez, 2008).

Para identificar las zonas vulnerables a intrusión salina en el estado de Veracruz con el apoyo de herramientas SIG, Neri (2007) utilizó la metodología GALDIT la cual se desarrolló como una herramienta para determinar la vulnerabilidad a intrusión salina en los acuíferos costeros, basándose en las características hidrogeológicas, tales como el acuífero, la conductividad hidráulica, la elevación del nivel estático de las aguas subterráneas, distancia de la costa, la geoquímica y el espesor del acuífero (Figura 6).

Neri (2007) explica, que para el procesamiento de los datos se utilizaron programas cartográficos los cuales fueron; MapInfo, ILWIS, IDRISI y Arc View. Se realizó el análisis físico-geográfico de la zona de estudio, específicamente un nuevo mapa geológico con base en el análisis de los datos raster de las imágenes Landsat.

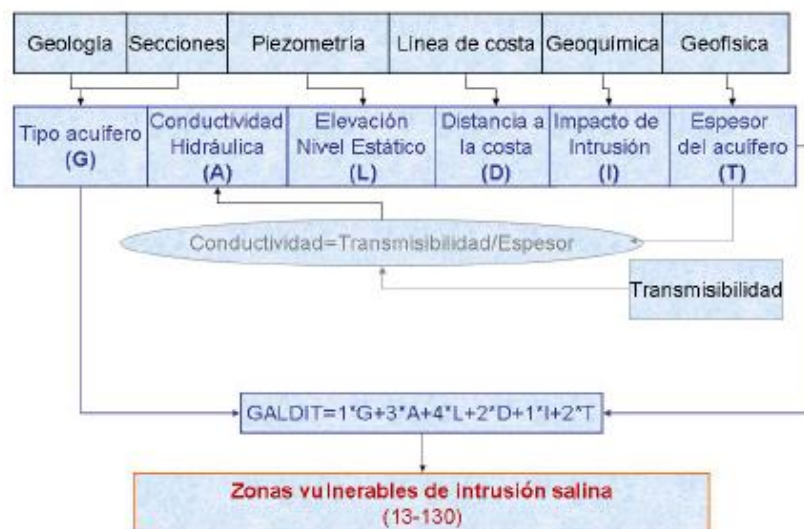


Figura 6. Diagrama de flujo para identificación de zonas vulnerables de Intrusión Salina (Neri, 2007).

La intrusión salina en el acuífero de la costa de Hermosillo, Sonora (Corona. et. al, 2001). Es otro de los antecedentes más relevantes de casos de estudios similares,



*Facultad De Geografía*

ya que se realizó un estudio donde se obtuvieron las características principales de los pozos en observación, topografía, geología, morfología de la cuenca, características geoquímicas del agua. Cabe resaltar que la exploración del acuífero de la costa de Hermosillo se inició en 1942, posteriormente la comisión nacional del agua realizó investigaciones. La metodología para la realización de este estudio se basó en la perforación de pozos, realización de pruebas, mediciones de conductividad eléctrica, ejecución de sondeos geofísicos electromagnéticos y levantamientos topográficos. Lo anterior permitió afirmar que la migración de la intrusión salina lejos de haber sido controlada, avanzó y continúa siendo atraída por la inducción del bombeo.

En la costa de Hermosillo, Sonora el fenómeno de intrusión salina se ha presentado en diversos acuíferos de la zona costera, bajo este criterio se ha evaluado la vulnerabilidad de acuíferos con métodos como DRASTIC, AVI, ERI, GOD y otros. Específicamente el acuífero “costa de Hermosillo” ha sido afectado en los últimos 37 años por ello ha sido estudiado a detalle obteniendo el modelo hidrogeológico basado en control tectónico-estructural, métodos hidráulicos, hidrogeofísicos e hidrogeoquímicos con apoyo isotópico que permitieron definir la geometría del basamento, la hidroestratigrafía y propiedades del acuífero, la distribución espacial de la posición del agua salina y las zonas más vulnerables donde ha penetrado el agua de mar (Medina et al. 2002).

Por otro lado, en el acuífero de Etlá perteneciente al estado de Oaxaca (Aragón et al. 2012) proponen calibrar el método de vulnerabilidad en acuíferos ya integrados con DRASTIC, utilizando los nitratos como indicador de la contaminación. Se realizó un análisis de la sensibilidad para identificar los parámetros más importantes en la atenuación de la contaminación, utilizando la correlación de Pearson para modificar los pesos del DRASTIC adaptando las condiciones del sitio de estudio, con la modificación de rangos se demostró que es posible acercarse a la realidad dejando fuera la subjetividad.





### 2.1.3 Antecedentes locales

Algunos estudios relacionados a la intrusión salina en la zona de estudio han sido principalmente realizados por el Dr. Daesslé perteneciente al cuerpo académico de agua y ambiente del Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO) de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) en donde destacamos el arduo trabajo de investigación y organización de eventos como el simposio sobre investigaciones del valle de maneadero (2016), donde se reúne a académicos (CICESE), autoridades gubernamentales y actores sociales que participan en la gestión y manejo del agua en una de las zonas agrícolas de Baja California.

El IIO, en el área de Geociencias Ambientales realizan investigaciones sobre procesos biogeoquímicos y ecológicos en ecosistemas marinos, también investigan el impacto del hombre en relación a los hábitats costeros y la contaminación de acuíferos, hasta estudios de escala global como el cambio climático (IIO, 2016). Otras de las aportaciones han sido por parte del centro de investigación científica y de educación superior de ensenada, Baja California, quien, apoyados por el CONACYT, realizan proyectos de investigaciones acerca de los recursos hídricos, generando y transmitiendo conocimiento científico y desarrollo de tecnología. Tal es el caso del proyecto vigente que desde el 2014 el valle de Maneadero recibe agua residual tratada procedente de la planta “El Naranja” lo que ha sido útil para reactivar tierras agrícolas en las que desde entonces se siembran diferentes tipos de flor las cuales son destinadas para exportación.

Daesslé et al. (2003) dan a conocer la evolución geoquímica de las aguas subterráneas por medio de 25 pozos en el acuífero costero de Maneadero durante un año seco en Baja California, México con el objetivo de determinar la variación de la composición en corto plazo del acuífero por la intrusión de agua de mar durante un año más seco de lo normal en un periodo de otoño 2001 a otoño 2002, donde se concluyó que la intrusión de agua salina está progresando más rápido en el centro y sur del acuífero costero afectando la calidad de agua en la ciudad ensenada.



Valdemar Belmonte (2016) como resultado de una ardua investigación realizo 41 perfiles con una longitud total de 270 m, utilizando el método geofísico de resistividad eléctrica (D.C) para determinar la influencia de la infiltración de agua tratada en el acuífero costero del valle de Maneadero que sufre de intrusión marina, se realizó inversión conjunta en 2 y 3 dimensiones para investigar como el agua infiltrada se mueve espacial y temporalmente. Los modelos resultantes manifiestan zonas bajas de resistividad cuando existe presencia de agua de mar aproximadamente después de los 10 metros de profundidad desde la superficie. Otro de sus resultados fue observar que el agua infiltrada se esparce en los primeros 15 m de profundidad, empujando el agua de mar hacia abajo. El movimiento del agua infiltrada es en dirección hacia el mar, el agua infiltrada rompe la continuidad del agua de mar justo por debajo del estanque de descarga.

Se observa aumento de resistividad después de los 45 m de profundidad empujando el agua de mar hacia abajo. En su estudio Valdemar midió parámetros físico-químicos del agua tratada proveniente de la planta “El naranjo”, en donde observo que no cumple con la NOM-014-CONAGUA para infiltrar agua tratada en los acuíferos, sin embargo, la calidad del agua tratada (2, 000 ppm) es mucho mejor que la residente en la zona (25, 000 ppm), por lo que para los fines agrícolas a los que está destinada se considera de buena calidad.

Como conclusión de los antecedentes para este trabajo de investigación se utilizará el método DRASTIC para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación vertical del acuífero Maneadero ya que se considera que este método propuesto por Aller et al. (1987) es el más completo, por los parámetros que utiliza se adecua a la zona de estudio y alcance de los datos requeridos, y para la estimar sitios propensos de la vulnerabilidad a la contaminación lateral utilizaremos el método SEA-GIndex.



## 2.2. MARCO TEORICO

En este capítulo se describen los aspectos teóricos más relevantes para comprender la metodología aplicada iniciando desde el siglo XXI donde se hablaba del racionalismo y cuantitavismo, así también de una geografía automatizada (perspectivas paradigmáticas), dando un acercamiento a la tecnología SIG

- Geografía teórica \_ características teórico metodológicas (Burge, 1960)
- Nueva geografía \_ aspectos revolucionarios (Manley, 1966)
- Geografía estadística \_ alto contenido estadístico (Berry, 1968)
- Macro geografía \_ estudios físicos sociales (Stewart y Warntz, 1958)

A lo largo del tiempo hubo distintas ideologías, unas opuestas a lo ya conocido y estudiado, y surgió la geografía humanista, que se basaba en la percepción de estudios a micro escala, es decir más individualista tomando en cuenta los sentimientos y aptitudes, posteriormente la geografía crítica (enfoque capitalista). Milton Santos (1978), concluyó que la primera era más psicológica y la segunda más económica determinista, que si bien pienso que la combinación de las dos, hace un análisis más integral para un mejor resultado, pero también tomando en cuenta las nuevas temáticas geográficas de la posmodernidad como la ecología del paisaje (relaciones eco sistémicas), todo lo anterior con un acoplamiento de la geografía automatizada, con el apoyo de las geotecnologías hacer todo ese mundo de información en algo más sistematizado y fácil de trabajar. Buzai (1999) aborda el término de geografía regional, considera a la región como realidad objetiva, el hombre debía descubrir límites e interacción física-humana al interior.

Los elementos sociales, económicos y espaciales han adoptado una nueva forma de experimentar el espacio y tiempo (Harvey, D. 1990) cada temporalidad y paradigmas que he tenido la ciencia nos da una visión distinta, tomando lo más relevante y útil de cada etapa del conocimiento, pero actualmente estamos en una etapa meramente tecnológica, refiriéndonos en temas de información.



La presente investigación tiene como objetivo identificar y analizar la vulnerabilidad a intrusión salina en la localidad Maneadero, Ensenada Baja California, que desde los últimos años se ha manifestado, por ello se centra en el paradigma neopositivista o también llamado paradigma cuantitativo. Teniendo sus inicios en 1950, para fines bélicos, donde se hizo uso de la cartografía, matemáticas, estadística y lógica. Donde postularon a la ciencia como observable, medible y comprobable. Desde un enfoque cuantitativo, el cual su objetivo era explicar, medir, predecir y establecer modelos. El cual trata de determinar y asociar la correlación entre variables, como punto de partida describir y explicar las características del sitio, buscando la objetividad basada en el método y en los instrumentos. En cuanto al paradigma cuantitativo se realizaron trabajos clásicos que habían utilizado principalmente la geometría como lenguaje espacial (Von Thunen 1826, Weber 1909, Burgues 1925, Christaller 1933, Losch 1939).

La geografía automatizada en el siglo XX, toma en cuenta aspectos socioculturales, teniendo una interacción computacional. geotecnología, desarrollos tecnológicos digitales que han impactado a la geografía. Realizando análisis socioespacial, abordando así los patrones de distribución espacial en temas sociales, económicos y demográficos, apoyándose de técnicas estadísticas. El análisis socioespacial es el conjunto de herramientas estadísticas para analizar y medir un fenómeno.

El enfoque cuantitativo servirá para esta investigación en el análisis de las variables físico-geográficas y socioeconómicas del área de estudio: geomorfología, clima y red de drenaje, hidrología (precipitación, escorrentía), vegetación, geología, hidrogeología (acuífero, captaciones, calidad físico química del agua subterránea), uso de suelo.

El enfoque de esta investigación se encuentra dentro de la Geografía Ambiental, aplicando la filosofía del método cualitativo y apoyado de los principios geográficos. Para Buzai, la Geografía Cuantitativa tiene como marco general la filosofía Neopositivista la cual observa la realidad empírica del espacio geográfico, realiza



mediciones de esa realidad, analiza sus distribuciones espaciales, las generaliza a través de modelos y la formulación de leyes” (Buzai et al., 2015).

El conocimiento actual nos permite tener percepciones diferentes en el espacio geográfico, teniendo una inclinación tecnológica e informática. La geoinformática fue un nuevo modelo de la ciencia geográfica, que prácticamente es la incorporación de la tecnología. Me parece acertada la definición de Buzai, G. (1992) la cual dice que el concepto de geoinformática se refiere a todo tipo de aplicación computacional destinado al manejo de la información georreferenciada, es cierta, pero se hace a través de un software que a su vez es pieza clave para los sistemas de información geográfica (SIG). Posteriormente para esta investigación se implementarán técnicas para el análisis espacial, con el apoyo de herramientas SIG para establecer correlaciones.

La temática del aporte de la tecnología en nuestra ciencia, ha sido de gran debate por el impacto y cambios que traería con ella en comparación con los trabajos geográficos tradicionales, algunas de las críticas fueron la pérdida de teoría y limitación de investigación, sin embargo eso no impidió que la geo informática integrara la cartografía, computación gráfica, procesamiento digital de imágenes, modelos digitales de información y sistemas de información geográfica al estudio de análisis geográfico, que en lo personal fue un gran aporte para los nuevos trabajos de investigación ya que acorta el tiempo y distancia en cada proceso, llevándolo bien al trabajo tenemos muy buenos resultados, claro pero sin dejar de lado el trabajo de campo que es una de las principales bases de los principios geográficos.

### 2.2.1 Métodos de evaluación de vulnerabilidad de acuíferos

Existen distintas metodologías utilizadas en la valoración de la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación, la mayoría de estos métodos, coinciden en determinar la vulnerabilidad en función de las características intrínsecas del medio. Se habla entonces de vulnerabilidad intrínseca, que Foster & Hirita (1991) definen como la sensibilidad del acuífero para ser adversamente afectado por una carga



contaminante impuesta. A continuación, se describen los modelos más utilizados a nivel mundial en los que destacan el DRASTIC, GOD, SINTACS, EPIK Y AVI.

**DRASTIC** es un método empírico desarrollado por Aller et al (1987) para la Environmental Protection Agency, EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos). Es un método usado tanto para la cualificación como para la cartografía y se basa en la asignación de índices que van de 1 (mínima vulnerabilidad) a 10 (máxima vulnerabilidad), de acuerdo a las características y el comportamiento de las variables.

El índice de vulnerabilidad final ( $D_i$ ) es la suma de los siguientes siete parámetros, obteniendo un valor numérico para cada factor usando la siguiente formula:

D: Profundidad del agua subterránea, R: Recarga neta, A: Litología del acuífero, S: Tipo de suelo, T: Topografía, I: Naturaleza de la zona no saturada y C: Conductividad hidráulica del acuífero.

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

Además de la valoración de 1 a 10 que se da a cada parámetro se pondera su influencia dentro de la evaluación de la vulnerabilidad mediante la asignación de pesos que van de 1 a 5 (cuadro 2.1), que variarán si el contaminante en cuestión es un pesticida, al ser éste menos volátil y más persistente. Ambos índices se multiplican y se suman los siete resultados para obtener una valoración final, según se indica en la siguiente expresión:

$$\text{DRASTIC} = (D_r \cdot D_w) + (R_r \cdot R_w) + (A_r \cdot A_w) + (S_r \cdot S_w) + (T_r \cdot T_w) + (I_r \cdot I_w) + (C_r \cdot C_w)$$

Donde  $D_i$ , es el índice DRASTIC para cada unidad del mapa, R: indica factor de clasificación o valoración (parámetro j de la formula) y W: indica factor de ponderación del peso.



Cuadro 2.1. Pesos asignados a los parámetros de la metodología DRASTIC

<b>Parámetro</b>	<b>Peso para índice general</b>
(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

Los índices DRASTIC varían en el intervalo de 23 a 230 para el índice general, tal es así que la vulnerabilidad aumenta en medida que aumenta el valor del índice, el cual nos permite comparar vulnerabilidades de distintas zonas en el mapa.

Las hipótesis en las que el índice DRASTIC se basa son las siguientes:

- Existe una fuente por la que el contaminante se introduce en la superficie del terreno.
- El contaminante penetra con el agua de recarga.
- El contaminante tiene la movilidad del agua.
- El área evaluada es mayor o igual a 45 hectáreas.

El método DRASTIC produce una serie de resultados que permiten desarrollar programas para la protección del agua subterránea, su practicidad facilita aumentar o disminuir el número de parámetros y la posibilidad de adaptar estos a condiciones específicas del área de estudio.



**SINTACS** es prácticamente una derivación del DRASTIC (utiliza los mismos parámetros), desarrollada por Civita et al (1994) como adaptación a las características hidrogeológicas de Italia y a una escala de trabajo de mayor detalle; por lo general el área de estudio se divide en celdas cuadradas de 0,5 km de lado.

El acrónimo SINTACS engloba; S: Profundidad del agua subterránea, I: Infiltración eficaz, N: Efecto de autodepuración de la zona no saturada, T: Tipo de suelo, A: Litología del acuífero, C: Conductividad hidráulica y S: Pendiente de la superficie topográfica.

Al igual que en el caso del DRASTIC, se asigna una puntuación (indicada con el subíndice "r") de 1 (mínima vulnerabilidad) a 10 (máxima vulnerabilidad) a cada parámetro y se pondera cada uno con un peso (indicado con el subíndice "w") de 1 a 5, para obtener una valoración final según la siguiente expresión:

$$SINTACS = (Sr \cdot Sw) + (Ir \cdot Iw) + (Nr \cdot Nw) + (Tr \cdot Tw) + (Ar \cdot Aw) + (Cr \cdot Cw) + (Sr \cdot Sw)$$

**GOD**, esta metodología fue desarrollada por Foster (1987), es un método sencillo y sistemático, por lo que se usa cuando se cuenta con escasos datos, éstos no son fiables o no cubren la totalidad del territorio que se estudia. Por su estructura simple y práctica, es el método utilizado en primer lugar para estimar el riesgo de contaminación de un acuífero, lo que sirve para establecer prioridades de actuación a la vista de los resultados. Se basa en la asignación de índices entre 0 y 1 a tres variables, que son las que nominan el acrónimo:

G: (ground water occurrence) tipo de acuífero o modo de confinamiento u ocurrencia del agua subterránea.

O: (overall aquifer class) litología de la zona no saturada. Se evalúa teniendo en cuenta el grado de consolidación y las características litológicas y como





consecuencia, de forma indirecta y relativa, la porosidad, permeabilidad y contenido o retención específica de humedad de la zona no saturada.

D: (depth to groundwater) profundidad del agua subterránea o del acuífero.

Estos tres parámetros se multiplican para obtener una valoración de la vulnerabilidad de 0 (despreciable) a 1 (extrema):

$$GOD = G \cdot O \cdot D \approx 0-1$$

**EPIK** fue desarrollado por Doerfliger y Zwahlen (1997) para estimar la vulnerabilidad de acuíferos kársticos. Se basa en la asignación de unas puntuaciones a cuatro parámetros:

E: epikarst. Zona de intensa karstificación.

P: protective cover. Cobertura de protección.

I: infiltration conditions. Condiciones de infiltración.

K: karst network development. Red kárstica.

A diferencia de la mayoría de métodos, el EPIK asigna vulnerabilidades crecientes a medida que disminuyen los valores relativos de los parámetros considerados, ya que apunta a definir factor de protección del acuífero en lugar de vulnerabilidad. Los parámetros son ponderados con cuatro factores de ponderación y sumados entre si para obtener finalmente lo que se conoce como índice de vulnerabilidad intrínseca o factor de protección.

$$V = (a \cdot E) + (b \cdot P) + (g \cdot I) + (d \cdot K)$$

En donde: V: factor de protección o índice de vulnerabilidad, E, P, I, K: puntuaciones de los parámetros y a, b, g, d: factores de ponderación.

**AVI** (Aquifer Vulnerability Index) es un método sencillo que cuantifica la vulnerabilidad en función del espesor de las capas homogéneas por encima del acuífero y de la permeabilidad de cada capa. Estas dos variables se relacionan para



dar lugar al parámetro denominado "resistencia hidráulica", que indica el tiempo aproximado de flujo vertical de agua por unidad de gradiente de carga que atraviesa la zona no saturada, y se calcula por la expresión:

$$C = \sum b_i / K_i$$

En donde:

C: resistencia hidráulica (años).

$b_i$ : espesor de la capa homogénea "i" que queda por encima de la zona saturada (cm), siendo  $i = 1,2,3,n$

$K_i$ : conductividad hidráulica vertical de la capa homogénea "i" que queda por encima de la zona saturada (cm/año), siendo  $i = 1,2,3,n$

A partir de los valores que tome el parámetro C, la vulnerabilidad del acuífero se clasificará según indica la siguiente tabla, con vulnerabilidades crecientes cuanto menor tiempo necesite el contaminante para llegar al acuífero.



## 2.2.2 Vulnerabilidad a la contaminación por intrusión salina

Para el caso de estimación en la contaminación de acuíferos por intrusión marina, existen diversos métodos de evaluación sin embargo anexamos los más sobresalientes a considerar este estudio. En los últimos años se han desarrollado una serie de métodos de análisis y modelos para la interpretación del fenómeno con la ayuda de tecnología de observación, control y prevención.

Se han aplicado diferentes métodos para el estudio de la intrusión salina en los acuíferos costeros. Los métodos más usados son los geoquímicos, con énfasis en los análisis de cloruros y bromuros, conductividad eléctrica en los pozos, geofísicos como los de resistividad eléctrica vertical (SEV), transitorio electromagnético (TEM) y gravimetría, algunos otros matemáticos utilizando el modelo SHARP e hidrodinámicos estudiando la evolución de la piezometría y gradientes hidráulicos.

Para los pozos localizados a menos de un kilómetro de la pleamar, se puede usar el valor de conductividad eléctrica del agua como indicador de la posibilidad de intrusión salina, para ello se utilizará el valor de referencia de  $400 \mu\text{S}/\text{cm}$  y para valores superiores deberá analizarse el tipo de roca y el proceso de intrusión salina. Para tener mayor certeza a la hora de caracterizar zonas con intrusión salina, se recomienda utilizar relaciones físico-químicos como también utilizar el bromuro como elemento conservativo del agua de mar.

### **Método de Glover**

Para la aplicación de este método se debe considerar un modelo geo hidrológico conceptual, con un perfil topográfico o bien apoyarse de métodos indirectos como la geofísica o en algunos casos realizar pozos exploratorios.

Las condiciones para efectuar el cálculo del método Glover son los siguientes: interface plana (no zona de mezcla), no debe existir flujo de agua salada, el flujo de agua dulce es solo horizontal, debe der acuífero cautivo y techo coincide con el nivel

del mar, acuífero de gran espesos, de modo que en la zona de estudio la cuña de agua salada no toca al mismo como lo podemos ver en la figura 7.

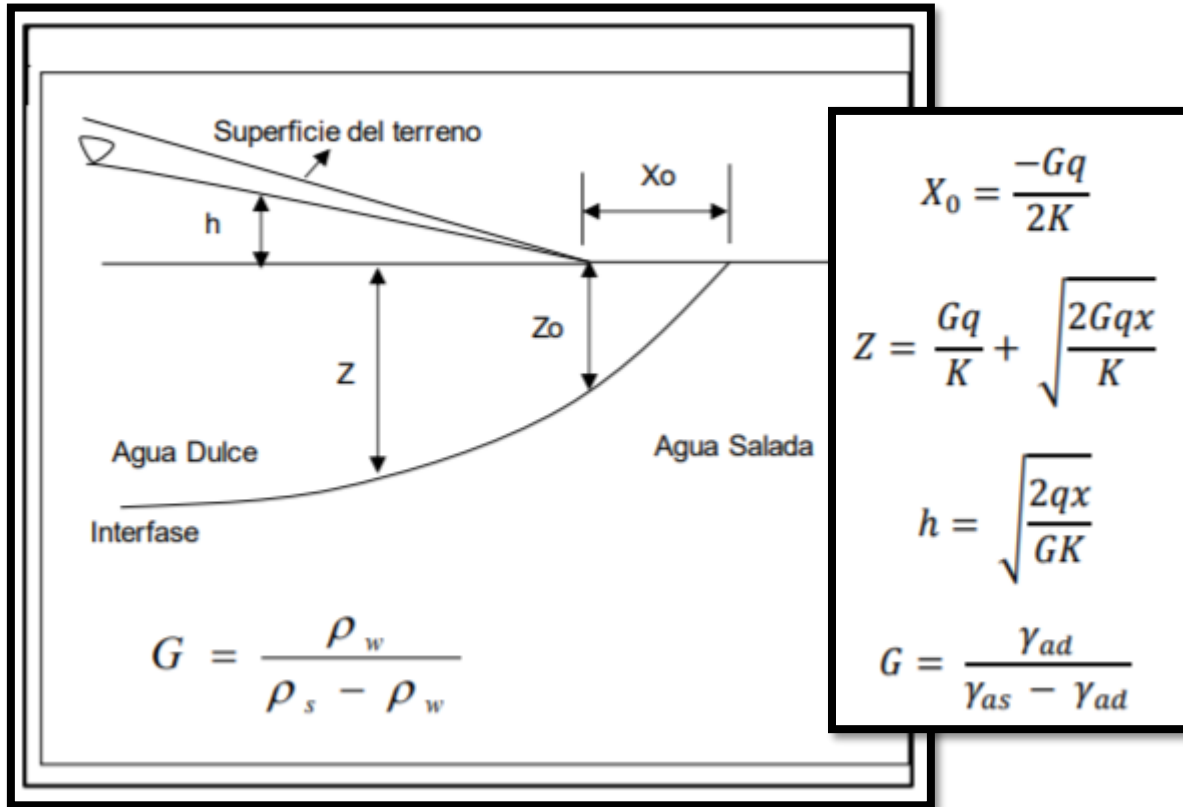


Figura 7. Aplicación con formula del método de Glover

Donde:

G = Relación agua dulce – agua salada ( $\gamma$  = densidad en kg/m<sup>3</sup>)

K = Conductividad hidráulica (m/d)

X = Distancia desde la línea de costa al punto de control o pozo (m)

q = descarga al mar (m<sup>3</sup>/día/m)

i = gradiente hidráulico



### **Método “SEA GIndex”**

Este método se basa en calcular la vulnerabilidad a la intrusión marina de acuíferos costeros usando Sistemas de Información Geográfica (SIG), como bien se tiene por entendido la exploración de los acuíferos como base de su gestión sustentable. La intrusión marina es un fenómeno de migración lateral y los métodos comúnmente utilizados para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos solo toman en cuenta la migración vertical de contaminantes (GOD Y DRASTIC), por lo cual propone este nuevo método de evaluación que está orientado a evaluar la intrusión salina lateral y no tienen en cuenta el movimiento vertical de contaminantes desde la superficie del terreno, por lo tanto, no incluye las variables de suelo y zona no saturada (Emilia B, 2011).

Para la obtención del método SEA-GIndex se adaptó el método GOD incluyéndose dos nuevos parámetros, que juegan un papel importante en la posición de la interfaz agua dulce – agua salada, los parámetros son los siguientes:

- La distancia a la costa
- La altura piezométrica
- Litología

Con este método se pueden obtener vulnerabilidades en un rango de “insignificante” a “extrema”, tal como se muestra la siguiente figura.



h > 10	10 > h > 5	5 > h > 2.5	2.5 > h > 1	h < 1	Nivel piezométrico (m)
3	6	8	9	10	*
Loess		Arenas eólicas		Gravas y arenas	Litología
Rocas de baja permeabilidad		Rocas Volcánicas		Calizas	
				Karst	
3	6	8	9	10	
*					
d > 10	10 > d > 6	6 > d > 3	3 > d > 1.5	d < 1.5	Distancia al mar (km)
2	4	7	9	10	=
V < 300	300 < V < 500	500 < V < 700	700 < V < 900	900 < V < 1000	Vulnerabilidad intrusión marina
insignificante	baja	moderada	alta	extrema	

Figura 8. Rangos de clasificación de vulnerabilidad a la intrusión salina por el método SEA-GIndex (Emilia B, 2011)

Cada parámetro mencionado anteriormente, se reclasifica de acuerdo al método usando un software cartográfico en formato raster, para posteriormente hacer uso del álgebra de mapas mediante la siguiente fórmula.

$$SEA - GIndex = (Distancia_R) * (Piezometría_R) * (Litología_R)$$

Donde el resultado se reclasifica de acuerdo a los rangos de vulnerabilidad que el método determina, como se muestra en el siguiente cuadro 2.2.

Cuadro 2.2 Rangos de vulnerabilidad estimado mediante el método SEA-GIndex.

Rango	Calificación
V < 300	insignificante
300 < V < 500	baja



<b>500 &lt; V &lt; 700</b>	moderada
<b>700 &lt; V &lt; 900</b>	alta
<b>900 &lt; V &lt; 1000</b>	extrema

El resultado final serán sitios estimados de vulnerabilidad de forma espacial que se verán reflejados en un mapa, el cual se construye teniendo en cuenta niveles estáticos, dinámica de flujo dependiendo de la litología y el nivel piezómetro.

### **Método “THE SITE INDEX”**

Uno de los objetivos más importantes a nivel mundial consiste en tener un buen estado ecológico en cuerpos de agua subterránea, incluidos los acuíferos costeros, lo que esto significa tener conocimiento del estado y cambio a lo largo del tiempo en los acuíferos (Ballesteros et. al.2016).

El método “THE SITE INDEX” para identificar la intrusión de agua de mar se basa en cuatro parámetros básicos que son:

- Área de la superficie
- Intensidad
- Temporalidad y evolución

Cada uno de los parámetros está determinado por cálculos específicos derivados de las concentraciones de cloruro del agua subterránea, los resultados se especifican como un índice numérico y un código alfanumérico, además el índice permite discriminar y comparar objetivamente los estados de estos cuerpos de agua subterránea que a su vez puede priorizar la gestión, acciones y evaluación en tiempo y forma.

El método destaca la necesidad de ilustrar el estado actual de la intrusión de agua de mar en un sistema hidrogeológico al proporcionar información sobre su



distribución espacial, grado de impacto y evolución en el tiempo, todos los cuales son indicadores importantes de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero y su capacidad de recuperación, basado principalmente en la concentración de cloruro.

El método SITE caracteriza la intrusión espacial y temporal del agua de mar desde cuatro perspectivas, superficie afectada, la intensidad, la variación estacional y las tendencias a medio y largo plazo de calidad del agua. El acrónimo SITE se deriva de estos parámetros de la siguiente manera:

S = Superficie afectada

I = Intensidad de salinización

T = Temporalidad o estacionalidad

E = Evolución a medio y largo plazo

El resultado o valor del SITE se calcula al ponderar cada parámetro de la siguiente manera:

$$SITE\ value = \frac{3S + 3\left(\frac{S}{4}\right)I + T + E}{30}$$

Donde:

El cociente de 30 es el valor máximo posible del algoritmo para el numerador y da un código numérico de 1 para un acuífero completamente salinizado.

Se definen diferentes rangos del índice de SITE para describir el estado de la intrusión salina y el grado de presión que ejerce sobre el acuífero como se muestra en el cuadro 2.3.

Cuadro 2.3 Estado de intrusión salina

Valores SITE	Presión o estado de intrusión
--------------	-------------------------------





<b>&lt; 0.10</b>	Nula
<b>0.11 – 0.25</b>	Baja
<b>0.26 – 0.50</b>	Moderada
<b>0.51 – 0.75</b>	Alta
<b>0.76 – 1.00</b>	Extrema

### Conclusión

Las metodologías para evaluar la vulnerabilidad de un acuífero comparten algunos parámetros; sin embargo, cada una de ellas tienen un enfoque diferente, algunas por ejemplo toman en cuenta más el riesgo o la protección, también difieren en las características intrínsecas secundarias o bien en como abordan la ecuación para el estudio. Sin embargo, para este trabajo en específico se tomará en cuenta el método DRASTIC para la contaminación vertical y el método SEA-GIndex para la contaminación lateral del acuífero, ya que, evaluando las condiciones del sitio de estudio y los datos que tenemos disponibles, estos serán los métodos que más se adaptan.



### 2.3. MARCO CONCEPTUAL

En el campo de estudio de la geografía se presenta un proceso de revolución denominado Geotecnología, que es la abstracción y representación del mundo real basado en el hecho conceptual, codificado bajo modelos numéricos y gráficos al modelo digital (Buzai, 1999).

Según Buzai (1999) el análisis espacial constituye una serie de técnicas matemáticas y estadísticas aplicadas a los datos distribuidos sobre el espacio geográfico. Mientras que el análisis socioespacial se define en dos sentidos: (a) el estudio de los patrones de distribución espacial univariado y multivariado de temas sociales, económicos y demográficos medidos en la población, y (b) la importancia que la componente espacial ejerce en dichos patrones de distribución.

Los sistemas de información geográfica son un conjunto organizado de tecnología computacional (equipo, paquetes de programas, datos geo referenciados, métodos y técnicas) y personal, diseñados para capturar, almacenar, actualizar, manejar, analizar y desplegar diferentes formas de información geográficamente referenciadas, (Santana G., 2011)

Los Sistemas de Información Geográfica son una herramienta de predicción mediante hipotéticos escenarios, son importantes para el análisis espacial y de apoyo para la toma de decisiones abordando también aspectos sociales y económicos. Según Buzai, los conceptos fundamentales para la aplicación de los SIG son:

- Localización
- Distribución
- Asociación
- Interacción
- Evolución



## Vulnerabilidad

Vrba y Zaporozec (1994) definen a la vulnerabilidad como “una propiedad intrínseca del sistema de agua subterránea que depende de la sensibilidad del mismo a los impactos humanos y/o naturales”. Foster e Hirata (1988) dicen que la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, representa su sensibilidad para ser adversamente afectado por una carga contaminante impuesta”.

Margat, hidrogéologo francés a finales de los años sesenta, introdujo el término “Vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas”, el cual conceptualizaba que el medio geológico y la cubierta edafológica proporcionan un cierto grado de protección a las aguas subterráneas, frente a contaminantes de origen tanto natural como derivados de actividades humanas, (Margat, 1968).

La asociación internacional de Hidrogéólogos, emplean el termino de vulnerabilidad como una propiedad intrínseca de un sistema de hidrogeológico que depende de la sensibilidad del sistema a impactos de origen natural y humano, lo cual definen en dos conceptos:

- Vulnerabilidad intrínseca o natural: en función de las características hidrogeológicas del acuífero, de los suelos y materiales geológicos que lo cubren.
- Vulnerabilidad específica o integrada: características hidrogeológicas del acuífero como algunos factores externos como de tipo climático, tipo de carga contaminante.

Para el presente proyecto específicamente se trabajó con la vulnerabilidad intrínseca (o natural), en función únicamente de factores hidrogeológicos, características del acuífero Maneadero.



## 2.4. MARCO LEGAL

La gestión jurídica del agua en México tiene como fundamento lo que dictan tres artículos de la Constitución Política (4°, 27 y 115) y la Ley de Aguas Nacionales, por mencionar los más representativos.

“El artículo 4° reconoce que toda persona tiene derecho al acceso, la disposición y el saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado debe garantizar este derecho de forma equitativa y sustentable, y establecer la participación de la Federación, los estados y la ciudadanía para conseguirlo”

“El artículo 27 señala que las aguas son propiedad de la Nación y sienta las bases para que el Estado regule su aprovechamiento sostenible, con la participación de la ciudadanía y de los tres niveles de gobierno. Especifica que la explotación, el uso o aprovechamiento de los recursos se realizará mediante concesiones otorgadas por el Ejecutivo, con base en las leyes”

“El artículo 115, por su parte, especifica que los municipios tienen a su cargo los servicios públicos de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales”

En cuanto a la legislación secundaria, la Ley de Aguas Nacionales (LAN) es el ordenamiento reglamentario del artículo 27 constitucional; regula la distribución y control del agua, y designa a la Comisión Nacional del Agua como el órgano responsable de ejercer la autoridad y administración del agua a nombre del Ejecutivo.

La LAN se promulgó en 1992 y fue reformada casi en su totalidad en 2004. Otras leyes secundarias se relacionan también con el tema de agua, como la de cambio climático, la de desarrollo forestal sustentable, la ley general del equilibrio ecológico



y protección al ambiente, la ley minera y otras. La Ley Federal de Derechos, por su parte, clasifica las zonas de disponibilidad de agua y determina las tarifas por uso, así como el cobro por descarga de aguas residuales con base en su calidad y la de los cuerpos de agua receptores.

Algunas de las normas oficiales mexicanas relacionadas con la temática objeto de investigación son las siguientes:

NOM-001-SEMARNAT-1996 (Irrigación)

NOM-003-SEMARNAT-1997 (Reusó)

NOM-014-CONAGUA-2003 (Recarga)

NOM-021-CONAGUA- (Calidad del agua para consumo humano)

CONAGUA – Inventario de plantas de tratamiento 2004-2007

Según la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, “Salud ambiental, agua para uso y consumo humano – límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”. El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades, lo cual por ello es importante establecer límites permisibles en cuanto a sus características bacteriológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas. Esta norma establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano.

Entendemos como límite permisible a la concentración o contenido máximo de un componente, que garantiza que el agua será agradable a los sentidos y no causará efectos nocivos a la salud del consumidor (Cuadro 3).



Cuadro 3. Límites permisibles de características químicas según la NOM-127-1994, publicadas en el DOF.

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Aluminio	0.20
Arsénico	0.05
Bario	0.70
Cadmio	0.01
Cianuros (como CN-)	0.07
Cloro residual libre	0.2-1.50
Cloruros (como Cl-)	250.00
Cobre	2.00
Cromo total	0.05
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	500.00
Fenoles o compuestos fenólicos	0.00
Fierro	0.30
Fluoruros (como F-)	1.50
Manganeso	0.15
Mercurio	0.00
Nitratos (como N)	10.00
Nitritos (como N)	0.05
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.50
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de Ph	6.5-8.5
Plaguicidas en microgramos/l: Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0.03
Clordano (total de isómeros)	0.30
DDT (total de isómeros)	1.00
Gamma-HCH (lindano)	2.00
Hexaclorobenceno	0.01
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03
Metoxicloro	20.00
2,4 – D	50.00
Plomo	0.03
Sodio	200.00
Sólidos disueltos totales	1000.00
Sulfatos (como SO <sub>4</sub> =)	400.00
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.50
Trihalometanos totales	0.20
Zinc	5.00
Los límites se expresan en mg/l, excepto cuando se indique otra unidad.	



### Conclusión del análisis sobre el marco legal

- No existe una coordinación interinstitucional (federal, estatal y municipal) adecuada para gestionar cuestiones del recurso hídrico.
- Los municipios actúan insuficientemente en garantizar la calidad de los servicios de agua potable, alcantarillado y tratamiento de aguas residuales.
- No existen normas o leyes que establezcan tarifas o subsidios que fomenten el uso apropiado sin llegar al desperdicio del agua.
- La infraestructura hidráulica está en malas condiciones y eso afecta que llegue a su destino en calidad y cantidad.
- Es recomendable siempre contar con la participación ciudadana para tener una visión integral.
- Se deben respetar las concesiones de volumen de extracción de acuerdo a la disponibilidad para no generar un déficit, no permitiendo las extracciones ilegales.
- Tener en cuenta una visión holística en el medio ambiente para no afectar ecosistemas previendo las consecuencias.



### Capítulo III. Caracterización físico geográfica del área de estudio

#### 3.1. LOCALIZACIÓN, LÍMITES Y EXTENSIÓN

El estado de Baja California se encuentra en el noroeste de la República Mexicana el cual está conformada por cinco municipios que son: Mexicali, Tecate, Tijuana, Playa de Rosarito y Ensenada el cual es el municipio que vamos a estudiar ya que políticamente el acuífero Maneadero pertenece a este municipio, al cual pertenece el municipio de Ensenada; donde la zona de estudio refiere a la cuenca del valle de Maneadero que se localiza en el noroccidente del estado de Baja California, integrada en la región hidrológica No. 1 de la vertiente del Océano Pacífico; dicha cuenca cubre una superficie de 1,866. km<sup>2</sup>. Limita al Norte con las cuencas de Ensenada, Ojos Negros y Real del Castillo; al Sur con Santo Tomás; al Este con las cuencas de Laguna Salada y San Vicente y al Oeste con el Océano Pacífico, sus coordenadas extremas se encuentran en el cuadro 3.1. El área de estudio se ubica a 13 km al Sur de la ciudad de Ensenada, B. C.

Cuadro 1. Disponibilidad media anual (CONAGUA, 2014)

CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES							
ESTADO DE BAJA CALIFORNIA							
0212	MANEADERO	20.8	0.0	38.377298	30.6	0.000000	17.577298

Leyenda:

R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales “3” y “4” de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.

En la figura 3.1 se observan los límites oficiales del acuífero Maneadero publicados en el diario oficial de la federación 2015.



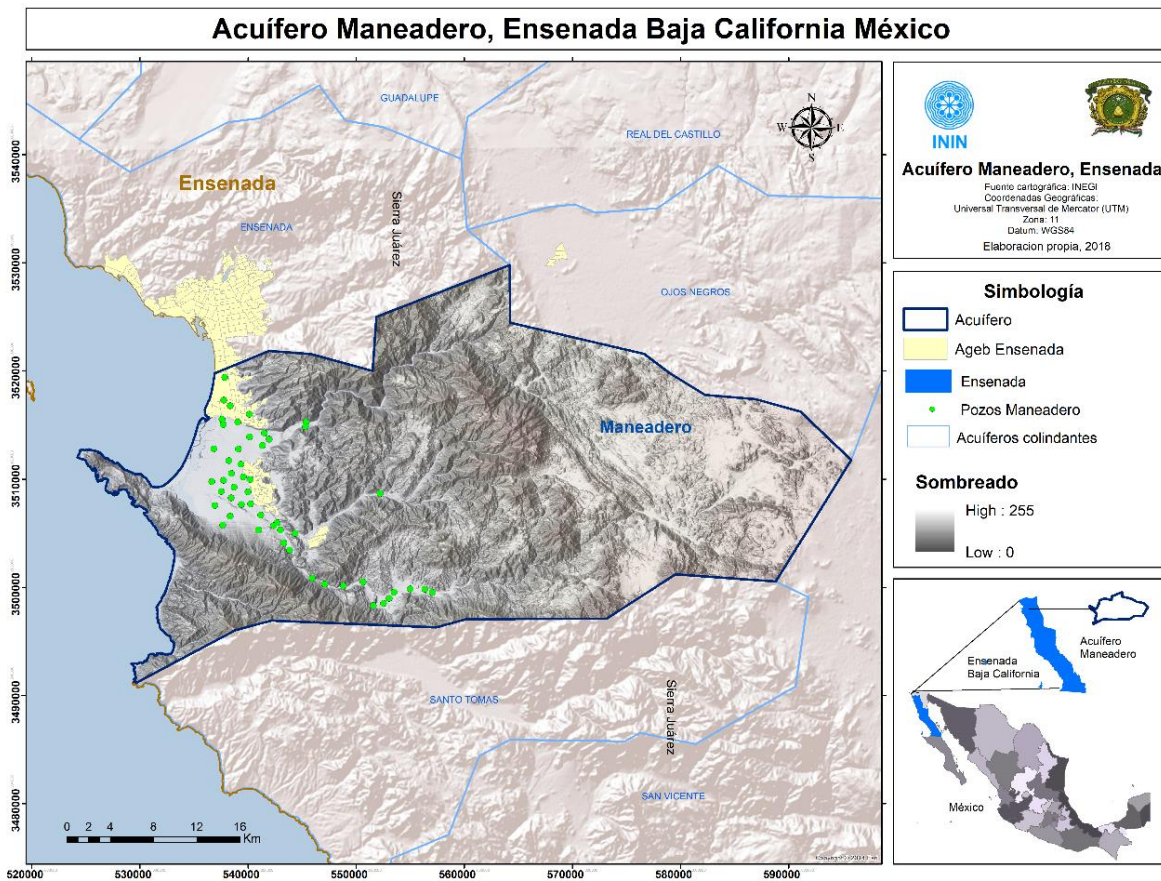


Figura 3.1 Límites político administrativos del acuífero Maneadero, Ensenada Baja California (2015).

Cuadro 3.1. Coordenadas extremas del acuífero Maneadero.

1	-116°29'14.56"O	31°30'1.03"N
2	-116°31'55.85"O	31°50'1.73"N
3	-116° 5'23.88"O	31°29'59.95"N
4	-116°15'47.16"O	31°50'3.37"N



### 3.1.1 Valle de maneadero

Los límites político administrativos del acuífero Maneadero publicados en el DOF en el año 2015 tuvieron una actualización la cual se muestra en el cuadro 3.2.

Cuadro 3.2. Delimitación actual puntual del acuífero Maneadero, (CONAGUA, 2015)

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	116	19	16.0	31	51	14.7	
2	116	11	24.4	31	49	38.3	
3	116	9	55.9	31	48	40.2	
4	116	7	51.5	31	47	33.8	
5	116	4	54.4	31	47	20.0	
6	116	2	16.8	31	46	41.2	
7	115	59	19.5	31	44	14.4	
8	116	3	48.6	31	38	11.6	
9	116	9	40.4	31	38	35.7	
10	116	13	42.7	31	36	24.2	
11	116	21	57.8	31	36	24.9	
12	116	23	42.7	31	36	1.2	
13	116	33	20.7	31	36	23.6	
14	116	35	27.2	31	35	55.3	
15	116	41	21.3	31	33	17.3	DEL 15 AL 16 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
16	116	36	33.0	31	48	48.3	
17	116	33	24.7	31	49	53.7	
18	116	30	56.2	31	49	43.4	
19	116	27	20.3	31	48	52.1	
20	116	27	6.0	31	51	34.6	
21	116	19	15.9	31	54	7.8	
1	116	19	16.0	31	51	14.7	

El Valle de Maneadero conformado por los distritos de riego es una de las áreas agrícolas más grandes de Ensenada irrigada con aguas tratadas. Éstas provienen de la planta de El Naranjo, la cual lleva operando desde 1999 (CESPE, 2012).

El agua tratada, se deposita en estanques, la cual corre a lo largo de 4 kilómetros 600 metros de tubería, con ello se busca volver productivas a 150 hectáreas, donde se siembra cebada para forraje y flores, aunado a eso busca reactivar la economía



en el poblado, pero aún más importante es la infiltración de las aguas tratadas en el manto freático.

Es una de las zonas con menor recarga ( $20.8 \text{ m}^3/\text{s}$ ). dentro del municipio de Ensenada hasta el 2015 INEGI reporta 486,639 población total; siendo el agua del subsuelo, la principal fuente de suministro, del cual se extraen ( $30.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) para uso urbano. Por tal razón, es necesario garantizar agua para la población en suficiente cantidad y calidad.

Se han realizado estudios multisectorial para evaluar las posibles problemáticas de contaminación por el reusó de aguas tratadas para el riego de cultivos de flor en Maneadero, los resultados que se han obtenido concluyen que las plantas que se producen en 98 hectáreas del valle agrícola están libres de patógenos y coliformes fecales, por lo tanto, la actividad agrícola es segura. Cabe resaltar que las aguas residuales contienen cantidades importantes de nutrientes, que permiten reducir significativamente las dosis de fertilizantes sintéticos usados en el cultivo de girasoles y otras flores que se exportan a Estados Unidos y Canadá. Otros de los impactos positivos que se han tenido aparte de no extraer agua para riego, es establecer varios ciclos de producción al año (CESPE, 2015).

Para el año 2012 un grupo de investigadores de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) e integrantes del ejido Sánchez Taboada solicitaron por primera vez al Gobierno del Estado de Baja California la inyección de 600 litros por segundo de agua tratada en el acuífero de Maneadero como medida de mitigación al intentar revertir la sobreexplotación y salinización de la cuenca hídrica, los tomadores de decisiones como la autoridad en ese entonces no respondieron a la petición que desde entonces pudo haber contribuido a reducir y eliminar el desabasto de agua potable en la ciudad de Ensenada. En este mismo año el comisariado del ejido Sánchez Taboada, amplió la cantidad de agua que la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada (CESPE) entrega al ejido para regar campos de flor y forraje.

Ya para el año 2015 un equipo de científicos del Instituto de Investigaciones Oceanológicas trabajo en el diseño de inyección de agua tratada al subsuelo del



valle agrícola de Maneadero, en donde los cuatro acuíferos que surten de agua potable a Ensenada están sobreexplotados y salinizados (Mendoza et.al. 2012).

Se ha pedido la introducción de agua tratada en el manto freático mediante un sistema de pozos de bombeo, o por medio de lagunas de infiltración. El investigador Ramón de Jesús Ramírez Acosta, de la Facultad de Economía de la UABC Campus Tijuana, realizó un estudio de factibilidad económica donde concluye que el proyecto de recarga artificial del acuífero es más viable económicamente que el de una planta desaladora y/o un acueducto desde el Río Colorado.

En junio del 2015 se hizo un estanque en maneadero con agua tratada de “El naranjo”, con el fin de proveer de agua a los horticultores, el agua se empezó a verter desde julio del 2014, el agua se infiltraba al subsuelo del acuífero, en donde se obtuvo una respuesta positiva del mismo.

### 3.2. TOPOGRAFÍA

De acuerdo con Álvarez (1956), el área de estudio se ubica en la subprovincia fisiográfica determinada como sierra de Juárez - san pedro mártir, que corresponde a la provincia regional conocida como sierra cristalina de baja california. tomando en consideración los rasgos fisiográficos de la cuenca hidrográfica del valle de maneadero, se observan dos expresiones morfológicas bien definidas: la primera constituida por elevaciones topográficas correspondientes en las inmediaciones occidentales de la sierra de Juárez; la segunda es una pared escarpada localizada al sur del sitio de estudio, que constituye un cierre hidrográfico. las laderas están formadas por rocas volcánicas extrusivas e intrusivas y metamórficas; en tanto que la pared sur está constituida por rocas sedimentarias de origen marino (Figura 3.2).

Tanto en las inmediaciones occidentales de la sierra de Juárez, como el frente abrupto del sur, son el resultado de intensos movimientos tectónicos producto de la acción de fallas transversales peninsulares con dirección predominante NW - SE, entre las que destacan la falla de agua blanca y tres hermanos.

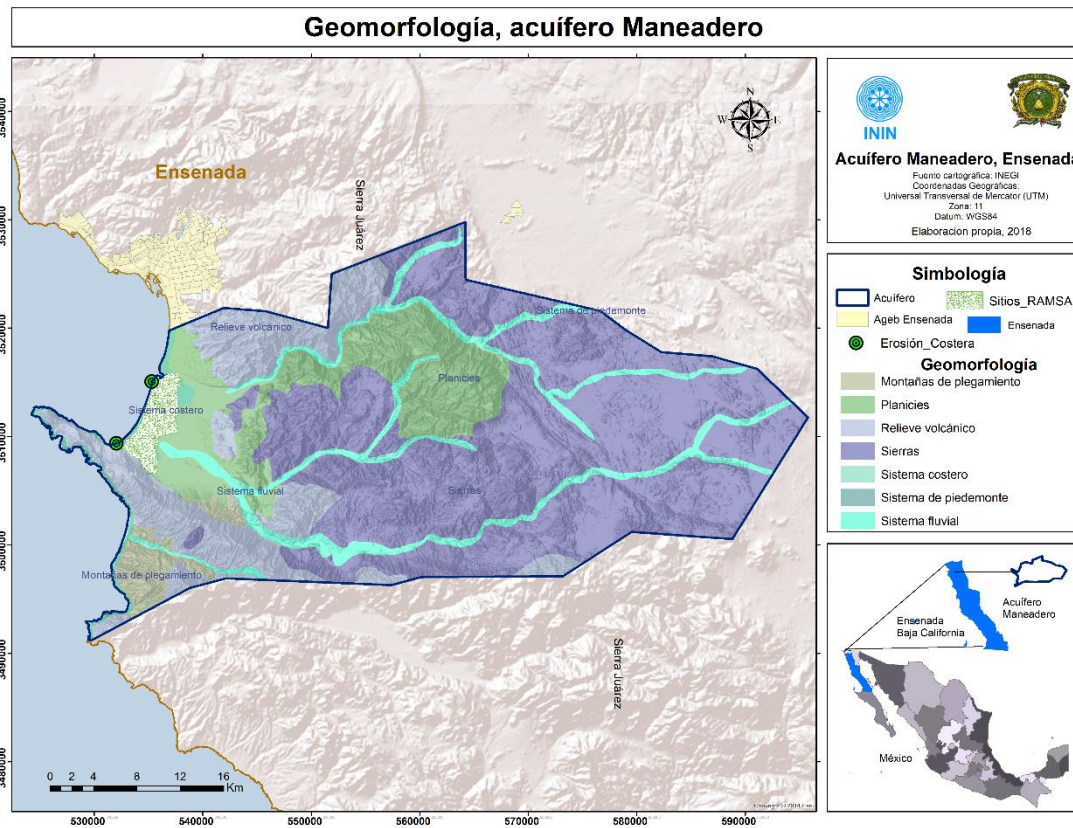


Figura 3.2 Geomorfología del acuífero Maneadero, Ensenada Baja California.

El valle es considerado como la región más importante, debido a que constituye la zona en donde ocurre la recarga del acuífero por parte de las lluvias que caen sobre este, los materiales que lo rellenan son de buena permeabilidad y están representados principalmente por arenas de grano medio a fino y gravas

En la zona de las sierras la infiltración se realiza a través de las fallas y fracturas de las rocas. Dadas las elevaciones se consideran la sierras y montañas de plegamiento como baja permeabilidad, más bien estas funcionan como zonas de recarga, el agua derivada de las precipitaciones en las partes altas adquiere una mayor velocidad debido a los elevados gradientes del terreno, lo cual impide en gran medida su infiltración al subsuelo antes de llegar al valle.



### 3.3 HIDROGRAFÍA

Hidrográficamente, la cuenca de Maneadero está integrada a la región hidrológica No. 1 (Baja California Noroeste), en la vertiente del océano pacifico, la constituyen una serie de arroyos que nacen en el flanco occidental de la Sierra de Juárez, formando una red de drenaje sencilla, en la que destacan los arroyos de Santa Clara, San Salvador, San Carlos, Las Animas y San Francisquito, siendo todos intermitentes.

La presencia del Océano Pacifico al poniente del valle y la sobreexplotación del acuífero ha dado lugar a la intrusión salina, representando una fuente potencial de recarga y deterioro de la calidad del agua subterránea.

- La recarga del acuífero proviene de la lluvia infiltrada a través de los arroyos, zonas inundables, y en menor medida de la superficie permeable de la cuenca. El arroyo San Carlos y el arroyo Las Animas son los mayores aportadores para la recarga del acuífero.
- La descarga del acuífero presenta dos componentes importantes: la evapotranspiración vegetal y el bombeo. La primera se manifiesta constante en las márgenes de los dos principales arroyos y la segunda se ha venido incrementando a partir de 1984.

En condiciones naturales la zona de descarga más importante se presenta hacia el oriente, en donde el flujo de agua subterránea descarga en el Estero Punta Banda. La cuenca hidrográfica de Maneadero por su dimensión se clasifica como intermedia – grande (500-2500 Km<sup>2</sup>), presenta diversos climas sujetos al relieve topográfico. En la zona se identifica al menos tres tipos de drenaje; subparalelo, paralelo peinado y dendrítico (Figura 3.3).

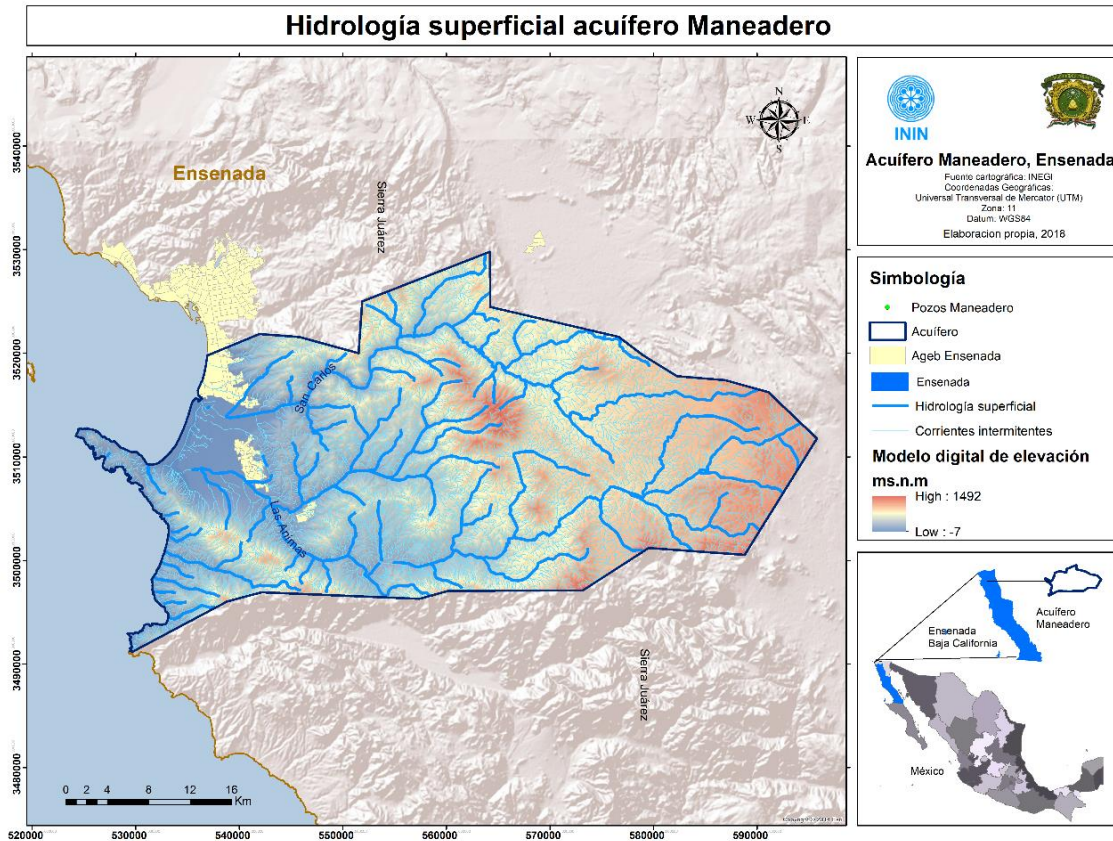


Figura 3.3 Hidrología superficial del acuífero Maneadero, Ensenada Baja California.

En base a la cartografía hídrica y diversos estudios y niveles piezométricos del sitio de estudio, se determinó que el flujo regional del valle va de las montañas hacia el mar.

### 3.3.1 Densidad de drenaje

La densidad de drenaje que se muestra en la figura 3.4 nos muestra que hay mayor presencia en la parte centro – sur del acuífero ya que la captación de lluvia es mayor en las laderas con menor pendiente de terreno.

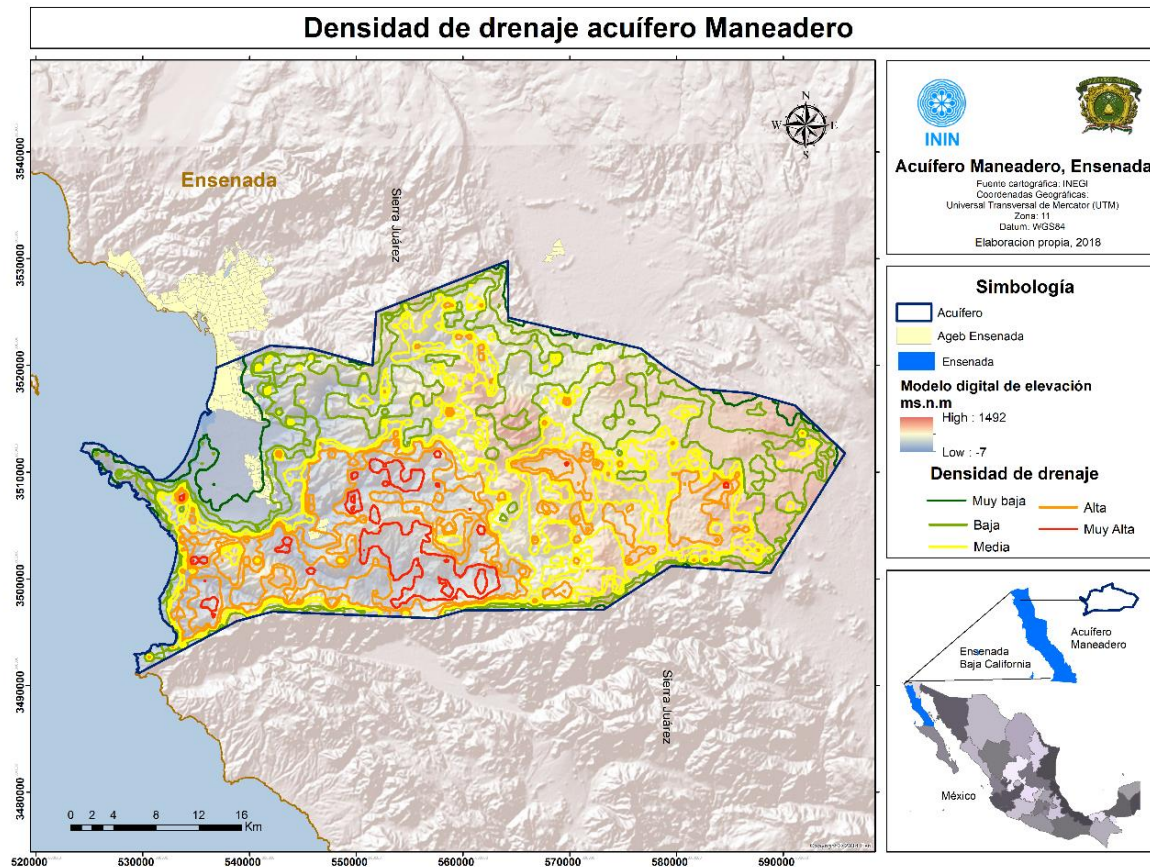


Figura 3.4 Densidad de drenaje del acuífero Maneadero, Ensenada Baja California.

### 3.4 CLIMA

El clima es determinado por los factores de altitud, geomorfología y la cercanía al mar. Así es como la circulación atmosférica y el sistema montañoso constituido por las sierras dan origen a las características de precipitación, temperatura y evaporación. Para el caso del acuífero maneadero es mayormente por los vientos que se adentran en el continente, cargados de humedad y no producen lluvias importantes más bien son escasas.

De acuerdo con el sistema de clasificación de Köppen, modificado por Enriqueta García (1964 - 1968). la cuenca hidrográfica del valle de Maneadero por su dimensión se clasifica como intermedia grande, debido a sus características topográficas (los templados húmedos que se presentan en las partes altas de las





sierras, y los secos y semisecos que se localizan en las partes bajas, ambos climas se caracterizan por fuertes oscilaciones térmicas y pluviométricas), presenta diversos climas que a continuación se mencionan:

- Clima semiseco. bs
- Subtipo templado. - temperatura media anual de 12° c a 18° c; verano fresco, régimen de lluvias en invierno y algo extremoso. bsks(e)n.
- Clima muy seco o desértico. bw.
- Subtipo templado. - temperatura media anual de 15° c a 18° c; verano fresco, régimen de lluvias en invierno y algo extremoso: bsks(e)n.
- Subtipo semicalido. - temperatura media anual de 18° c a 22° c, verano fresco que se extiende en la base de las montañas a altitudes menores de 800 msnm y régimen de lluvias en invierno: bwhs(e).
- Subtipo cálido. - temperatura media anual mayor de 22° c, régimen de lluvias en invierno y extremoso: bw(h')hs(e).
- Clima templado. cs.
- Subtipo húmedo. - lluvias en invierno, clima mediterráneo; verano cálido y algo extremoso: csa(e).
- Subtipo húmedo: lluvia de invierno con verano fresco y algo extremoso: csb(e), se encuentra sobre las laderas de las sierras de Juárez y san pedro mártir, entre los 1,000 y los 2,000 msnm.
- Subtipo húmedo. - lluvia de invierno semifrío con temperatura media anual de 5° c a 12° c; verano largo y fresco. se localiza a alturas superiores a los 2,000 msnm: cs(b)(e).

#### 3.4.1 Precipitación

Con base a los datos históricos de precipitación, el periodo de mayor precipitación es de diciembre a marzo (invernales) y menor precipitación y altas temperaturas de mayo a julio, en el acuífero la precipitación media anual va desde los 191.80 mm hasta 306.08 mm, como se puede observar en la figura 3.5 los mayores valores se

realizan en la parte central. Debido a la escasa precipitación, la red hidrográfica es intermitente; es decir no se encuentra ningún río perene.

### 3.4.2 Evapotranspiración

En general la franja costera del océano pacifico se tiene 1 387.63 mm, ya que como consecuencia de la cercanía al mar se registra alta evaporación, las cuales a su vez propician la formación de suelos con altas cantidades de sales y sodio.

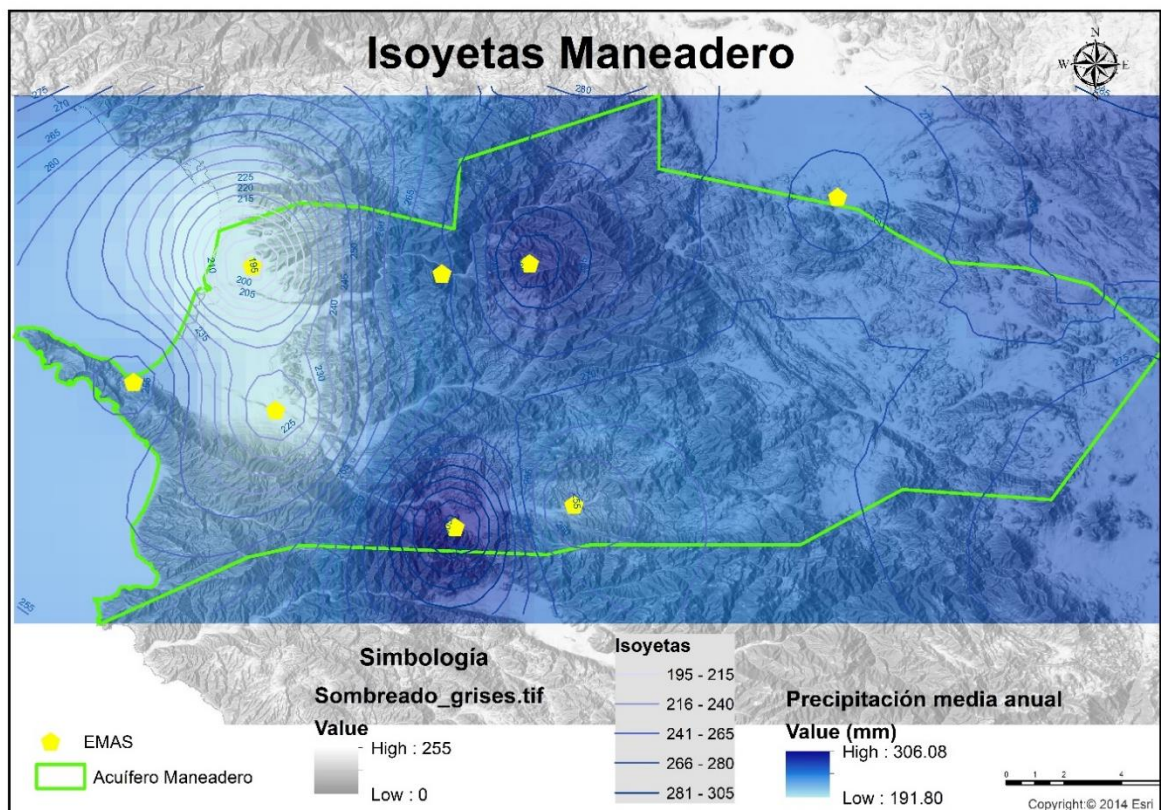


Figura 3.5 Precipitación media anual en el acuífero Maneadero, Ensenada Baja California.

### 3.4.3 Temperatura

La temperatura media anual varia de entre los 16 y 20 grados centigrados, donde el periodo mas caluroso del año se presenta de junio a septiembre y los meses mas frios de noviembre a abril (Figura 3.6).

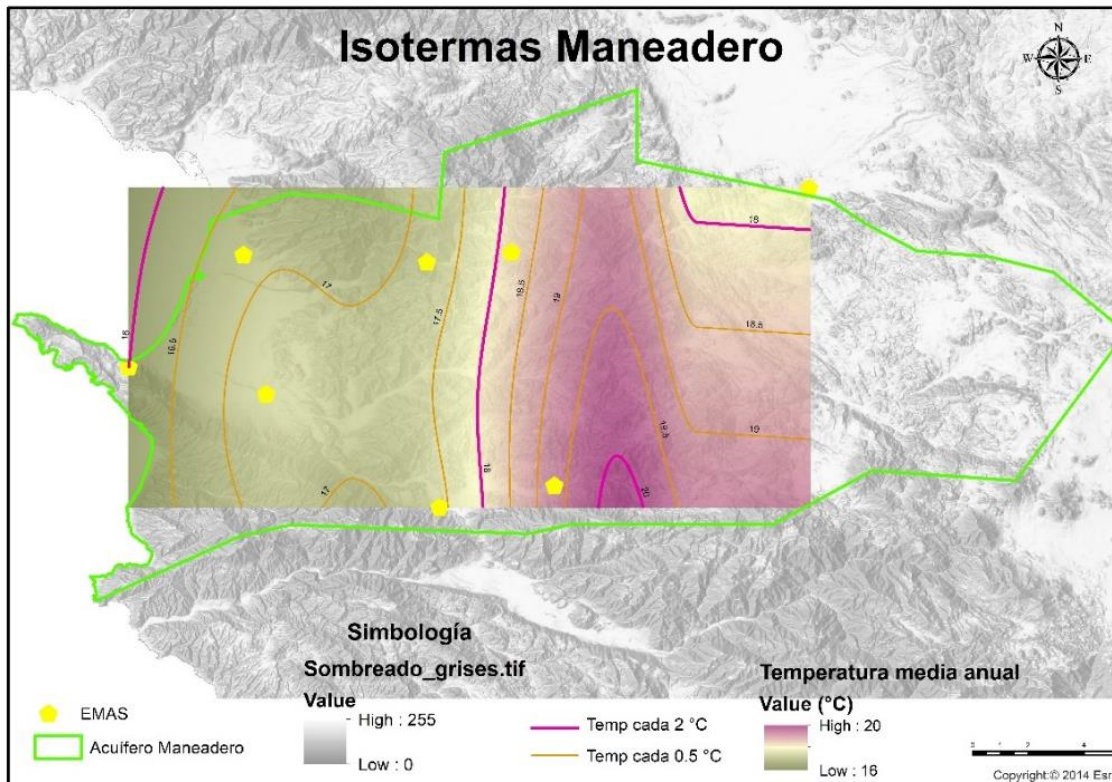


Figura 3.6 Temperatura media anual del acuífero Maneadero, Ensenada Baja California.

### 3.5 GEOLOGÍA

Las formaciones geológicas del Valle de Maneadero están representadas por rocas ígneas intrusivas: granodioritas, gabros; por rocas metamórficas integradas por gneis, esquistos y pizarras; por rocas sedimentarias aluviales, fluviales y lacustres, constituidas por arenas, gravas, gravillas, arcillas y cantos rodados (Figura 3.7).

Se han definido tres unidades geohidrológicas de acuerdo con las condiciones de permeabilidad: Unidad permeable: representada por depósitos aluviales constituidos por arenas con limo y gravas, así como por depósitos de playa formados por arenas de grano medio a fino, dunas de alta permeabilidad. Unidad Semipermeable: representada por areniscas y conglomerados compactos de baja permeabilidad; distribuidos en las partes superiores de las mesetas y en el contorno del Valle como abanicos aluviales. Unidad Impermeable: agrupa a rocas

metamórficas e ígneas intrusivas (granitos y granodioritas). Derrames y tobas de composición riolítica con lutitas y areniscas.

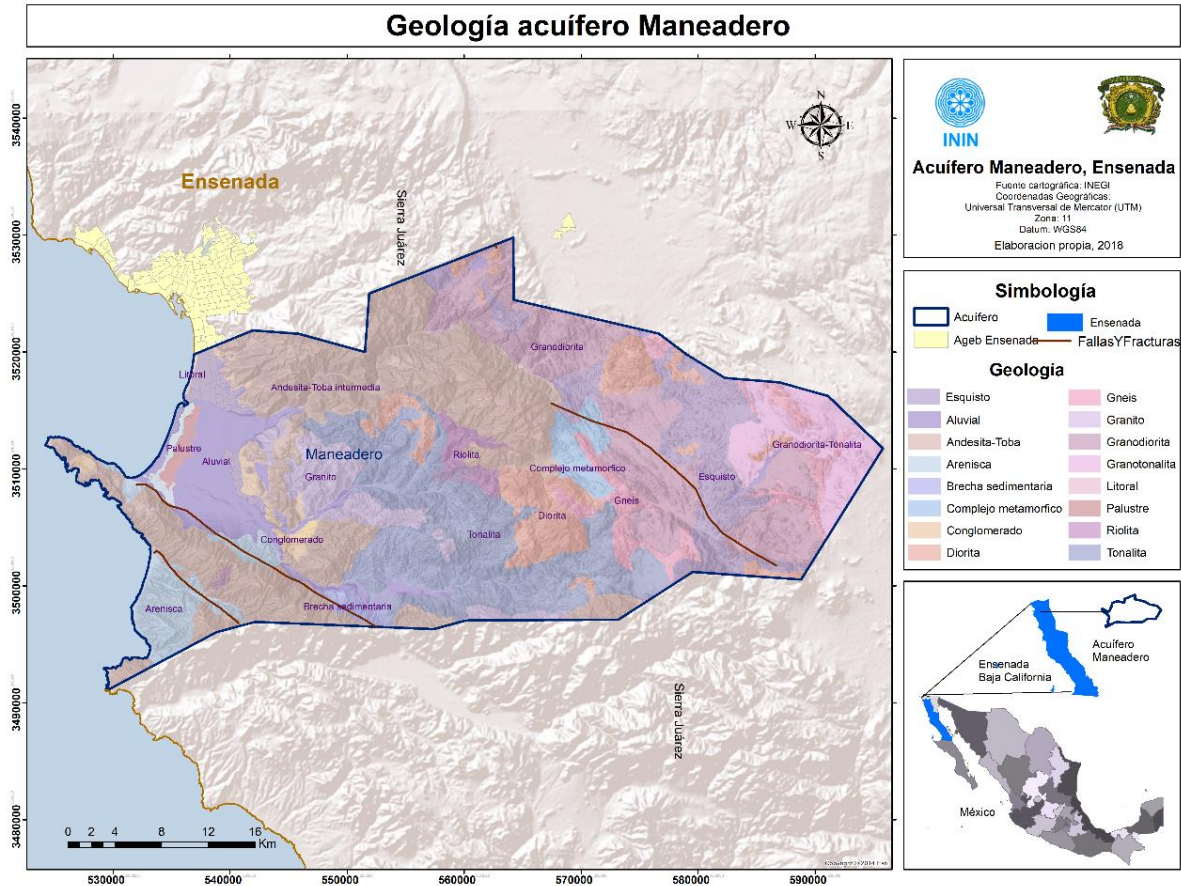


Figura 3.7 Geología del acuífero Maneadero, elaboración propia en base al INEGI 2015.

### 3.5.1 Hidrogeología

Las formaciones geológicas del Valle de Maneadero están representadas por rocas ígneas intrusivas: granodioritas, gabros; por rocas metamórficas integradas por gneis, esquistos y pizarras; por rocas sedimentarias aluviales, fluviales y lacustres, constituidas por arenas, gravas, gravillas, arcillas y cantos rodados.



Se han definido tres unidades geohidrológicas de acuerdo con las condiciones de permeabilidad:

- **Unidad permeable:** Representada por depósitos granulares aluviales constituidos por arenas con limo y gravas, así como por depósitos de playa formados por arenas de grano medio a fino y dunas de alta permeabilidad. En esta unidad los materiales se representan no consolidados por lo que tienen capacidad permeable, de almacenamiento y circulación de flujo subterráneo.
- **Unidad Semipermeable:** Esta constituida por por areniscas y conglomerados compactos de baja permeabilidad; distribuidos en las partes superiores de las mesetas y en el contorno del Valle como abanicos aluviales.
- **Unidad Impermeable:** Agrupa a rocas metamórficas e ígneas intrusivas (granitos y granodioritas) que de acuerdo con sus características físicas se consideran de muy baja permeabilidad. Como son las rocas de origen volcánico, derrames y tobas de composición riolítica y las lutitas. Su funcionamiento dentro del sistema hidráulico estudiado, consiste en representar el área de captación del agua de lluvia; propiciando su escurrimiento hasta las zonas de materiales permeables donde se infiltra.

Las rocas que constituyen el área de estudio corresponden a ígneas plutónicas, volcánicas, metamórficas y sedimentarias. los depósitos sedimentarios característicos del valle de maneadero, corresponden a materiales aluviales, integrados por arenas de diferente granulometría, gravas, gravillas, arcillas y cantos rodados, afloran desde la entrada de los arroyos San Carlos y Las Animas - san francisquito al valle, especialmente sobre toda el área de análisis. Los depósitos aluviales, debido a su elevada permeabilidad revisten una mayor importancia desde el punto de vista hidrogeológico para almacenar agua subterránea. En términos generales, el acuífero costero del valle de maneadero está formado por depósitos granulares sedimentarios, predominantemente aluviales y fluviales.

### 3.6 EDAFOLOGÍA

Los suelos que prevalecen en el Valle de Maneadero se clasifican al tipo Solum-Crudum ya que son recientes, profundos con horizontes de textura areno francosa, franco arenoso, areno franco arcilloarenosa y franco limoso; predominando las dos primeras.

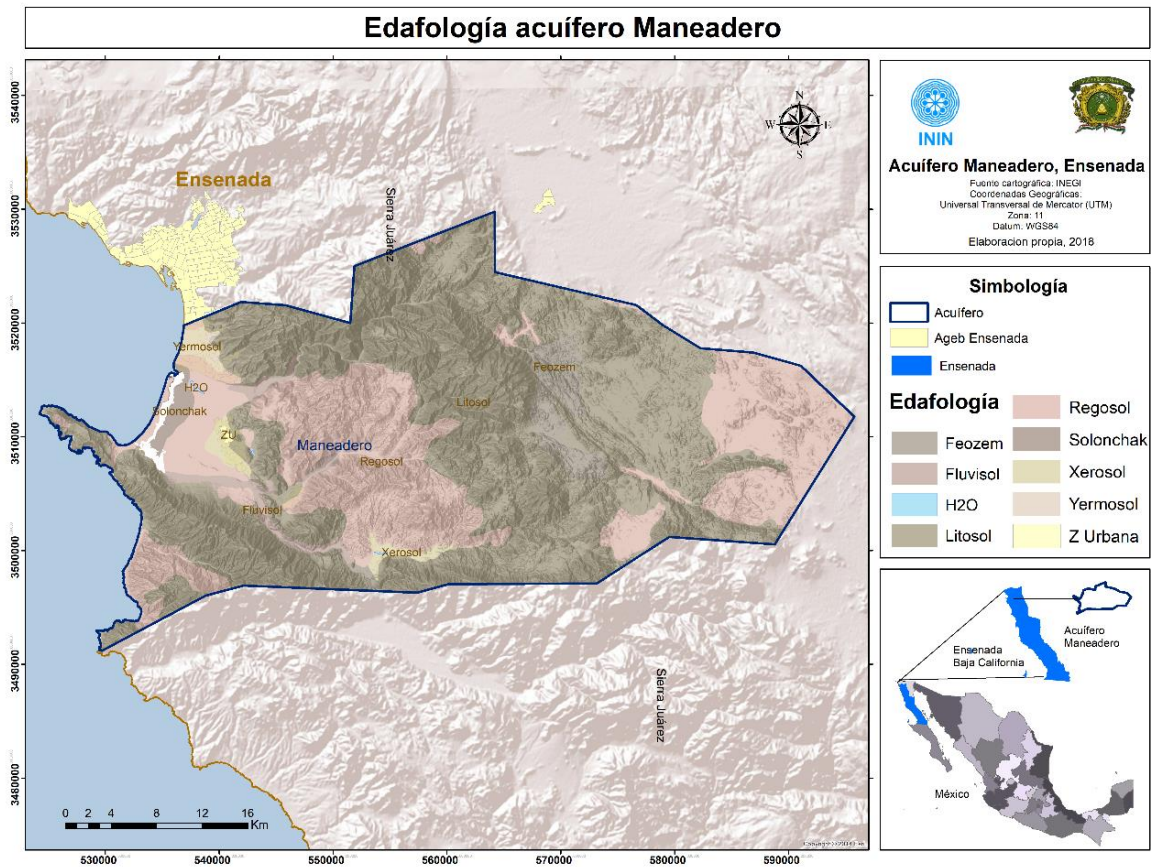


Figura 3.8. Mapa Edafológico del acuífero Maneadero, elaboración propia en base al INEGI 2015.

Características generales y grado de permeabilidad en los suelos:

La interacción de los factores como clima, geología, relieve, vegetación y uso de suelo son determinantes en el modo de formación y desarrollo de los suelos.



Facultad De Geografía

Litosol: contienen menos de 10 cm de espesor, profundidad limitada por la roca, su estructura es demasiado débil y textura media, arenosa y gravosa. Por lo tanto, su permeabilidad va de alta a muy alta.

Regosol: son suelos poco profundos (menor de 50cm), se localizan sobre las zonas de montaña, están limitados por roca, sobre los terrenos plano algunos representan altas concentraciones de sales de sodio.

Son características de la roca origen, sin desarrollo de textura arenosa o gravosa y de muy alta permeabilidad

Solonchak: se localizan sobre zonas de inundación, áreas de regresión marina y depresiones topográficas alrededor del humedal Estero punta banda.

Las altas temperaturas, aguas salobres y depósitos aluviales finos y gruesos, son factores determinantes en el modo de formación (lacustres-aluviales), su característica más importante es la alta concentración de sales con muy alta permeabilidad por su estructura heterogénea y su textura arenosa.

Los suelos de tipo feozems, xerosoles, planosoles y fluvisoles pertenecen a esta familia.

Yermosol: se encuentran en valles, con profundidad de los 30 cm a 1 metro, con gran cantidad de gravas y fragmentos de roca, contienen altas concentraciones de sales de sodio.

Se localizan en aluviales, por lo tanto, son suelos de estructura moderada a fuerte y de textura media a fina, su permeabilidad es moderada (cuadro 3.3).

Cuadro 3.3 Agrupación de tipo de suelos por área y porcentaje

ID	Tipo	Área (Ha)	Porcentaje
1	Litosol	87680.1	60.73
2	Regosol	45831.74	31.75
3	Feozem	4671.33	3.24
4	Fluvisol	2630.98	1.82

5	Xerosol	1532.03	1.06
6	Solonchak	1057.81	0.73
7	Yermosol	829.94	0.57
8	ZU	85.08	0.06
9	H2O	53.98	0.04

### 3.7 USO DE SUELO Y VEGETACIÓN

La vegetación es variada, destacando la comunidad de chaparral; arbórea, vegetación de galería, matorral rosetófilo y dunas costeras, popal-tular en las áreas que rodean al Estero Punta Banda.

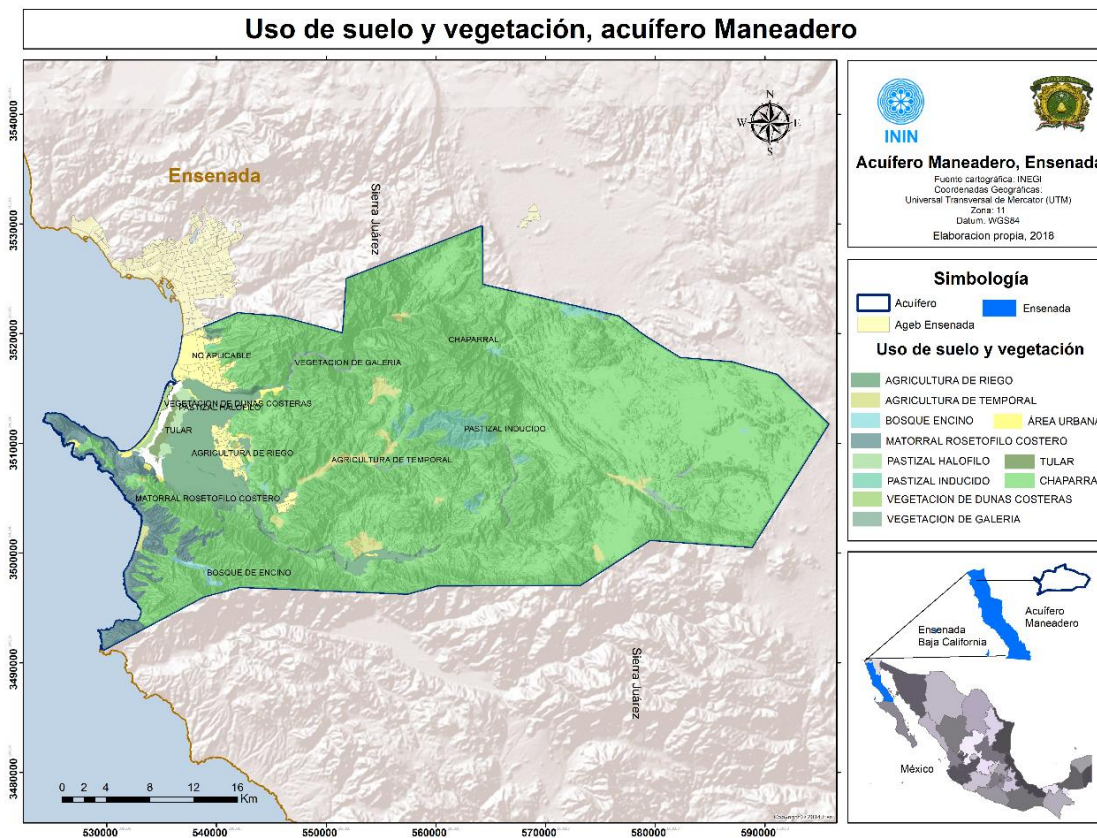


Figura 3.9 Uso de suelo y vegetación del acuífero Maneadero, elaboración propia en base al INEGI 2015.

El acuífero maneadero por sus rasgos fisiográficos y climáticos da lugar a una variada flora, de los cuales destacan por su distribución el chaparral con 121645





*Facultad De Geografía*

hectáreas perteneciente a la familia de matorral xerófilo con un 85.13 % distribuido a lo largo del acuífero, por otro lado, la agricultura de riego y temporal un 7.12 % con un total de 10297 hectáreas ocupadas en la planicie costera. También es importante resaltar la vegetación costera como el tular y vegetación de dunas costeras, ya que son parte de un ecosistema importante para el desarrollo ecológico y la fauna endémica sobre todo de aves y acuáticas propias de la bahía, que se deben conservar de una manera sustentable.

Chaparral: se distribuye a lo largo del acuífero (este-oeste) su especie son arbustos con población densa, las especies más comunes son encino, rosa de castilla, manzanita, como podemos ver en el mapa dentro de esta comunidad se desarrolla una comunidad de bosque de encino.

Matorral rosetófilo costero: esta comunidad se desarrolla gracias a los vientos húmedos del pacífico que hacen contacto con la costa, se distinguen por tener hojas arrosetadas, arbustos espinosos y algunas cactáceas.

El uso de suelo urbano y agropecuario ha causado la deforestación de algunos lugares y la escasa disposición de agua de buena calidad ha reducido en los últimos años la actividad agrícola con alcance significativo.

### 3.8 DEMOGRAFÍA

El estado de Baja California representa el 3.6% de la superficie del país, por su tamaño se ubica en el lugar 12 del país. El estado limita la norte con Estados Unidos de América, Sonora y el Golfo de California; al este con el Golfo de California; al sur con Baja California Sur y el Océano Pacífico; al oeste con el Océano Pacífico. Lo conforman cinco municipios donde la capital es Mexicali, pero por la superficie continental el más extenso es Ensenada, que ocupa el 73.5 % de la superficie estatal, el menos extenso es Playas de Rosarito y, por último, pero no menos importante es Tijuana.

En cuanto a la población el estado de Baja California ocupa el 14° lugar a nivel nacional ya que para el 2015 contaba con 3 315 766 habitantes (2015), lo que



Facultad De Geografía

representa 2.8 % de la población de México. La edad mediana de la población de la entidad es 27 años, la mitad de los habitantes tiene menos de 27 años y la otra mitad, más de 27 que desde el punto de vista productivo están en edad trabajadora (INEGI, 2015). El crecimiento población ha sufrido cambios diminutos los últimos años, se puede observar que en el periodo de 1940 a 1950, casi se triplica la población, pero posteriormente de los años 2000 al 2015 no ha sido tan acelerado su crecimiento (Figura 3.10).

Población total del estado de Baja California ( 1921 - 2015)

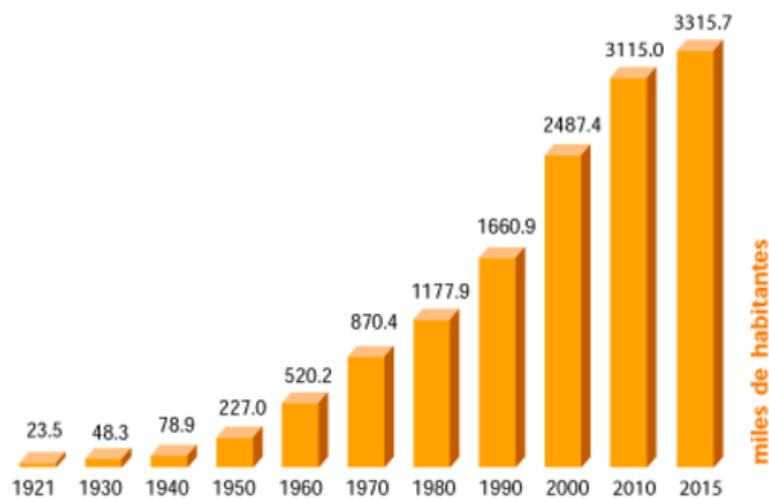


Figura 3.10 Dinamismo demográfico de Baja California, INEGI (2015)

Para el 2015 en municipio de Ensenada contaba con un total de 486, 639 habitantes, de los cuales 243 180 eran hombres y 243 345 eran mujeres (Figura 3.11 y 3.12).

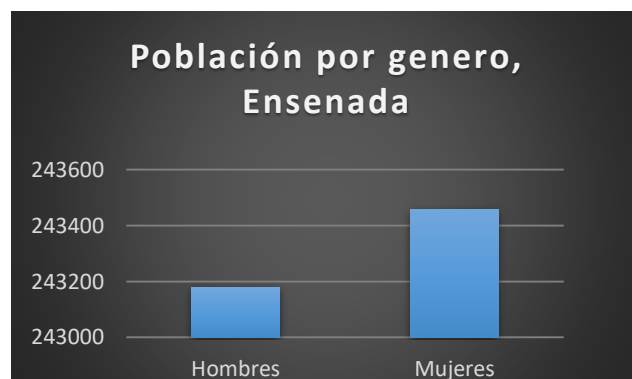


Figura 3.11: Población por género en base a INEGI encuesta intercensal, 2015.



Para el caso de natalidad y mortalidad, para el año 2013 se registraron 61840 nacimientos y 15947 defunciones en Baja California, de las cuales las principales causas de muerte fueron por enfermedades del corazón, tumores malignos y diabetes mellitus.

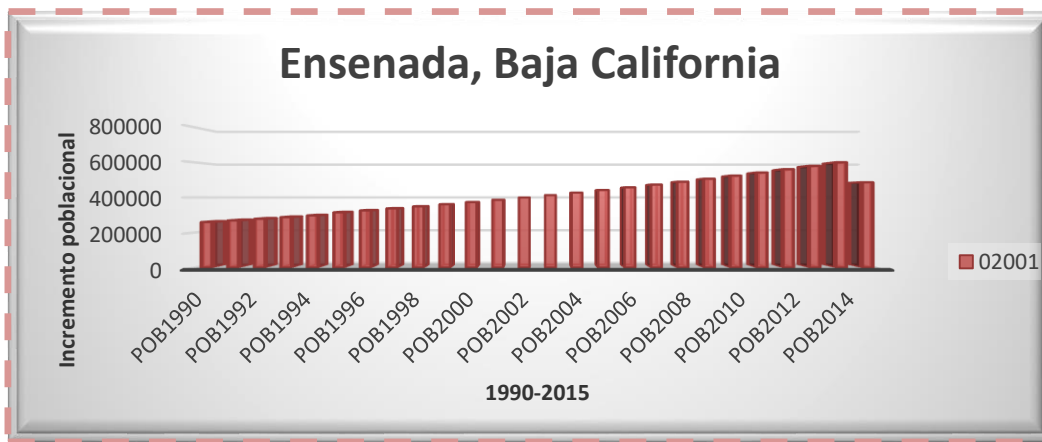


Figura 3.12 Incremento poblacional en base a INEGI, 2015.

De la población económicamente activa el 45% está integrada al sector primario, representado por la agricultura, el 24% al sector secundario (transformación) y el restante 31% labora en el sector terciario, dedicados al comercio y servicios.

El principal polo de desarrollo en Ensenada se encuentra en las actividades de comercio y servicios mismas que son demandadas por la actividad turística en la zona del malecón y en el atractivo turístico llamado “La Bufadora”, la cual atrae gran masa turística extranjera, para el año 2015 se registró un total de 111 229 extranjeros y 229 982 turistas nacionales (SECTUR, 2016).

Ensenada cuenta con 143 169 viviendas particulares habitadas, siendo la mayoría de estas casas y posteriormente departamentos, cabe resaltar que la disponibilidad de agua es escasa ya que el 86.75 por ciento de ellas tienen que hacer uso de pipas para contar con ese recurso (Figura 3.13)

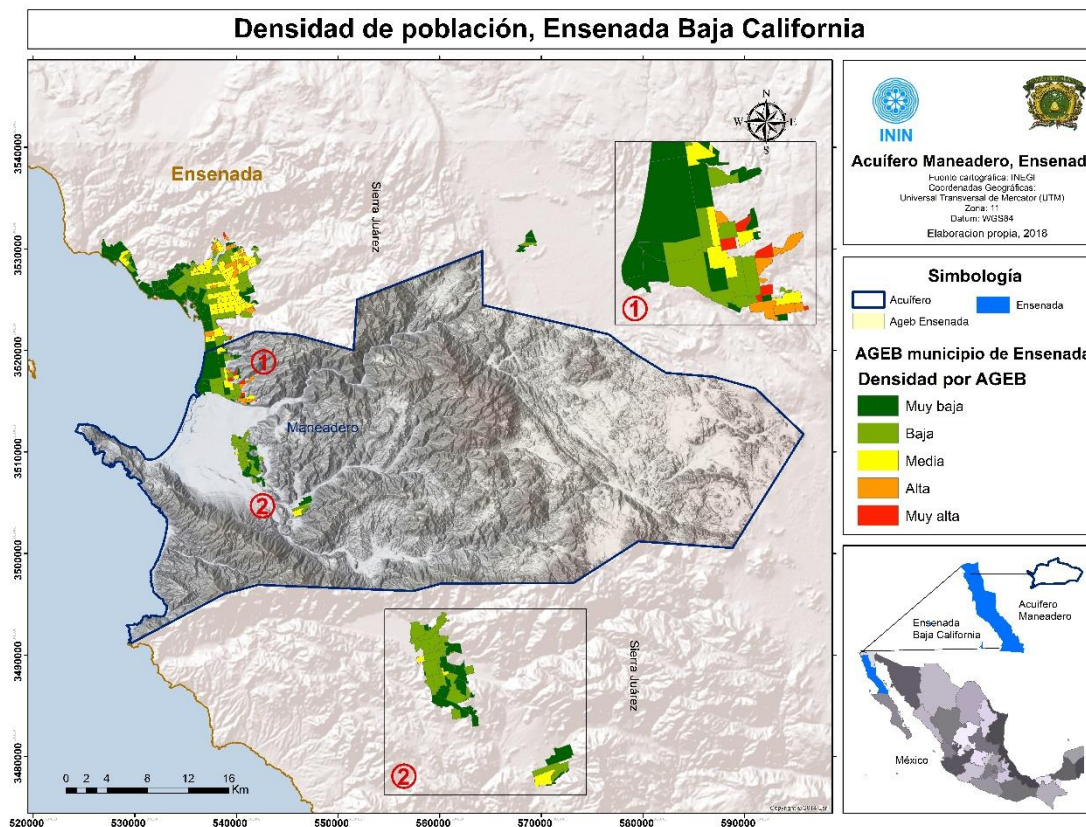


Figura 3.13 Densidad de población en base a INEGI, 2015.

### 3.8.1 Actividades agrícolas

En el estado de Baja California se siembran 78 cultivos diferentes de los cuales 52 son cultivos de ciclo, ya sea otoño-invierno o primavera-verano y 26 son perennes, todos con carácter comercial y con superficies que van desde una hectárea como el kohlrabi y berenjena hasta las 50,000 hectáreas o más, variando año como el trigo y el algodón (Figura 3.14). Entre el algodón, la uva, el trigo y las hortalizas que se siembran, se obtiene el 80% del valor de la producción agrícola de riego en el estado (SEFOA, 2010).

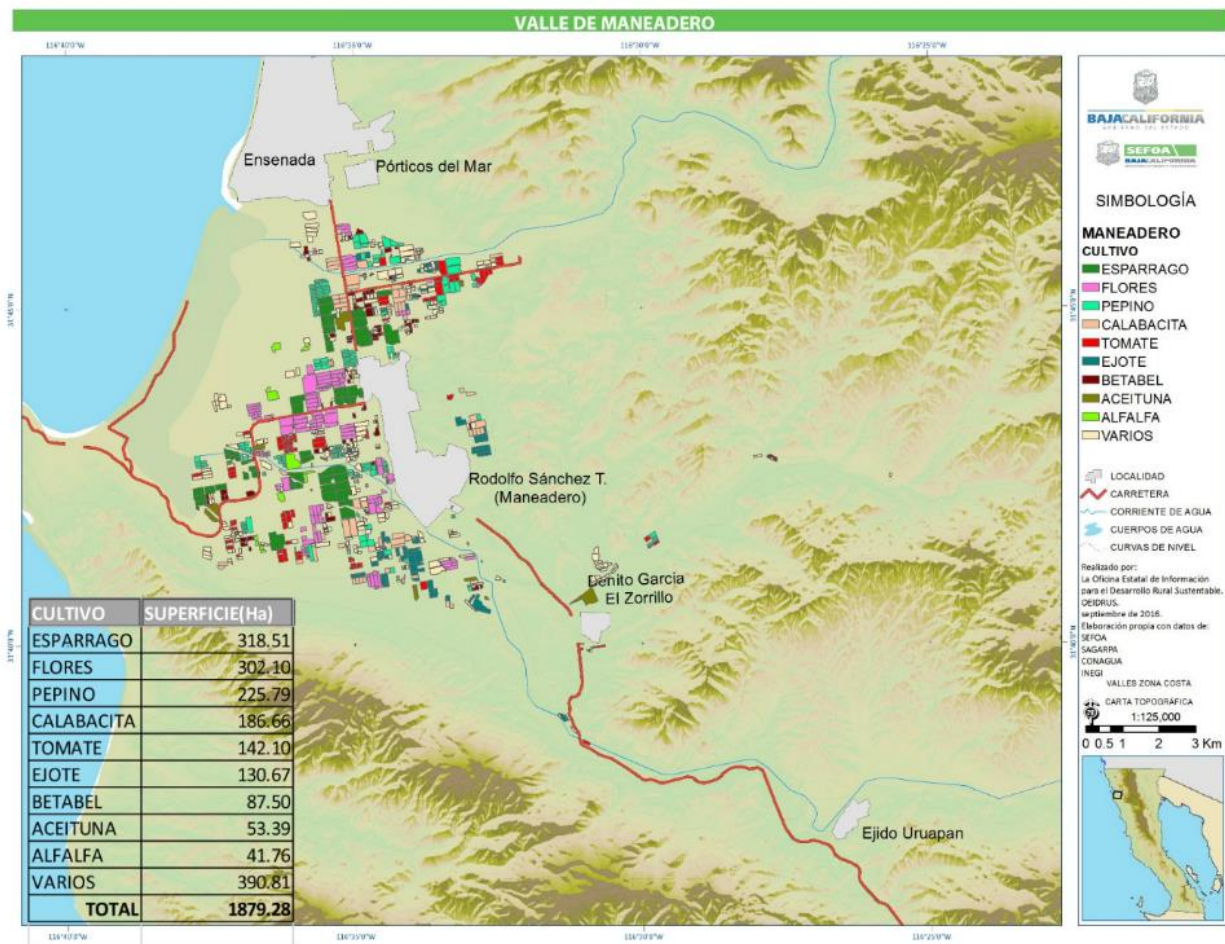


Figura 3.14 Tipo de cultivos, SEFOA (2010).

En cuanto a la actividad forestal no maderable el volumen que se genera en el municipio de Ensenada en el año 2015 fue de 6 647 toneladas, esta producción económicamente representa 38 555 miles de pesos al año según SEMARNAT. La actividad pesquera también está presente en el municipio, donde las especies principales son la sardina y el atún



### 3.9 PROYECTOS SUSTENTABLES

El Valle de Maneadero conformado por los distritos de riego Maneadero y Guadalupe es una de las áreas agrícolas más grandes de Ensenada irrigada con aguas tratadas. Éstas provienen de la planta tratadora de agua “El Naranja”, la cual lleva operando desde 1999 y produce un volumen de agua tratada (CESPE, 2012). El agua tratada, se deposita en estanques, la cual corre a lo largo de 4 kilómetros 600 metros de tubería, con ello se busca volver productivas a 150 hectáreas, donde se siembra cebada para forraje y flores, aunado a eso busca reactivar la economía en el poblado, pero aún más importante es la infiltración de las aguas tratadas en el manto freático.

Dentro del municipio de Ensenada hasta el 2015 INEGI reporta 486,639 población total; siendo el agua del subsuelo, la principal fuente de suministro. Se han realizado estudios multisectorial para evaluar las posibles problemáticas de contaminación por el reusó de aguas tratadas para el riego de cultivos de flor en Maneadero, los resultados que se han obtenido concluyen que las plantas que se producen en 98 hectáreas del valle agrícola están libres de patógenos y coliformes fecales, por lo tanto, la actividad agrícola es segura.

Cabe resaltar que las aguas residuales contienen cantidades importantes de nutrientes, que permiten reducir significativamente las dosis de fertilizantes sintéticos usados en el cultivo de girasoles y otras flores que se exportan a Estados Unidos y Canadá. Otros de los impactos positivos que se han tenido aparte de no extraer agua para riego, es establecer varios ciclos de producción al año (CESPE, 2015).

Áreas Naturales Protegidas en Ensenada:

Como sabemos se ha adoptado la conservación y el uso sustentable del territorio insular, es por ello que las islas de baja california han sido decretadas ANP, se

sugiere que los tomadores de decisiones tengan conocimiento de los planes de manejo.

En el área de estudio se en la planicie costera se encuentra categorizado sitio RAMSAR, ya que se cuenta con humedales los cuales representan la zona de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres, teniendo así un plan de manejo RAMSAR representando una gran importancia a nivel internacional por el habitat de aves acuáticas, algunas de ellas endémicas (Figura 3.15).

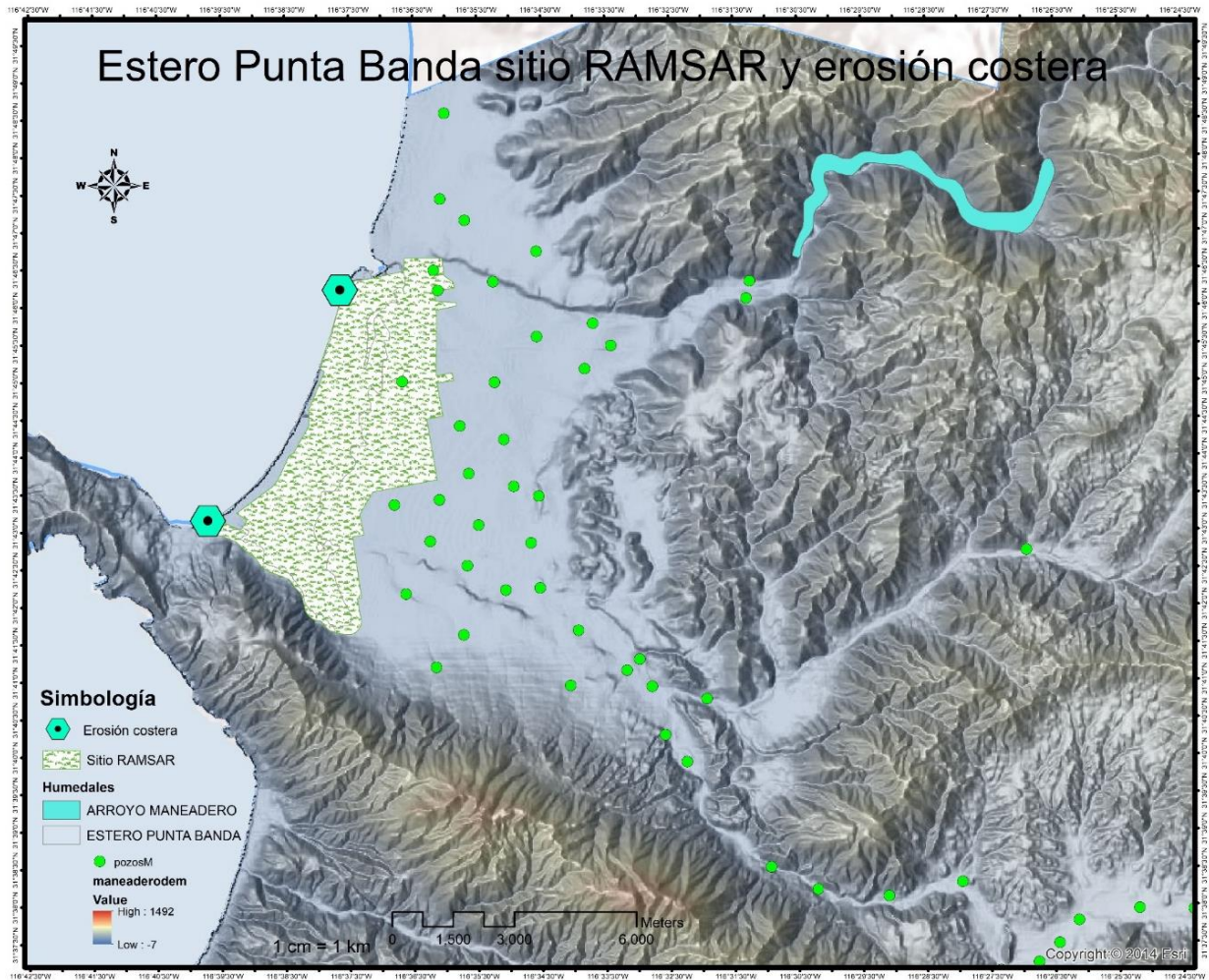


Figura 3.15 Sitio RAMSAR, INEGI, 2015.



El manejo integral de los recursos naturales es hoy en día un tema de gran debate, ya que intervienen distintos sectores de la sociedad, gobierno y académico, precisamente en el acuífero antes mencionado, después de indagar en artículos científicos se encontró que se pretende poner en práctica el proyecto de “Recarga artificial del acuífero”, para este proceso se debe tomar en cuenta la norma oficial mexicana NOM-014-CONAGUA-2003, en la cual nos desglosa los requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada. Pero se necesita hacer un análisis previo y se considera prudente esta investigación pueda servir para la toma de decisiones.

En la comunidad Maneadero se lleva a cabo una experiencia exitosa del manejo de recursos naturales y también se han aplicado técnicas de mejora como es el caso de la reforestación, en los sistemas de riego se considera importante proponer el uso de agua tratada para más hectáreas con cultivos no comestibles, construyendo obras de riego, por ejemplo, si se siembra forraje permitirá que el ganado tenga el alimento asegurado.

En el valle de Maneadero los trabajos de aprovechamiento son factibles, ya se tiene como ejemplo la planta de purificación de agua, esto a su vez hace posible tener mejoras en la calidad de vida de los pobladores y generando un integral y buen manejo de los recursos naturales.

Como conclusión del capítulo podemos decir que en base a la información anterior se deben aplicar estrategias sustentables, tomando en cuenta al “programa 21” de las naciones unidas son tres los pilares de desarrollo sostenible: social, económico y ecológico (Figura 3.16).



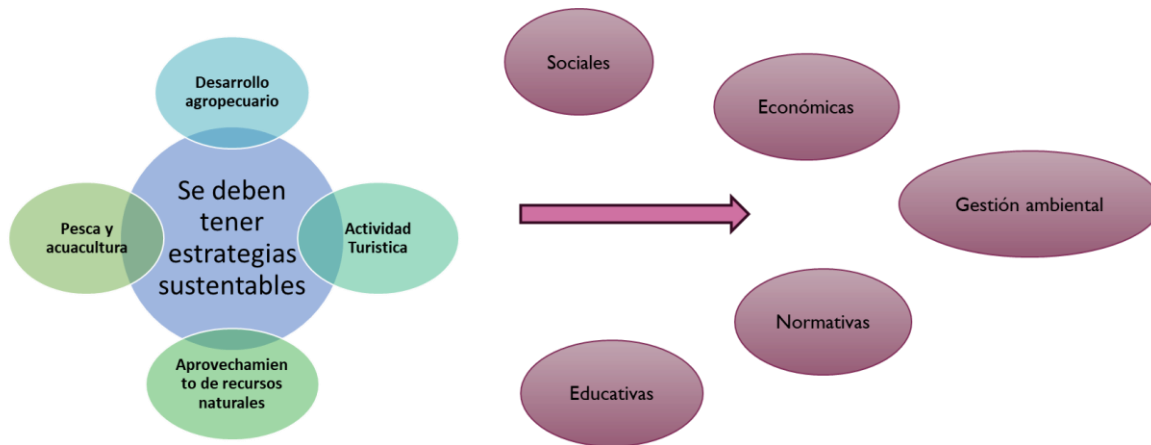


Figura 3.16. Estrategias sustentables en base a la agenda 21

Actualmente ensenada cuenta con proyectos sustentables, dirigidos por la UABC, por ejemplo

- La energía de oleaje: producir potencia mediante boyas marinas
- Micro algas para tratar aguas residuales
- Generación de energía eléctrica mediante geotermia

Uso de energías limpias y protección al ambiente permitirá al estado, municipio y localidades ser competitivos y sustentables. Dentro del desarrollo económico del estado se deben incluir vertientes para el fomento y desarrollo de la actividad turística, aplicando estrategias sustentables para tener un modelo turístico de bajo impacto ambiental no dañando o alterando a los ecosistemas, apoyando la cuestión económica (generando empleos) y una de ellas podría ser el Ecoturismo, aunque si bien ya existe en algunos lugares costeros del estado, se necesita tener un seguimiento exhaustivo que cumpla con las normas técnicas oficiales.

El adecuado manejo de los recursos naturales permitirá mantener un equilibrio entre el medio ambiente, calidad de vida y producción. Y al implementar políticas públicas



*Facultad De Geografía*

y planes de manejo con el fin de protección al ambiente se podrá tener como resultado la conservación de la biodiversidad. Las innovaciones tecnológicas apoyan a tener proyectos más efectivos y veraces los fines antes mencionados.



## **CAPITULO IV. MATERIALES Y MÉTODOS**

El capítulo “Materiales y métodos” es una de las partes más importantes para el proyecto de tesis titulado “Vulnerabilidad a la contaminación del Acuífero Maneadero, Ensenada Baja California, aplicando los métodos DRASTIC y SEA-GIndex” en el cual se presenta el procedimiento seguido, desde las herramientas a utilizar, hasta los procesos empleados para llegar a los objetivos. Esta etapa tuvo como objetivo describir y explicar detalladamente cada proceso (Cuadro 4.1).

Para llevar a cabo este proyecto se realizó en primera instancia la delimitación del universo de estudio, consulta bibliográfica y fijar los objetivos que se alcanzaron, incluyendo una caracterización físico-geográfica y socioeconómica posteriormente se eligieron las herramientas SIG para el procesamiento de los datos y requerimientos del software y hardware, teniendo claro un cronograma de actividades para tener en tiempo y forma la base alfanumérica y cartográfica disponible en sitios web para su tratamiento e integración y teniendo en cuenta datos más actuales y locales. Además, se realizó una estancia de investigación en el Instituto de Investigaciones Oceanológicas como apoyo para recopilar datos y verificar la caracterización físico geográfica. Se visitó el ejido de Maneadero, y en oficinas municipales se solicitaron datos históricos de la extracción y uso del agua. Se llevó a cabo el diseño lógico y físico para la integración y sistematización de datos en cartografía utilizando herramientas SIG y se estimaron sitios propensos a la vulnerabilidad por intrusión salina.



## 4.1 Etapas metodológicas

Cuadro 4.1 Etapas metodológicas

	<b>Etapas metodológicas</b>	<b>Descripción</b>
1	<b>Análisis de requerimientos</b>	En esta fase se eligieron las herramientas SIG para el procesamiento de los datos y se establecen los requerimientos del software y hardware.
2	<b>Caracterización físico geográfica</b>	Se recopiló parte de la base alfanumérica y cartográfica ya disponible en sitios web y otra solicitada a departamentos específicos, para su tratamiento e integración.
3	<b>Validación de la información</b>	Se realizó una estancia de investigación en el sitio de estudio para recopilar datos en campo y verificar la caracterización físico geográfica. Se visitó el ejido de Maneadero, en oficinas municipales y académicas se solicitaron datos históricos de la extracción y uso del agua.
4	<b>Integración de base de datos y análisis estadístico SIG</b>	Se llevó a cabo el diseño lógico y físico para la integración y sistematización de datos en cartografía utilizando herramientas SIG.
5	<b>Modelado DRASTIC</b>	Emplear el método DRASTIC para evaluar la contaminación.  Se estimaron sitios propensos de vulnerabilidad a la contaminación vertical del acuífero Maneadero.
6	<b>Modelado SEA-GIndex</b>	Emplear el método SEA-GIndex para evaluar la intrusión de agua de mar en el acuífero costero.  Se estimaron sitios propensos de vulnerabilidad a la contaminación lateral del acuífero Maneadero.



Esta investigación se basa en el uso de los SIG donde se almacenan y procesan datos de campo. Mediante la literatura se caracteriza el acuífero objeto de estudio, permitiendo tener un marco técnico sólido para analizar los procesos físicos naturales, ambientales y sociales que influyen en la composición y situación actual del acuífero.

La caracterización del acuífero Maneadero, se realizó en plataforma de Sistemas de Información Geográfica (SIG), introduciendo dos aspectos importantes: El físico geográfico (geología, edafología, uso de suelo y vegetación, hidrología, modelo digital de elevación) y el social (densidad de población y actividades económicas). El banco de datos colectados proviene de información abierta de instituciones gubernamentales como el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el Servicio Geológico Mexicano (SGM), el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) de Maneadero; así como de consultas específicas en dichas instancias y en el Instituto de Investigaciones Oceanológicas, ver el proceso se resume en el Cuadro 4.2.

El procesamiento de la información se realizó con el software ArcMap 10.3, consistiendo en convertir la cartografía de formato vector (punto, línea o polígono) a formato raster (píxeles) con coordenadas “Universal Transversal de Mercator” (UTM), los cuales contienen un valor numérico que permiten zonificar áreas. Este proceso permite una sobre posición de capas de información mediante álgebra de mapas.



Cuadro 4.2 Esquema metodológico empleado para la caracterización Físico-Geográfica del acuífero Maneadero.

Caracterización físico-geográfica del acuífero Maneadero				
<b>HERRAMIENTAS GEOINFORMÁTICAS</b>	Sistemas de Información Geográfica	Métodos y Herramientas	Geoprocesos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CLIIP</li> <li>• FISHNET</li> <li>• DISSOLVE</li> <li>• CALCULATOR</li> <li>• INTERSECT</li> <li>• FEATURE TO POIN</li> <li>• MÉTODOS INTERPOLACIÓN (IDW KRIGING)</li> <li>• CONTOUR</li> </ul>
<b>FUENTES DE INFORMACIÓN</b>	CONAGUA	INEGI	SGM	COTAS
<b>PRODUCTOS DIRECTOS</b>	Red Hídrica escala 1:50 000 Límite del acuífero	Edafología escala 1:250 000 formato vectorial  Demografía a nivel AGEB  Uso de suelo y vegetación escala 1: 50 000 formato vectorial  Modelo digital del terreno resolución a 15 metros formato raster	Geología escala 1:250 000 clave carta H11-2, H11-3 formato vectorial  Geología escala 1:50 000 clave carta H11-B23 formato vectorial	Base de datos de profundidad nivel de 51 pozos del año 2016
<b>PRODUCTOS GEOESTADÍSTICOS</b>	Densidad de drenaje	Densidad de población por km <sup>2</sup>  Modelo digital de elevación		Interpolación de nivel piezométricos mediante el método Kriging

### 4.1.1 Análisis de requerimientos

Los SIG dentro de la hidrología se han utilizado para la caracterización de los sistemas de agua subterránea en estudios específicos, asimismo el manejo de datos en mapas temáticos puede ser utilizado en otras aplicaciones como el modelado matemático. En cuanto a la aplicación de los SIG en estudios de intrusión salina se ha utilizado principalmente para la determinación de zonas vulnerables (Neri, 2007).

En esta fase se eligieron las herramientas SIG para el procesamiento de los datos y se establecieron los requerimientos del software y hardware.



Para la base de datos cartográfica se necesitaron los archivos de tipo vector (shp) de aspectos físicos como son geomorfología, clima y red de drenaje, hidrología (precipitación, escorrentía), vegetación, geología, hidrogeología (acuífero, captaciones, calidad físico química del agua subterránea), uso de suelo.

La información alfanumérica necesaria se tomó de la red de monitoreo del nivel piezométrico del acuífero Maneadero conformada por 51 aprovechamientos (Pozos). Para la presente investigación fue necesario el trabajo de campo, para recopilación de información en el sitio de estudio, aplicando los principios geográficos, realizando una estancia en el Instituto de Investigaciones Oceanológicas, siendo vínculo el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. Se realizó también trabajo de gabinete, con apoyo de información oficial de las instituciones gubernamentales a nivel local, municipal, estatal y nacional; posteriormente procesando los datos en el software ArcMap para procesos estadísticos y análisis espacial (figura 4.1).



Figura 4.1 Requerimientos para la investigación (Elaboración propia, 2016).



En esta etapa también fue necesario requerir datos de muestreo de pozos específicamente los correspondientes al valle agrícola Maneadero, para rescatar así información hidroquímica del agua y detectar la presencia de salinidad mediante los cloruros y la contaminación de nitratos. Para ello se utilizaron datos de extracción de muestras de agua en pozos del Valle agrícola Maneadero por el Instituto de Investigaciones Oceanológicas,

#### **4.1.1.1 Selección del método**

Para seleccionar el método adecuado para la investigación, se analizaron las distintas metodologías antes mencionadas, la disponibilidad de datos para la zona de estudio, también se tomó en cuentas estudios previos de contaminación por nitratos en la misma zona de estudio para poder posteriormente hacer una validación de resultados con la cartografía obtenida.

Se decide aplicar el método SEA-GINDEX y DRASTIC por la popularidad y éxito que tienen en la aplicación del mismo con autores de talla mundial, por otra parte, los parámetros que utilizan son los más importantes para el comportamiento del acuífero, otro punto importante es que nos permite trabajar con Sistemas de Información Geográfica.

#### **4.1.2 Caracterización físico geográfica y socioeconómica**

Esta etapa inicio con la recopilación de la base alfanumérica y cartográfica ya disponible en sitios web para su tratamiento e integración. En el caso de la caracterización físico geográfica, se estará trabajando por capas de información, para seccionar el nivel o escala de estudio por ejemplo en la cuestión de hidrología superficial se trabajará a nivel de subcuenca para un análisis más integral, para las cuestiones sociales se tomará como base escala la localidad Maneadero, y el municipio de Ensenada, esto para ver la influencia y afectación de la población





Facultad De Geografía

Para esta etapa metodológica se trabajó la población del municipio de Ensenada ya que gran parte de la acción tenía una reacción o en este caso consecuencia de la masiva extracción del agua para el acuífero, también se torna importante la acción de las autoridades municipales en planes y programas de uso y reusó del agua

Para esta etapa se realizó la integración de datos alfanuméricos y cartográficos para la generación de mapas temáticos que caracterizaron la zona de estudio en cuanto aspectos físicos y sociales, en donde las fuentes de la mayoría de datos son oficiales y publicadas por estancias gubernamentales, dado el caso en distintos archivos digitales (vector, raster, Excel, archivos de texto) algunas de ellas recibieron tratamiento sistemático o digitalización ya que no se encontraban a la escala requerida para el análisis.

Cuadro 4.3 Fuentes de información

Localización: identificar el area de estudio

Fisiografía: Modelo digital de elevación INEGI, a 12m de resolución.

Hidrología: Red hidrografica 2.0 INEGI

Geología: Servicio Geológico Mexicano e INEGI

Localización de pozos: Instituto de Investigaciones Oceanológicas - COTAS Ensenada

Demografía: INEGI

Actividad económica: INEGI- SELPER



### 4.1.3 Validación de la información

Se realizó una estancia de investigación en el sitio de estudio para recopilar datos y verificar la caracterización físico geográfica. Se visitó el valle de Maneadero, y en oficinas municipales se solicitaron datos históricos de la extracción y uso del agua, mediante un plan de trabajo antes estructurado.

Durante el trabajo de campo se corroboraron y validaron datos físicos sobre la geología del sitio, la vegetación, recopilar datos hidroquímicos del acuífero, así como datos históricos municipales de la extracción del agua, nivel de profundidad del nivel estático, para su estandarización cartográfica y alfanumérica de información proporcionada en la región hídrico administrativa de la península de Baja California perteneciente a CONAGUA.

### 4.1.4 Integración de base de datos y análisis geoestadístico SIG

Para esta etapa se llevó a cabo la integración y sistematización de datos cartográficos y alfanuméricos utilizando herramientas SIG, realizando la caracterización física, social e hidroquímica del acuífero Maneadero, utilizando el software ArcMap 10.3 (Figura 4.2).

Análisis espacial:

Se obtuvieron datos que se ven expresados en cartografía y superposición de mapas.

Algebra de mapas

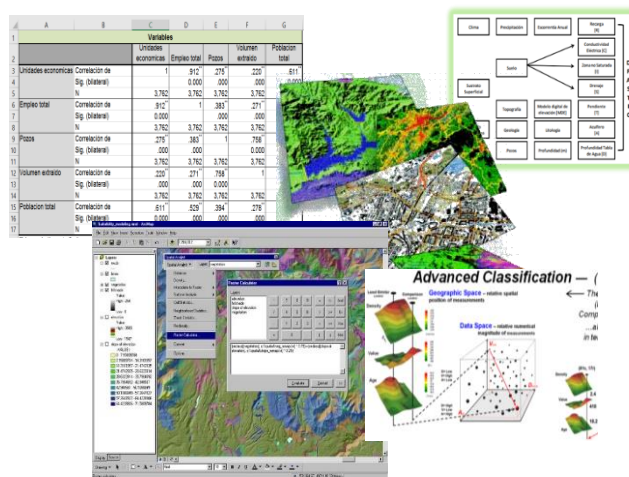


Figura 4.2 Integración de fuente de datos.



**Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Maneadero**

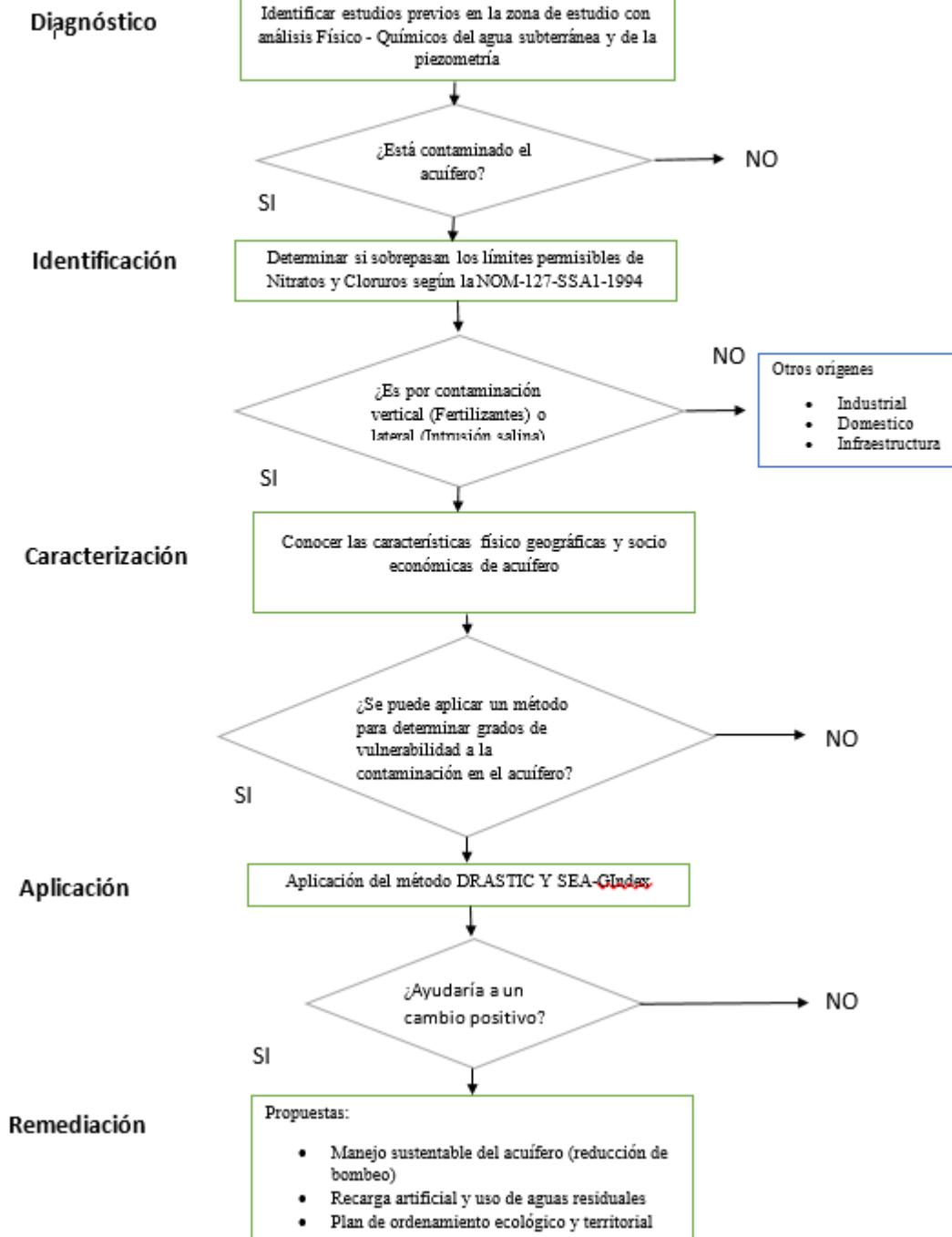


Figura 4.2.1 Modelo básico para la estrategia de diagnóstico, identificación, caracterización y aplicación de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Maneadero.



## Elaboración de mapas piezométricos

Para tener un análisis más robusto, se realizaron los mapas piezométricos de los años 2009, 2014, 2015 y 2016, teniendo la información primaria en base alfanumérica, con el uso de herramientas SIG, siguiendo los pasos que se muestran en la figura 4.2.2.

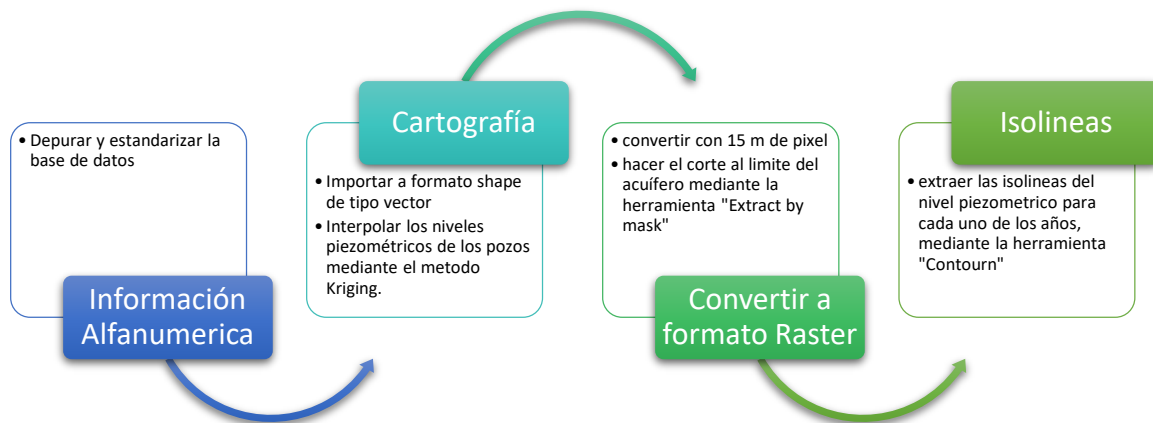


Figura 4.2.2 Esquema metodológico empleado para el análisis

Obteniendo los resultados de los mapas piezométricos, se obtiene información relevante de las variaciones en los niveles, se crearon mapas de abatimiento donde se analiza el nivel de descenso de los mismo a lo largo del tiempo.

### 4.1.5 Modelado DRASTIC

Para esta etapa se estimaron sitios propensos de vulnerabilidad a intrusión salina, se implementó el método DRASTIC, el cual es un modelo empírico desarrollado por Aller et al (1987), ha sido puesta en práctica en algunos casos de estudio en México y en otros países de Latinoamérica. Se consideró este método como el más completo en cuanto a las variables e indicadores que toma en cuenta. La



*Facultad De Geografía*

elaboración de un mapa de vulnerabilidad implica combinar 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 en el correr 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.

Al inicio de la investigación se había considerado el método EPIK pero ya adentrados en el sitio de estudio, especialmente en la geología del área, se precisó que el escenario no corresponde a un paisaje kárstico por ello se desistió.

Dicha metodología (D, R, A, S, T, I, C) toma en cuenta 7 parámetros que son: la profundidad del agua subterránea, recarga neta, litología y estructura del medio acuífero, tipo de suelo, topografía, naturaleza de la zona no saturada y la conductividad hidráulica del acuífero (Figura 4.3). Haciendo uso de herramientas SIG para sistematizar y modelar la información, se realizó el análisis espacial de vulnerabilidad vertical en el acuífero Maneadero.

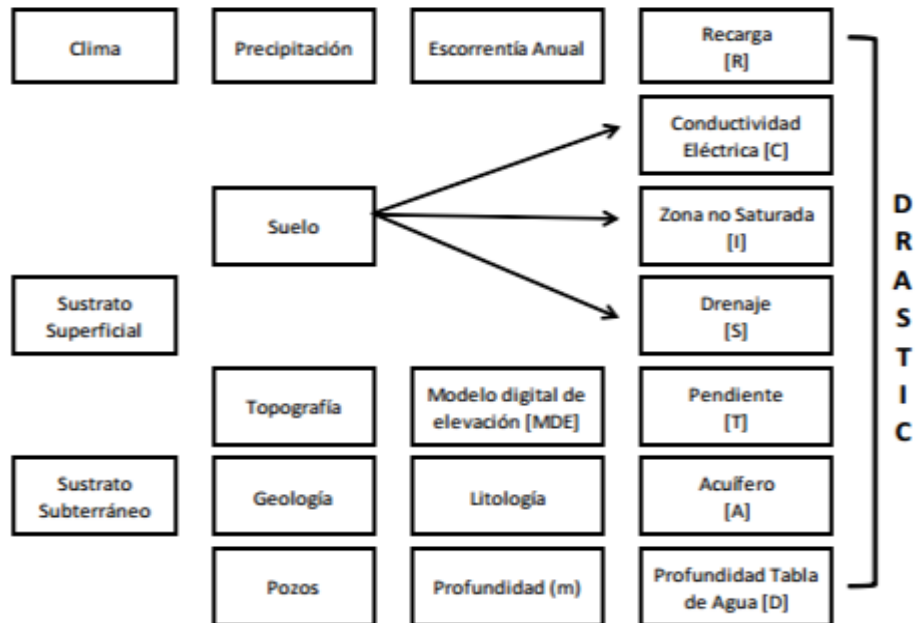


Figura 4.3 Variables de evaluación del método DRASTIC (Vargas, 2010).

- **D: Profundidad del agua subterránea.** Indica 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.
- **R: Recarga neta.** Es la cantidad de agua anual por unidad de superficie que contribuye a la alimentación del acuífero. La recarga resulta primariamente de la fracción de precipitación que no sufre evapotranspiración y de la escorrentía superficial. Es el principal vehículo transportador de los contaminantes.
- **A: 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.
- **S: 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.



- **T: Topografía.** Representa la pendiente de la superficie topográfica e influye en la evacuación de aguas con contaminantes por escorrentía superficial y sub-superficial.
- **I: Naturaleza de la zona no saturada.** Representa la capacidad del suelo para obstaculizar el transporte vertical.
- **C: 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.

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

La metodología DRASTIC propuesta por Aller et al. (1987), consiste en caracterizar el comportamiento de cada parámetro, asignándoles índices que van desde 1,0 (mínima vulnerabilidad) hasta 10,0 (máxima vulnerabilidad) como se muestra más detalladamente en los cuadros del 4.4 al 4.9.

Cuadro 4.4. Valoración de parámetros para el método DRASTIC.

FACTORES DE VALORACIÓN	
VARIABLE	VALORACIÓN
<b>D (PROFUNDIDAD, m)</b>	<b>D<sub>r</sub></b>
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
<b>R (RECARGAS, mm)</b>	<b>R<sub>r</sub></b>
0 – 50	1
50 – 103	3
103 – 178	6
178 – 254	8
> 254	9



Cuadro 4.5 Valoración de Litología para el método DRASTIC

A (LITOLOGÍA DEL ACUÍFERO)	VALORACIÓN $A_r$	VALOR TÍPICO $A_r$
Lutita masiva	1 – 3	2
Metamórfica/Ígnea	2 – 5	3
Metamórfica/Ígnea meteorizada	3 – 5	4
Arenas y gravas de origen glaciar	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

Cuadro 4.6. Valoración de tipo de suelo para el método DRASTIC

VARIABLE	VALORACIÓN
<b>S (TIPO DE SUELO)</b>	<b><math>S_r</math></b>
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

Cuadro 4.7 Valoración de pendiente para el método DRASTIC

T (PENDIENTE, %)	$T_r$
0 – 2	10
2 – 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
>18	1





Cuadro 4.8. Valoración de naturaleza de la zona no saturada para el método DRASTIC

I (NATURALEZA DE LA ZONA NO SATURADA)	VALORACIÓN I <sub>r</sub>	VALOR TÍPICO I <sub>r</sub>
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

Cuadro 4.9. Valoración de conductividad hidráulica para el método DRASTIC

C (CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA)		C <sub>r</sub>
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	$> 9,5 \cdot 10^{-2}$	10

Además de la asignación de valores a cada parámetro, este método asigna un factor de ponderación a cada parámetro, que depende si el contaminante en cuestión es un pesticida (DRASTIC-P) o no (dado que los pesticidas son menos volátiles y más persistentes), con valores que están entre 1,0 y 5,0 (Cuadro 4.10).

Cuadro 4.10. Factores de ponderación para el método DRASTIC

TIPO DE CONTAMINANTE	FACTORES DE PONDERACIÓN						
	D <sub>w</sub>	R <sub>w</sub>	A <sub>w</sub>	S <sub>w</sub>	T <sub>w</sub>	I <sub>w</sub>	C <sub>w</sub>
Pesticida (DRASTIC-P)	5	4	3	5	3	4	2
No Pesticida	5	4	3	2	1	5	3



El valor índice se obtiene de la forma siguiente:

$$iV_{DRASTIC} = (D_r \times D_w) + (R_r \times R_w) + (A_r \times A_w) + (S_r \times S_w) + (T_r \times T_w) + (I_r \times I_w) + (C_r \times C_w)$$

r: factor de clasificación o valoración

w: factor de ponderación

Los resultados de la vulnerabilidad general pueden variar entre 23 (mínima) y 230 (máxima), en la práctica este índice varía entre 50 y 200. Si se considera contaminación por pesticidas (DRASTIC\_P) podrá tomar valores comprendidos entre 26 y 260 (Cuadro 4.11).

Cuadro 4.11 Grados de vulnerabilidad utilizando en método DRASTIC.

GRADOS DE VULNERABILIDAD – D R A S T I C			
VULNERABILIDAD GENERAL		VULNERABILIDAD PESTICIDAS	
GRADO	VULNERABILIDAD	GRADO	VULNERABILIDAD
Muy bajo	23 – 64	Muy bajo	26 – 73
Bajo	65 – 105	Bajo	74 – 120
Moderado	106 – 146	Moderado	121 – 167
Alto	147 – 187	Alto	168 – 214
Muy alto	188 – 230	Muy alto	215 – 260

Una vez asignándole los valores a cada parámetro se realiza el análisis espacial, utilizando el software ArcGis con los procesos de reclasificación, interpolación y algebra de mapas (Figura 4.4).

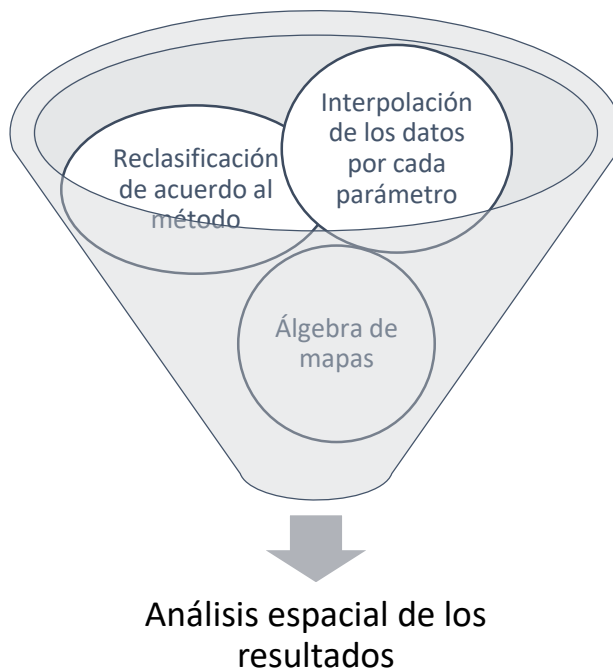
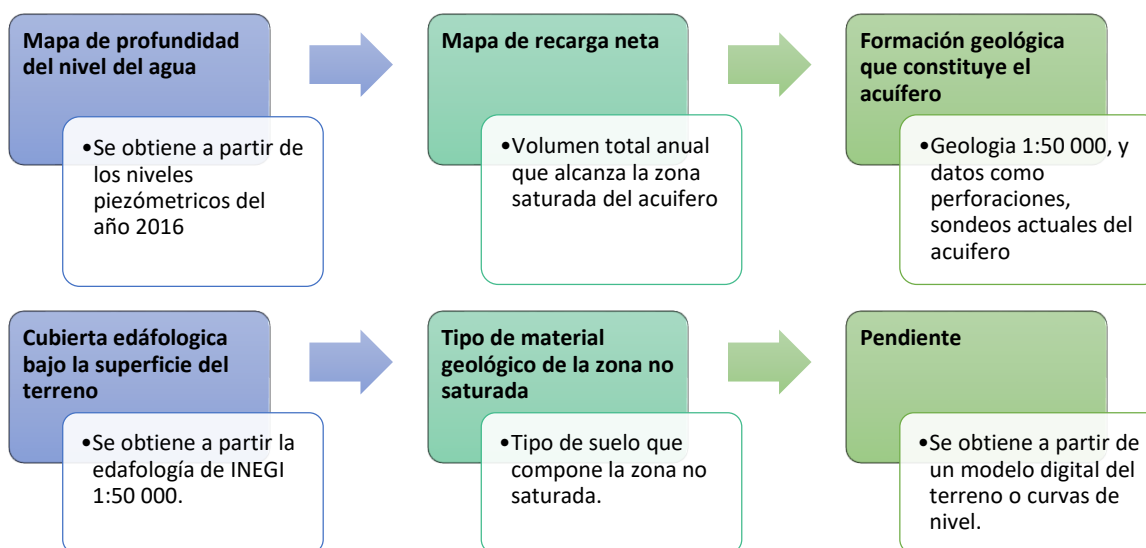


Figura 4.4 Esquema metodológico general empleado para en método DRASTIC.

**Paso 1:** Construir los mapas que representan la distribución espacial de cada una de las variables





#### Conductividad hidráulica del acuífero

- Esta información se obtiene a partir de pruebas de bombeo realizadas en los distintos piezómetros o pozos de explotación existentes en el acuífero.

Figura 4.5 Procedimiento empleado para cada parámetro del método DRASTIC.

**Paso 2:** Reclasificar los mapas obtenidos para cada una de las variables de acuerdo a los datos del sitio.

**Paso 3:** Algebra de mapas, con los mapas ya reclasificados de acuerdo al paso anterior, lo que sigue es realizar la suma ponderada de cada uno de ellos. El resultado obtenido se reclasifica de acuerdo a la tabla de DRASTIC para finalmente obtener el mapa de vulnerabilidad.

Con los mapas resultantes se pretende que ayuden a la prevención y mitigación del problema actual a la contaminación.

En la evaluación se emplea el método de índices y superposiciones, que combina un conjunto de características o atributos físicos del suelo, de la zona no saturada y de los acuíferos; a los cuales se asigna un valor numérico según su importancia en la evaluación de la vulnerabilidad, mediante sistemas de matrices (superposición) y modelos de sistemas de conteo de puntos (índices). Primero se seleccionan los parámetros representativos para evaluar la vulnerabilidad y posteriormente a cada parámetro se le asigna un rango de valores que refleja el grado de vulnerabilidad a la contaminación (Gogu y Dassargues, 2000).

El método de conteo de puntos utilizado por DRASTIC, es un sistema de evolución en los que cada parámetro es multiplicado por un peso asignado para reflejar la relación entre ellos, los parámetros evaluados y multiplicados, son después sumados para obtener la puntuación final (Gogu y Dassargues, 2000), esta



puntuación provee una medida de la vulnerabilidad para cada punto del área de estudio.

#### 4.1.6 Modelado SEA-GIndex

Para calcular la vulnerabilidad a la intrusión salina de acuíferos costero Maneadero se utilizó el software ArcGIS, tomando en cuenta que la intrusión marina es un fenómeno de migración lateral, en la literatura se proponen dos nuevos métodos él SEA-GIndex y él SEA-DIndex, que son una adaptación de los métodos actuales GOD y DRASTIC comúnmente utilizados para evaluar la vulnerabilidad de acuíferos pero que solo toman en cuenta la migración vertical de contaminantes. La adaptación de estos nuevos métodos, están orientados a evaluar la intrusión salina lateral y no tienen en cuenta el movimiento vertical de contaminantes desde la superficie del terreno, por tanto, no incluyen las variables de suelo y zona no saturada.

El método SEA-GIndex trata de una adaptación al método GOD incluyéndose dos nuevos parámetros que juegan un papel importante en la posición de la interfaz agua dulce – agua salada:

- La distancia a la costa (en lugar de la distancia vertical al agua subterránea); la parte del acuífero más alejada de la costa es menos vulnerable a la contaminación por intrusión salina.
- La altura piezométrica (en lugar del grado de confinamiento hidráulico); Este factor es importante porque se convierte en una barrera natural contra el avance de la intrusión marina.
- El último factor y que se conserva del método GOD es la Litología; dependiendo de ella, el agua salada o salobre va a tener menor o mayor resistencia a contaminar el acuífero de agua dulce.

Para calcular la vulnerabilidad a la intrusión marina se hizo uso del software ArcGIS, como resultado se obtuvieron tres mapas: La distancia a la costa, La altura



piezométrica y la Litología. Con este método se logró obtener vulnerabilidades en un rango de “insignificante” a “extrema”.

La distancia a la línea de costa se obtuvo a partir de un shapefile (shp) del límite del acuífero Maneadero y se extrajo solo la línea de costa que colinda con el Océano Pacífico, una vez teniendo el shp de la línea de costa, abrimos la caja de herramientas y en la opción Spatial Analyst elegimos la opción de Distance y del submenú la opción de “*Euclidean Distance*”. En la ventana como dato de entrada es el shp de línea de costa y en tamaño de celda de salida le decimos que sea de 30 metros y le damos el nombre de salida “Distancia”, cabe resaltar que ahora el resultado es un archivo de tipo raster. Recordemos que la Euclidean Distance, calcula para cada celda, la distancia euclidiana a la fuente más cercana.

El mapa raster obtenido del proceso anterior se reclasificó de acuerdo al cuadro de ponderaciones (Cuadro 4.12).

Cuadro 4.12 Pesos asignados de acuerdo a la distancia de la línea de costa

Distancia (km)	Distancia (m)	Peso
<b>&lt; 1.5</b>	<1500	10
<b>1.5 a 3</b>	1500 a 3000	9
<b>3 a 6</b>	3000 a 6000	7
<b>6 a 10</b>	6000 a 10000	4
<b>&gt; 10</b>	>10000	2

### La altura piezométrica

Se obtuvo a partir de la base de datos puntual de los pozos en Maneadero, se interpolaron los datos mediante el método Kriging de la herramienta Geostatistical Analyst con el método de Kriging / CoKriging, insertando la capa de puntos que contiene datos de los 51 pozos que se tomaron en cuenta para este análisis, los niveles piezométricos fueron tomados en campo en el año 2016, con predicción y modelo de tipo estable, con el máximo de vecinos de 5 y mínimo de 2, con tamaño de celda de salida de 30 m. Este método fue elegido en base a distintos ejercicios



y este fue el que dio mejor resultado y también menor error medio cuadrático RMS (Root Mean Square error) el cual significa que se utilizó la raíz cuadrada del error cuadrado medio.

Posteriormente se realizó la reclasificación del raster de “piezometría” con los siguientes rangos para piezometría de acuerdo al método (Cuadro 4.13).

Cuadro 4.13 Rangos de peso del nivel piezométrico

Rangos	Nivel piezométrico (msnm)	Peso
1	>1	10
2	1 a 2.5	9
3	2.5 a 5	8
4	5 a 10	6
5	>10	3

## Litología

Se obtiene a partir de la cartografía en formato shp de INEGI, posterior a ello se corta con el polígono de acuerdo a los límites del acuífero Maneadero y se reclasifica en base a las características del material geológico (cuadro 4.14).

Litología	Peso
Gravas, arenas, calizas y kars	10
Arenas eólicas, areniscas y rocas volcánicas	8 - 9
Loes	6
Rocas de baja permeabilidad	3 - 6



## CAPITULO V. RESULTADOS

Actualmente existe una necesidad insoslayable de plantear y desarrollar políticas para el uso sustentable y sostenible de los recursos hídricos, así es como en este capítulo se manifiesta el interés por implementar métodos y generar la cartografía de vulnerabilidad del acuífero Maneadero.

Es importante rescatar que la generación de esta cartografía va en pro dentro de las actividades del Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO, la garantía que se tendría para tener un buen estado de las aguas subterráneas requiere medidas tempranas y una estable planificación a largo plazo en medidas de protección y/o mitigación.

Es de suma importancia disponer de un estudio de esta naturaleza con información hidrológica actual, con una perspectiva de gestión del agua en Ensenada Baja California, lo cual a su vez será importante proveer la información contenida y análisis de resultados a los tomadores de decisiones para su conocimiento en el sitio con la aplicación de métodos de vulnerabilidad.

Se analiza detalladamente las condiciones de los factores que inciden de forma directa en el comportamiento del acuífero Maneadero, los componentes del medio físico e interacción humana que actúan como variables independientes, se consideró en este modo el crecimiento de la población, los niveles de concentración, uso y distribución del recurso, se examinó también el factor tiempo, relieve, suelo, vegetación, clima, y la geología sobre la disponibilidad del agua.

El estado de Baja California está constituido por acuíferos muchos de ellos sobreexplotados y con intrusión salina, aunado a esto podemos resaltar que su extracción es muy intensa en base a los requerimientos de uso, que son; tanto para el abastecimiento urbano como para el regadío en el área agrícola. En respuesta a los problemas actuales sobre la situación del agua subterránea se realizó el estudio



del acuífero “Maneadero” con el fin de evaluar el nivel de vulnerabilidad frente a la contaminación vertical y lateral, difundiendo los principales resultados alcanzados.

### 5.1. ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LA PIEZOMETRÍA EN EL ACUÍFERO MANEADERO

En el presente estudio se analiza la evolución espacio-temporal de los descensos del agua subterránea durante los años 2009, 2014, 2015 y 2016, de 51 aprovechamientos (Pozos), a través del análisis metodológico Kriging ordinario, con el objetivo de conocer el estado actual del acuífero. La base de datos fue proporcionada por el comité de agua subterránea de Ensenada y el Instituto de Investigaciones Oceanológicas (Fig. 5.1), ya que los pozos contemplados en CONAGUA, INEGI u otras dependencias de banco de datos para el acuífero, no eran suficientes.

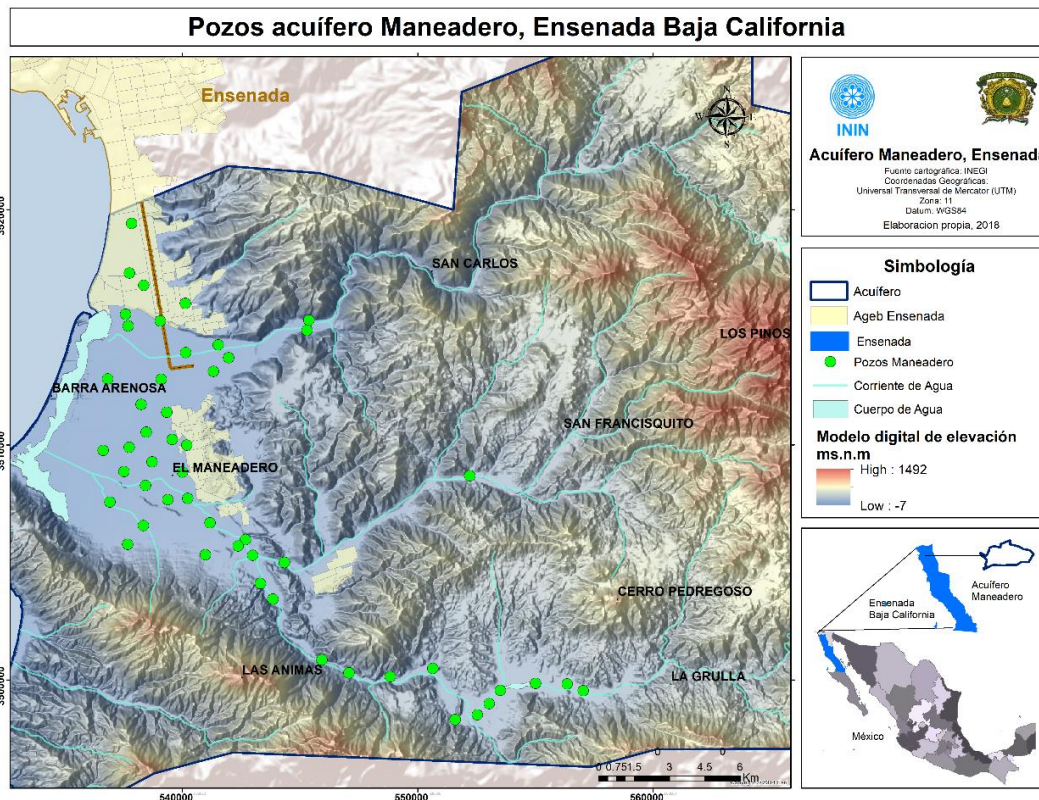


Figura 5.1. Aprovechamientos de agua para el año 2016 (IIO, 2016).



Algunos de los problemas que se presentan en la localidad de Maneadero están relacionados principalmente con la disponibilidad y calidad del agua, esto ha aumentado las últimas décadas, siendo el agua subterránea la principal fuente de abastecimiento urbano y agrícola. En la figura 5.2 Podemos destacar que la zona de aprovechamiento se ubica en una alargada planicie costera con elevaciones que varían entre los 0 y 360 msnm dentro del valle. Las elevaciones donde se encuentran ubicados los pozos varían desde 0 y 5 msnm en las proximidades de la zona costera hasta los 245 msnm al oriente del valle en lo más alto del sistema fluvial, las mayores elevaciones se presentan sobre la continuación del arroyo “Las Animas” que es la zona de mayor recarga por flujo subterráneo, disminuyendo estas elevaciones conforme se adentra hacia la zona costera.

El censo de aprovechamientos hidráulicos subterráneos, reportado en el año 2016, revelo la existencia de 75 aprovechamientos, de los cuales 59 son pozos y 16 son norias, para el caso de los pozos, 8 están en situación de inactivos. De los aprovechamientos activos 54 son utilizados para fines agrícolas, 8 son de observación pertenecientes a CNA o CESPE, 4 para fines comerciales y 1 para industria constructora, de los cuales se explota un volumen de 38.377298 Mm<sup>3</sup> anuales. Como se mencionó anteriormente, para este estudio solo se tomaron en cuenta 51 aprovechamientos.

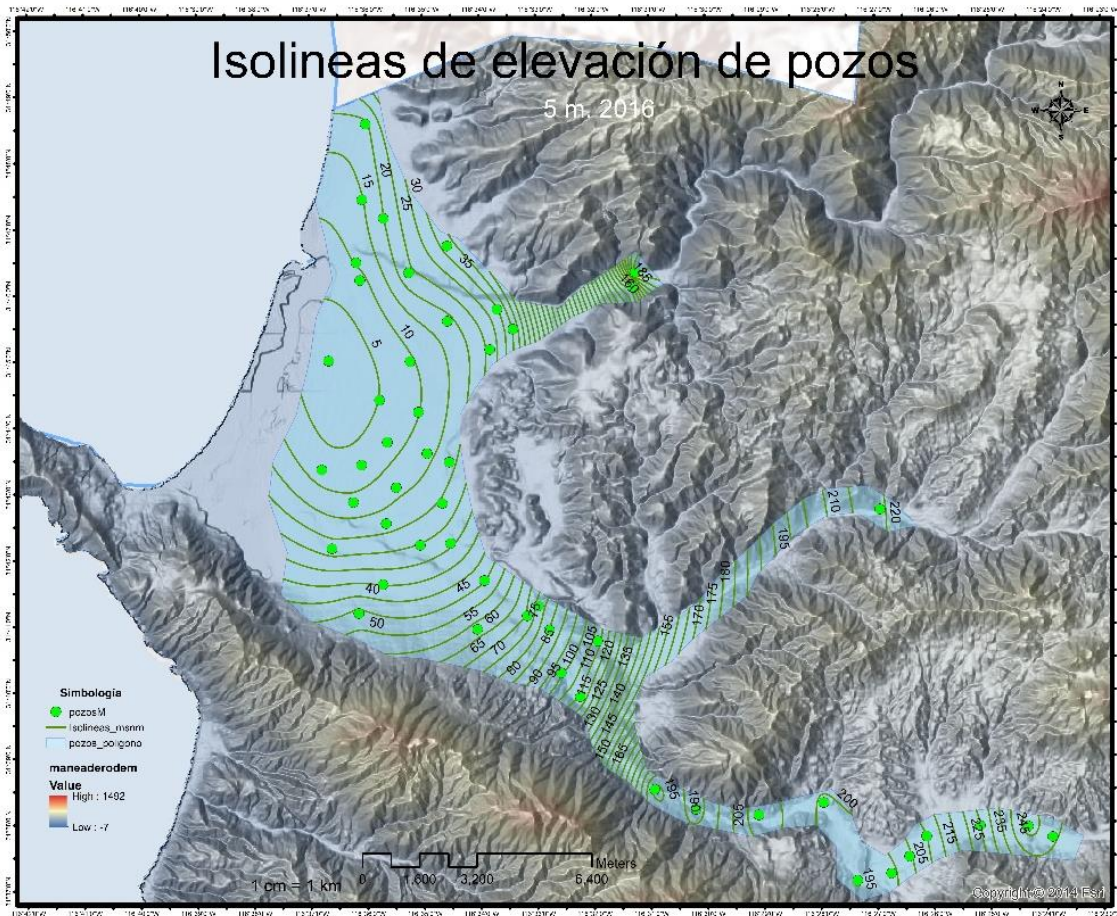


Figura 5.2. Isolíneas de elevación de pozos para el año 2016.

A fin de analizar la piezometría y su evolución en el área de estudio, se generaron mapas donde se muestra la distribución del nivel del agua en el periodo 2009 y 2016 que representan la variabilidad temporal.

El análisis piezométrico del acuífero Maneadero se llevó a cabo a través de la evolución de los niveles estáticos, la configuración de los mismos referidos al nivel medio del mar y la profundidad de estos en los pozos que se han observado.

En consecuencia de la extracción masiva de agua en el acuífero Maneadero, este se determino en estado de sobreexplotacion, aunado al problema de la intrusion salina debido a los bajos niveles de recarga y elevando el deficit de aprovechamiento a 17.57 millones de metros cubicos anuales, este dato se ve reflejado en el descenso de los niveles piezométricos en datos historicos desde el año 2009 al 2016.(Fig 5.3 y 5.4).

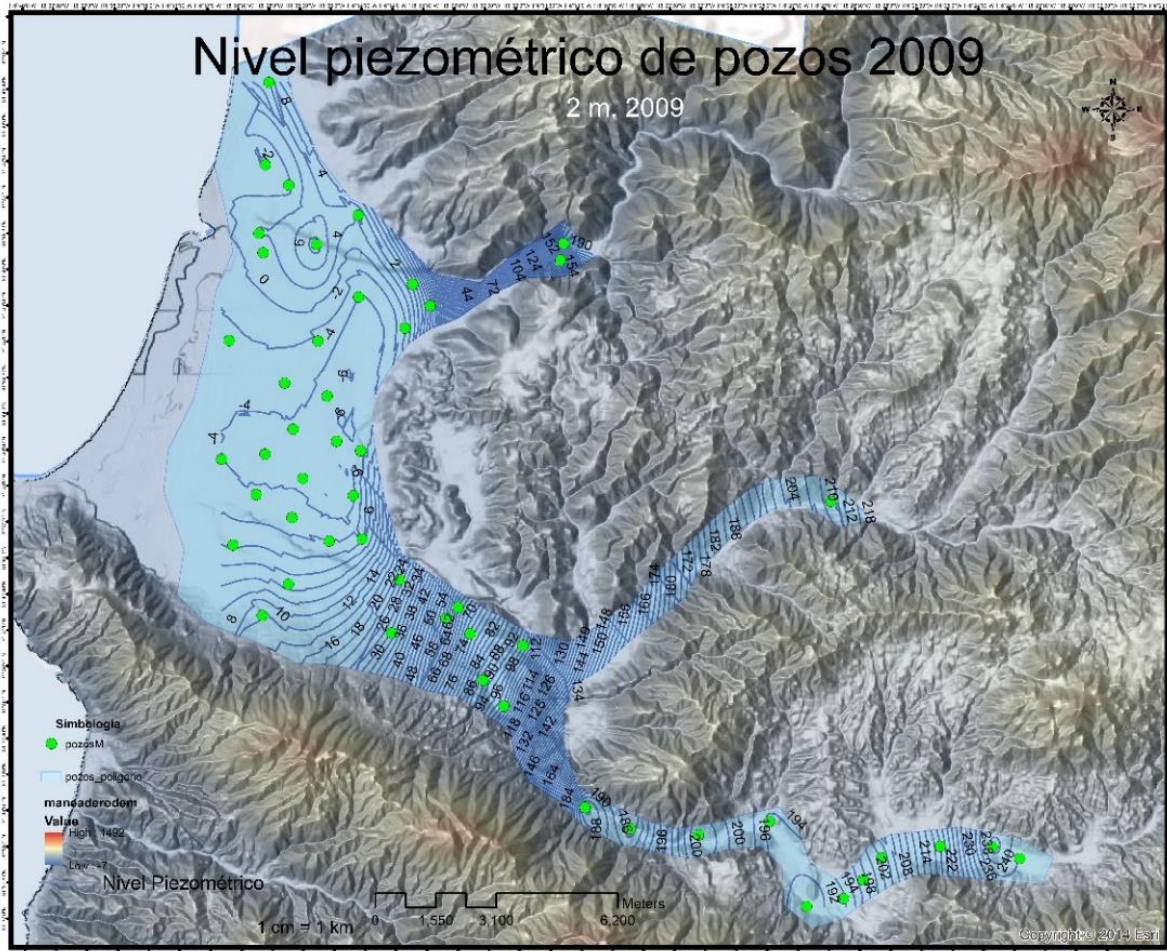


Figura 5.3 Nivel piezométrico para el año 2009.

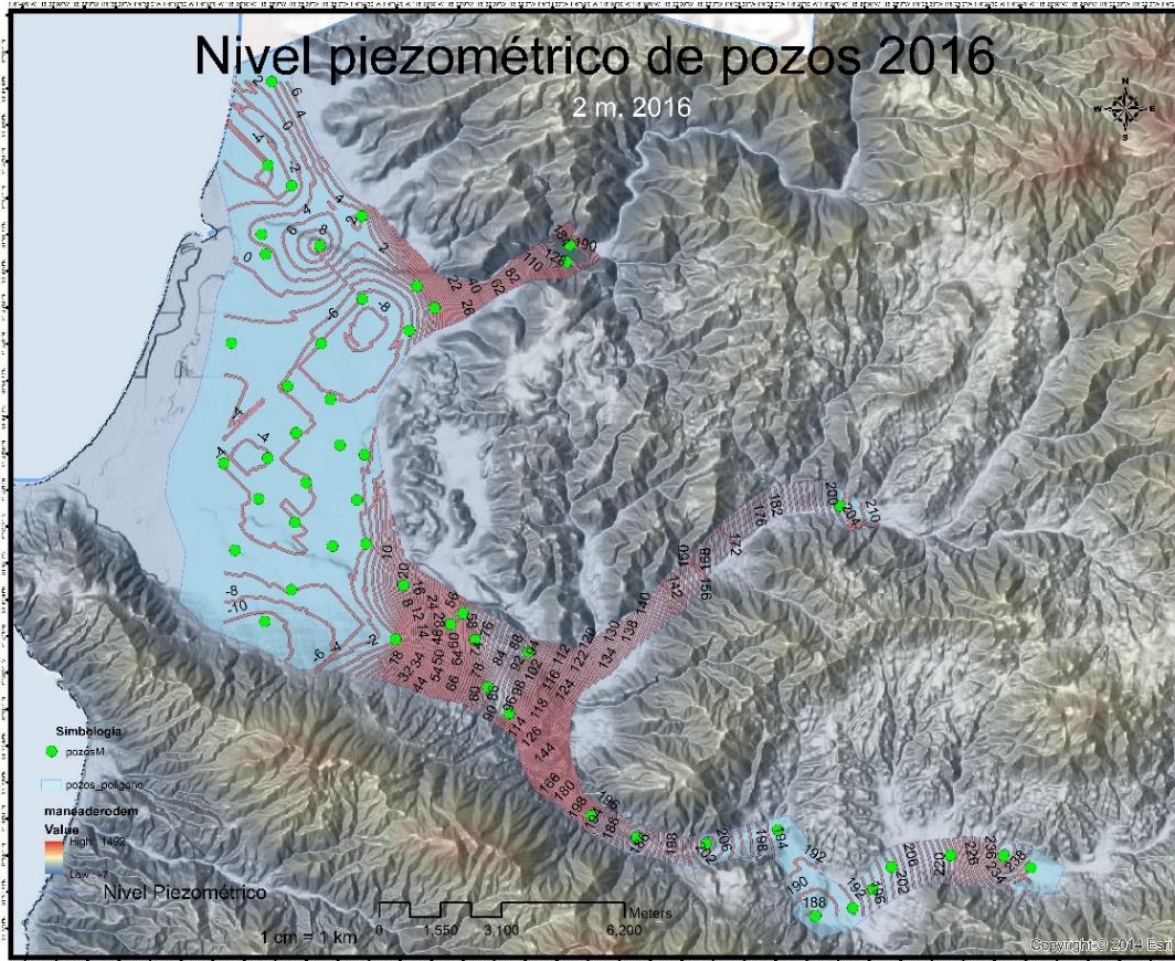


Figura 5.4. Nivel piezométrico para el año 2016.

Debido a la presencia de años consecutivos con precipitaciones escasas, las condiciones geohidrológicas del acuífero se tornan críticas, al disminuir la recarga y seguir incrementándose las extracciones lo cual se ve reflejado en la diferencia de nivel ya para el año 2016.

En cuanto a los niveles piezométricos para este último año, una parte importante de éstos, se ubican debajo del nivel medio del mar, favoreciendo en consecuencia al avance rápidamente del agua de mar por el interfaz (cuña) hasta llegar a la zona de depósito de agua dulce y afectando la calidad del agua subterránea y suelos.



A partir del análisis espacio temporal de la piezometría en el acuífero Maneadero en los años 2009 al 2016, se concluye que:

- La gran velocidad del descenso de los niveles piezométricos en tan poco tiempo (7 años), hace que el acuífero sea aún más vulnerable a la intrusión marina, debido a que la extracción de los pozos de agua que se encuentran en la planicie costera es masiva y no dejan lugar a que haya un equilibrio natural en el acuífero.
- Los niveles piezométricos de algunos pocos cercanos a la línea de costa, se encuentran por debajo del nivel medio del mar, esto provoca que su barrera natural de defensa sea más frágil de poder desestabilizar, afectando la calidad del agua cada vez más adentrando al continente, donde es un foco de alerta de salud importante, ya que la zona urbana se ubica precisamente en donde los pozos con mayor extracción son para consumo humano.

## 5.2. ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DEL CONTENIDO DE NITRATO (N-NO<sub>3</sub>) EN MANEADERO.

Se estudiaron los elementos que intervienen en el acuífero, uno de los más importante fue el comportamiento del contenido de nitratos espacial y temporalmente, ya que se relaciona directamente con la calidad y uso del agua tanto superficial como subterránea. Se identificaron zonas con alto contenido de nitratos en el sondeo de los años 2005, 2007, 2008, 2010 y 2011, (Fig. 5.5 a 5.9) sobrepasando así el valor recomendado por la OMS que en el caso de la calidad del agua para consumo humano no debe sobrepasar de 10.00 mg/l correspondiente a los nitratos (NOM-127,1994), es importante mencionar que donde más concentración se encuentra es en las zonas de mayor extracción de agua para riego de cultivos, donde podemos suponer que los usos de fertilizantes han causado este problema principalmente en la planicie costera.

Como podemos observar en la figura 5.5, en el año 2005 solo existen 4 pozos que se encuentran por encima del límite permisible de buena calidad del agua para consumo.

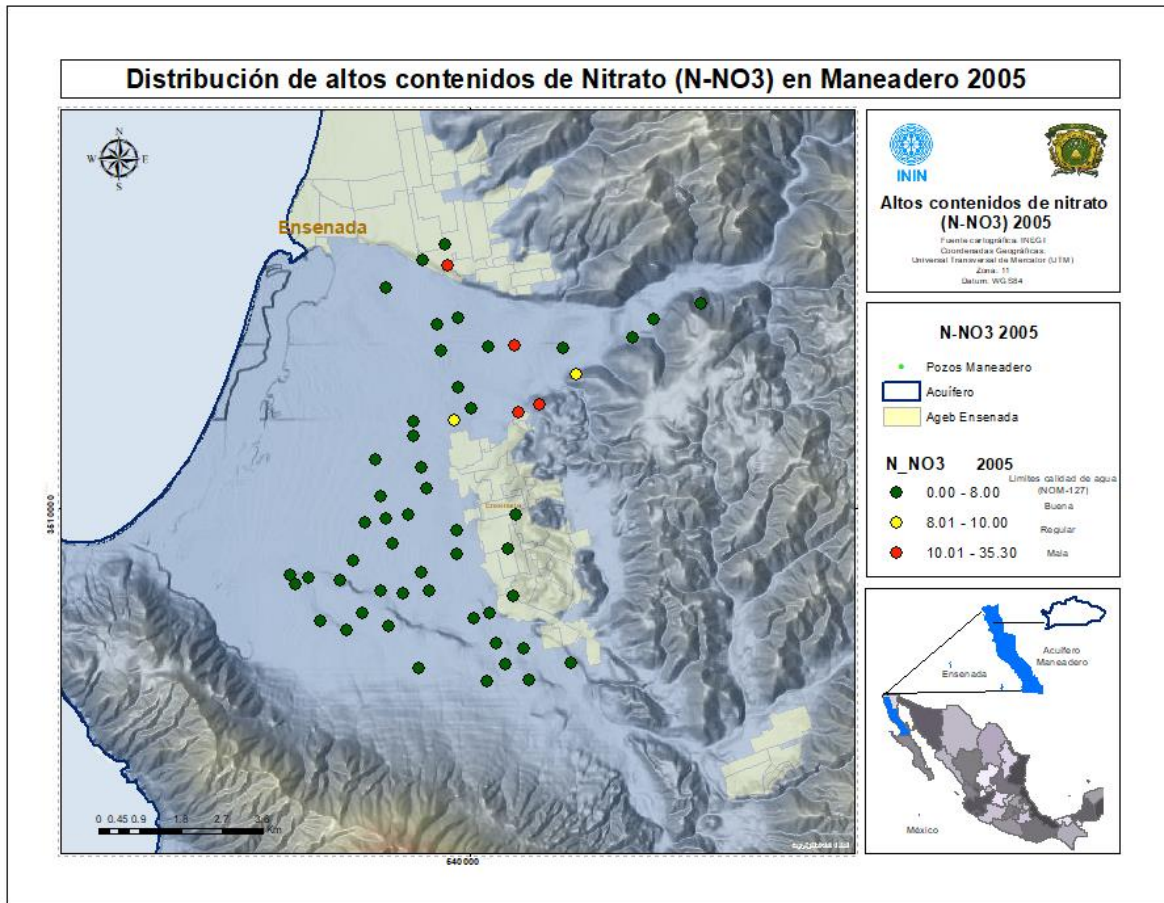


Figura 5.5. Distribución de altos contenidos de Nitrato (N-NO3) en Maneadero 2005.

Para el año 2007 aumento la mala calidad del agua en 2 pozos más, es relevante notar que solo se encontraban en la parte norte de la planicie costera y ahora ya existe uno dentro de los límites del polígono AGEB de área urbana, lo cual representa un peligro latente para la salud ante el consumo de agua de los habitantes de esta localidad (Figura 5.6).

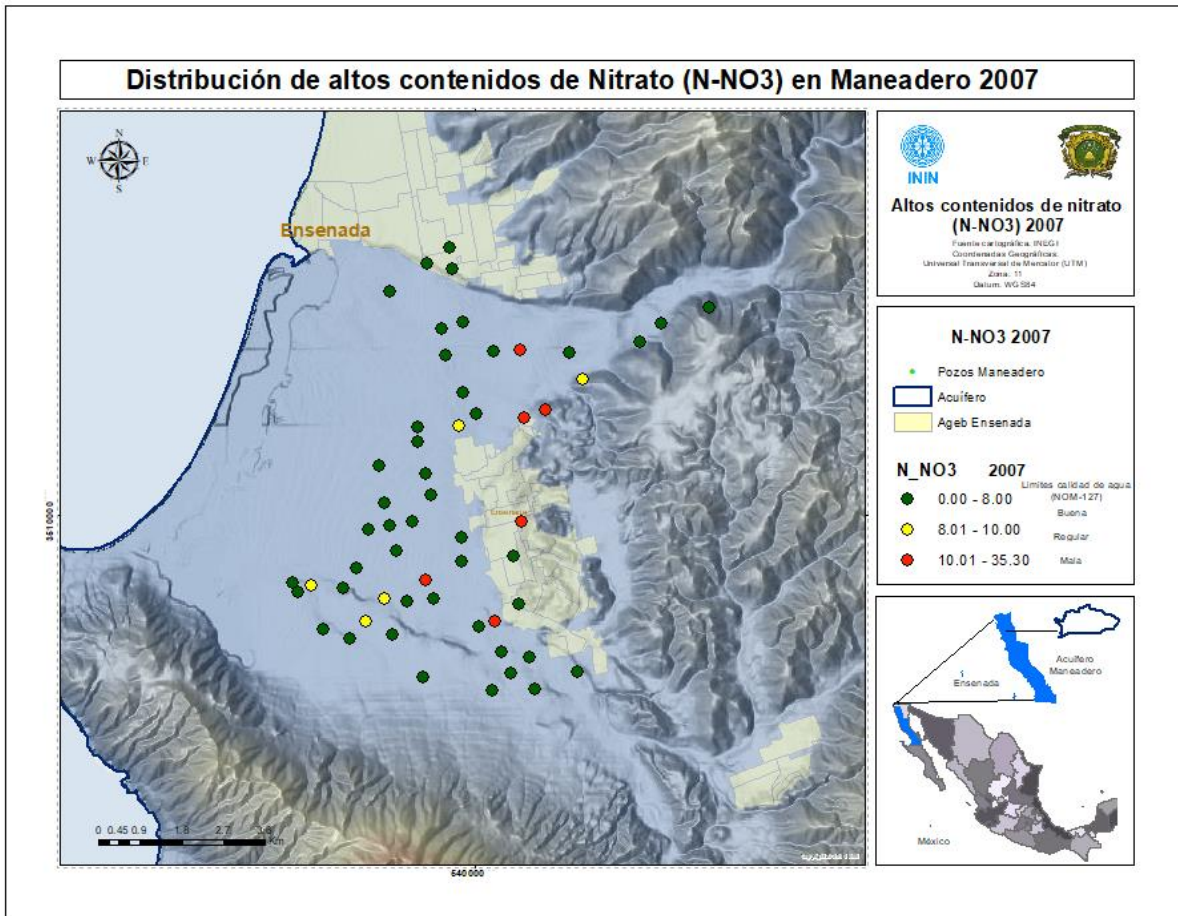


Figura 5.6. Distribución de altos contenidos de Nitrato (N-NO3) en Maneadero 2007.

En la distribución del contenido de nitratos para el año 2008 se observan afectaciones en gran parte de la planicie costera, con esto se puede deducir que los contaminantes ya se han distribuido adentrándose cada vez más al pie de monte de la sierra, afectando el agua que corre por el cauce del río San Carlos, y algunos otros de calidad regular en zonas de área agrícola (Figura 5.7).

Para este año no solo existe mala calidad en el área urbana, si no ya está llegando al área rural, donde se encuentran las pequeñas localidades más alejadas y existen casas aisladas donde su infraestructura es nula y el sector de población es más vulnerable hablando social y económicamente.



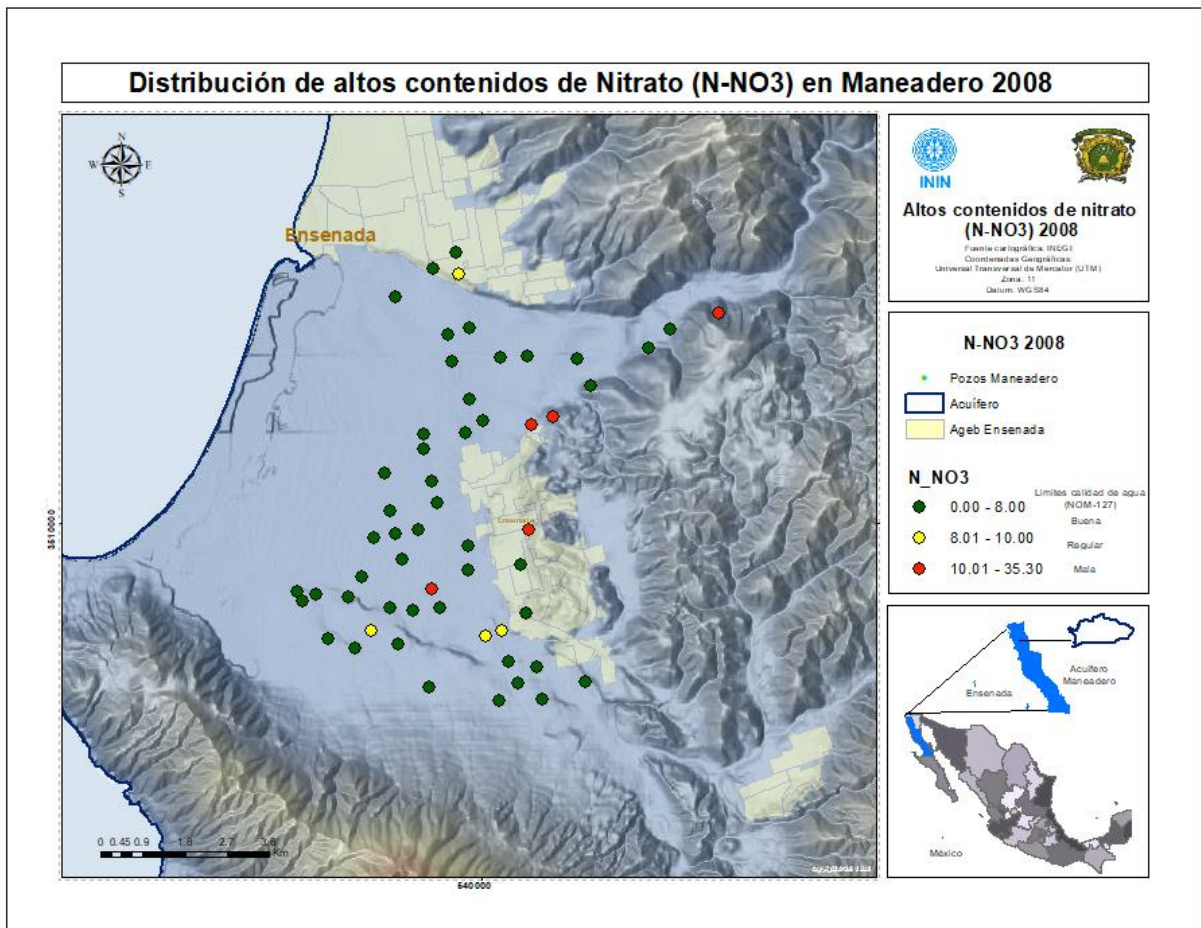


Figura 5.7. Distribución de altos contenidos de Nitrato (N-NO<sub>3</sub>) en Maneadero 2008.

Para el año 2010 como se muestra en la figura 5.8, se puede observar que existe una disminución considerable de la contaminación por nitratos, esto se debe a que en ese año se ha puesto en práctica la recarga artificial del acuífero con agua de la planta tratadora “El naranjo” lo que ayuda a regular un poco su balance y no empeorar la situación con aumento de extracción.

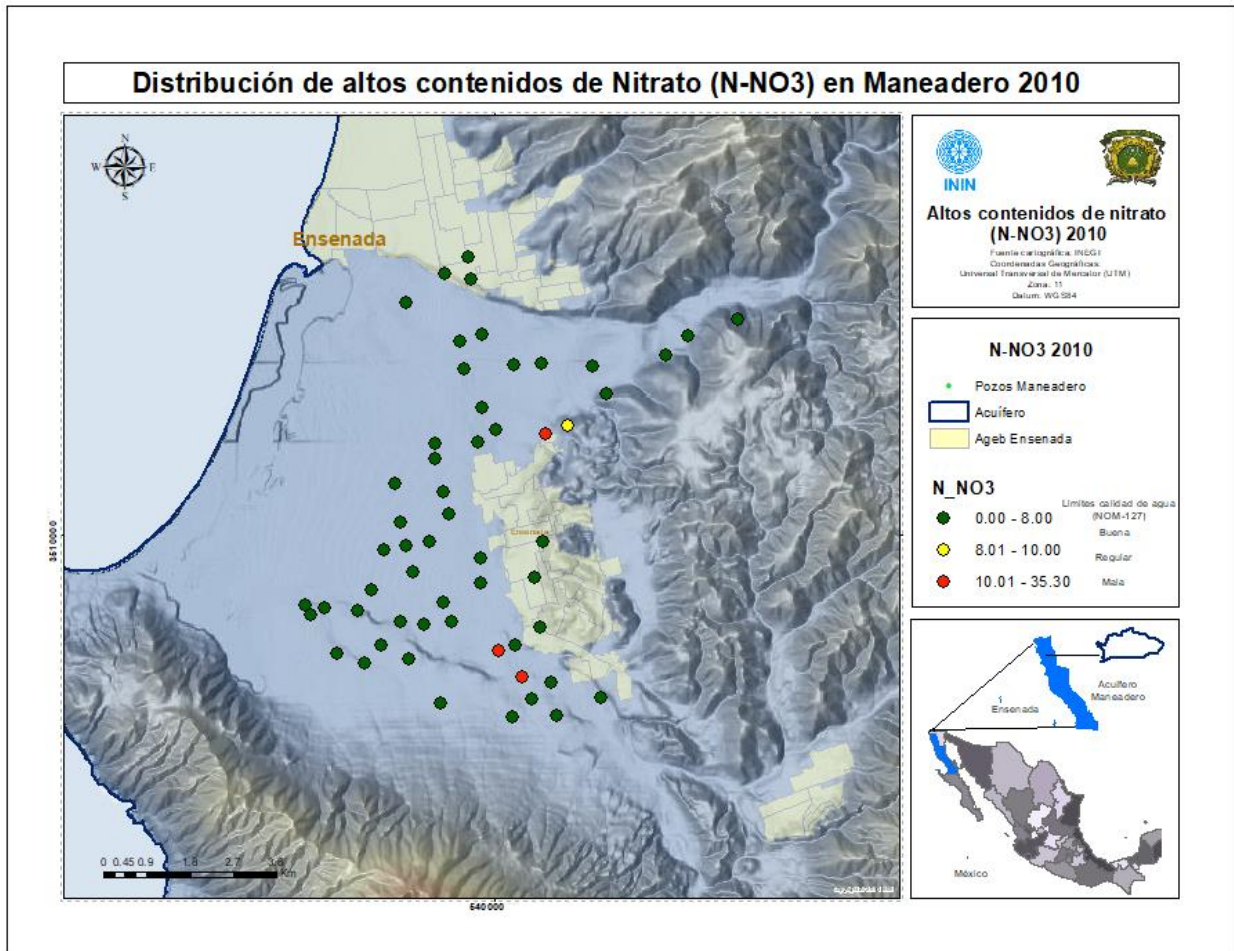


Figura 5.8. Distribución de altos contenidos de Nitrato (N-NO3) en Maneadero 2010.

Debido al incremento de producción agrícola de riego y de temporal se ha llevado un proceso de extracción masiva de agua y el uso de fertilizantes ha ocasionado la rápida distribución y arrastre de contaminantes, como se observa en la figura 5.9 para el año 2011 se identificaron 11 pozos que sobrepasan los límites permisibles asegurando una mala calidad de agua.

Este problema es muy grave ya que la ausencia de precipitación impide la limpieza natural del acuífero, otra consecuencia es que se ha dejado de tener un balance hídrico entre la recarga y descarga del acuífero y el déficit sigue aumentando año con año.

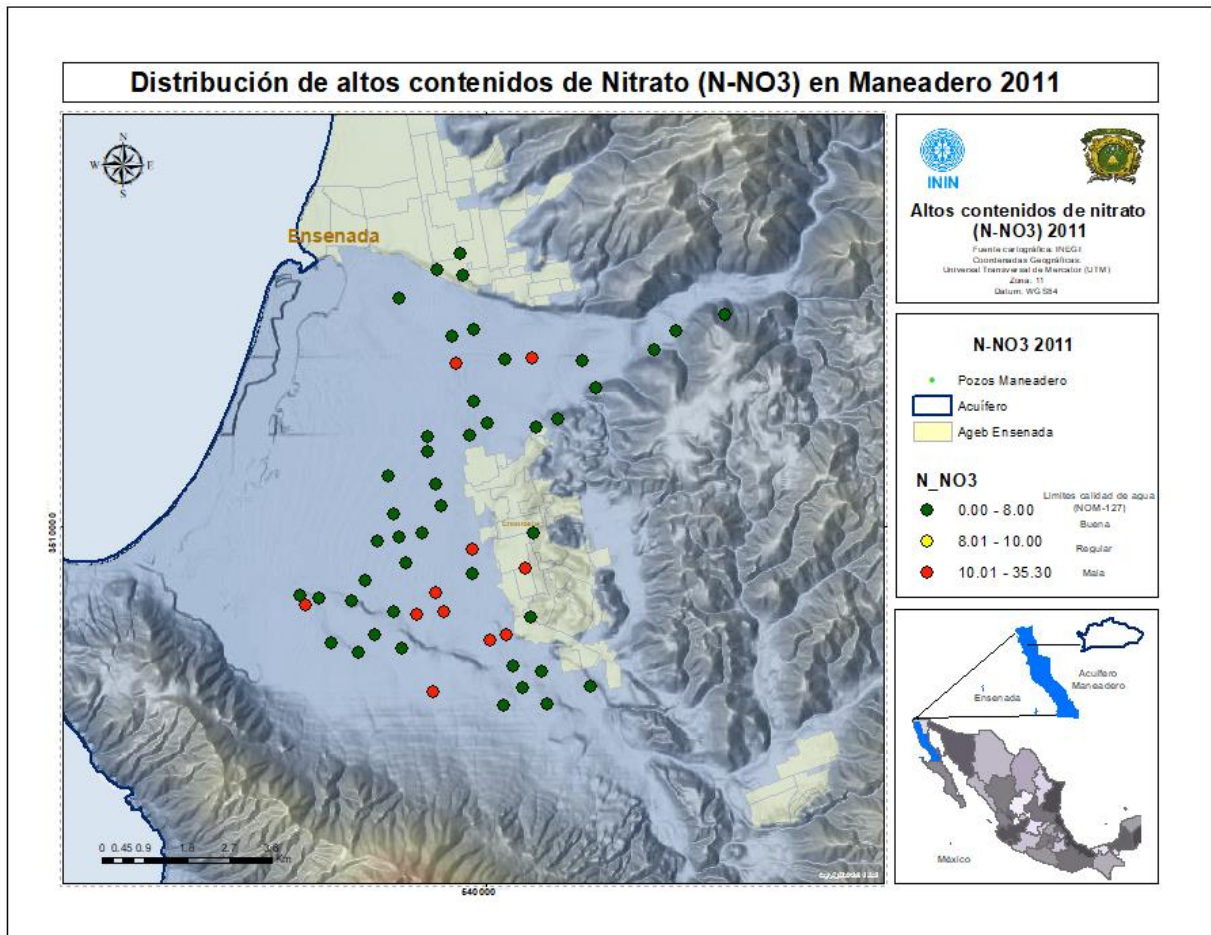


Figura 5.9. Distribución de altos contenidos de Nitrato (N-NO3) en Maneadero 2011.



En este epígrafe, se puede concluir que existen variaciones del total de contenido de nitratos para los años estudiados, esto se debe a que inicio la concentración de nitratos que sobrepasaban el limite permisible para la buena calidad del agua y se tomaron medidas de prevención y mitigación, así fue como algunos años se mantuvieron esos límites pero la extracción no disminuía al contrario seguía incrementando por ello se tornó la contaminación del agua cada vez más hacia el continente, posterior se puso en práctica la planta de tratamiento de agua “El naranjo” así se inyectó agua tratada al acuífero y se recuperó el curso de agua subterránea inhibiendo que se quedaran estáticos los nitratos. Especialmente en el año 2010 donde se pudo realizar una limpieza artificial de las zonas no tan contaminadas, pero eso solo fue temporal por que ya en el 2011 se identifica la concentración de nitratos en áreas aleatorias de la planicie.

### 5.3. ANÁLISIS ESPACIAL DE LOS NIVELES PIEZOMÉTRICOS PARA EL AÑO 2016, MEDIANTE EL MÉTODO KRIGING.

La red piezométrica del año 2016 toma en cuenta 51 pozos, donde por la demanda de extracción se encuentran en condiciones de sobreexplotación, sobre todo en las zonas colindantes a los dos arroyos principales: San Carlos y Las Animas, donde se concentran la mayoría de los pozos como se puede observar en la figura 5.10.

En forma general, el rango de las profundidades al nivel estático varía entre los 1.45 y 51.58 metros para el año 1999 mientras que para el 2016 varían de entre 4.41 y 85.78 metros; registrándose los valores mínimos en los cauces de los arroyos Las Animas, San Francisquito y San Carlos.



Con el polígono que delimita el acuífero, se realizó la estimación espacial mediante kriging ordinario, que consiste en interpolar espacialmente el valor espacial de un punto mediante una combinación lineal de sus “n” vecinos más cercanos, generando una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersos con distintos valores. Esta herramienta de interpolación supone que la distancia y dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que sirve para explicar la variación en la superficie del acuífero.

Para usar el método kriging fue necesario realizar previamente el análisis estadístico exploratorio de los datos en Excel para depurar, ordenar y sistematizar la base de datos, el modelado de variogramas y la creación de la superficie.

Se calculó mediante una ecuación un gráfico de semi-variograma, el cual permite ajustar de manera teórica el modelo a la distribución espacial de los datos. Para la selección del mejor modelo de semivariograma se usaron los siguientes criterios: El valor de la raíz cuadrada del error medio cuadrático, Root Mean Square (RMS), menor y el valor del error estándar promedio, Average Standard Error (ASE) menor y el valor de la raíz cuadrada del error medio cuadrático estándar, Root Mean Square Standardized (RMSS).



Cuadro 5.1. Valores de profundidad del nivel piezométrico observados y calculados, con la cuantificación del error obtenido.

<b>PROFUNDIDAD DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO (m)</b>		
<b>No.</b>	<b>Medido</b>	<b>Calculado</b>
1	-6.89	5.43
2	-4.94	-3.87
3	-7.46	-3.81
4	8.12	-2.14
5	-8.7	1.15
6	-5.64	-3.94
7	-1.78	-4.77
8	-9.59	-4.30
9	-3.06	-6.51
10	44.31	5.63
11	160.09	164.79
12	188.41	170.40
13	265.69	159.33
	<b>RMS</b>	<b>16.05</b>

En el cuadro anterior se ve reflejado el resultado estadístico del Root Mean Square (RMS) donde fue comparado a partir de una muestra del 25 por ciento del total de los datos, que serían los 13 pozos con el valor medido directamente en campo y el valor obtenido con el kriging, como podemos notar no son tan similares, pero son los que más se acercaron al valor real.

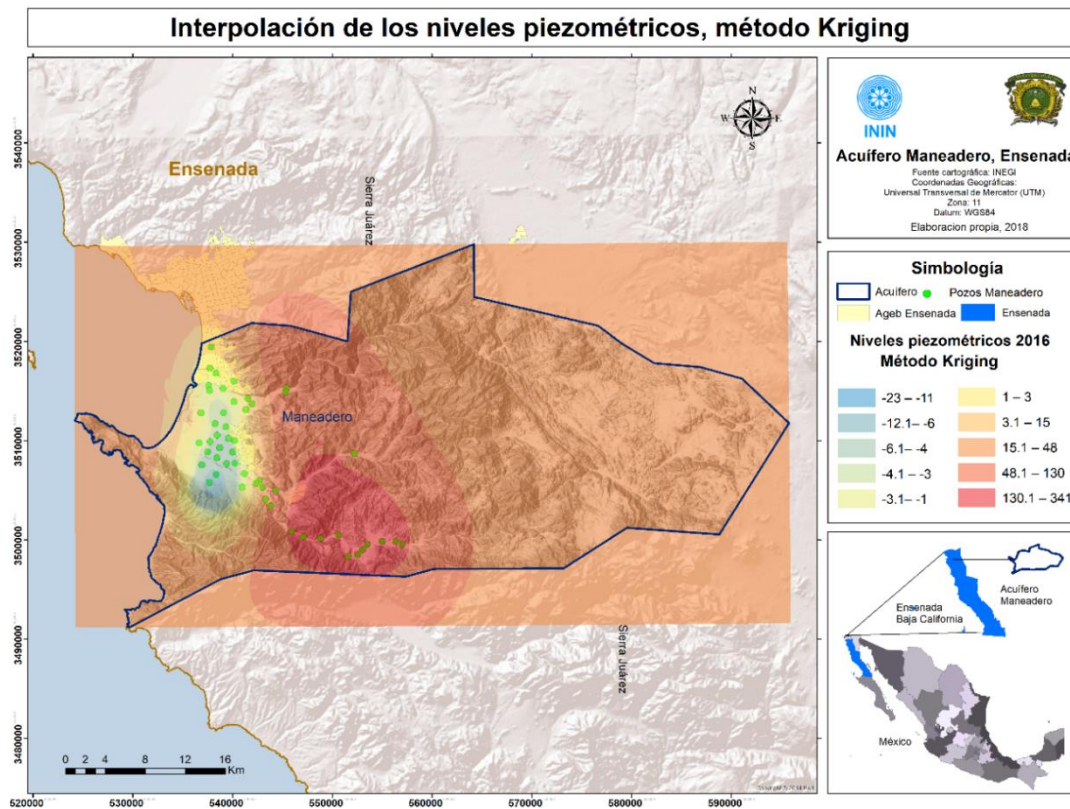


Figura 5.10. Interpolación de los niveles piezométricos Maneadero 2016.

La alta necesidad del recurso hídrico en las partes bajas del acuífero cerca de la zona costera se refiere al uso principal de actividades agrícolas y de abastecimiento urbano, esto explica la alta densidad de pozos y la gran intensidad de bombeo. En general, en las partes bajas del valle la infiltración del acuífero se considera media o alta, debido a la existencia de material permeable.

A partir de la configuración de la elevación del nivel estático, se detecta la existencia de conos de abatimiento localizados al sur oeste de Ensenada donde existe una extracción importante para satisfacer las necesidades de irrigación.

En lo que se refiere a la evolución del nivel estático se ha observado que no existe recuperación alguna, sino todo lo contrario, por ejemplo, en el periodo 2009-2014 existe un descenso de hasta 28.77 m., para el periodo 2014 al 2015 existe un descenso de 2.73 m., en el año 2015 para 2016 ocurrió el descenso de 2.7 m., se



reporta que la media del descenso del nivel freático con abatimientos promedio en los últimos 3 años se ha mantenido entre los 2 y 3 m. Los valores de la profundidad del nivel piezométrico han tenido modificaciones importantes como se observa en el cuadro 5.2.

Cuadro 5.2. Valores de profundidad del nivel piezométrico calculado.

<b>Profundidad de nivel</b>	<b>Mínimas</b>	<b>Máximas</b>
2009	2.38	51.58
2014	3.87	80.35
2015	4.12	83.08
2016	4.41	85.78

Es importante identificar los rasgos que influyen en el escurrimiento, ya que en su conjunto se establecen los niveles de disponibilidad del agua. Los factores que influyen en la recarga natural del acuífero son los siguientes

- **Clima:** coinciden con las áreas de influencia climática, pluviométrica y evapotranspiración potencial
- **Suelo:** características edafológicas con la capacidad de almacenamiento y escorrentía
- **Sectores de riego:** se toma en cuenta los retornos de riego y regadío según el tipo de cultivo





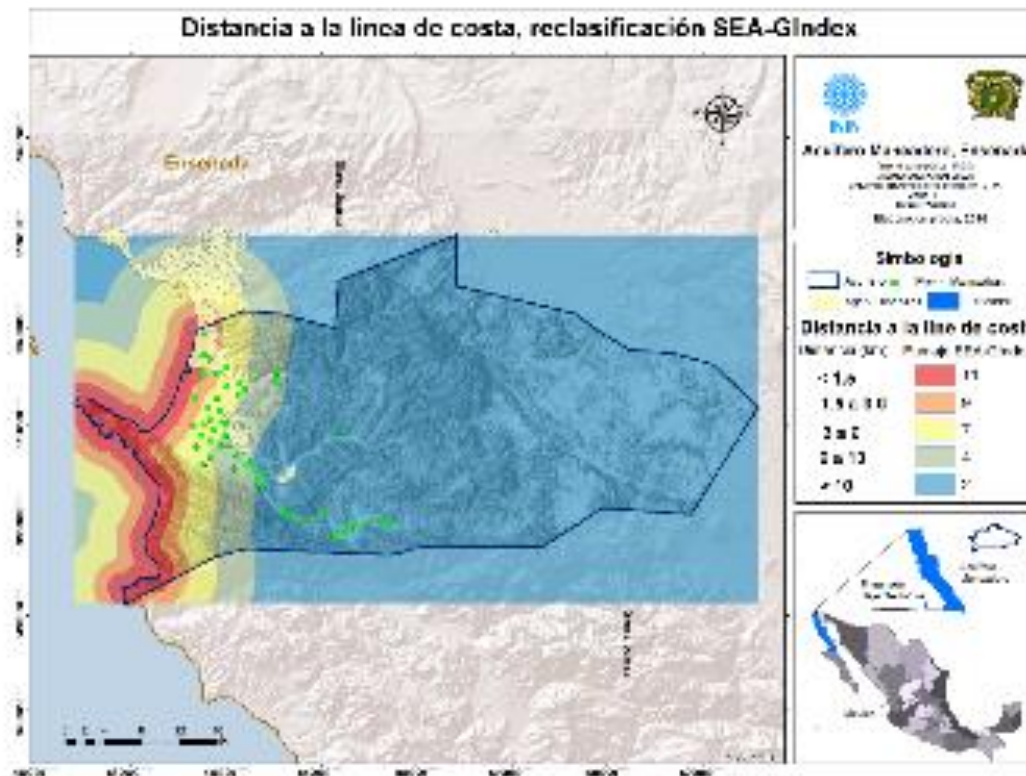
## 5.4 ESTIMACIÓN DE LA VULNERABILIDAD POR INTRUSIÓN SALINA EN EL ACUÍFERO MANEADERO, MÉTODO SEAGINDEX

En el acuífero Maneadero, Ensenada Baja California se evaluó y realizó una estimación de zonas propensas a ser vulnerables y/o afectadas actualmente por la intrusión salina a través del método SeaGIndex, lo que permitió identificar tres factores importantes que intervienen directamente en este problema los cuales son: la distancia a la línea de costa, la litología del acuífero y los niveles piezométricos. De estos últimos mencionados los más recientes que se tienen medidos y observados en campo son del año 2016. La metodología aplicada permite caracterizar cada factor antes mencionado y estimar zonas altamente vulnerables. A continuación, se describe cada parámetro que conforma el método.

### 5.4.1 Distancia a la línea de costa

La distancia a la línea de costa es importante reclasificarla de acuerdo a un buffer de distancia que para este caso fue de 30 metros por cada pixel para tener una buena resolución. Los cuatro primeros rangos son los más importantes a partir de la costa hacia tierra adentro (0 a 1.5km, 1.5 a 3 km, 3 a 6 km y de 6 a 10 o más de 10 km). El ultimo rango (mayor a 100 Km) visualizado en color azul que abarca todo el acuífero hacia el este, no es tan relevante, a esa distancia existe baja vulnerabilidad debido a que intervienen distintos factores como la topografía para este caso de estudio (Figura 5.11).

Figura 5.11 Distancia a la línea de costa



#### 5.4.2 Litología

Para la figura 5.12 se muestra la litología del acuífero ya reclasificada para la aplicación del método SeaGIndex, donde el material de arenas, gravas y areniscas se tornan más vulnerables a la intrusión salina ya que el material es menos consolidado, con mayor porosidad y mayor conductividad hidráulica.

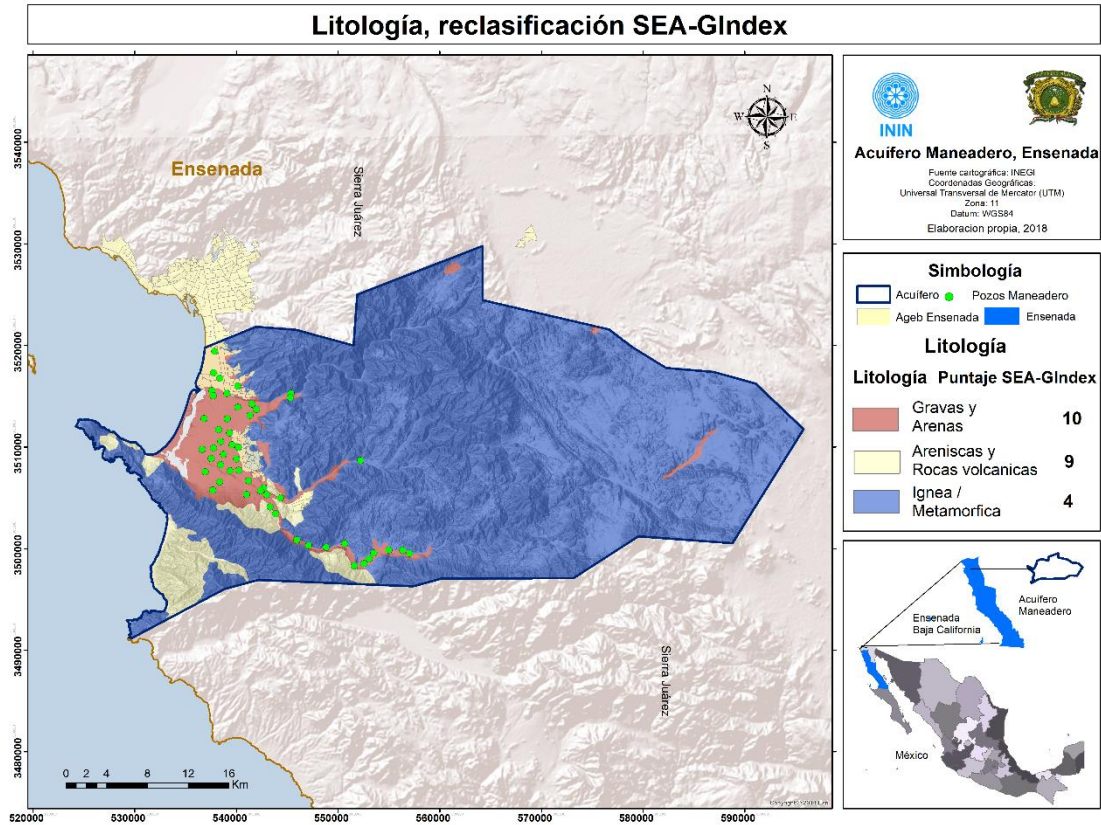


Figura 5.12 Litología

### 5.4.3 Piezometría

Los niveles piezométricos se observan mayormente abatidos en la parte baja de la planicie costera, al norte se observa el declive de la profundidad de nivel descendiente y parte del desembocadura del río, podemos decir que la alta cantidad de extracción principalmente para el cultivo de espárragos ha afectado la dinámica del acuífero.



La piezometría se llevó a cabo mediante la interpolación de los pozos con el apoyo del método kriging lineal, dando valores de mayor abatimiento en la planicie costera donde ha descendido el nivel considerablemente a consecuencia de la extracción mayor de agua especialmente para la actividad agrícola del valle de maneadero (figura 5.13).

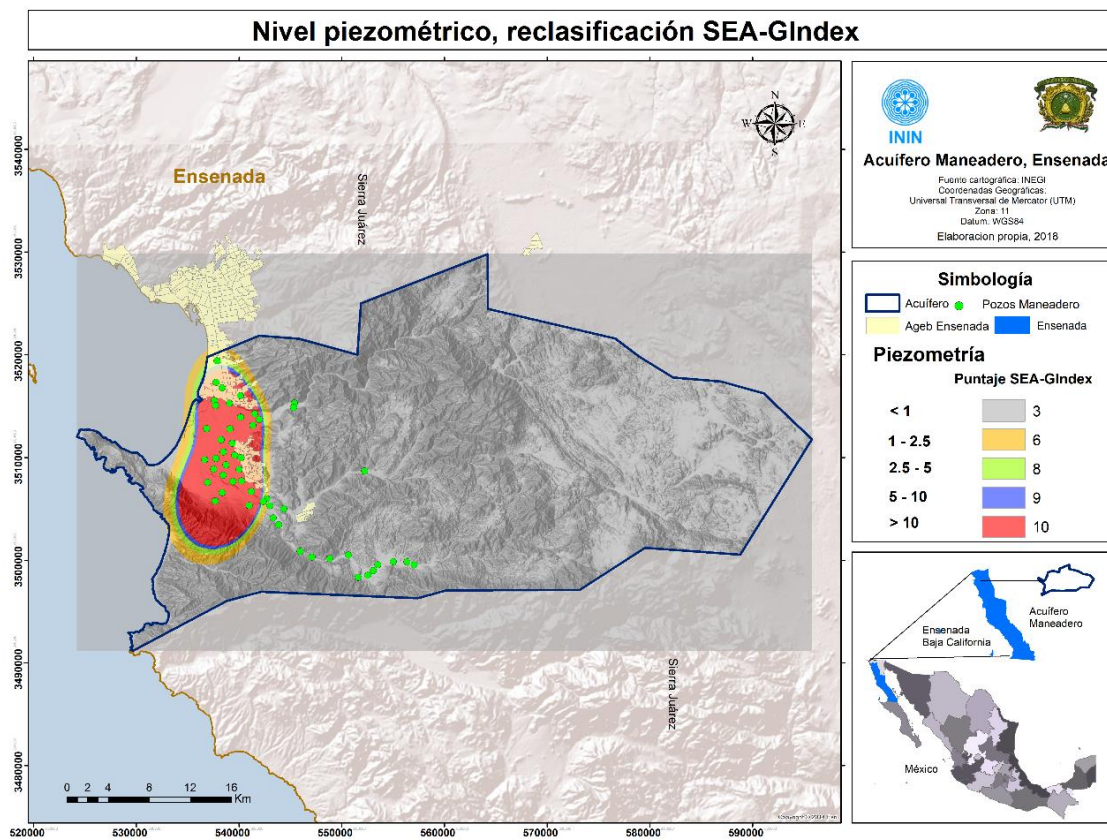


Figura 5.13 Piezometría

En la planicie costera o centro del valle existe la mayor zona de abatimiento que provocan que el flujo sea hacia adentro del valle, los niveles piezométricos aceleran la entrada a la intrusión marina ya que los que se encuentran cerca de la línea de costa y hacia el norte, se encuentran con niveles por debajo del nivel medio del mar.



### 5.4.4 Vulnerabilidad a la intrusión salina

El aplica el álgebra de mapas de los tres elementos mencionados anteriormente mediante la fórmula SEA-GIndex ( $[Distancia\_R] * [Piezometria\_R] * [Litología\_R]$ ), que implica el análisis geoestadístico de las características por zona en el acuífero, donde se estiman las áreas más o menos vulnerables a ser contaminadas por la intrusión marina (Figura 5.14) la valoración del método lo podemos observar en el cuadro 5.3.

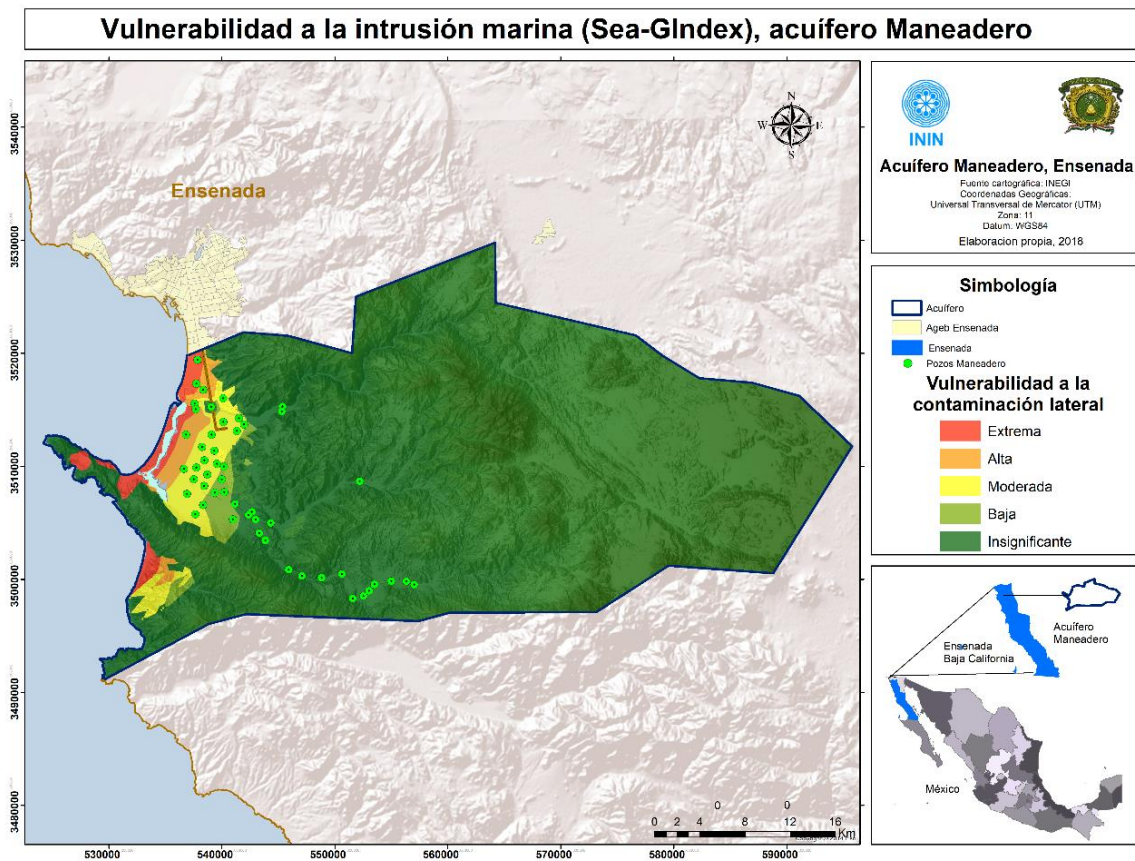


Figura 5.14 Vulnerabilidad a la intrusión salina mediante el método SeaGIndex.



Cuadro 5.3 Rango de Vulnerabilidad.

Rango	Calificación
$V < 300$	insignificante
$300 < V < 500$	baja
$500 < V < 700$	moderada
$700 < V < 900$	alta
$900 < V < 1000$	extrema



Este método es exclusivo para la contaminación lateral, ya que deja fuera aspectos superficiales como por ejemplo el tipo de suelo. El agua del valle se destina principalmente para uso agropecuario seguido del doméstico, la calidad del agua se muestra como tolerable a salada con mayor dominio de esta última. De acuerdo al método; en el rango de vulnerabilidad extrema tiene un porcentaje de 2 % respecto al área total del acuífero, se encuentra dentro de los 2.06 km lineales desde la línea de costa hacia el continente constituidos por materiales poco consolidados como arenas y gravas, la estimación espacial de este rango es de 23.90 km<sup>2</sup>, otro problema anexo a esta área es que, en gran parte de la línea de costa existe erosión costera lo que hace que cada vez más se agrave el asunto.

La vulnerabilidad en rango alta que es de 19.93 km<sup>2</sup> y la estimación espacial de moderada vulnerabilidad cuenta con un 3 % y 47.55 km<sup>2</sup> respecto al total del acuífero. Parte del problema en estas áreas se debe a dos factores, uno es la extracción masiva para el área agrícola y otro es la densidad de población que va en aumento, donde la demanda de agua dulce es apremiante. Es por ello que el incremento de agua salada hacia el continente define una mezcla de contaminantes.

Cuadro 5.3.1 Rangos de vulnerabilidad en porcentaje y km<sup>2</sup>.

Vulnerabilidad SEA-GIndex	Total km <sup>2</sup>	Porcentaje
Insignificante	1333.11	92 %
Baja	19.59	1 %
Moderada	47.55	3 %
Alta	19.93	1 %
Extrema	23.90	2 %



Facultad De Geografía

Como podemos observar en la figura 5.14 y el cuadro 5.3.1 el área vulnerabilidad insignificante es bastante grande lo que constituye el 92 % del total de la superficie del acuífero lo cual el fenómeno de la intrusión marina no implica peligro para este rango, y tampoco en el de alta vulnerabilidad ya que en este precisamente juega un papel importante la altitud.

## 5.5 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DRASTIC

Como se explicó anteriormente, existen distintas metodologías que permiten aplicar modelos para estimar la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación. A continuación, se desarrolla el modelo DRASTIC para conocer la vulnerabilidad vertical del acuífero Maneadero perteneciente al municipio de Ensenada, Baja California.

La metodología DRASTIC es un índice que se considera el más completo en cuanto a número de propiedades que se consideran para caracterizar como ya se explicaron 7 parámetros fundamentales donde se les asigna valores según el método y un multiplicador según su importancia en la zona de estudio.

Gran parte del análisis consistió en la ponderación de estos parámetros **D** – Profundidad del acuífero (Depth to water), **R** Recarga neta (Net recharge), **A** – Litología del acuífero (Acuifer media), **S** – Tipo de suelo (Soil media), **T** – Topografía pendiente (Topography), **I** – Litología de la zona no saturada (Impact of the vadose zone media) y **C** – Conductividad hidráulica (Conductivity of the aquifer).

Como resultado se obtuvo la estimación de vulnerabilidad a la contaminación vertical DRASTIC mediante la superposición de polígonos donde cada uno de ellos contiene un valor numérico mediante el método.





Cada parámetro tiene un ponderador predeterminado y fijo los cuales son responsables de pesos que varían de 1 a 5. La superposición de polígonos se resuelve mediante la intersección de los mapas ya reclasificados con los nuevos pesos asignados para la importancia del acuífero, asignándole un nuevo nombre por ejemplo (profundidad\_R).

Para la superposición de polígonos de cada uno de los mapas temáticos se utilizó el software ArcMap 10.3, utilizando la información cartográfica en formato raster lo cual nos permitió obtener el índice de vulnerabilidad en valores numéricos

Sin embargo, al momento de trabajar también con formato vectorial nos permitió asociar atributos de cada uno de los mapas temáticos lo cual pudimos conocer las características específicas de cada parámetro que intervienen en la construcción del índice de vulnerabilidad.

## OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA METODOLOGÍA DRASTIC

A continuación, se describe detalladamente los parámetros de la metodología con el uso del software cartográfico, siendo el resultado de la clasificación DRASTIC.

### 5.5.1 Profundidad al nivel freático

El nivel freático es la distancia a la que se encuentra el agua desde la superficie del terreno, la zona no saturada es aquella donde el contenido de agua es mucho menos que la porosidad del material, como se menciona al principio su espesor se obtiene como la distancia desde el nivel topográfico al nivel donde se encuentra la zona saturada, conociéndose, así como el nivel piezómetro del acuífero libre.



La zona no saturada del acuífero, es considerada como la primera defensa natural del acuífero en cuanto a los contaminantes, ahí el flujo es más lento. Cuando el espesor de esta capa es mayor entonces los contaminantes tienen más tiempo de detención y atenuación en el sitio, por lo tanto, cuando el lapso es más prolongado, el acuífero presentara una mayor vulnerabilidad.

En la metodología DRASTIC se asignan puntajes mayores para rangos de profundidad cada vez menores que están asociados a rangos de vulnerabilidad (Aller et al., 1987) cuadro 5.4. Para el caso del acuífero Maneadero los niveles piezométricos se generaron a partir de información de la elevación del nivel freático en msnm en el año 2016, en los pozos de aprovechamiento activos en la localidad de Maneadero, proporcionados por COTAS Ensenada.

**Cuadro 5.4.** Rangos y clasificaciones para el nivel piezométrico de acuerdo a la metodología DRASTIC

Rango (metros)	Clasificación
Menos de 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
Mayor de 30	1



Se tomaron en cuenta 51 pozos, los cuales presentan datos de coordenadas UTM (Universal Transversal de Mercator) en X y Y, la elevación del brocal en msnm, la elevación del nivel freático en el año 2016 en msnm y la profundidad de nivel freático (cuadro 5.5), donde destacamos que las menores profundidades se localizan en la planicie costera. A partir de la información disponible para el valle de Maneadero se llevó a cabo la interpolación de los valores utilizando el método Kriging ordinario.}

En la figura 5.15 se muestra que la menor profundidad al nivel freático se localiza cerca del Estero Punta Banda, la cual varía de -23.78 a 9.1 metros de profundidad, lo cual se define a esta zona como la de mayor vulnerabilidad dentro de este parámetro, mientras aumenta la profundidad, la vulnerabilidad disminuye considerablemente.

Cuadro 5.5 Niveles piezométricos del año 2016 para los 51 pozos ubicados en el acuífero Maneadero.

No.	Coordenada UTM_X	Coordenada UTM_Y	Elevación del brocal msnm	Profundidad de nivel freático (m) 2016	Nivel piezométrico (m) 2016
1	539060.88	3515261.70	36	13.93	22.07
2	541522.01	3514241.10	23	29.89	-6.89
3	545380.96	3515286.03	351	9.17	341.83
4	557041.51	3499534.05	244	13.73	230.27
5	555011.34	3499845.14	224	8.81	215.19
6	553042.34	3498981.49	205	6.31	198.69
7	545933.19	3500843.34	241	8.24	232.76
8	543317.83	3504097.21	100	10.34	89.66
9	541177.51	3506673.76	40	21.42	18.58
10	536924.54	3507562.06	17	20.63	-3.63
11	537744.92	3509889.30	6	10.94	-4.94
12	540193.76	3509980.03	16	23.46	-7.46
13	538355.05	3516779.84	21	26.51	-5.51
14	537592.39	3515546.00	15	6.88	8.12
15	538246.51	3511708.56	5	9.00	-4.00
16	539384.56	3507661.23	24	27.22	-3.22
17	541322.83	3513118.92	22	28.80	-6.80
18	537849.31	3519413.60	5	4.86	0.14
19	540125.62	3516012.10	43	51.70	-8.70
20	537752.15	3517301.39	12	18.22	-6.22



Facultad De Geografía

21	537698.73	3515049.56	2	6.45	-4.45
22	540140.53	3513914.28	13	22.47	-9.47
23	539100.20	3512786.45	9	14.64	-5.64
24	541968.16	3513694.75	28	31.60	-3.60
25	545302.17	3514861.23	57	15.86	41.14
26	536636.83	3509759.24	3	6.91	-3.91
27	538464.34	3510532.57	9	12.10	-3.10
28	539332.88	3511376.27	9	13.25	-4.25
29	539572.48	3510220.74	16	18.94	-2.94
30	537517.25	3508858.38	9	13.23	-4.23
31	538712.30	3509266.31	16	17.78	-1.78
32	540001.79	3508829.83	19	27.05	-8.05
33	538434.74	3508262.38	16	18.54	-2.54
34	540230.90	3507717.76	27	36.59	-9.59
35	538345.13	3506559.62	34	37.06	-3.06
36	537671.58	3505756.96	58	71.63	-13.63
37	540981.00	3505313.01	62	85.78	-23.78
38	542681.81	3505962.81	82	10.32	71.68
39	542371.26	3505691.10	52	7.69	44.31
40	542989.07	3505290.07	82	10.03	71.97
41	544339.40	3504988.58	90	6.89	83.11
42	552215.42	3508675.05	218	9.16	208.84
43	543853.40	3503433.78	88	12.07	75.93
44	547082.86	3500293.72	166	5.91	160.09
45	550644.87	3500482.79	193	5.48	187.52
46	552536.52	3498509.34	193	4.59	188.41
47	553517.51	3499547.12	205	4.78	200.22
48	556351.99	3499825.87	278	12.31	265.69
49	548832.69	3500132.58	227	5.46	221.54
50	551594.78	3498307.13	188	4.41	183.59
51	536826.39	3512799.21	1	4.60	-3.60

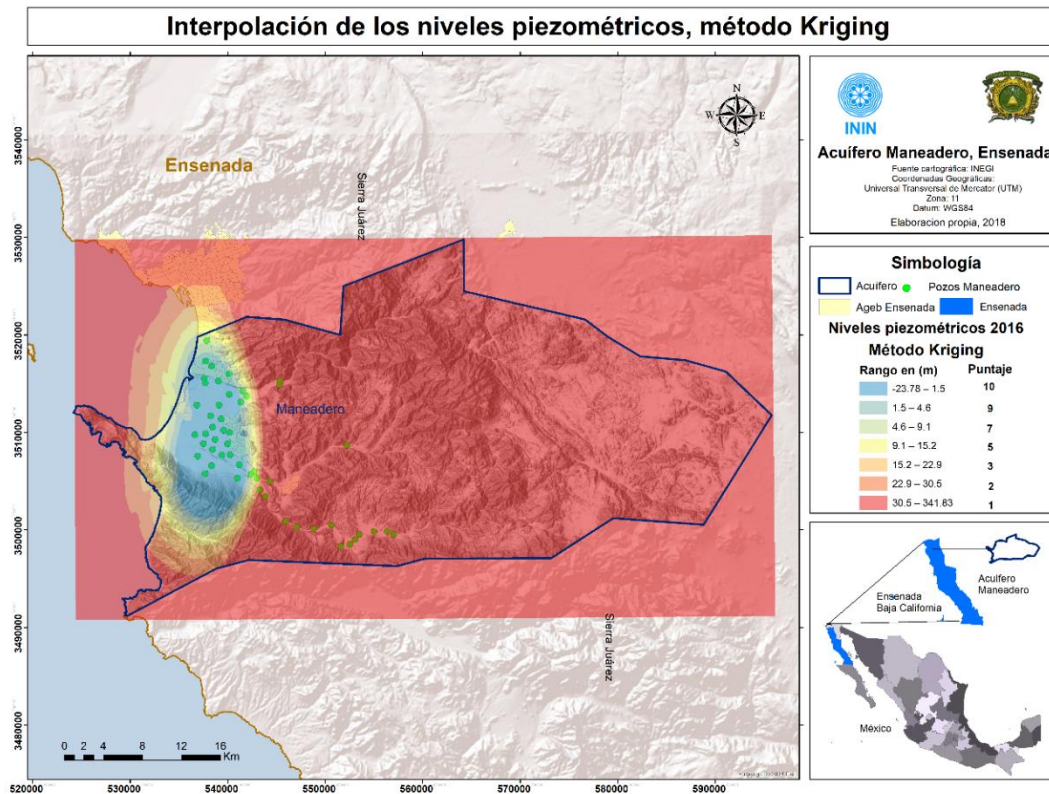


Figura 5.15 Parámetro de profundidad del método DRASTIC en el acuífero Maneadero 2016.

### 5.5.2 RECARGA NETA

La recarga neta está constituida por la recarga natural y la recarga inducida, es decir; infiltración de agua de lluvia e infiltración de aguas residuales. En el método DRASTIC la recarga se entiende como el volumen de agua por unidad de área que ingresa en el terreno y se infiltra hasta alcanzar el acuífero, para este caso se tomó en cuenta la recarga media anual publicada por CONAGUA, 2015.

Cabe resaltar que la fuente primaria de contaminación de agua subterránea es la infiltración de las precipitaciones a través de la superficie del terreno, que desciende por gravedad hasta alcanzar la superficie piezométrica. La recarga permite el transporte de los contaminantes verticalmente hasta el nivel piezométrico por infiltración directa y horizontalmente por la distribución dentro del acuífero. Entonces se podría decir que, a mayor recarga, mayor vulnerabilidad para este método.



*Facultad De Geografía*

Claro que la variable de material geológico, pendiente y cubierta vegetal desempeñan un papel muy importante para que se lleve a cabo la recarga natural debido al grado de permeabilidad, siendo así que en ciertas áreas el acuífero posee escasa protección frente a los contaminantes por la existencia de material poco consolidado lo cual genera alta permeabilidad que acelera el movimiento del agua hacia el acuífero.

En este caso se toma en cuenta la zona de recarga, la cual se da mayormente en la planicie costera del valle, ya que es la zona que más nos interesó evaluar porque es área agrícola actividad principal de la localidad y también la más afectada por la contaminación.

La dirección del flujo de recarga es importante ya que esta determina la dirección de la posible migración de los contaminantes, ya que el agua que pasa por la zona no saturada, es el principal transporte de contaminantes líquidos y sólidos.

Se puede decir entonces que, a mayor recarga, habrá mayor oportunidad de que los contaminantes lleguen al acuífero, y las sustancias arrastradas tendrán menos tiempo de atenuación en la zona no saturada.

Otra fuente de recarga es el retorno de riego, la recarga artificial del acuífero con aguas tratadas provenientes de la planta “El naranjo”, o por lixiviación, las mencionadas son significativas para la alimentación del acuífero, ya que los últimos años se ha tratado de no aumentar el déficit de balance entre recarga y descarga que hasta el 2014 era de 17.57 hm<sup>3</sup>.

El método DRASTIC asigna mayores puntajes entre mayor sea la recarga neta que se tenga registrada, como se puede ver en el cuadro 5.6, para este caso la recarga neta publicada en el diario oficial de la federación es de 20.08 recarga neta, lo cual se ubica en el primer rango de clasificación de este parámetro como podemos observar en la figura 5.16.



**Cuadro 5.6** Rangos y clasificación para la recarga neta.

Rango (mm/año)	Clasificación
Menor de 50.8	1
50.8 – 101.6	3
101.6 – 177.8	6
177.8 – 254	8
Mayor de 254	9

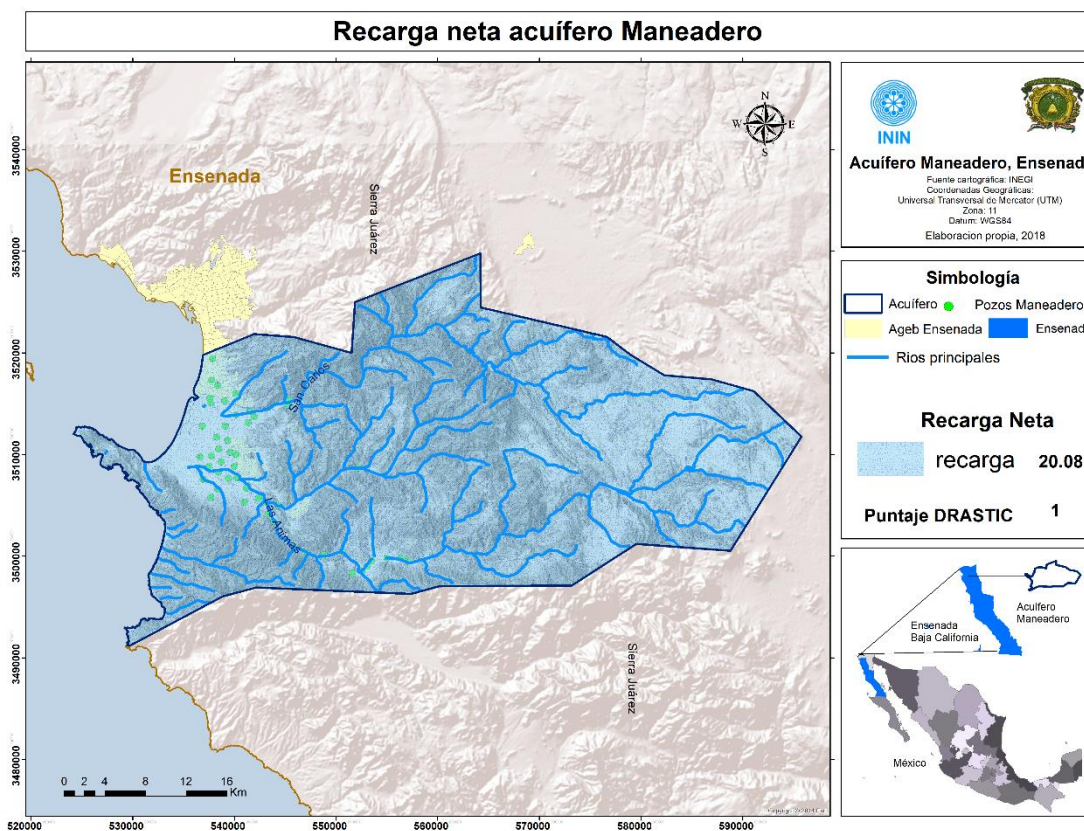


Figura 5.16 Parámetro de recarga del método DRASTIC en el acuífero Maneadero 2016.



### 5.5.3 LITOLOGÍA DEL ACUÍFERO

Las características del medio acuífero tienen relación directamente con el sistema de flujo, que van de la mano con el transporte de contaminantes, así como su dispersión y velocidad, el estado del material rocoso también es importante como por ejemplo las fallas o fracturas que se presenten, podemos decir que en general a mayor tamaño de grano y fracturación representa una mayor permeabilidad y menor capacidad de atenuación.

Este factor se evaluó en base a la estimación media adecuada a cada polígono en función de la información disponible para el valle de Maneadero cuadro 5.7, que podemos observar en la figura 5.17.

**Cuadro 5.7** Rangos y clasificaciones para las características del medio acuífero.

Rango	Clasificación variable	Clasificación
Arcillas masivas / Esquisto macizo	1-3	2
Ígneas/metamórficas	2-5	3
Ígneas/metamórficas meteorizadas	3-5	4
Conglomerados glaciares	4-6	5
Capas de calizas, arenas y arcillas	5-9	6
Conglomerados / Arenisca masiva	4-9	6
Calizas	4-9	6
Arenas y gravas	4-9	8
Basaltos	2-10	9
Calizas karstificadas	9-10	10



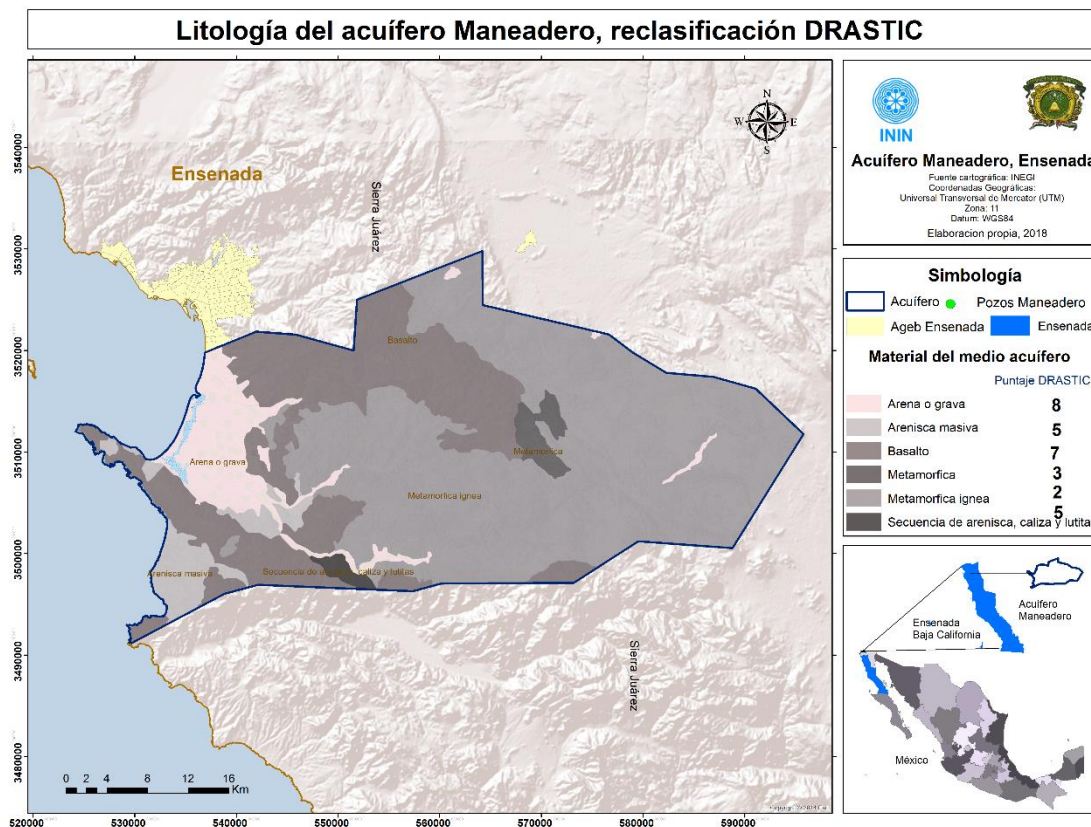


Figura 5.17 Parámetro de material del medio acuifero del método DRASTIC.

### 5.5.4 TIPO DE SUELO

El suelo es un parámetro con influencia en la cantidad y calidad de del agua que se infiltra en el acuífero, siendo la zona más superficial de la zona no saturada junto con una capa vegetal importante existiendo actividad biológica en ella.

Existe presencia de materiales finos (limos y arcillas) que disminuyen el riesgo de migración de contaminantes por que disminuye también la filtración. El contenido de materia orgánica (plantas y animales) influye en la atenuación de los contaminantes.

Po ejemplo los suelos arcillosos no expansivos son los que dan mayor protección al acuífero. El suelo es importante en la función de atenuación sobre todo cuando los contaminantes son difusos (fertilizantes y pesticidas o ácidos).



Facultad De Geografía

En el cuadro 5.8 se encuentran los valores asignados por el método DRASTIC de acuerdo al tipo de suelo, este parámetro se creó a partir del mapa edafológico el cual muestra 7 tipos de suelo, donde a cada unidad de suelo se le asignó un puntaje de acuerdo a sus características en la clasificación como se puede observar en la figura 5.18.

**Cuadro 5.8** Rangos y clasificaciones para el tipo de suelo.

Rango	Clasificación
Delgado o ausente	10
Gravas	10
Arenas	9
Turba	8
Arcillas expansivas	7
Arenas margosas	6
Margas	5
Limos margosos	4
Arcillas margosas	3
Orgánico	2
Arcillas no expansivas	1

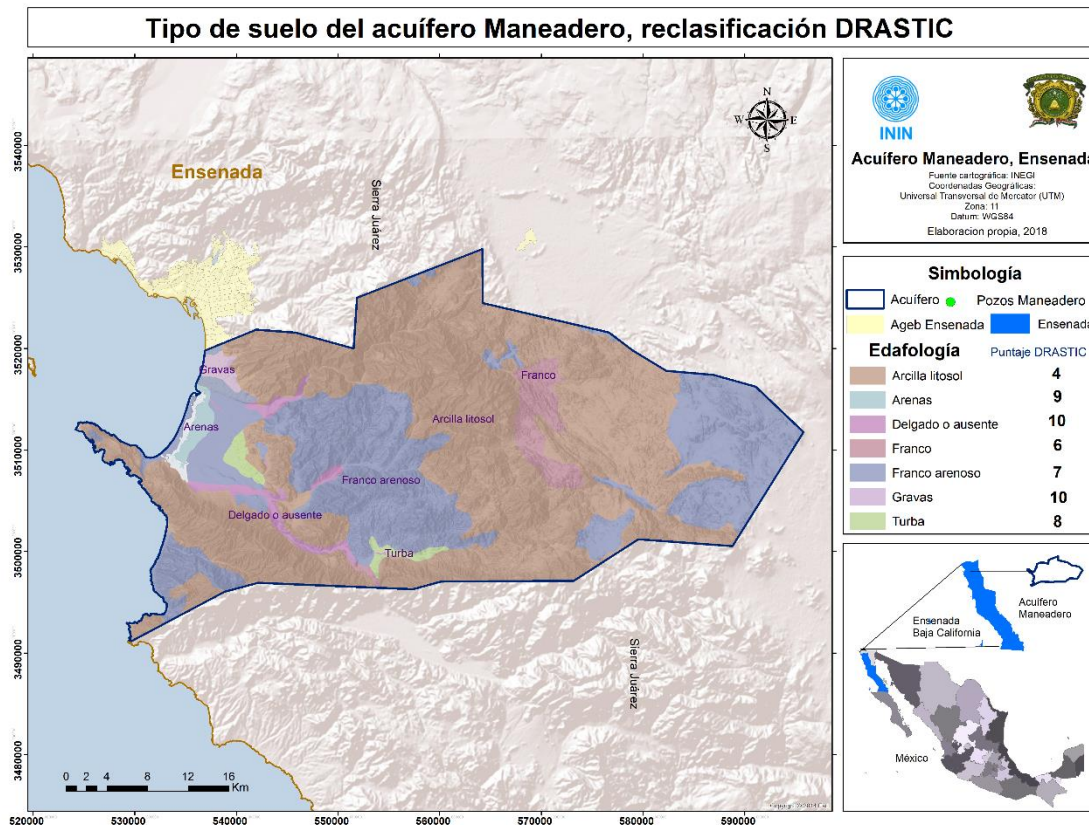


Figura 5.18 Parámetro de material del medio acuífero del método DRASTIC.

### 5.5.5 TOPOGRAFÍA

Por topografía se entiende por la pendiente del terreno y su variación espacial (Figura 5.19). Este parámetro es un factor importante para estimar la vulnerabilidad ya que puede controlar la posibilidad de que un contaminante sufra escorrentía o permanezca en la superficie el tiempo suficiente para que se infiltre. Para este caso las pendientes que favorecen la infiltración se asocian a una alta vulnerabilidad. A su vez, la topografía influye en el desarrollo de los suelos y por tanto de la atenuación de la contaminación. La clasificación dada por el método la podemos observar en el cuadro 4.9.



**Cuadro 4.9** Rangos y clasificaciones para topografía.

Rango (% de pendiente)	Clasificación
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
Mayor de 18	1

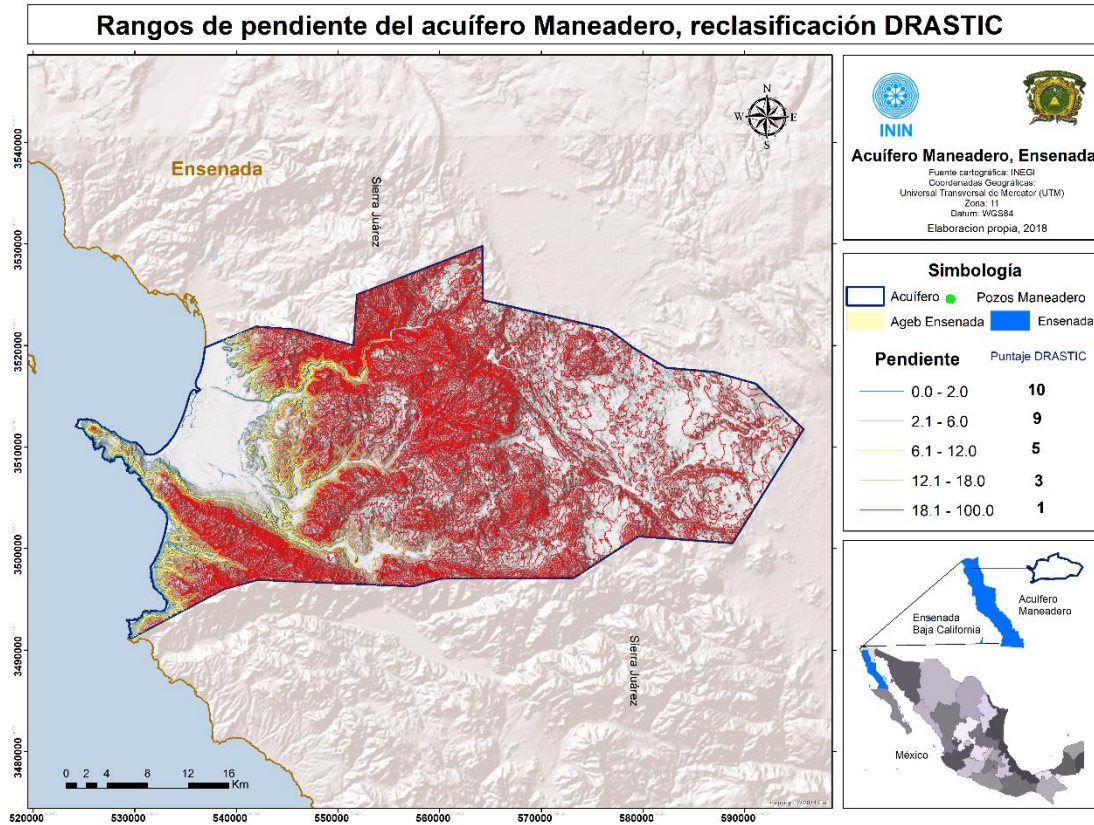


Figura 5.19 Parámetro de pendiente en el acuífero Maneadero con la reclasificación del método DRASTIC.

### 5.5.6 LITOLOGÍA DE LA ZONA NO SATURADA

La zona no saturada o vadosa es la zona existente encima de la superficie piezométrica cuyos poros está rellenos de agua y aire. Sus características determinan el nivel de atenuación del material debajo del suelo, con la profundidad la biodegradación y la volatilización decrecen.

Los valores para cada rango son los siguientes (cuadro 4.10) y se eligieron de acuerdo a las características que influyen en la estimación de la vulnerabilidad se pueden observar en la figura 5.20.



Cuadro 4.10 Rangos y clasificaciones para el impacto de la zona no saturada.

Rango	Clasificación variable	Clasificación tipo
Capa confinante	1	1
Arcillas/limos	2-6	3
Arcillas	2-5	3
Calizas	2-7	6
Conglomerados	4-8	6
Capas de caliza, conglomerado y arcilla	4-8	6
Gravas y arenas con arcilla y limo	4-8	6
Igneas y metamórficas	2-8	4
Gravas y arenas	6-9	8
Basalto	2-10	9
Caliza karstificadas	8-10	10

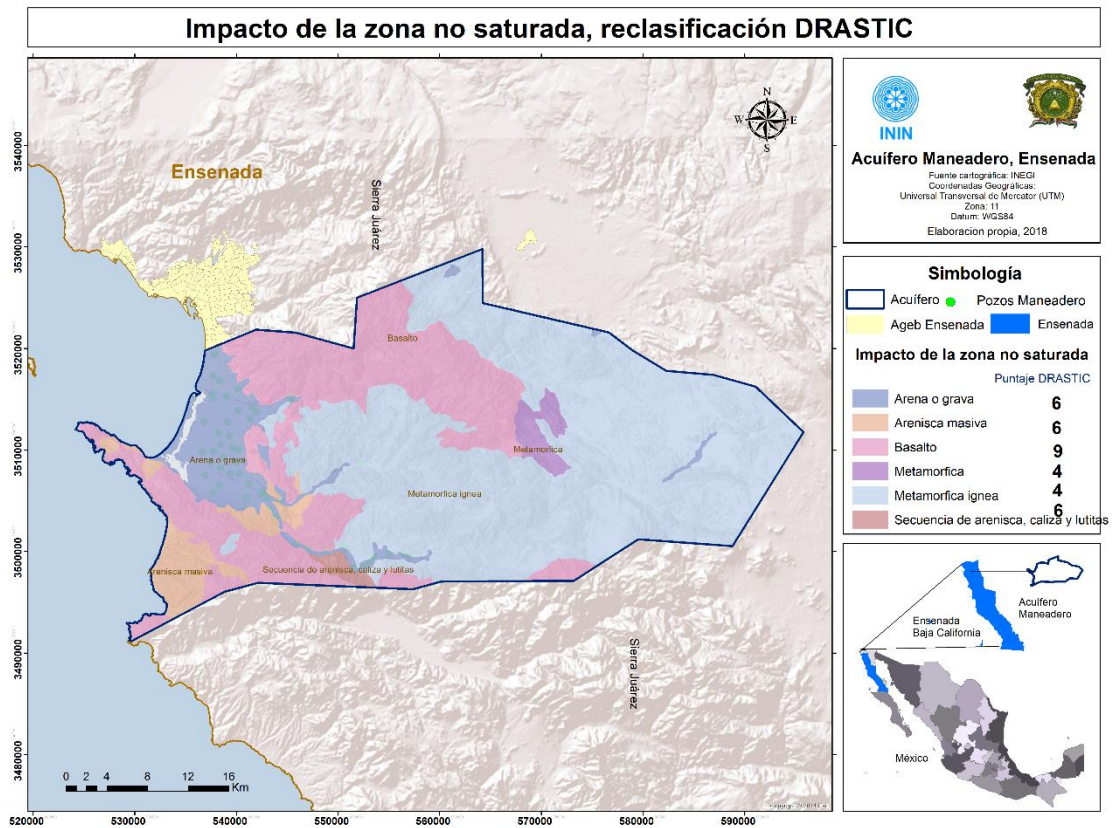


Figura 5.20 Parámetro del impacto de la zona no saturada con la reclasificación del método DRASTIC.

### 5.5.7 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DEL ACUÍFERO

En este parámetro se hace referencia a la capacidad del acuífero para transmitir agua, y por tanto controlará la velocidad a la que se mueve el agua subterránea bajo un gradiente hidráulico. Tal como lo menciona el método DRASTIC, este parámetro también controla la velocidad a la que se mueve el contaminante desde el punto en que penetra en el acuífero por ello sus rangos de clasificación son los siguientes (cuadro 5.11).

El valor de conductividad viene dado por la cantidad de porosidad intergranular del material, espacios, fracturación y estratificación, es así que teniendo valores altos de conductividad se asocia directamente a una alta vulnerabilidad y su reclasificación espacial se puede observar en la figura 5.21.



**Cuadro 5.11** Rangos y clasificaciones para la conductividad hidráulica.

Rango (metros/día)	Clasificaciones
0,05-4,0	1
4,0-12	2
12-30	4
30-40	6
40-80	8
+80	10

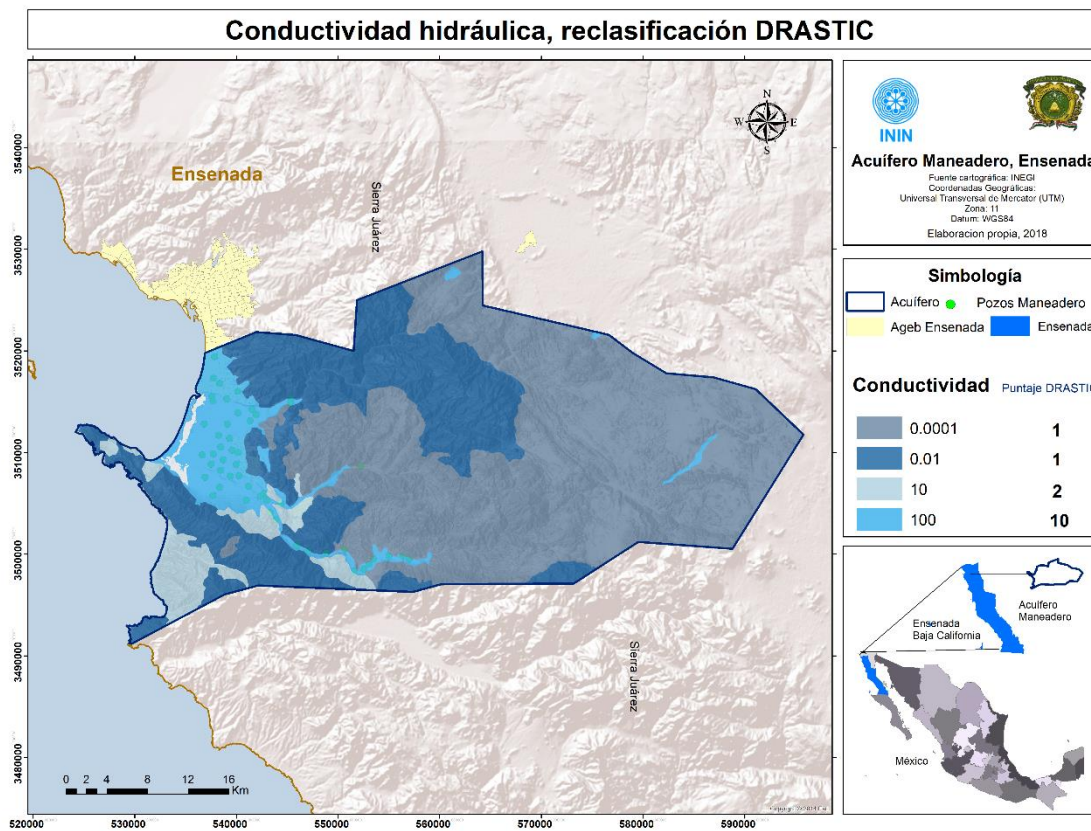


Figura 5.21 Conductividad reclasificada del método DRASTIC.





#### 4.2.6. CLASIFICACIÓN EN GENERAL DE LOS PESOS POR PARÁMETRO DRASTIC.

El índice DRASTIC se obtiene mediante una suma ponderada de todos los factores que intervienen, de acuerdo a los pesos que se indican en el cuadro 5.12 a través del álgebra de mapas y sobre posición, el resultado lo podemos observar en la figura 5.22

**Cuadro 5.12.** Pesos asignados por características DRASTIC.

<b>Parámetro</b>	<b>Peso</b>
Profundidad del agua (D)	5
Recarga neta (R)	4
Medio acuífero (A)	3
Características del suelo (S)	2
Topografía (T)	1
Impacto de la zona no saturada (I)	5
Conductividad hidráulica del acuífero (c)	3

## 5.6 VULNERABILIDAD ACUÍFERO MANEADERO MEDIANTE EL MÉTODO DRASTIC

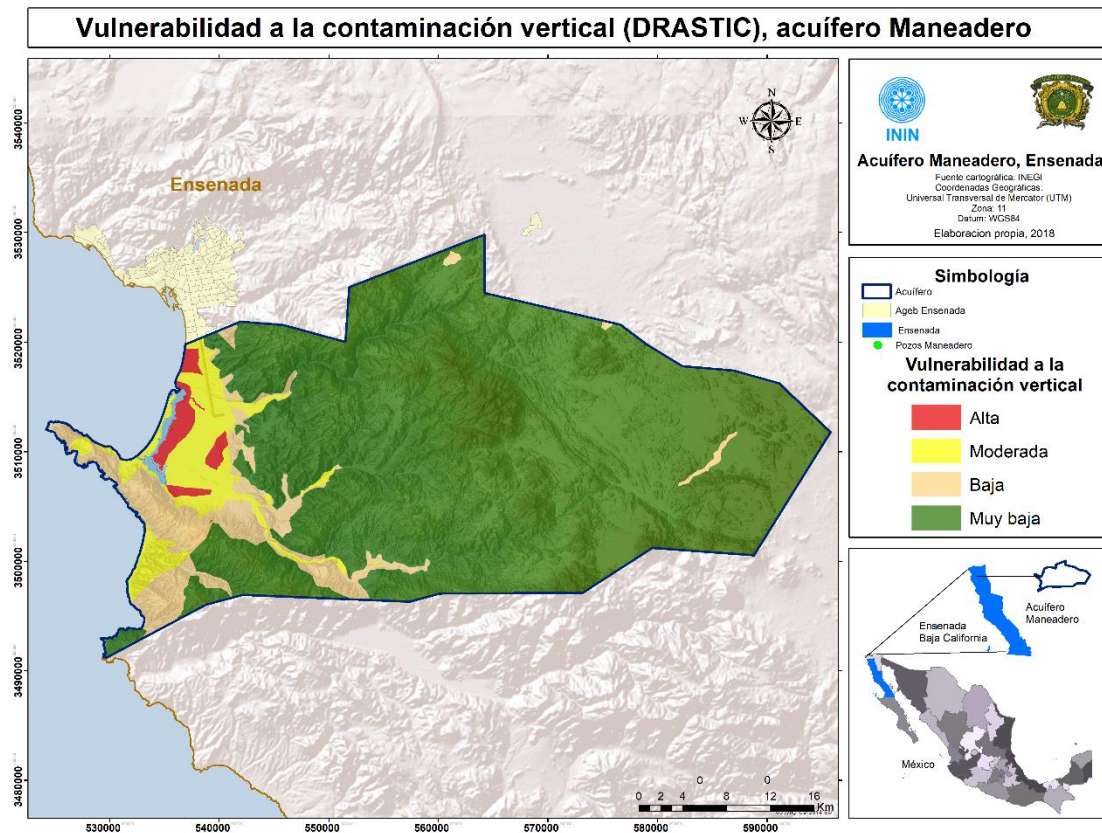


Figura 5.22 Vulnerabilidad a la contaminación vertical, empleando el método DRASTIC.

El mapa referente al índice de la vulnerabilidad intrínseca frente a la contaminación vertical indica valores de muy bajo (color verde) en zonas de pocos asentamientos humanos y gran altitud lo que dificulta la extracción de aguas subterráneas y el paso de contaminantes al nivel freático.

Se identifica un índice de vulnerabilidad bajo (color naranja) para la zona del pie de monte y parte de la montaña que se encuentra justo al lado del océano, esto se debe a que es un lugar que presenta características litológicas de basalto y rocas de tipo metamórfica ígnea, las cuales son de muy baja permeabilidad y por lo tanto de baja conductividad hidráulica, y valores altos de profundidad, lo que podemos



*Facultad De Geografía*

suponer que en caso de entrar en contacto con el contaminante el trayecto que debe pasar para llegar al agua subterránea será largo y cada vez será menor, así su impacto será mínimo al llegar a la zona saturada del acuífero.

La estimación del índice de vulnerabilidad moderada (color amarillo) representa el 92.05 km<sup>2</sup> respecto a la superficie total del acuífero con un porcentaje de 6 % (cuadro 5.13). Estos sitios vulnerables moderados se encuentran en el centro de la planicie costera, otros al sur oeste rodeando la península de Maneadero y también donde está el curso natural de los ríos San Carlos y Las Animas, el área de planicie coincide con la zona urbana y el área agrícola.

Precisamente en esta zona la extracción del agua es para consumo humano y riego, ahí mismo se ubican los pozos que extraen mayor agua por consecuencia de la demanda de la población que va en aumento y se sigue sobreexplotando cada vez a mayor intensidad. No se descarta también la posibilidad de vertimientos inadecuados por las industrias que existen.

Además, se identifica un índice de vulnerabilidad moderada en las zonas montaña aproximadamente entre los 0 y 600 msnm, debido a que representa una zona de recarga por su fracturamiento.

Como se evidencia en el cuadro 5.13 el índice muy bajo predomina en el acuífero, abarcando el 83 % del área total de estudio, mucho tiene que ver el relieve montañoso, pero la vulnerabilidad en rango moderada con el 6 % lo que equivale 92.5 km<sup>2</sup>, también es un indicador de prevención para actuar a los tomadores de decisiones con fines de uso sustentable.



Cuadro 5.13 Rangos de vulnerabilidad en porcentaje y km<sup>2</sup>.

Vulnerabilidad DRASTIC	Total km <sup>2</sup>	Porcentaje
Muy baja	1201.11	83 %
Baja	129.73	9 %
Moderada	92.05	6 %
Alta	20.72	1 %

La zona de alta vulnerabilidad (color rojo), se encuentra en 4 polígonos; el primero es al noroeste en la localidad “El ciprés” y enseguida más al centro colindando con el área del sistema costero que es donde se ubica un sitio RAMSAR y también es la parte más vulnerable de todas ya que se encuentran materiales muy permeables y poco consolidados como las gravas y arenas, sus características porosas permiten el flujo de agua mejor que en otras zonas. El tercer y cuarto polígono de vulnerabilidad alta a la contaminación, se encuentra dentro de la planicie costera donde se ubica el mayor número de invernaderos agrícolas principalmente para el cultivo de espárragos. El espacio se torna vulnerable ya que es un suelo permeable y está en constante actividad agrícola, el uso de fertilizantes para fines agrícolas aumenta aún más la probabilidad de contaminación del agua subterránea de forma vertical.



### 5.7 VALIDACIÓN

Como se pudo observar el método DRASTIC está pensado para evaluar el potencial de contaminación de las aguas subterráneas desde una perspectiva estadística y espacial. La utilización del método DRASTIC se realizó bajo los supuestos intrínsecos a la propia definición que evalúa el método.

De los factores que se utilizaron para la obtención del índice se destaca que el principal actor fue el material geológico y los niveles piezómetros más actuales con los que se cuenta. Por ello la validación se realiza comparando la estimación de las zonas vulnerables mediante el método, con la concentración de nitratos para el año 2005 y 2011 (figura 5.23 y 5.24).

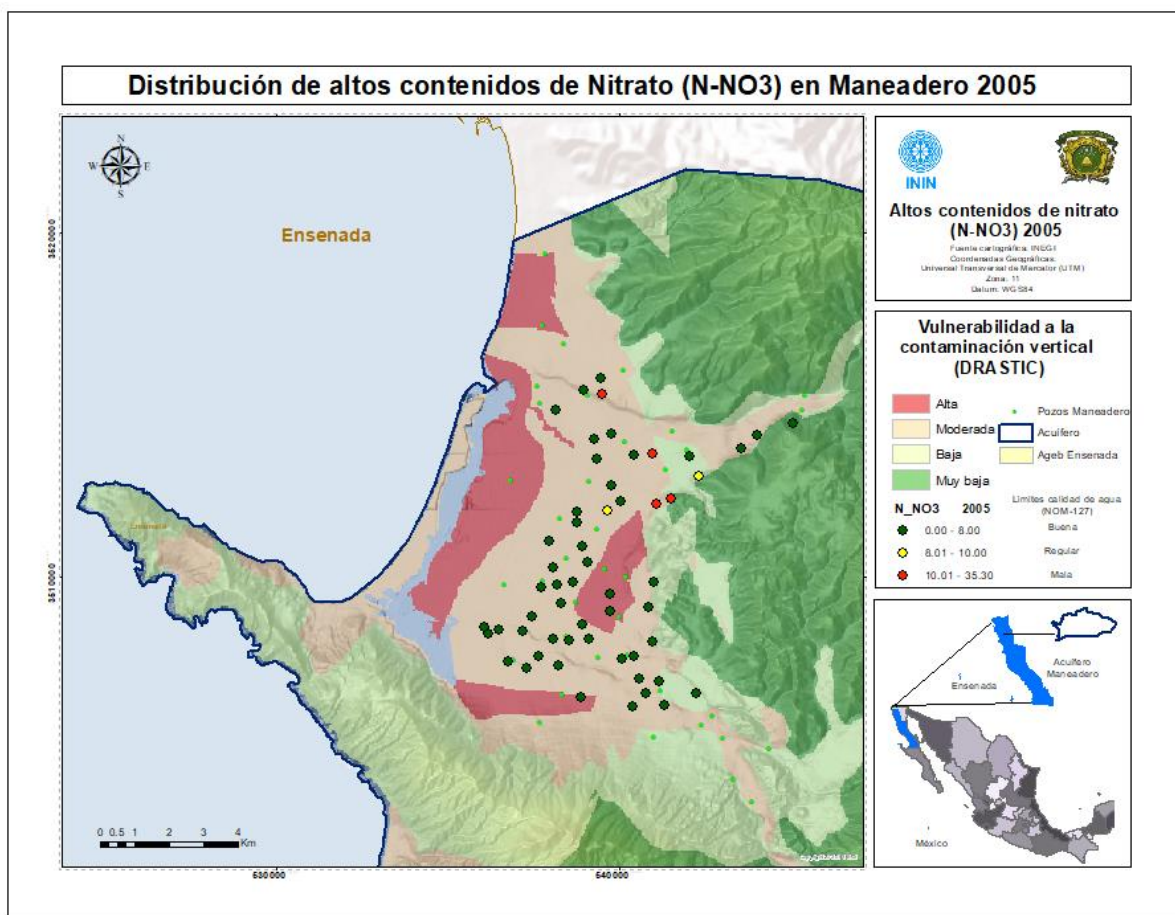


Figura 5.23 Contaminación por nitratos en el año 2005

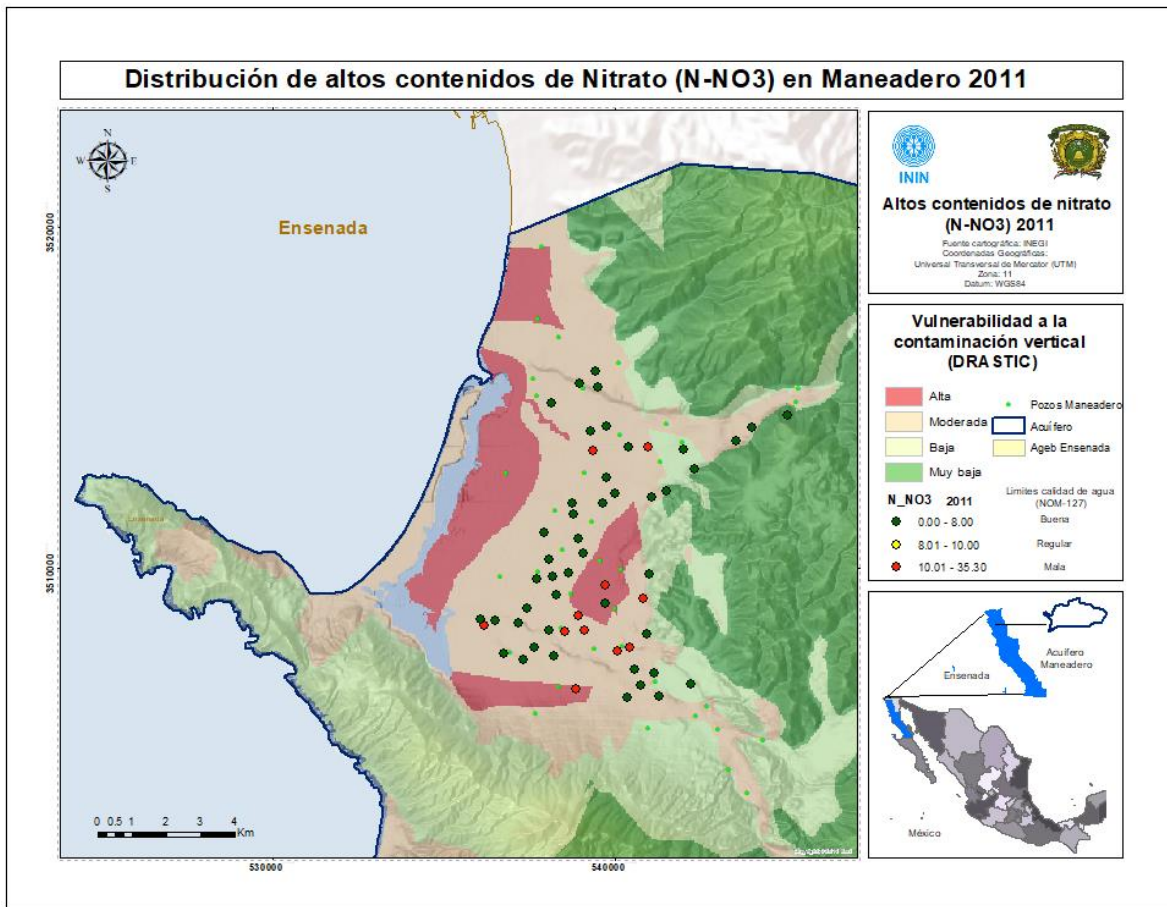


Figura 5.24 Contaminación por nitratos en el año 2011

Para el año 2005 la concentración de nitratos que sobrepasan el límite permisible para la calidad del agua se localizan en el centro norte de la planicie costera donde existían 4 puntos de mala calidad y solo 2 de calidad regular en la misma orientación, esto nos quiere decir que el flujo de contaminante aún se encontraba un poco aglomerado y todos corresponden a la zonificación de muy baja, baja y moderada vulnerabilidad, pero ya para el año 2011 el problema de la mala calidad del agua por contenido de nitratos se acrecienta no solo en cantidad de puntos que ahora ya son 11 zonas que sobrepasan el límite, sino que también ahora se distribuyen a lo largo y ancho de la planicie costera, coincidiendo dos zonas en la estimación de vulnerabilidad alta, y 9 zonas en moderada vulnerabilidad, podemos destacar que ya ninguna zona se encuentra en baja vulnerabilidad.



El contaminante se sitúa en la superficie del terreno donde se observan en las figuras anteriores la estimación de vulnerabilidad, sin embargo, los nitratos como contaminantes potenciales se movilizan hacia el inferior del acuífero por el agua de precipitación y la inestabilidad del agua. Es de gran importancia destacar que las zonas con más alta vulnerabilidad, es también donde se encuentran las altas concentraciones de nitratos.

La contaminación de los acuíferos y la alta concentración de nitratos, puede llegar desde los mismos cuerpos de agua por descargas legales, ilegales o no tratadas.

#### VALIDACIÓN DEL CONTENIDO DE NITRATOS CON EL MÉTODO SEA-GINDEX

El contenido de nitratos para el año 2011 se concentra en 11 zonas de la planicie costera desde el pie de monte hacia el oeste del océano pacífico en las zonas de baja y moderada vulnerabilidad (figura 5.25), aunque los sitios de estimación a vulnerabilidad son de intrusión salina no tiene tanta relevancia en nitratos ya que su absorción es vertical.

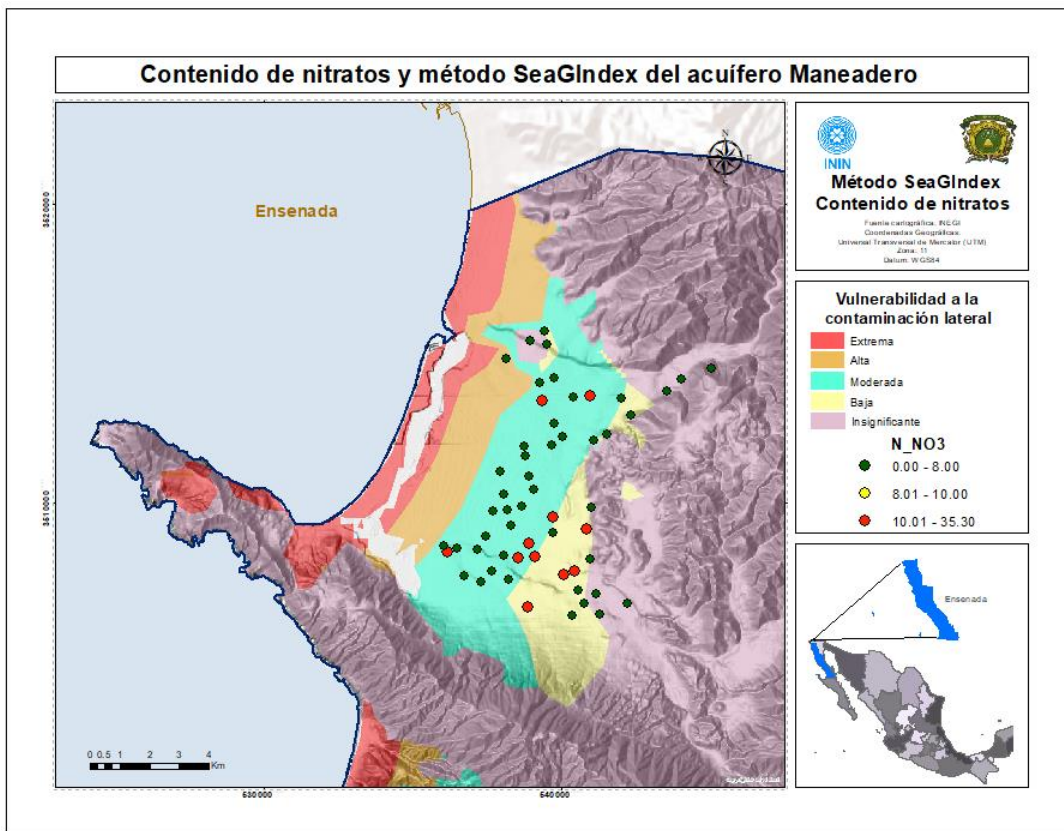


Figura 5.25 Contaminación por nitratos en el año 2011 con el método SeaGIndex

## 5.8 VALIDACIÓN DEL MÉTODO SEA-GINDEX Y CONCENTRACIÓN DE CLORUROS.

El agua dulce del acuífero y el agua salada del mar son miscibles y, por lo tanto, lo que existe es una zona de transmisión y está causada principalmente por el fenómeno de dispersión. Uno de los principales indicadores de la identificación de sales disueltas son los cloruros, siendo el elemento (ion) que más predomina en el agua de mar. Para este apartado sobreponemos la cartografía de sitios vulnerables a la intrusión salina mediante el método SEA-GIndex y la concentración de cloruros en la planicie costera.





*Facultad De Geografía*

Según la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, establece que los límites permisibles de la concentración de cloruros (Cl) es de 250 mg/l para tener una buena calidad del agua para consumo humano, siguiendo esta norma podemos clasificar la concentración del cloruro en el acuífero como aceptable, mala e inservible (Figura 5.26) donde observamos que el comportamiento mayor es de mala ya que la concentración de los cloruros está por encima del límite permisible, y solo 24 puntos de un universo de 56 muestras son de buena calidad y 3 se muestran como inservible.

Observamos también los sitios propensos a ser vulnerables a la intrusión salina mediante la aplicación del método SEA-GIndex y lo podemos validar con la concentración de los cloruros que se sitúan en lugares de moderada y alta vulnerabilidad y las bajas concentraciones de cloruro se observan más a medida que se va alejando de la línea de costa y se van adentrando a las zonas insignificantes a ser vulnerables.

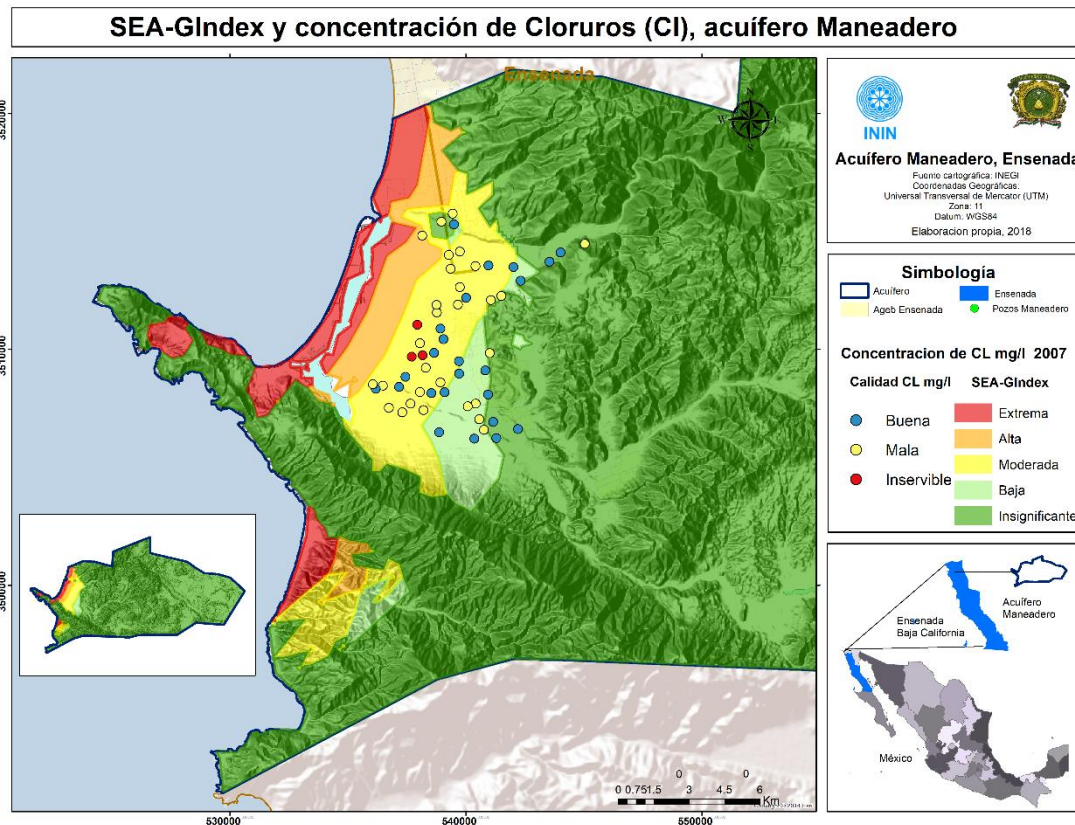


Figura 5.26 Concentración de Cloruros con el método SeaGIndex

Es importante resaltar que estas zonas de muestreo, como se observa en la imagen anterior solo se hicieron en la parte central de la planicie costera, y la mayoría de los puntos de concentración de cloruros reflejan una mala calidad del agua a menudo que se acercan a la línea de costa donde se encuentran los polígonos de extrema y alta vulnerabilidad a la intrusión salina según el método.

En la siguiente imagen (figura 5.27) se muestra la vulnerabilidad a la contaminación lateral y vertical, mediante la combinación de los métodos SEA-GIndex y DRASTIC, donde podemos observar que la vulnerabilidad baja coincide en ambos métodos, que inicia desde el pie de monte del sistema montañoso, es comprensible ya que se estructura por materiales litológicos como es el basalto y la roca metamórfica e ígneas intrusivas que por sus características físicas se consideran de muy baja permeabilidad.



En cuanto a la vulnerabilidad moderada, la zonificación en el método DRASTIC abarca mayor superficie que la estimación del SEA-GIndex, sin embargo, los dos coinciden en sitios mayormente agrícolas y con ocupación poblacional conglomerada.

Ya para el caso de alta y extrema vulnerabilidad por contaminación vertical o lateral se observa en los sitios más cercanos a la línea de costa, y parte de la zona agrícola que es también donde existe mayor abatimiento de los pozos, el descenso de los niveles piezométricos es debido a la sobreexplotación de los pozos por la demanda del recurso hídrico en los pozos del centro que como podemos observar son los de mayor problema.

La ubicación de zonas con alta concentración de contenido de nitratos se observa en los puntos color rojo que situación de moderada y alta vulnerabilidad vertical y las zonas con mala calidad de agua debido al alto contenido de cloruros se encuentra en área de moderada vulnerabilidad lateral.

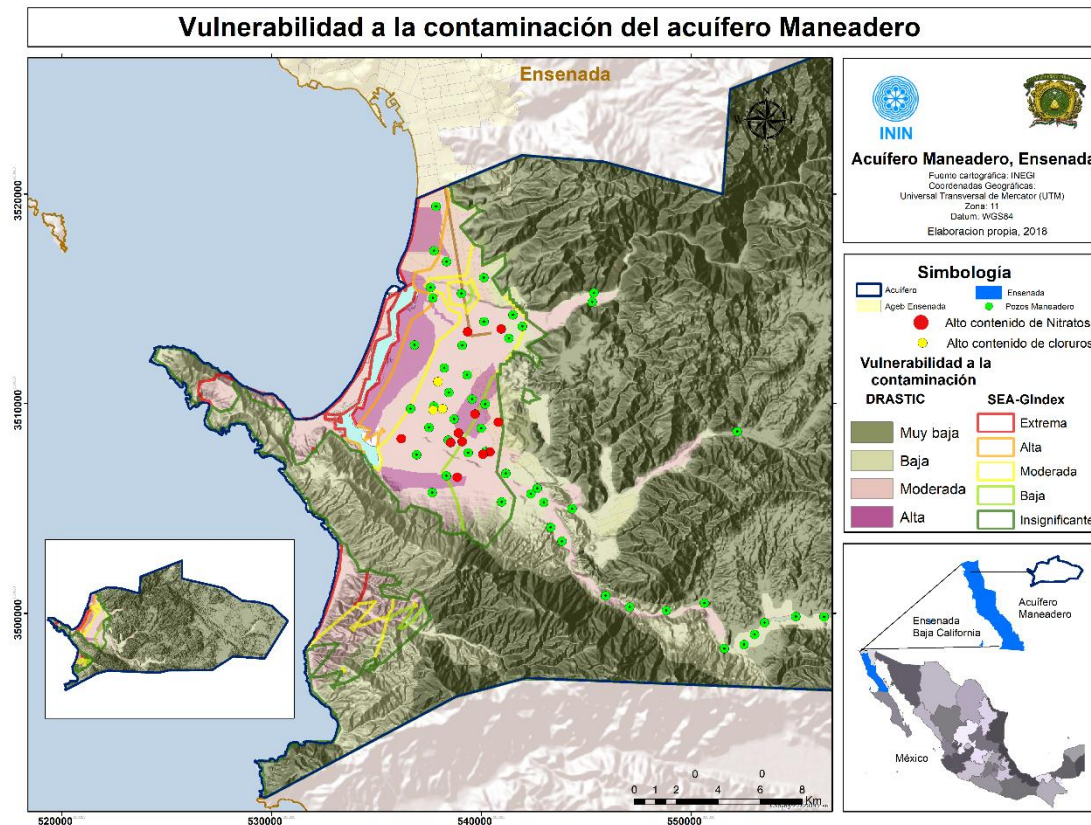


Figura 5.27 Zonificación de vulnerabilidad a la contaminación vertical y lateral del acuífero Maneadero.

El área mayormente afectada y vulnerable a la contaminación (extrema y alta) varía entre el 1 por ciento y 3 por ciento respecto a la superficie total del acuífero (cuadro 5.14), esto se refiere entre 20 y 23 km<sup>2</sup>.

Cuadro 5.14 Rangos de vulnerabilidad en km<sup>2</sup> y porcentaje de zonas vulnerables a la contaminación.

Vulnerabilidad	Total km <sup>2</sup>		Porcentaje	
	SEA-Gindex	DRASTIC	SEA-Gindex	DRASTIC
<b>Insignificante</b>	1333.11	1201.11	92%	83 %
<b>Baja</b>	19.59	129.73	1%	9 %
<b>Moderada</b>	47.55	92.05	3%	6 %
<b>Alta</b>	19.93	20.72	1%	1 %
<b>Extrema</b>	23.9	-	2%	-



El abastecimiento de agua es un servicio de interés social en el municipio de maneadero por ello es importante tener agua de buena calidad ya sea para el consumo humano o para el riego que es la principal actividad en la localidad y genera una fuente económica para la población.

Como podemos ver en la cartografía, el acuífero es altamente vulnerable a la contaminación y se comprueba con las zonas ahora ya afectadas, por ese motivo se necesita tener un manejo adecuado del agua subterránea aplicando medidas de prevención y mitigación, lo cual a su vez reduciría la necesidad de buscar fuentes externas de aguas (acueducto para traer agua del Río Colorado) y/o una inversión económica gigantesca en la construcción y operación de una planta desoladora, existen varios métodos de empleo, pero casi todos generan un costo ecológico muy grande, anexando que esto solo ocasionaría elevar el precio del agua para los ciudadanos.

## 5.9 USOS POTENCIALES DE LA ESTIMACIÓN A LA VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO

- La cartografía de zonas hidrogeológicas a detalle sirve para averiguar qué área es vulnerable de recibir contaminantes en superficie o de forma subterránea.
- La identificación de sectores altamente vulnerables en el acuífero, puede servir de referencia para los tomadores de decisiones con la finalidad de una protección óptima.
- La zonificación geográfica de puntos de control de la calidad de las aguas subterráneas para estudio de investigación.
- Propuestas de criterios sustentables a tomadores de decisiones que sean aplicables a las políticas de ordenación del territorio para alcanzar un nivel de protección determinado de las aguas subterráneas.



*Facultad De Geografía*

- Puede utilizarse para establecer líneas de prevención para determinados usos del suelo.
- Mitigar o disminuir usos de contaminantes en áreas vulnerables



## CONCLUSIONES

El objetivo principal de la presente investigación fue evaluar el estado de vulnerabilidad del acuífero Maneadero, perteneciente al municipio de Ensenada Baja California, mediante la aplicación de dos métodos distintos uno para la contaminación vertical (DRASTIC) y el otro para la contaminación lateral (SEA-GIndex), ambas metodologías permitieron generar mapas de vulnerabilidad estimando sitios propensos, se realizó la validación y coincidió con la base teórica y metodología.

El agua subterránea en la comunidad de Maneadero representa un recurso indispensable que actualmente se encuentra escaso, ya que se ha propiciado una constante y creciente explotación, perjudicial para la recuperación del equilibrio en el ciclo natural del agua.

El presente estudio requirió de trabajo de campo y gabinete para la recopilación y análisis de información alfanumérica y cartográfica en diversas instituciones gubernamentales sobre el acuífero Maneadero, respecto al comportamiento superficial y subterráneo del agua desde una perspectiva espacial.

Se elaboraron mapas temáticos que ilustran las características físico – geográficas del acuífero, como geomorfología, hidrología, clima, geología, edafología, uso de suelo y vegetación, densidad de población, etc. La actualización y generación de nueva cartografía para el área de estudio, enriquece la interpretación físico geográfica. El uso intensivo del agua subterránea ha provocado problemas de abastecimiento en el centro de la ciudad de Ensenada.

A partir del estudio detallado del marco teórico se pudo identificar que los métodos más viables para el análisis de la contaminación vertical del acuífero era el método DRASTIC, ya que este método considera como factores condicionantes la profundidad del agua subterránea, recarga neta, litología del acuífero, tipo de suelo,



topografía, naturaleza de la zona no saturada y la conductividad hidráulica del acuífero.

Para la contaminación lateral se eligió el método SEA-GIndex ya que se adapta a los datos disponibles que tenemos como son la distancia a la línea de costa, los niveles piezométricos y la litología del acuífero.

La cartografía generada por la aplicación de estos métodos, estima sitios propensos a ser vulnerables a la contaminación, buscando atender el tema de la calidad del agua en el acuífero, encaminado a tener conciencia de la problemática actual, y así tener una visión sustentable de la extracción del agua en la localidad.

Los indicadores que mas importantes son para evaluar la vulnerabilidad son las características litológicas y los niveles piezométricos. Entre el año 2009 a 2016 se presentan un abatimiento importante debido a la sobreexplotación del agua subterránea por consecuencia de la demanda del recurso ya sea para consumo humano o para riego en la zona agrícola.

La aplicación del método SEA-GIndex para el caso de estudio del acuífero Maneadero ilustra cinco rangos de vulnerabilidad que va desde insignificante, baja, moderada, alta y extrema donde fundamentalmente más importante atender las zonas de extrema y alta para la mitigación y las zonas de moderada vulnerabilidad para la prevención.

El área que se encuentra vulnerable cerca de la línea de costa, donde se estimó mediante el método SEA-GIndex alta vulnerabilidad, coincide con el proceso actual, existiendo factores que provocan la intrusión marina como por ejemplo la distancia tan corta al océano, los niveles piezométricos que se encuentran por debajo del nivel medio del mar, el material litológico que constituye esta área es de tipo arenas con limo y gravas que son altamente vulnerables ya que son muy porosas y están poco consolidadas así como la existencia también de las dunas costeras, aunado a esto justo en la línea de costa existe erosión costera que provoca que el avance de la cuña salina sea más acelerado.





*Facultad De Geografía*

La estimación del rango de vulnerabilidad extrema comprende el 2 % respecto al área total del acuífero, esto es decir 23.9 km<sup>2</sup> y para los sitios con vulnerabilidad alta comprenden un total de 19.93 km<sup>2</sup> correspondiente al 1 %, esto sin dejar fuera a la vulnerabilidad moderada con un 47.55 km<sup>2</sup> de extensión territorial representando un 3 %, el 93 % restante corresponde a la baja e insignificante vulnerabilidad a la contaminación, estas últimas clasificaciones comprenden más territorio pero de debido a que se encuentran las alejas de la línea de costa y a mayor altitud.

La metodología DRASTIC permitió evaluar el acuífero maneadero a través de 7 mapas y el mapa resultante después de aplicar la fórmula generando el índice de vulnerabilidad intrínseca frente a la contaminación

También a partir del análisis de la actividad económicas que se genera en el área de estudio se pudo visualizar que la agricultura es la principal actividad y un indicador importante para la economía de la población, pero esta actividad va acompañada con el uso de fertilizantes y en los análisis hidroquímicos de monitoreo realizadas anteriores a esta investigación se observa que en el año 2011 había una concentración de nitrato a lo largo de la planicie costera, por lo que sobrepasa los límites permisibles de la calidad del agua para consumo humano por lo que se comprobó niveles de contaminación por fertilizantes y en este sentido el método DRASTIC puede modelar de manera espacial las zonas susceptibles a la contaminación vertical.

El método DRASTIC arrojó que existen cuatro niveles de contaminación en el acuífero que van desde muy baja (1202 km<sup>2</sup>, 83%), baja (130 km<sup>2</sup>, 9 %), moderada (92 km<sup>2</sup>, 6%) y alta (21 km<sup>2</sup>, 1 %) que comprende valores de 23 a 187 de acuerdo al método. El más importantes es el rango de moderada y alta, las cuales deben estar bajo constante monitoreo que contribuya con la prevención de contaminación del recurso subterráneo.

Con las herramientas de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los softwares cartográficos se logró determinar el comportamiento de las variables



consideradas para cada metodología implementada, dando resultados congruentes con la información teórica encontrada y la validación de acuerdo a los datos hidroquímicos.

Con los resultados obtenidos de la estimación espacial en cuanto a la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea del acuífero Maneadero, puede ser de apoyo para la toma de decisiones sobre la protección y manejo de los recursos hídricos subterráneos, en los Planes de Ordenamiento Territorial –POT, los cuales permiten identificar zonas donde se prohíben o restringen determinados usos del suelo, que representen una amenaza para la calidad de las aguas subterráneas, también podría impulsar el diseño, desarrollo e implementación de proyectos de educación relacionados con la necesidad de proteger los acuíferos y evitar la contaminación del agua subterránea.

Es importante tomar en cuenta este tipo de estudios para la toma de decisiones ya que la buena calidad del agua puede prevenir y evitar riesgos de enfermedades

El proceso de sobreexplotación rebasa las posibilidades e intentos de recuperación, sin embargo, es posible mantener estable el funcionamiento del acuífero a partir del desarrollo de políticas para la protección del recurso hídrico como la implementación de programas de recarga. Se torna necesario el conocimiento integral de los problemas actuales para poder proponer posibles soluciones que permitan tomar medidas para la preservación y uso sustentable del agua.

Se recomienda reducir la demanda mediante el uso sustentable del recurso sobre todo para fines agrícolas, distribución para uso urbano, e incrementar el volumen de agua pluvial recolectada y el reúso de agua residual tratada.



## Bibliografía

- AVR. (2003). Aquifer Vulnerability and Risk. Proceedings of the First International Workshop on Aquifer Vulnerability and Risk.
- Ballesteros et.al. (2016). *A standardized INDEX for assessing seawater intrusion in coastal aquifers: THE SITE INDEX. Geological survey of Spain. Valencia, Spain.*
- Belmonte, V. (2016). Monitoreo de la pluma de agua tratada que se descarga en una zona costera del acuífero del valle de Maneadero, Baja California, mediante métodos eléctricos. *Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. México.*
- Buzai, G. (2013). *Geografía Geotecnología y Análisis Espacial; tendencias, métodos y aplicaciones.* Argentina: UNL.
- Castillo. (2003). *Aplicación de diferentes métodos para estudiar la Intrusión salina en acuíferos de Sonora, México. Tecnología de la Intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: Países Mediterráneos.* Madrid.
- CIRA. (2016). *Centro Interamericano de Recursos del Agua.* Obtenido de <http://cira.uaemex.mx/investigacion/cuerpos-academicos>.
- 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.
- CONABIO. (2012). *Portal de Geoinformación. Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad .* Obtenido de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>.
- CONAGUA. (2009). *Acuíferos con intrusión salina y/o salinización de suelos y aguas subterráneas salobres.* Obtenido de [http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/SINA/M2\\_8.jpg](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/SINA/M2_8.jpg).
- CONAGUA. (2015). *Atlas del Agua en México.* Obtenido de <http://agua.org.mx/cono/multimedia/mapas/1131-mapas/38767-atlas-del-agua-en-mexico-2015>.
- CONAGUA. (2001). *Comisión Nacional del Agua.* Obtenido de <http://www.gob.mx/conagua>.
- Corona - Esquivel y Gómez - Godoy. (2001). *La Intrusión Salina en el Acuífero de la costa de Hermosillo, Sonora.*
- Custodio, E. (1987). En *Studies and Reports in Hidrology: Groundwater problems in coastal areas.* Paris, Francia.



Facultad De Geografía

Daesslé, Sánchez, Camacho, Mendoza, Carriquiry, Macias, & Castro. (2005). Geochemical evolution of groundwater in the Maneadero coastal aquifer during a dry year in Baja California, México. *Hidrogeology Journal*, 584-595.

DOF. (2001). *Administración del agua subterránea, Diario Oficial de la Federación*. México: DOF.

Duijvenbooden W, waegeningh, H.G. van. (1987). Vulnerability of soil and groundwater pollutant. *Proceedings of the International Conference held in Natherlands. TNO Committee of Hydrological Research*. Netherlands.

Emilia, B. (2011). La exploracion de acuíferos costeros como base de su gestión sustentable. Aguas subterráneas, superficiales y la aplicación de los SIG. Mar del plata, Argentina.

Ferguson G. and T.Gleeson. (2012). Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change. *Nature Climate Change*.

Foster, S.S.D and Hirata R.C.A. (1991). *Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data*. . Obtenido de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaca/i/fulltext/risk/risk.pdf>.

Foster, S.S.D and Hirata R.C.A. (1988). Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas , una metodología basada en datos existentes. Organización Panamericana de la salud. Perú. (CEPIS), 74 pp.

Google Earth. (2004, 2016). *Localidad de Maneadero*. Obtenido de <https://earth.google.es.com>

Graf, M. S. (2007). *La escasez de Agua en el mundo y la importancia del Acuífero Guaraní para Sudamérica: Relación abundancia - escasez*. Argentina.

Green, & MacQuarrie. (2014). An evaluation of the relative impotence of the effects of climate change and groundwater extraction on seawater intrusion in coastal aquifers in Atlantic Canada. *Hidrogeology Journal*, 609-623.

Hernández, L. (2006). *Generación de los Indices de Vulnerabilidad para acuíferos. Comparación de Métodos*. México.

IIO. (2016). *Instituto de Investigaciones Oceanológicas*. Obtenido de <http://iio.ens.uabc.mx/area-geo-cuerpos.php>.

INEGI. (1995). *Estudio hidrológico del estado de Baja California*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática, México. <http://www.inegi.org.mx/inegi/>

INEGI. (2015). *Encuesta intercensal 2015*. Obtenido de <http://www.inegi.org.mx/inegi/default.aspx?s=est&c=6023&e=&i=> .

Margat, J. (1968). Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero. Bases de la cartografía, (DOC.) Orléans, France: BRGM, 68 SGL, 198 pp.



Facultad De Geografía

Medina, Saavedra, Montaña, & Gurrola. (2002). Vulnerabilidad a la intrusión marina de acuíferos costeros en el pacífico Norte Mexicano; un caso el acuífero costa de Hermosillo, Sonora. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, 31-51.

Neri, I. (2007). *Identificación de zonas vulnerables a intrusión salina en una zona costera de Veracruz*. México: UNAM.

BIBLIOGRAPHY Ramos. (2007). Factores que efectúan la vulnerabilidad de sistemas acuíferos de Salamanca Gto.

SECTUR. (2016). *Sistema Nacional de la Información Estadística del Sector Turismo de México-Data Tur*. Obtenido de SECTUR: <http://www.datatur.sectur.gob.mx/SitePages/Inicio.aspx>

SEMARNAT. (2013). *Estadísticas del Agua en México*. Obtenido de SEMARNAT: [http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_resumen14/06\\_agua/6\\_1\\_2.html](http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen14/06_agua/6_1_2.html).

SEMARNAT. (2015). *Aprovechamiento y restauración de los recursos naturales*. Subdirección de gestión para la protección ambiental y de recursos naturales. Obtenido de SEMARNAT: <https://www.gob.mx/semarnat>

SIGA. (2001). *Mapa de Acuíferos. Subgerencia de Información Geográfica del Agua. CONAGUA*. México.

Stephen, F. (1995). *Groundwater pollution risk assessment a methodology using available data*. Lima, Peru: Engineering and environmental sciences.

UNESCO. (2008). *WWPA*. Obtenido de [http://www.whymap.org/whymap/EN/Downloads/Additional\\_global\\_maps/addimaps\\_no\\_de\\_en.html](http://www.whymap.org/whymap/EN/Downloads/Additional_global_maps/addimaps_no_de_en.html).

Vrba, J. y Zaporozec, A. Edts. (1994). *Guide book on mapping groundwater vulnerability*. Edt. Heise. International contributions to hidrogeology, vol. 16. 131 pp.

*Propuesta Metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación*. Bogotá, Colombia: Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial.

Vargas Quintero, M. C. (2010). *Propuesta Metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación*. Bogotá, Colombia: Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial.

Werner, A., & Simmons, C. (2009). Impact of sea level rise on seawater intrusion in coastal aquifers. *Ground Water*, 197-204.

WHYMAP. (2001). *World Hidrogeological Mapping Evaluacion Program*. Obtenido de [http://www.whymap.org/whymap/EN/Home/whymap\\_node.html](http://www.whymap.org/whymap/EN/Home/whymap_node.html).