



**El Colegio  
de la Frontera  
Norte**



**EVALUACIÓN DEL PELIGRO DE CONTAMINACIÓN  
DEL ACUÍFERO DEL ARROYO ALAMAR, TIJUANA,  
BAJA CALIFORNIA**

Tesis presentada por:

**Marnie González Estévez**

para obtener el grado de:

**MAESTRA EN ADMINISTRACIÓN INTEGRAL  
DEL AMBIENTE**

Tijuana, B. C., México  
2008

# CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Director de Tesis:

\_\_\_\_\_ *Dr. Vicente Sánchez Munguía*

Aprobada por el Jurado Examinador:

1. \_\_\_\_\_

2. \_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

*A mis padres, quienes han acompañado cada uno de  
mis pasos, aún en esta distancia.*

*...Gracias por permitirme volar tras mis sueños.*

*Los quiero infinitamente.*

## AGRADECIMIENTOS:

- A El Colegio de la Frontera Norte (El Colef) por haberme recibido y por haber contribuido a mi formación profesional. Por otorgarme la beca para mis estudios.
- Al Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE) por contribuir a mi superación.
- Al Dr. Vicente Sánchez Munguía, mi director. Por haberme acogido en el Proyecto del Arroyo Alamar desde mi admisión a la MAIA. Por estar disponible ante cada una de mis inquietudes y por su ayuda ante determinadas situaciones.
- Al Dr. Jaime Herrera, por haber sido de quien partió la propuesta inicial del tema de esta tesis; así como por la asesoría proporcionada durante las primeras fases del presente trabajo y por la bibliografía facilitada.
- Al Dr. Fernando Wakida y al Dr. Leonardo Lizárraga, por aceptar ser lectores de este trabajo y por sus útiles comentarios.
- A Arizbé Gutiérrez por proporcionarme los datos de su trabajo de tesis y por los recorridos de campo alrededor del Arroyo Alamar.
- A Gil, por apoyarme en la búsqueda de información, en la elaboración de los mapas y gráficos; pero sobre todas las cosas por el apoyo emocional que su amor ha significado para mí lejos de mi familia y mi país.
- A mis compañeros de maestría July, Jenny, Karen y Chuy, y en especial Kuko y Kenia, por abrirme las puertas de su casa. A todos gracias por su amistad.
- A mi familia en Tijuana por estar pendientes de mí todo el tiempo y por su cariño: a tío Rober y Aidé, a mi primo Robertico. A mis primos Daymel y Yailén, y a Daylencita (mi pequeña mexicanita, por siempre hacerme olvidar las tristezas). Muy en especial a mis tíos Humberto y Xiomara, por haberme hecho sentir como en casa y por hacer posible la materialización de este sueño.
- A mi familia en Cuba (mi tierra verde), por todo su apoyo y amor, a pesar de la distancia que nos separa. Gracias por la entereza que muestran ante mi ausencia y la fortaleza que me transmiten, esta tesis también es su logro. Los quiero con todo el corazón: a mi abuela Rosa, a mi hermanito (Henrycito, mi bicho), a tía Alina, a mi primo Marcos y a Mildred. A mis padres: Rosalina y Henry, aunque estar lejos de uds. ha sido el mayor sacrificio de este viaje, siempre los llevo conmigo adonde quiera que voy.
- A quienes ya no están en mi vida, pero llevo en mi corazón: a mi abuela Adelfa y a mi abuelo Lino.
- A los que de una manera u otra contribuyeron en la realización de esta tesis.

## **RESUMEN**

El acuífero del Arroyo Alamar, en la ciudad de Tijuana, Baja California, es una de las escasas fuentes de agua con que cuenta esta urbe. En el área recorrida por el Alamar se realizan diversas actividades que, aunadas a la falta de medidas de control y vigilancia, inciden en la contaminación del lugar. En el presente estudio se evaluó el peligro de contaminación al que se encuentra expuesto este acuífero, mediante la interacción entre la vulnerabilidad intrínseca y la carga contaminante a la que es sometido. Para estimar la carga contaminante se empleó la metodología POSH. Con el uso del sistema de información geográfica Arc View se generaron tres mapas: el obtenido como resultado del inventario de fuentes potenciales de contaminación, con su ubicación geográfica; el de carga contaminante y el de peligro de contaminación. La mayor concentración de fuentes potencialmente contaminantes se localizó en la zona norte, específicamente en la porción más occidental y en la central, las que son las más urbanizadas. El acuífero está siendo sometido a cargas contaminantes en aproximadamente la mitad de su área, de acuerdo con las fuentes contaminantes contempladas en el estudio. De la misma manera, la mitad de la superficie de este cuerpo de agua está expuesta a la contaminación, como resultado de la interacción entre sus propiedades físicas (vulnerabilidad) y las características de la carga contaminante. Los resultados obtenidos en este trabajo pueden ser empleados para la protección de este acuífero.

## **ABSTRACT**

The Alamar Creek aquifer is one of the few sources of available water to the city of Tijuana, Baja California. Various activities are carried out in the Alamar area, coupled with the lack of control and surveillance measures, affecting pollution. The present study assessed the contamination risk to which this aquifer is exposed, through interaction between the inherent vulnerability and the pollutant load to which it is subjected. POSH methodology was used to estimate the pollutant load. Three maps were generated with the use of Geographic Information System Arc View: the map of the inventory of potential sources of pollution, with its geographical location; the map of pollutant load and the map of contamination risk. The largest concentration of potentially polluting sources is located in the north, specifically in the western portion and the core, which are the most urbanized. According to sources pollutants covered by the study, the aquifer is being subjected to pollution loads in about half of its area. By the same token, half the surface of this body of water is exposed to contamination as a result of the interaction between its physical properties (vulnerability) and the characteristics of the pollutant load. The results of this work can be employed to protect this aquifer.

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I MARCO DE REFERENCIA.</b>	<b>7</b>
I.1 Agua subterránea.	7
I.1.1 Importancia.	7
I.1.2 Conceptos relacionados.	9
I.2 Contaminación del agua subterránea.	10
I.2.1 Vulnerabilidad.	13
I.2.2 Fuentes de contaminación potencial y carga contaminante asociada.	14
I.2.3 Peligro de contaminación.	16
I.3 Protección de la calidad del agua subterránea.	18
I.4 Marco normativo para la protección del agua subterránea en México.	19
<b>CAPÍTULO II CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO.</b>	<b>27</b>
II.1 Características físicas.	27
II.1.1 Localización del área.	27
II.1.2 Hidrología.	30
II.1.3 Litología.	32
II.1.4 Topografía.	32
II.1.5 Suelos.	33
II.1.6 Clima.	34
II.2 Importancia del agua aportada por el acuífero del Arroyo Alamar.	34
II.3 Usos del suelo.	35
II.4 Problemas presentados.	36
II.4.1 Infraestructura	36
II.4.2 Asentamientos irregulares.	37
II.4.3 Actividad agropecuaria.	38
II.4.4 Actividad extractiva.	39
II.4.5 Actividad industrial.	39

II.4.6	Contaminación del área.	40
II.5	Estudios previos del área.	42

**CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO. 48**

III.1	Delimitación del área de estudio.	48
III.2	Inventario de fuentes contaminantes.	53
III.3	Clasificación y estimación de la carga contaminante (Método POSH).	58
III.4	Elaboración del mapa de carga contaminante.	63
III.5	Estimación de la vulnerabilidad (Método DRASTIC).	64
III.6	Evaluación del peligro de contaminación.	65

**CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN. 67**

IV.1	Evaluación de la carga contaminante.	67
IV.1.1	Inventario de fuentes contaminantes.	67
IV.1.2	Estimación de la carga contaminante del acuífero.	74
IV.2	Mapa de vulnerabilidad.	79
IV.3	Evaluación del peligro de contaminación.	83

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. 88**

**BIBLIOGRAFÍA 1-5**

**ANEXOS i-xv**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Título</b>	<b>Página</b>
I.1	Criterios de clasificación para las fuentes contaminantes y tipos.	14
I.2	Normatividad para la protección del agua subterránea en México.	20
II.1	Unidades topográficas, geología y pendientes dominantes en el Arroyo Alamar.	33
III.1	Resumen de las actividades potencialmente generadoras de una carga contaminante al subsuelo.	53
III.2	Fuentes de información empleadas para el inventario de los diferentes tipos de actividades generadoras de carga contaminante al acuífero del Arroyo Alamar.	57
III.3	Clasificación y categorización de fuentes de contaminación difusa de acuerdo al método POSH.	61
III.4	Clasificación y categorización de fuentes puntuales de contaminación de acuerdo al método POSH.	62
III.5	Matriz para evaluar el peligro de contaminación del acuífero del Arroyo Alamar.	66

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Título</b>	<b>Página</b>
I.1	Ciclo hidrológico.	8
I.2	Procesos comunes de contaminación del agua subterránea.	11
I.3	Esquema conceptual para la evaluación del peligro de los recursos hídricos subterráneos.	17
II.1	Subcuenca del Arroyo Alamar.	28
II.2	Fragmentación física del Arroyo Alamar en tres zonas.	29
II.3	Área del acuífero del Arroyo Alamar.	31
III.1	Área del acuífero del Arroyo Alamar. (A) Cuadrícula del área de estudio. (B) Contorno del acuífero sobre imagen satelital.	49
III.2	Parteaguas del Arroyo Alamar. (A)Parteaguas de la ciudad de Tijuana (12, 13 y 14: Arroyo Alamar. (B)Parteaguas del Alamar.	51
III.3	Delimitación del área de estudio. (A) Superposición de los parteaguas, el acuífero y el área de estudio. (B) Área de estudio.	52
III.4	Metodologías para la recolección de datos para detectar fuentes potenciales de contaminación del agua subterránea.	56
IV.1	Imagen satelital de la localización geográfica de las fuentes contaminantes potenciales del acuífero del Arroyo Alamar.	68
IV.2	Localización geográfica de las fuentes contaminantes potenciales del acuífero del Arroyo Alamar.	69
IV.3	Porcentaje de fuentes contaminantes, por tipo de actividad.	70
IV.4	Porcentaje de sectores industriales identificados en al área de estudio.	73
IV.5	Porcentaje de potencial de carga contaminante de acuerdo al tipo de actividad contaminante.	74
IV.6	Mapa de carga contaminante del acuífero del Arroyo Alamar.	75
IV.7	Porcentaje de los potenciales de carga contaminante por cada	76

	zona del acuífero.	
IV.8	Porcentaje de los potenciales de carga contaminante en toda el área del acuífero.	78
IV.9	Mapa de vulnerabilidad del acuífero del Arroyo Alamar.	80
IV.10	Porcentaje del índice de vulnerabilidad por cada zona del acuífero.	81
IV.11	Porcentaje de los índices de vulnerabilidad en toda el área del acuífero.	82
IV.12	Mapa de peligro de contaminación del acuífero del Arroyo Alamar.	84
IV.13	Porcentaje del índice de vulnerabilidad por cada zona del acuífero.	85
IV.14	Porcentaje del peligro de contaminación en toda el área del acuífero.	86

## **INTRODUCCIÓN.**

El agua, en general, y la subterránea en particular, es un recurso limitado en nuestro planeta. El incremento en la demanda y la disminución en la disponibilidad, fundamentalmente por deterioro en su calidad, han generado y generan problemas cada vez más graves para el abastecimiento tanto a nivel local como regional, e incluso a nivel global. Esta problemática, se vino manifestando en forma creciente durante el pasado siglo, y de acuerdo a la tendencia actual, es previsible que continúe en ascenso (Auge 2006). El vertiginoso aumento de las actividades humanas, a consecuencia del crecimiento poblacional, el cual ha traído aparejado, un incremento en el consumo para la producción de bienes y un aumento consecuente en la contaminación generada; han comprometido la disponibilidad de ese recurso (Yoshinaga y Albuquerque, 2002).

La escasez de agua dulce es un factor limitante para el desarrollo regional, pudiendo ser de origen natural o ser provocada por el hombre (Yoshinaga y Albuquerque, 2002). El agua de origen subterráneo posee un notorio predominio respecto a la superficial para abastecimiento humano. Esto se debe a varias causas, entre las que se destacan su menor costo, pues no necesita tratamiento, y por su mejor calidad, al estar más protegida de la contaminación (Auge 2006).

Dentro de este contexto se inserta la ciudad de Tijuana, en Baja California. En esta, el agua constituye uno de los factores de desarrollo urbano más importantes a tener en consideración, sobre todo por la ubicación geográfica y las condiciones climáticas, las cuales favorecen la escasez de este recurso en la región (SEDUM, 2002). De ahí que el abastecimiento de agua de la mencionada ciudad constituya una gran preocupación en la actualidad.

### **Antecedentes del problema.**

La ciudad de Tijuana se surte principalmente de agua proveniente de fuentes superficiales, y en menor medida, de fuentes de agua subterránea. El agua de origen superficial proviene de dos presas y de acueductos. Entre estas se encuentran la presa Abelardo L. Rodríguez, que

recoge agua de origen pluvial y recibe agua de los Ríos Las Palmas y Tijuana, y la presa El Carrizo, que recibe agua conducida por el acueducto Río Colorado- Tijuana, la cual es transportada desde el Valle de Mexicali hasta el mencionado embalse con un costo de 1.00 dólar por m<sup>3</sup> de agua (SEDUM, 2002; Sánchez, 2006). Teniendo en cuenta las características climatológicas y de urbanización de la mencionada ciudad; la dependencia del bombeo de agua del Río Colorado, desde el Valle de Mexicali y, por último; el hecho de que las fuentes superficiales de este líquido en la región se hallan expuestas en mayor medida a la contaminación; la atención se centra en los acuíferos con que cuenta la urbe.

En la ciudad de Tijuana el agua de origen subterráneo es extraída de dos zonas: la que subyace bajo el río La Misión y la correspondiente a los sub-álveos del Río Tijuana- Arroyo Alamar, que se encuentran dentro del perímetro urbano de la ciudad. A los fines de este trabajo la atención se centrará en el acuífero que se ubica en el subsuelo del Arroyo Alamar.

El Arroyo Alamar forma parte del sistema hidrológico de la cuenca del Río Tijuana. Este cauce de agua recorre a la ciudad de Tijuana por 9.8 km, que van desde el puente Cañón del Padre hasta el tramo revestido de concreto, de 2.5 km, ubicado a la altura de la central camionera de la misma ciudad. Con posterioridad el mencionado arroyo se une al Río Tijuana, el cual desemboca al océano Pacífico en Imperial Beach, en el condado de San Diego (Michel y Graizbord, 2002).

En la actualidad la condición de abastecedor de agua del Arroyo Alamar está amenazada por los problemas de contaminación ambiental que este enfrenta. De acuerdo a estudios realizados (Guzmán, 1998; Wakida *et al.*, 2005) el acuífero conformado tanto por el Río Tijuana como por el Arroyo Alamar, se encuentra contaminado. A este fenómeno contribuyen la carencia de infraestructura de saneamiento y la falta de control urbano-administrativo sobre las actividades que se realizan en el área. Entre estas actividades se hallan los asentamientos irregulares, la agricultura, la ganadería, la extracción de productos pétreos y la industria (IMPLAN, 2007; SEDESOL-IMPLAN, 2005).

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CNA) en el área de estudio existían 167 obras de aprovechamiento de agua subterránea, hasta 1990. De este total, para 1999, sólo quedaban en operación ocho obras (CNA, 1999). Las restantes, fueron dadas de baja en 1991, debido a que la calidad del agua extraída no era adecuada para uso y consumo humano. El agua extraída del acuífero del Arroyo Alamar no cumple con los límites máximos permitidos por la NOM-127-SSA1-1994, por lo cual se envía a la planta potabilizadora Monte de los Olivos, para su tratamiento (CESPT, 2006, citado en Gutiérrez, 2006).

### **Planteamiento del problema.**

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CNA), hasta 1999, el acuífero del Arroyo Alamar aportaba una cantidad de agua importante para el abastecimiento de un porcentaje significativo de la población, esta fue estimada en 14 Mm<sup>3</sup>/ año. Este potencial representaba hasta un 20 por ciento del consumo de la ciudad de Tijuana (CNA, 1999); sin embargo estudios más recientes indican que esta urbe depende en un 90 por ciento del agua importada desde el Río Colorado (Wakida *et al.*, 2005). Ambos estudios coinciden en que no se recomienda el uso directo de esta agua para el consumo humano, debido a que su calidad no cumple con los parámetros establecidos. En la actualidad, uno de los mayores problemas que enfrenta la zona abarcada por el acuífero del Arroyo Alamar es la contaminación.

La zona recorrida por el Arroyo Alamar y su acuífero está siendo afectada por numerosos problemas relacionados con las actividades que se realizan alrededor de su entorno; así como con la falta de políticas ambientales, controles e instrumentos necesarios para evitar un mayor deterioro ambiental. Estos problemas, a su vez, se traducen en un incremento en el peligro de contaminación del acuífero del mismo nombre y en una disminución en la calidad del agua obtenida a partir de este.

### **Justificación.**

El agua es un recurso de vital importancia, y merece especial atención en las ciudades con escasez en las fuentes de abasto de este líquido, como lo es Tijuana. El acuífero del Arroyo

Alamar constituye una de las pocas fuentes de agua subterránea con que se abastece dicha urbe, que aunque con un limitado aporte, tiene especial significación, dadas las características de la región. Con el fin de garantizar la calidad adecuada del agua que aporta esta fuente subterránea se requiere su protección. De ahí la necesidad de evaluar el peligro de contaminación que el mencionado acuífero posee. Para conseguir este propósito se hace necesaria la realización de un análisis de la interacción entre la vulnerabilidad y la carga contaminante impuesta en el área que abarca el acuífero.

No obstante a que el volumen de agua del acuífero en cuestión pudiera parecer poco significativo para el consumo humano, es importante considerar su relevancia como factor primordial en los usos ambientales e igualmente en la perspectiva de que el Arroyo Alamar forma parte de una cuenca binacional y por tanto, es pertinente cuidar que no se convierta en fuente de conflicto a partir de la contaminación del agua que conduce.

### **Pregunta de investigación.**

Ante el problema de contaminación presentado en el acuífero del Arroyo Alamar y con el fin de proponer medidas encaminadas a su protección, surge la siguiente interrogación:

¿Cuál es el peligro de contaminación al que se halla expuesto el acuífero del Arroyo Alamar?

### **Hipótesis de trabajo.**

El acuífero del Arroyo Alamar presenta un elevado peligro de contaminación, como consecuencia de su alto grado de vulnerabilidad y de las numerosas fuentes generadoras de carga contaminante que se localizan en el área que este abarca.

### **Objetivo general.**

Determinar el peligro de contaminación al que se halla expuesto el acuífero del Arroyo Alamar.

## **Objetivos específicos.**

1. Realizar un inventario de las fuentes generadoras de cargas contaminantes localizadas en el área de estudio.
2. Estimar la carga contaminante a la que se halla sometido el acuífero del Arroyo Alamar y generar un mapa de carga contaminante.
3. Evaluar el peligro de contaminación que presenta el acuífero, mediante un análisis de la interacción entre su vulnerabilidad y la carga contaminante que se aplica o podría ser aplicada en el medio subterráneo, como resultado de la actividad humana.
4. Generar un mapa de peligro de contaminación del acuífero.

Para alcanzar los objetivos del presente trabajo se emplearon diferentes técnicas y métodos. De esta manera el inventario de las fuentes contaminantes fue diseñado siguiendo lo propuesto por Foster *et al.* (2002) y se realizó a partir de la evaluación de gabinete de fuentes de información secundaria y mediante el reconocimiento directo en campo. Por otra parte, para clasificar y estimar la carga contaminante generada se empleó el método POSH (Foster *et al.*, 2002). Por último, para conocer el peligro de contaminación al que se halla expuesto el acuífero del Arroyo Alamar se analizó la interacción entre la vulnerabilidad intrínseca del acuífero (Gutiérrez, 2006) y la carga contaminante generada por las actividades identificadas, con este fin se siguió lo planteado por Foster e Hirata (1991).

El presente trabajo constituye una aproximación al problema de degradación ambiental que se viene presentando en el área del acuífero del Arroyo Alamar, desde la perspectiva de la contaminación de su agua subterránea. Entre los aportes realizados por esta tesis se encuentran el ofrecer un listado de las fuentes potencialmente contaminantes que se localizan en las inmediaciones del acuífero, su ubicación geográfica, así como la clasificación de las actividades y la estimación de la carga contaminante que generan. Además brinda una estimación del peligro de contaminación del acuífero, plasmada en un mapa, lo cual constituye una herramienta para que los tomadores de decisiones puedan emprender acciones encaminadas a la protección de esta fuente de agua subterránea.

Entre las limitaciones que enfrentó este trabajo de tesis se hallaron la disponibilidad de información y de tiempo, las cuales no hicieron posible realizar un inventario de cargas contaminantes que considerara las fuentes generadoras en su totalidad. De ahí que el trabajo ofrezca una evaluación del peligro de contaminación del acuífero del Arroyo Alamar, pero sólo basado en las fuentes contaminantes identificadas durante este estudio.

Este documento consta de cuatro capítulos. El primer capítulo corresponde al marco de referencia o conceptual, donde se definen los conceptos básicos para la comprensión de este trabajo. El segundo capítulo hace referencia a las características del área de estudio, ofreciendo una descripción sobre esta y una breve reseña sobre trabajos anteriores basados en la zona en cuestión. El tercer capítulo aborda la metodología empleada para cumplir los objetivos de esta tesis, mientras que en el cuarto se exponen y analizan los resultados obtenidos. Por último, son presentadas las conclusiones del trabajo y algunas recomendaciones dirigidas a la protección del acuífero. Se integra al trabajo una sección de anexos.

# **CAPÍTULO I**

## **MARCO DE REFERENCIA.**

Este capítulo tiene como objetivo brindar un acercamiento hacia la problemática de la contaminación del agua subterránea, recurso natural que constituye el tema central del presente trabajo de tesis. En sus diferentes apartados se definen conceptos o términos claves que serán retomados en capítulos posteriores; así mismo, se hace referencia a algunas normas y leyes que abordan la protección de este recurso.

### **I.1 Agua subterránea.**

El agua subterránea o sub-superficial es aquella que se filtra a través de la superficie de la tierra y es almacenada en los espacios porosos de las rocas o materiales aluviales (arcilla, limo arena y grava), así como en las grietas formadas entre las rocas duras fracturadas (Michel y Graizbord, 2002).

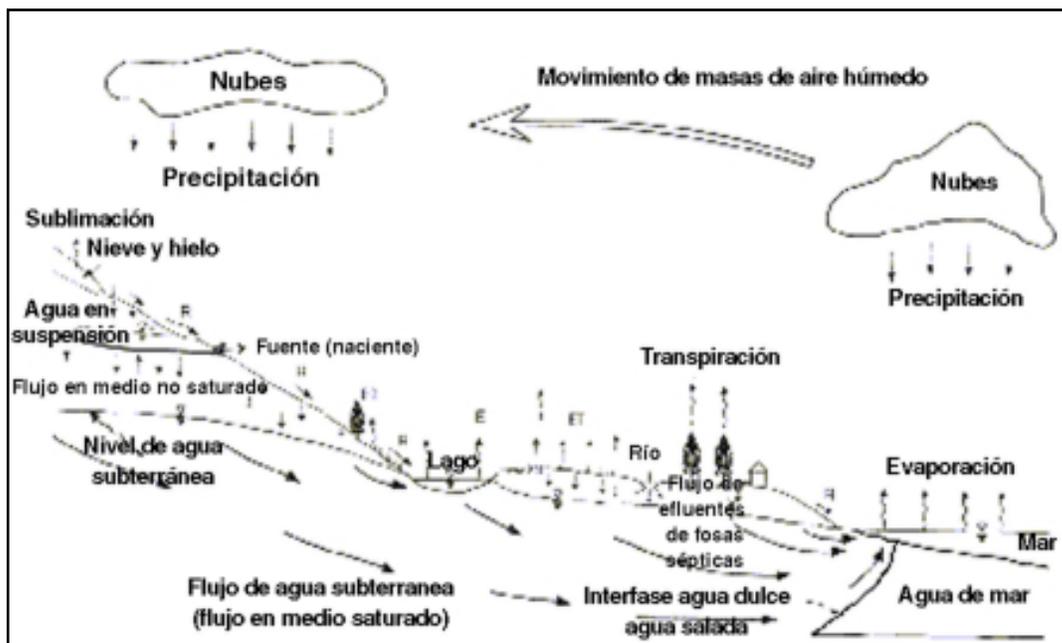
#### **I.1.1 Importancia.**

El agua en general, y la subterránea en particular, es un recurso limitado en nuestro planeta, donde más del 97 por ciento es salada y se concentra en mares y océanos. Del resto, alrededor del 2 por ciento constituye los casquetes polares en forma de hielo. Le sigue en magnitud el agua subterránea, cuya reserva hasta 1000 metros de profundidad se estima en el 0.5 por ciento del total, mientras que el volumen instantáneo de agua superficial llega a sólo el 0.02 por ciento y entre el agua del suelo y la atmosférica, componen algo más del 0.01 por ciento del total (Auge, 2006). El agua subterránea corresponde al 98 por ciento del agua potable disponible en la tierra (Yoshinaga y Albuquerque, 2002).

El ciclo hidrológico es el responsable de la distribución del agua y de su renovabilidad (Figura I.1). En síntesis, el ciclo comienza por el movimiento del agua en sus diversos estados físicos, esta es evaporada de los océanos y se mueve a través de la atmósfera. Después se condensa y cae en forma líquida en el océano y en la tierra, o se vuelve a evaporar sin llegar al mar o a los

suelos. La precipitación que llega a la tierra hace varias trayectorias del ciclo hidrológico. Si la superficie del suelo es porosa, el agua penetra en el suelo a través de la infiltración. El agua infiltrada podrá volver a la atmósfera por la transpiración de las plantas, penetrar en el suelo y salir a través de un curso de agua (tales como manantiales, lagos, por ejemplo), así como también infiltrarse hasta llegar al agua subterránea. De ahí el agua podrá moverse hasta llegar al área de descarga, que podrá ser el océano nuevamente, reiniciando el ciclo (Yoshinaga y Albuquerque, 2002).

*Figura I.1: Ciclo hidrológico.*



*Fuente: Yoshinaga y Albuquerque, 2002.*

El agua subterránea, como parte integrante del ciclo hidrológico sufre la influencia de los procesos de superficie, que interferirán en el comportamiento de la recarga de los acuíferos y las características del agua subterránea (Yoshinaga y Albuquerque, 2002). Este tipo de agua es un recurso natural vital para el suministro de agua potable en el medio urbano y rural, de manera segura y económica y juega un papel fundamental, aunque en general, poco apreciado

en el bienestar del ser humano y de muchos ecosistemas (Foster *et al.*, 2002). El bajo costo y la excelente calidad natural del agua subterránea (no requiere tratamiento y se halla más protegida de la contaminación) ha justificado su amplia utilización para abastecimientos públicos, aún en las regiones más húmedas (Foster e Hirata, 1991).

El incremento en la demanda y la disminución en la disponibilidad, particularmente por deterioro en su calidad, han generado y generan problemas cada vez más graves para el abastecimiento tanto a nivel local como regional y continental (Auge, 2006).

### **I.1.2 Conceptos relacionados.**

El agua del ciclo hidrológico que se infiltra en el suelo atraviesa dos grandes zonas del perfil de infiltración: la zona no saturada, también denominada como zona de aireación o vadosa, y la zona saturada o de saturación (Yoshinaga y Albuquerque, 2002):

- Zona no saturada: es aquella situada entre la superficie del terreno y la zona de saturación del agua, esta se caracteriza por la presencia de poros rellenos de aire y agua.
- Zona saturada: es aquella situada debajo de la superficie freática y se caracteriza por el relleno de todos los poros vacíos por agua y es el área de estudio de la hidrogeología.

La zona no saturada merece especial atención, ya que ella representa la primera y más importante defensa natural contra la contaminación de las aguas subterráneas. Esto no es solamente por su posición estratégica entre la superficie y la napa freática, sino también porque su ambiente es generalmente más favorable para la atenuación y eliminación de los contaminantes (Foster e Hirata, 1991).

Un acuífero es definido por Yoshinaga y Albuquerque (2002), como un tipo de formación geológica o grupo de formaciones, que almacenan agua y permiten el movimiento de determinado volumen bajo condiciones naturales, suministrando agua en cantidades significativas. Por su parte, Foster *et al.* (2002), definen a los acuíferos como formaciones geológicas que contienen recursos hídricos utilizables.

Los acuíferos pueden ser libres o confinados (Yoshinaga y Albuquerque, 2002):

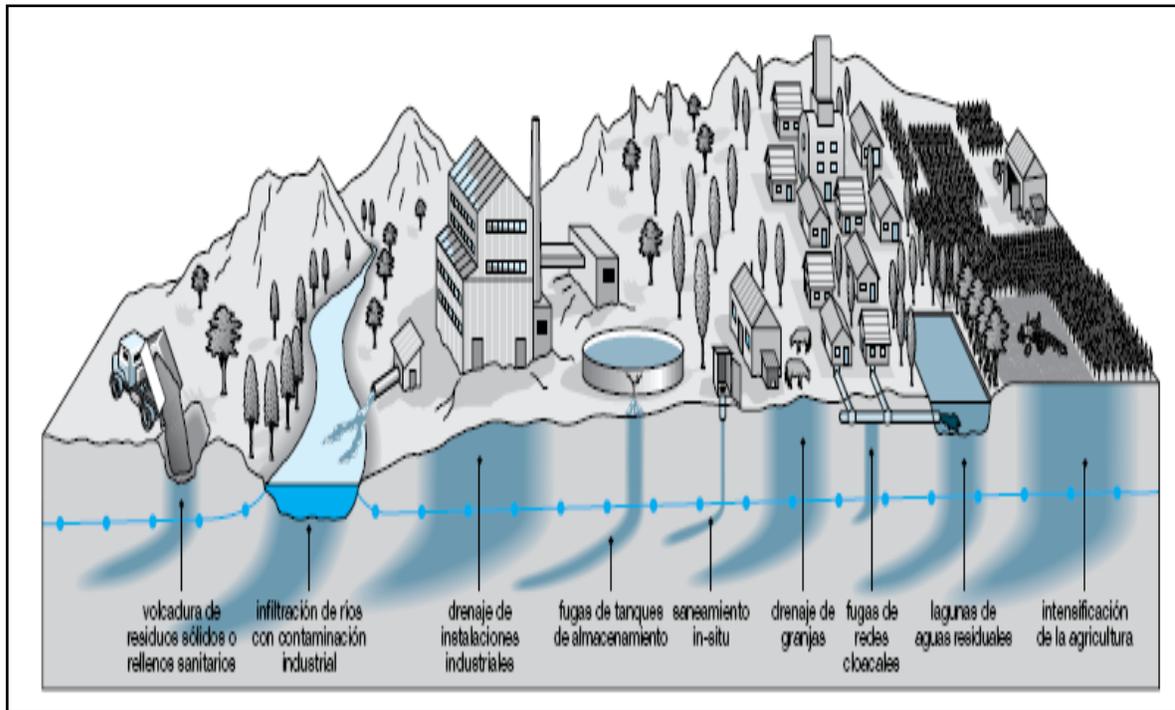
- Acuífero libre: es aquel cuyo límite superior es la superficie freática y su movimiento es controlado por la inclinación de esta, bajo condiciones de presión atmosférica.
- Acuífero confinado: es aquel donde la roca acuífera está limitada por las capas confinantes (impermeables) y esta bajo una presión interna mayor que la atmosférica.

## **I.2 Contaminación del agua subterránea.**

Las aguas subterráneas se originan principalmente por exceso de precipitación que se infiltra directa o indirectamente en la superficie del suelo. Como consecuencia, las actividades humanas en la superficie pueden constituir una amenaza a la calidad del agua subterránea. La contaminación de los acuíferos ocurre cuando la carga de contaminantes sobre el subsuelo, generados por descargas o lixiviados de actividades urbanas, industriales, agrícolas o mineras, no es controlada adecuadamente, y en ciertos componentes excede la capacidad natural de atenuación del subsuelo y estratos suprayacentes (Figura I.2) (Foster *et al.*, 2002).

En el fenómeno de contaminación se incluye a todo proceso que genere un deterioro apreciable en la calidad física, química y/o biológica del agua subterránea. Generalmente la contaminación deriva de acciones artificiales, aunque a veces tiene origen natural, y en otras ocasiones, si bien su génesis es natural, ocurre por inducción artificial (salinización por sobre-explotación de acuíferos costeros) (Auge, 2006). A los fines de este trabajo se centrará la atención en la contaminación artificial.

Figura I.2: Procesos comunes de contaminación del agua subterránea.



Fuente: Foster et al., 2002.

La contaminación artificial es la más frecuente y se le puede clasificar de acuerdo al sitio donde se produce (urbana y rural) o a la actividad que la genera (doméstica, industrial, agropecuaria, entre otras):

- Urbana: originada por vertidos domésticos, residuos de los escapes de los motores, pérdidas en las redes cloacales, lixiviados de depósitos de basura, humos y desechos líquidos, sólidos y semisólidos de la industria.
- Rural: originada por el empleo de fertilizantes y plaguicidas, desechos humanos y animales.
- Doméstica: generada por el vertido de jabones, detergentes, materia orgánica (alimentos, residuos fecales y basura en general). Ocurre cuando no se dispone de redes de drenaje sanitario, el resultado es la generación de ambientes propicios para la reproducción bacteriana y la formación de amoníaco y nitratos.

- Industrial: generada por el vertimiento de líquidos y por la disposición de sólidos y semisólidos; así como por la infiltración de los contaminantes atmosféricos que caen solos o que son arrastrados por la lluvia.
- Agropecuaria: generada por el empleo de plaguicidas y fertilizantes para mejorar la productividad. Los primeros (organoclorados y organofosforados), son altamente tóxicos; mientras que los fertilizantes más comunes están compuestos por materia orgánica y por nitrógeno, fósforo y potasio.

A escala mundial los acuíferos están experimentando una creciente amenaza de contaminación causada por la urbanización, el desarrollo industrial, las actividades agrícolas y la minería (Foster *et al.*, 2002). La degradación del agua subterránea por explotación excesiva y contaminación en las zonas urbanas y rurales, ha generado un grave problema que se ha incrementado notoriamente en los últimos 60 años, debido al aumento de la población, al fuerte crecimiento industrial, y al uso intensivo de plaguicidas y fertilizantes en la agricultura (Auge, 2006).

Los perfiles naturales del subsuelo atenúan muchos contaminantes en forma activa, e históricamente han sido considerados potencialmente eficaces para la disposición segura de excretas humanas y aguas residuales domésticas. Sin embargo, no todos los perfiles del subsuelo y estratos subyacentes son igualmente eficaces en la atenuación de contaminantes, y los acuíferos son particularmente vulnerables a la contaminación cuando, por ejemplo, se encuentran rocas consolidadas altamente fisuradas. El grado de atenuación también variará ampliamente según el tipo de contaminante y el proceso de contaminación en un ambiente determinado (Foster e Hirata, 1991).

La forma de producirse, de propagarse, de situarse y la intensidad de la contaminación, dependen de las características y ubicación de la fuente de contaminación, de las propiedades del contaminante (reactivo - no reactivo) de su movilidad, de la recarga y de las características del medio (permeabilidad, porosidad, heterogeneidad), que inciden en las del agua (gradiente hidráulico, velocidad de flujo). Por ello, existe una variedad muy grande de situaciones, en realidad una para cada caso, lo que hace muy difícil realizar generalizaciones (Auge, 2006).

La preocupación sobre la contaminación del agua subterránea se refiere principalmente a los acuíferos no confinados o freáticos, especialmente donde su zona no saturada es delgada y el nivel freático es poco profundo (Foster *et al.*, 2002).

### **I.2.1 Vulnerabilidad.**

La vulnerabilidad de un acuífero se define, según Yoshinaga y Albuquerque (2002), como la mayor o menor capacidad del mismo de sufrir contaminación. Esta viene dada por las características intrínsecas del acuífero que determinan una mayor o menor susceptibilidad a la contaminación. Por otra parte, de acuerdo con Foster e Hirata (1991), la vulnerabilidad de los acuíferos se define como las características intrínsecas que determinan la susceptibilidad de un acuífero a ser afectado adversamente a causa de una carga contaminante aplicada en la superficie.

Existen dos tipos de vulnerabilidad de las aguas subterráneas (Gutiérrez, 2006):

- Vulnerabilidad intrínseca o natural: es aquella que está en función de las condiciones naturales del acuífero y no considera ni los atributos ni el comportamiento de contaminantes específicos.
- Vulnerabilidad específica: es aquella que hace referencia a un contaminante o un grupo de contaminantes de propiedades similares.

De acuerdo con el propósito de este trabajo será tenido en cuenta el concepto de vulnerabilidad intrínseca. Esta característica de los acuíferos está en función de parámetros primarios como la recarga, el suelo, la zona no saturada y el propio acuífero; y de parámetros secundarios tales como la topografía, la litología y el contacto con aguas superficiales o de mar (Fornez y Llamas, 1998).

El mapeo de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos normalmente es el primer paso en la evaluación del peligro o riesgo de contaminación del agua subterránea y protección de su calidad a escala municipal o provincial (Foster *et al.*, 2002).

### **I.2.2 Fuentes de contaminación potencial y carga contaminante asociada.**

La actividad humana en la superficie del terreno modifica los mecanismos de recarga de los acuíferos e introduce otros nuevos, cambiando la distribución, frecuencia, tasa y calidad de la recarga del agua subterránea. Esto se da especialmente en climas áridos, aunque también ocurre en regiones más húmedas (Foster *et al.*, 2002).

Se considera como fuente contaminante de un acuífero a un sitio que está generando, o puede generar, lixiviados con solutos que al incorporarse a un sistema acuífero alteran la calidad natural del agua subterránea (Figuroa y Sánchez, 2001). En cualquier programa de protección de la calidad del agua subterránea el conocimiento de las fuentes potenciales de contaminación es crítico, ya que son ellas las que generan las descargas de contaminantes en el ambiente subterráneo (Foster *et al.*, 2002).

Las fuentes contaminantes se pueden clasificar de acuerdo a diferentes criterios (Tabla I.1):

*Tabla I.1: Criterios de clasificación para las fuentes contaminantes y tipos.*

<b>Criterios de clasificación</b>	<b>Tipos</b>		
<b>Origen</b>	Natural	Antropogénico	
<b>Geometría</b>	Puntual	Lineal	Difusa
<b>Actividad</b>	Activa	Potencial	
<b>Temporalidad</b>	Pulso	Intermitente	Permanente

*Fuente: Figuroa y Sánchez, 2001.*

La clasificación de las actividades potencialmente contaminantes de acuerdo a su distribución espacial (geometría) provee una impresión directa y visual del tipo de peligro de contaminación del agua subterránea que ellas plantean, así como de las medidas de control que pueden requerirse. De ahí que esta haya sido la clasificación asumida en la realización de este trabajo. De acuerdo con Foster *et al.* (2002), las definiciones son las siguientes:

- Fuentes de contaminación puntual: son aquellas que producen descargas de contaminantes claramente definidas y más concentradas, las cuales facilitan su identificación; sin embargo cuando estas actividades, que producen fuentes de contaminación puntual, son pequeñas y múltiples, terminan por equivaler a una fuente esencialmente difusa en lo que respecta a su identificación y control.
- Fuentes de contaminación difusa: son aquellas que no producen descargas de contaminación del agua subterránea de manera definida en un punto en específico, sino que normalmente impactan en un área, y por lo tanto un volumen, mucho mayor del acuífero.

Desde un punto de vista teórico, la carga contaminante al subsuelo, generada por una actividad antrópica dada, tiene cuatro características fundamentales y semi-independientes (Foster e Hirata, 1991):

- Clase de contaminante involucrado: definida por su persistencia probable en el ambiente subterráneo y por su coeficiente de retardo relacionado con el flujo de agua subterránea.
- Intensidad de la contaminación: definida por la concentración probable del contaminante en el efluente o lixiviado, en relación con los valores guías recomendados por la Organización Mundial de Salud (OMS) para la calidad de agua potable y por la proporción de la recarga del acuífero involucrada en el proceso de contaminación.
- Modo en que el contaminante es descargado al subsuelo: definido por la carga hidráulica (incremento sobre la tasa de recarga natural o sobrecarga hidráulica) asociada con la descarga del contaminante y la profundidad debajo de la superficie del terreno en la cual el efluente o lixiviado contaminado que ingresa es descargado o generado.

- Duración de aplicación de la carga contaminante: definida por la probabilidad de descarga del contaminante al subsuelo (ya sea intencional, incidental o accidentalmente) y por el período durante al cual la carga contaminante será aplicada.

De manera ideal se requiere información sobre cada una de las características anteriormente mencionadas para todas las actividades potencialmente contaminantes significativas. Sería mejor aún si fuera posible estimar las concentraciones reales y los volúmenes de descarga de contaminante al subsuelo. Sin embargo, este ideal no es alcanzado en la práctica, a consecuencia de la gran complejidad, la alta densidad con que frecuentemente se encuentran las fuentes de contaminación y su considerable diversidad (Foster *et al.*, 2002).

La presencia de contaminantes en el subsuelo modifica las tasas naturales de recarga de los acuíferos, ya que estas sustancias generan una carga hidráulica artificial. Este es un factor clave en la determinación del peligro de contaminación de las aguas subterráneas (Foster *et al.*, 1991).

### **I.2.3 Peligro de contaminación.**

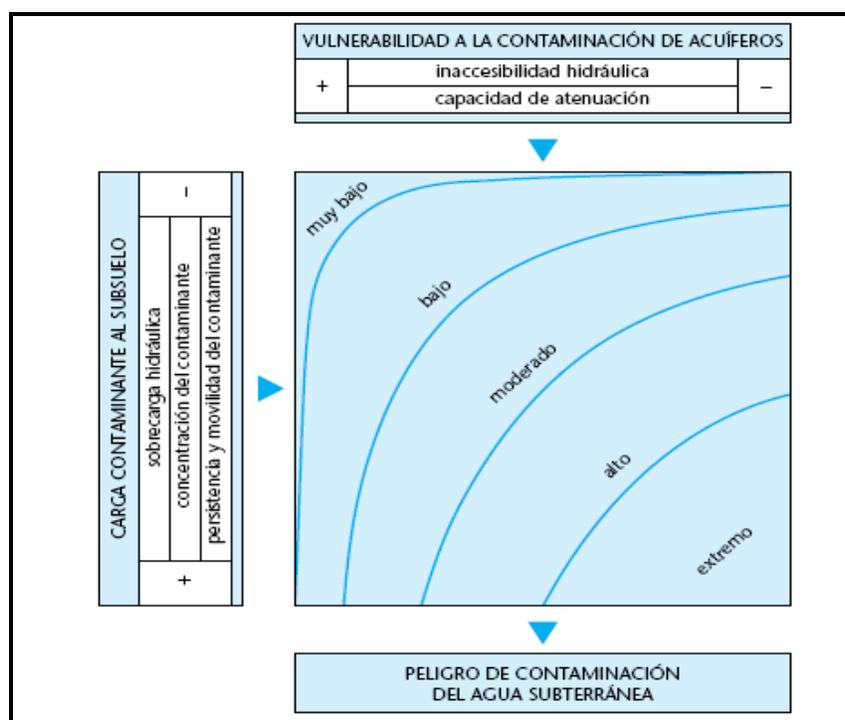
El peligro de contaminación del agua subterránea puede definirse como la posibilidad que un acuífero experimente impactos negativos, a partir de una actividad antrópica dada, hasta un nivel tal que su agua subterránea se torne inaceptable para el consumo humano, de acuerdo con los valores guía de la OMS para calidad de agua potable (Foster *et al.*, 2002).

El uso del término *peligro de contaminación del agua subterránea* definido por los autores Foster *et al.* (2002), y empleado en este trabajo, tiene la misma acepción que el término *riesgo de contaminación del agua subterránea*. El cambio se realizó, de acuerdo con los autores citados, por la necesidad de adecuarlo con lo que es utilizado actualmente en otras áreas de evaluación del riesgo a la salud humana o animal y a los ecosistemas, donde el riesgo se define como el resultado *del peligro adaptado a la escala del impacto*. Esta definición no incluye el impacto de la contaminación sobre la salud humana o animal, o sobre los ecosistemas.

El peligro de contaminación de acuíferos en cualquier localización dada puede ser determinado considerando la interacción entre (Figura I.3):

- Vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, que depende de las características naturales de los estratos que lo separan de la superficie del terreno.
- Carga contaminante sub-superficial que es, será, o podría ser aplicada en el subsuelo como resultado de las actividades humanas.

*Figura I.3: Esquema conceptual para la evaluación del peligro de los recursos hídricos subterráneos.*



*Fuente: Foster e Hirata, 1991.*

Así, en términos prácticos, la evaluación del peligro involucra la consideración de esta interacción (Foster e Hirata, 1991), mediante la superposición de los resultados del inventario de cargas contaminantes al subsuelo con el mapa de vulnerabilidad a la contaminación de

acuíferos. La preocupación más grave surgirá donde se presentan o son proyectadas actividades capaces de generar carga contaminante elevada en un área de alta o extrema vulnerabilidad del acuífero.

Si adoptamos este enfoque podremos tener alta vulnerabilidad, pero ningún peligro de contaminación en los casos en que no exista una carga contaminante significativa al subsuelo y viceversa. Ambas situaciones son perfectamente consistentes en la práctica. Por otra parte, la carga contaminante puede ser controlada o modificada, pero la vulnerabilidad de los acuíferos está determinada esencialmente por el entorno hidrogeológico natural (Foster *et al.*, 2002).

La evaluación del peligro de contaminación de los acuíferos es un prerequisite esencial para la protección de los recursos hídricos subterráneos, ya que identifica aquellas actividades humanas que tienen la mayor probabilidad de tener impactos negativos sobre el acuífero y así indica la priorización de las medidas de control y mitigación necesarias (Foster *et al.*, 2002).

La calidad de las aguas subterráneas es hoy el mayor motivo de preocupación para los organismos de gestión, ya que la contaminación se hace presente ante innumerables elementos contaminantes ya detectados, provenientes de fuentes diversas. En la planificación y gestión de los recursos hídricos se utilizan como estrategias de protección de acuíferos las cartas de vulnerabilidad de acuíferos y riesgo potencial o peligro de contaminación (Yoshinaga y Albuquerque, 2002).

### **I.3 Protección de la calidad del agua subterránea.**

El término protección del agua subterránea se refiere a la conservación de las aguas subterráneas, en términos de cantidad y calidad, que permitirá una explotación eficiente de los acuíferos a largo plazo, especialmente como fuente segura y confiable de abastecimiento de agua potable (Foster *et al.*, 1992).

El restaurar la calidad de un acuífero a su condición natural, previa a la contaminación, es prácticamente imposible y en este sentido, en la generalidad, sólo pueden lograrse mejoramientos parciales, mediante tecnologías que requieren elevados costos. Es por eso que las medidas para proteger al agua subterránea de la contaminación, están orientadas a prevenirla, a eliminar sus consecuencias y a preservar su calidad, para asegurar un uso efectivo de la misma. Dado que la contaminación del agua subterránea está íntimamente relacionada con el estado del agua superficial, la atmósfera, la lluvia y el suelo, su protección debe encararse al mismo tiempo y sobre la base de pautas que apunten a la preservación del ambiente en forma global (Auge, 2006).

La implementación de una política de protección de las aguas subterráneas tiene su costo, tanto en la etapa de su introducción como durante su ejecución en el largo plazo, pero son necesarias para evitar costos aún mayores, en términos de pérdida de la inversión en obras de captación, riesgos para la salud pública debido a la reducción en el suministro o inadecuada calidad del agua y daños irreversibles de los acuíferos y del medio ambiente (Foster *et al.*, 1992).

El primer paso para un adecuado sistema de prevención hidrogeológica, es la instalación de una red para el monitoreo de niveles y calidad del agua subterránea. El término monitoreo implica seguimiento y por lo tanto, se refiere a mediciones y muestreos reiterados (periódicos) (Auge, 2006).

Otros factores trascendentes en la prevención para evitar el deterioro del agua subterránea son: la educación, la difusión, las normas legales y el control que asegure su cumplimiento (Auge, 2006).

#### **I.4 Marco normativo para la protección del agua subterránea en México.**

Una de las herramientas fundamentales en la lucha para evitar el deterioro del agua subterránea, es la normatividad vigente en el país, conformada por normas legales, regulaciones y leyes, que abordan la utilización, las concentraciones máximas admitidas para

diferentes usos y las cargas de contaminantes permitidas en los efluentes industriales, urbanos y agrícolas. Esta normatividad debe ir acompañada de un control adecuado que asegure su cumplimiento, con el propósito de asegurar el éxito.

La mayoría de los países en desarrollo dispone de un marco legal adecuado que regula el uso y la preservación de los recursos naturales, pero lamentablemente no sucede lo mismo con los organismos de control y por ello, su aplicación resulta muy difícil y generalmente, imposible de concretar (Auge, 2006).

La protección de acuíferos en México está contemplada en varios instrumentos jurídicos, de diferente jerarquía. Estos se resumen a continuación en la Tabla I.2:

*Tabla I.2: Normatividad para la protección del agua subterránea en México.*

Nivel	Ley/ Norma	Sección/ Artículo
Federal	Constitución Mexicana	<p>Artículo 27, párrafo quinto:  <i>(...) las aguas del subsuelo pueden ser libremente alumbradas mediante obras artificiales y apropiarse por el dueño del terreno; pero, cuando lo exija el interés público o se afecten otros aprovechamientos, el Ejecutivo Federal podrá reglamentar su extracción y utilización y aún establecer zonas vedadas al igual que para las demás aguas de propiedad nacional (...)</i></p>
Federal	Ley de Aguas Nacionales (LAN)	<p>Artículo 86, fracción III:  <i>(...) la Autoridad del Agua tiene a su cargo formular programas integrales de protección de los recursos hídricos en cuencas hidrológicas y acuíferos considerando las relaciones existentes entre los usos del suelo y la cantidad y calidad del agua.</i></p>

Federal	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)	<p>Título tercero, capítulo I, artículo 88:</p> <p><i>Para el aprovechamiento racional del agua y los ecosistemas acuáticos se considerarán los siguientes criterios:</i></p> <p><i>III. Para mantener la integridad y el equilibrio de los elementos naturales que intervienen en el ciclo hidrológico, se deberá considerar la protección de suelos y áreas boscosas y selváticas y el mantenimiento de caudales básicos de las corrientes de agua, y la capacidad de recarga de los acuíferos, y</i></p> <p><i>IV. La preservación y el aprovechamiento sustentable del agua, así como de los ecosistemas acuáticos es responsabilidad de sus usuarios, así como de quienes realicen obras o actividades que afecten dichos recursos.</i></p>
Federal	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)	<p>Título cuarto, capítulo III, artículo 117:</p> <p><i>I. La prevención y control de la contaminación del agua, es fundamental para evitar que se reduzca su disponibilidad y para proteger los ecosistemas del país;</i></p> <p><i>II. Corresponde al Estado y la sociedad prevenir la contaminación de ríos, cuencas, vasos, aguas marinas y demás depósitos y corrientes de agua, incluyendo las aguas del subsuelo;</i></p> <p><i>III. El aprovechamiento del agua en actividades productivas susceptibles de producir su contaminación, conlleva la responsabilidad del tratamiento de las descargas, para reintegrarla en condiciones adecuadas para su utilización en otras actividades y para mantener el equilibrio de los ecosistemas;</i></p> <p><i>IV. Las aguas residuales de origen urbano deben recibir tratamiento previo a su descarga en ríos, cuencas, vasos, aguas marinas y demás</i></p>

		<p><i>depósitos o corrientes de agua, incluyendo las aguas del subsuelo, y</i></p> <p><i>V. La participación y corresponsabilidad de la sociedad es condición indispensable para evitar la contaminación del agua.</i></p>
Federal	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)	<p>Título cuarto, capítulo III, artículo 118:</p> <p><i>Los criterios para la prevención y control de la contaminación del agua serán considerados en:</i></p> <p><i>V. Las concesiones, asignaciones, permisos y en general autorizaciones que deban obtener los concesionarios, asignatarios o permisionarios, y en general los usuarios de las aguas propiedad de la nación, para infiltrar aguas residuales en los terrenos, o para descargarlas en otros cuerpos receptores distintos de los alcantarillados de las poblaciones; (...)</i></p>
Federal	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)	<p>Título cuarto, capítulo III, artículo 120:</p> <p><i>I. Las descargas de origen industrial;</i></p> <p><i>II. Las descargas de origen municipal y su mezcla incontrolada con otras descargas;</i></p> <p><i>III. Las descargas derivadas de actividades agropecuarias;</i></p> <p><i>IV. Las descargas de desechos, sustancias o residuos generados en las actividades de extracción de recursos no renovables;</i></p> <p><i>V. La aplicación de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas;</i></p> <p><i>VI.- Las infiltraciones que afecten los mantos acuíferos; y</i></p> <p><i>VII.- El vertimiento de residuos sólidos, materiales peligrosos y lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales, en cuerpos y corrientes de agua.</i></p>
Federal	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)	<p>Título cuarto, capítulo III, artículo 121:</p> <p><i>No podrán descargarse o infiltrarse en cualquier cuerpo o corriente de agua o en el</i></p>

		<i>suelo o subsuelo, aguas residuales que contengan contaminantes, sin previo tratamiento y el permiso o autorización de la autoridad federal, o de la autoridad local en los casos de descargas en aguas de jurisdicción local o a los sistemas de drenaje y alcantarillado de los centros de población.</i>
Federal	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)	<p>Título cuarto, capítulo III, artículo 122:</p> <p><i>Las aguas residuales provenientes de usos públicos urbanos y las de usos industriales o agropecuarios que se descarguen en los sistemas de drenaje y alcantarillado de las poblaciones o en las cuencas ríos, cauces, vasos y demás depósitos o corrientes de agua, así como las que por cualquier medio se infiltren en el subsuelo, y en general, las que se derramen en los suelos, deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir:</i></p> <p><i>I. Contaminación de los cuerpos receptores;</i></p> <p><i>II. Interferencias en los procesos de depuración de las aguas; y</i></p> <p><i>III. Trastornos, impedimentos o alteraciones en los correctos aprovechamientos, o en el funcionamiento adecuado de los sistemas, y en la capacidad hidráulica en las cuencas, cauces, vasos, mantos acuíferos y demás depósitos de propiedad nacional, así como de los sistemas de alcantarillado.</i></p>
Federal	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)	<p>Título cuarto, capítulo III, artículo 123:</p> <p><i>Todas las descargas en las redes colectoras, ríos, acuíferos, cuencas, cauces, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua y los derrames de aguas residuales en los suelos o su infiltración en terrenos, deberán satisfacer las normas oficiales mexicanas que para tal efecto se expidan, y en su caso, las condiciones particulares de descarga que</i></p>

		<i>determine la Secretaría o las autoridades locales. Corresponderá a quien genere dichas descargas, realizar el tratamiento previo requerido.</i>
Federal	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)	Título cuarto, capítulo III, artículo 124: <i>Cuando las aguas residuales afecten o puedan afectar fuentes de abastecimiento de agua, la Secretaría lo comunicará a la Secretaría de Salud y negará el permiso o autorización correspondiente, o revocará, y en su caso, ordenará la suspensión del suministro.</i>
Federal	Normas oficiales mexicanas (NOMs)	NOM-001-ECOL-1996: <i>Establecer los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales vertidas a aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta Norma Oficial Mexicana no se aplica a las descargas de aguas provenientes de drenajes pluviales independientes.</i>
Estatal	Programa de Ordenamiento Ecológico de Baja California	Recurso Agua: - <i>“No se permiten edificaciones ni el establecimiento de asentamientos humanos en áreas de recarga de acuíferos.</i> - <i>Se prohíbe alterar áreas esenciales para los procesos de recarga de acuíferos.</i> - <i>En el desarrollo de obras y actividades en cauces, se evitará la afectación al lecho de ríos, arroyos y a los procesos de recarga de acuíferos.”</i> Manejo y conservación de recursos naturales: - <i>“No se permitirá la expansión de las áreas urbanas (...) hacia las zonas de recarga de acuíferos.”</i>
Municipal	Reglamento de Protección al Ambiente para el Municipio de	Artículo 88: <i>“Para el incremento de la calidad y cantidad</i>

	Tijuana	<i>del agua se requiere donde sea posible, la mitigación de los fenómenos de erosión del suelo y evaporación, la protección de los suelos en general, y de las zonas de recarga de los acuíferos, y la captación y aprovechamiento de las aguas pluviales.”</i>
Municipal	Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Tijuana (PDUCPT) 2002-2025	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>“Proteger las zonas de recarga acuífera principalmente en los arroyos Alamar, Florido, Matanuco, Valle de las Palmas, San Antonio y desarrollarlos como corredores ecológicos.</i></li> <li>- <i>Crear un sistema de áreas verdes que integre todos los ríos y arroyos como corredores ecológicos conectados con avenidas reforestadas que a su vez ligen las áreas verdes de la ciudad.”</i></li> </ul>
Municipal	Programa de Medio Ambiente, el PDUCPT 2002-2025	<i>“(…) la administración de los recursos hidráulicos deberá enfocarse en el manejo de cuencas hidrológicas, más que el de las fronteras administrativas y políticas. Con esta filosofía se crearon los consejos de cuenca, que figuran en la Ley de Aguas Nacionales para la regulación de recursos hídricos. El énfasis en la coordinación de los tres niveles de gobierno debe hacerse en estos esquemas, ya que por el momento la competencia y la asignación de recursos a los municipios en materia de servicios de suministro de agua, alcantarillado y tratamiento de aguas residuales no están definidas aún, creando discrepancias entre las necesidades del desarrollo y la política en materia de agua, la cual no debe ser tratada tampoco como una intervención sectorial desligada de los procesos reales y de las expectativas de transformación del territorio. Por lo tanto, en la gestión de este recurso se debe tener como marco de referencia las estrategias de</i>

		<i>desarrollo económico, equilibrio ambiental y ordenamiento territorial, a las que el agua como recurso debe adecuarse en su planificación.”</i>
--	--	---

*Fuente: Elaboración propia con datos de la normatividad vigente.*

En el presente capítulo se ofreció una base conceptual y de referencia con respecto al tema abordado en el trabajo. En el texto de este apartado se hallan los conceptos básicos y definiciones a los cuales se debe remitir el lector en caso de cualquier duda que presente. En este Marco de referencia se establecieron las bases para introducirnos en el tema central del trabajo y constituyó la antesala para adentrarnos en el área de estudio.

## **CAPÍTULO II**

### **CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO.**

Este capítulo tiene como objetivo ofrecer una descripción sobre el área que recorre el Arroyo Alamar, en la ciudad de Tijuana, Baja California y que, a los fines de este trabajo, constituye el área de estudio. De esta manera el presente apartado nos informa acerca de la localización, características físicas y problemas presentados en la zona de interés, así como de estudios previos que han sido realizados en este lugar.

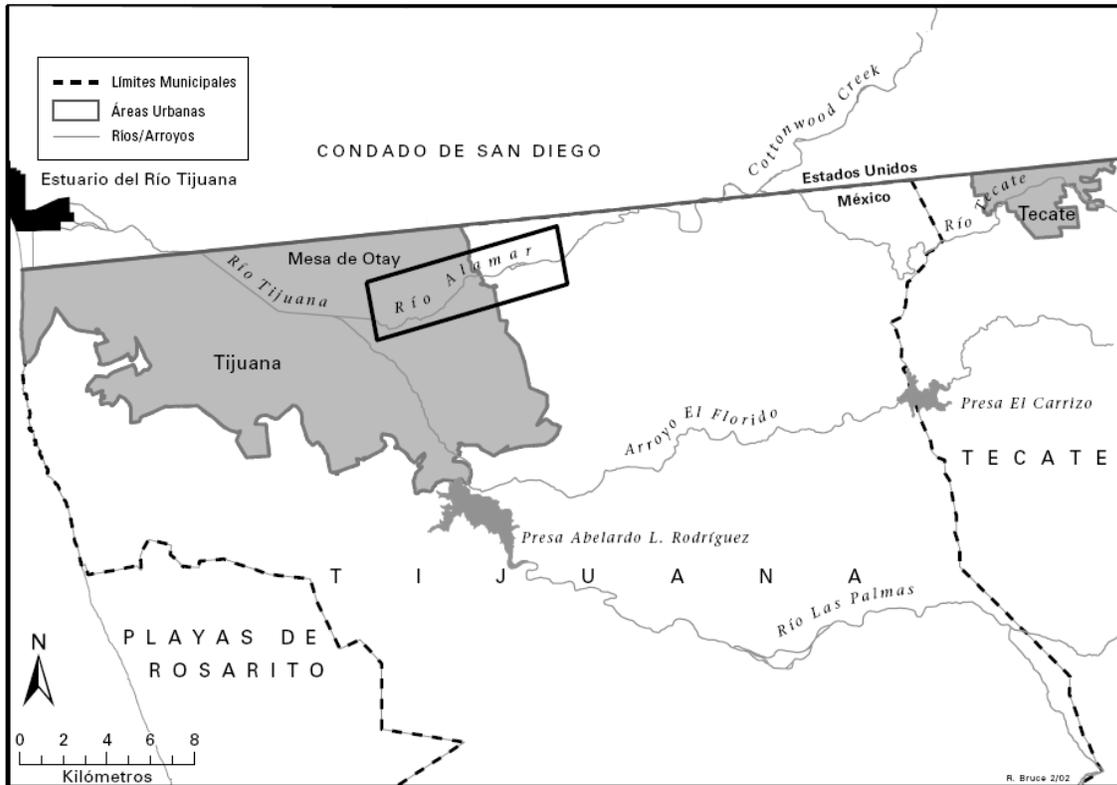
#### **II.1 Características físicas.**

##### **II.1.1 Localización del área.**

El Arroyo Alamar forma parte de la cuenca del Río Tijuana, la cual es compartida con los Estados Unidos y tiene una extensión de 4460 km<sup>2</sup>. En este país se localiza el 27.7 por ciento (1237 km<sup>2</sup>) de la superficie de la mencionada cuenca, que mayormente corresponde a la subcuenca del Arroyo Alamar (Gutiérrez, 2006). En territorio mexicano la cuenca del Río Tijuana se encuentra localizada en el noroeste de la península de Baja California, limitando al norte con los Estados Unidos, al este con el Valle de Tecate, al sur con la Sierra de San Pedro Mártir y al oeste con el Océano Pacífico (CNA, 1999).

El Arroyo Alamar está ubicado en la orilla este del área urbana de Tijuana y fluye de este a oeste, uniendo la parte superior del Río Tecate y del Arroyo Cottonwood, en territorio de Estados Unidos, con la parte baja del Río Tijuana (Figura II.1) (Michel y Graizbord, 2002). Esta subcuenca tiene un área aproximada de 759 km<sup>2</sup> y se localiza entre las coordenadas 32°30'00'' y 32°43'30'' de latitud norte, 117°00'00'' y 116°19'00'' de longitud oeste (CNA, 1993).

Figura II.1: Subcuenca del Arroyo Alamar.



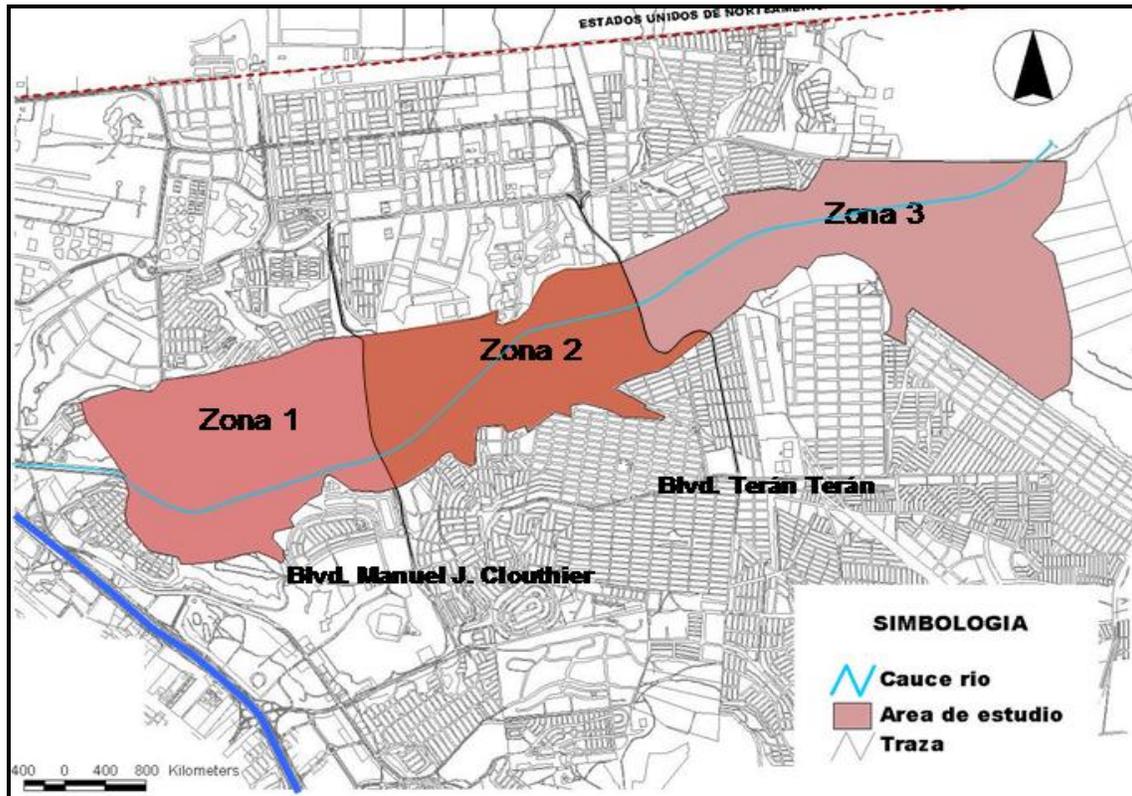
Fuente: Michel y Graizbord, 2002.

El Arroyo Alamar recorre la ciudad de Tijuana desde el puente Cañón del Padre, ubicado en la carretera de cuota Tijuana-Tecate, hasta el área de la bocina de concreto que se encuentra a la altura de la Central Camionera Municipal (Espinoza *et al.*, 2004). Su longitud es de 9.8 km, de los cuales 2.5 se hallan revestidos en concreto en la porción más occidental, cerca de su confluencia con el Río Tijuana, río que posteriormente cruza nuevamente la frontera, desembocando en el Océano Pacífico a la altura de Imperial Beach, California (Ponce *et al.*, 2001).

Este arroyo queda fragmentado físicamente en tres zonas (Figura II.2) por el Boulevard Manuel J. Clouthier (conocido como El Gato Bronco) y el Boulevard Terán Terán. Las tres zonas del Alamar son definidas de la siguiente manera (Michel *et al.*, 2001):

- Zona 1: sección urbanizada. Comienza al final de la canalización del Río Tijuana, justo al sur de la Mesa de Otay y se extiende hasta el puente del Boulevard Manuel J. Clouthier. Es en esta sección el hábitat nativo ha sido más afectado por factores antropogénicos.
- Zona 2: sección de transición. Comienza en el Boulevard Manuel J. Clouthier y se extiende al este hasta el Boulevard Terán Terán.
- Zona 3: sección rural. Comienza a partir del Boulevard Terán Terán y se extiende hasta el puente de la carretera de cuota Tijuana-Tecate.

*Figura II.2: Fragmentación física del Arroyo Alamar en tres zonas.*



*Fuente: Espinoza et al, 2004.*

## II.1.2 Hidrología.

En el “Estudio Geohidrológico del Valle de Tijuana en el estado de Baja California”, realizado por la entonces Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en el año 1979, se reconocieron cuatro unidades geohidrológicas: una unidad permeable, que se considera la de mayor importancia y representa el acuífero en explotación en la ciudad; una unidad semi-permeable, que forma un acuitardo; una unidad de permeabilidad, que puede constituir acuíferos de muy baja permeabilidad y por último una unidad impermeable, no comunicada con los acuíferos y se considera como el límite impermeable (CNA, 1999).

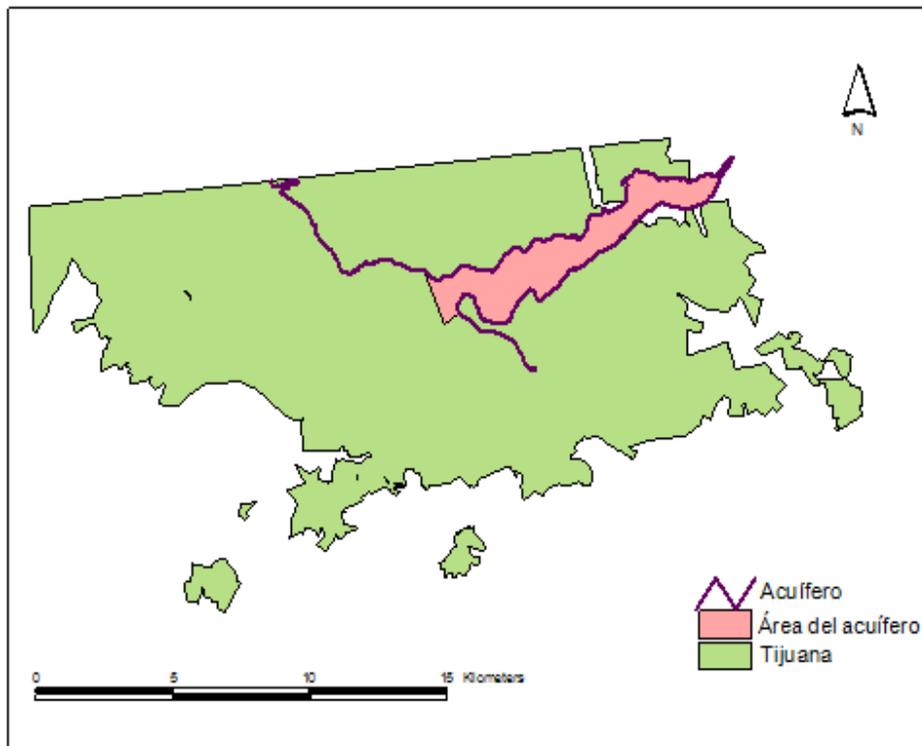
El lecho del Arroyo Alamar es una zona de recarga vital para una extensa cuenca de agua subterránea o acuífero, que yace debajo del mencionado arroyo y del Río Tijuana y que conforman el acuífero en explotación de la ciudad de Tijuana. Este acuífero es de tipo libre y es conocido como el acuífero del Río Tijuana o acuífero Tijuana-Alamar y está geográficamente delimitado por formaciones montañosas al norte y suroeste del Río Tijuana, las formaciones de meseta de la Mesa de Otay, las formaciones montañosas al este en Los Álamos y elevaciones topográficas como el Cerro Colorado, al sureste (Michel *et al.*, 2001).

La recarga de este acuífero la efectúan tanto el subálveo del Río Tijuana como el del Arroyo Alamar (CNA, 1999). Estos, a su vez, son alimentados por un sistema de escurrimientos regionales y locales de tipo superficial, rodeados por cuencas y microcuencas. Cabe mencionar que el Arroyo Alamar constituye un área de recarga acuífera de gran importancia en la región, no sólo por la aridez y la escasez de este recurso; sino por la pérdida de la capacidad de recarga acuífera que presenta el flujo superficial de agua del Río Tijuana, a consecuencia de su canalización en concreto (SEDESOL-IMPLAN, 2005).

El acuífero que yace bajo el Arroyo Alamar (Figura II.3) se encuentra en equilibrio con una recarga media anual de  $19 \text{ Mm}^3$  y una extracción de  $17 \text{ Mm}^3$ , lo que da como resultado  $2 \text{ Mm}^3$  disponibles (CEA, 2003). En el área de estudio, hasta 1990, existían 29 pozos y 138 norias, para un total de 167 obras de aprovechamiento de agua subterránea, de estos, siete pozos fueron concesión de la Comisión de Servicios Públicos de Tijuana (CESPT) y el resto de

particulares. Del total de obras de aprovechamiento sólo ocho estaban activas para 1999 (CNA, 1999). Para el año 2006 la CESPT mantenía en operación un solo pozo, los seis pozos restantes operados por esta entidad, fueron dados de baja en 1991, debido a que la calidad del agua extraída no era adecuada para uso y consumo humano. El agua que está siendo extraída de este acuífero no cumple con los límites máximos permitidos por la NOM-127-SSA1-1994, por lo cual se envía a la planta potabilizadora Monte de los Olivos, para su tratamiento (CESPT, 2006, citado en Gutiérrez, 2006).

*Figura II.3: Área del acuífero del Arroyo Alamar.*



*Fuente: Gutiérrez, 2006.*

### **II.1.3 Litología.**

El acuífero del Arroyo Alamar se compone de grava y arena, seguida en importancia por limo y arcilla, con permeabilidad baja. Esta sedimentación es de origen aluvial y forma parte de un relleno intermontano. Gran parte del cauce está formado por rocas sedimentarias, basaltos, conglomerados e ígneas extrusivas así como de tipo aluvial, areniscas, areniscas-conglomerado y limos medio compactados (SEDESOL-IMPLAN, 2005).

### **II.1.4 Topografía.**

El cauce del Alamar está formado por distintas terrazas, mesetas y lomeríos que tienen una antigüedad de varios millones de años, lo que indica la existencia de fallas e inclinaciones de bloques terrestres, características que explican la estructura topográfica de esta zona (SEDESOL-IMPLAN, 2005).

En la Tabla II.1 se muestran las cuatro unidades topográficas que conforman la zona, su geología y pendientes dominantes (IMPLAN, 2007).

*Tabla II.1: Unidades topográficas, geología y pendientes dominantes en el Arroyo Alamar.*

<b>Unidades topográficas</b>	<b>Geología</b>	<b>Pendientes</b>
Canal principal del arroyo	Depósito de aluvión producto del aporte de varios arroyos	Pendientes mínimas, oscilan de 0 a 4%
Área de inundación del arroyo	Material no consolidado como las areniscas con posibilidades altas para infiltrar agua	Adyacente al canal principal. Pendientes mínimas < 4%. Altas probabilidades de inundación.
Planicie de inundación	Material no consolidado como las areniscas con probabilidades altas de infiltrar agua.	Pendientes de 4% a 10%. Bajas probabilidades de inundación. Cubre gran parte de la zona de estudio.
Pie de monte	Material de aluvión y areniscas conglomeradas con probabilidades altas de infiltración de agua. Se considera la zona de mayor importancia para la recarga del acuífero.	Pendientes entre 10% y 15%.
Laderas	Areniscas conglomeradas y conglomerados	Pendientes altas, > 15%.

*Fuente: IMPLAN, 2007.*

### **II.1.5 Suelos.**

Las zonas de los ríos en la ciudad de Tijuana se caracterizan por la abundancia de arenas sueltas, de tamaño uniforme, y saturadas por el nivel freático, cuya presencia se localiza generalmente a cuatro o cinco metros de profundidad. Le subyacen a estas capas los materiales del basamento de la ciudad formados por conglomerados y rocas sedimentarias (IMPLAN, 2007).

La mayor parte de la cuenca del arroyo está formada por suelos de tipo vertisoles crómicos con fluvisol eutrigo de textura fina, además regosoles crómicos con fluvisol eutrigo de textura fina y litosoles con feosem haplico de textura media, estos dos últimos mayormente en las laderas (SEDESOL-IMPLAN, 2005).

### **II.1.6 Clima.**

El clima general del municipio de Tijuana es seco templado, de tipo mediterráneo, el cual se caracteriza por inviernos fríos y lluviosos y veranos secos. Tijuana cuenta con una precipitación media anual de 258.5 mm, temperatura promedio de 17.5 °C y evaporación de 1630.4 mm (CNA, 1999). En verano la radiación solar eleva la temperatura al medio día por encima de los 26 °C, mientras que en invierno las masas de aire polar marítimo favorecen los días nublados que atemperan el clima de la región. La tasa de evaporación anual es alta, la media es de 161 cm por año (IMPLAN, 2002). La precipitación, temperatura del aire y evapotranspiración real son factores climáticos que condicionan la presencia a poca profundidad de la superficie freática, en una zona de recarga (CNA, 1999).

Bioclimáticamente el Arroyo Alamar, y en general el municipio de Tijuana se ubica dentro del piso climático termo-mediterráneo, donde la vegetación climática son comunidades de chaparrales y matorrales costeros californiano-suculento (SEDESOL-IMPLAN, 2005).

### **II.2 Importancia del agua aportada por el acuífero del Arroyo Alamar.**

Al no haber sido revestida en concreto la mayor parte del cauce del Arroyo Alamar, este funciona como área de recarga del acuífero que subyace bajo él y del Río Tijuana. Los canales de concreto eliminan los ecosistemas riparios que funcionan como corredores ecológicos. Los ríos naturales conservan altos niveles de mantos freáticos que sostienen la abundante fauna y flora endémicas, que son especialmente valiosas en las áreas desérticas y áridas, como lo es la ciudad de Tijuana (Michel y Graizbord, 2002).

No obstante a que los escasos pozos ubicados en dicho acuífero proveen una pequeña cantidad de agua, esta es de importancia para el suministro de la ciudad de Tijuana (Michel y Graizbord, 2002). La cantidad de agua que puede suministrar el acuífero, es importante para el abastecimiento de un porcentaje significativo de la población. Este potencial representa aproximadamente un 10 por ciento del consumo actual de la ciudad, sin embargo no se recomienda el uso directo para el consumo humano sino en el riego de áreas verdes y recarga al acuífero para mantener zonas de humedad, entre otras. Las principales aplicaciones de esta agua son el uso doméstico y agrícola (CNA, 1999; Wakida, 2005).

Actualmente la condición de abastecedor de agua del Arroyo Alamar está amenazada por los problemas de contaminación ambiental, la carencia de infraestructura de saneamiento y la falta de control urbano-administrativo que se ve reflejado en el incremento de asentamientos irregulares en la zona (IMPLAN, 2007).

### **II.3 Usos del suelo.**

El uso del suelo representa los fines particulares a que podrán destinarse determinadas zonas, áreas y predios de un centro de población. En esta zona de la ciudad los usos de suelo tienen una conformación heterogénea. Existen tres zonas que se pueden diferenciar marcadamente (IMPLAN, 2007):

- Zona consolidada, compuesta en su mayoría por usos habitacionales, comercios y servicios, industria y equipamiento.
- Zona del arroyo, delimitado por la zona federal.
- Predios baldíos distribuidos en diferentes lugares de la zona de estudio.

## **II.4 Problemas presentados.**

El Arroyo Alamar no cuenta con ordenación urbana o con un encauzamiento adecuado de sus aguas, por lo que actualmente conforma un espacio de transición para el crecimiento urbano integral de Tijuana entre la zona oeste ya consolidada, y el este de la ciudad aún en desarrollo. (Espinoza *et al.*, 2004).

La zona del Arroyo Alamar no es ajena al crecimiento de la población que se viene dando desde hace diez años en la ciudad de Tijuana, a consecuencia de los flujos de emigrantes hacia la frontera norte buscando mejoras económicas. A esto se suman la cercanía de las industrias maquiladoras que se hallan en la Ciudad Industrial, al sur de la Mesa de Otay, y otras zonas industriales que se localizan en las inmediaciones del área de estudio; así como la escasa planeación de la expansión urbana y la carencia de control administrativo. Por último, cabe mencionar las descargas ilegales de contaminantes y la deposición de basura. Todos estos factores constituyen las causas primarias de la pérdida del capital natural en el Arroyo Alamar (Michel *et al.*, 2001).

El Arroyo Alamar, además de sus funciones naturales, posee funciones derivadas del actual uso del suelo, característico de una zona urbana donde cruzan arroyos y ríos, como son: agricultura, ganadería, asentamientos habitacionales, industria y extracción de productos pétreos (SEDESOL-IMPLAN, 2005). Algunas de estas actividades resultan incompatibles con lo usos del suelo designados (Espinoza *et al.*, 2004).

### **II.4.1 Infraestructura.**

El rápido crecimiento económico y urbano de Tijuana ha llevado al incremento en la demanda no solo de agua, sino también del servicio de drenaje. Muchas de las líneas de drenaje son viejas y se encuentran en malas condiciones estructurales. Esto, sumado al déficit de infraestructura conduce a fugas y a que el agua residual frecuentemente fluya a los cañones de los ríos, con la consecuente disminución en la calidad del agua, tanto superficial, como subterránea (Michel *et al.*, 2001).

En este contexto, el polígono del Alamar se caracteriza por niveles de infraestructura que en promedio están por debajo de la cobertura existente en Tijuana, lo que provoca que se generen tiraderos de residuos a cielo abierto, derrame de aguas negras y la quema clandestina de basura. No obstante a la deficiencia de infraestructura que se da en todo el Alamar, existe un comportamiento diferenciado en las tres zonas que lo componen (IMPLAN, 2007).

La cobertura de agua potable en la zona de estudio es del 43 %, del cual la zona 1 presenta el mayor porcentaje de cobertura, 62 por ciento; seguido por la zona 2 con un 36 por ciento y por último la zona 3 con un 28 por ciento. En cuanto a la red de drenaje sanitario, el área presenta una cobertura del servicio del 40 por ciento. Con relación a las zonas, se observa que la zona 1 es la que presenta mayor cobertura, con un 62 por ciento, seguida por las otras dos zonas (2 y 3) con igual cobertura, 26 por ciento. Con respecto al servicio de recolección de basura, se realiza una vez a la semana, siendo que su cobertura es del 45 por ciento (IMPLAN, 2007).

#### **II.4.2 Asentamientos irregulares.**

La ciudad de Tijuana se caracteriza por los procesos migratorios, lo que trae como consecuencia la formación de asentamientos irregulares, principalmente en laderas y cauces de arroyos, lo cual resulta en procesos urbanísticos desordenados (Rentería, 2004). El Alamar ha presentado un continuo establecimiento de asentamientos irregulares sobre la zona federal (demarcación realizada por la Comisión Nacional del Agua, CNA, para delimitar el área de influencia del arroyo dentro de cada uno de los predios que colindan con él). Este fenómeno es sin duda proporcional al fenómeno de migración que ha caracterizado a Tijuana, convirtiéndose el Arroyo Alamar en uno de los espacios de la ciudad con mayor susceptibilidad de asentamientos irregulares, debido a la ausencia de control y vigilancia sobre la zona federal dentro del ámbito municipal (Espinoza *et al.*, 2004).

Si bien los primeros asentamientos corresponden a la década de 1930, es a finales de la década de 1950 cuando empieza una emigración permanente, presentando un incremento sustancial de población a partir de 1980, alcanzando su máxima concentración a mediados de la década de 1990 (Espinoza *et al.*, 2004).

De acuerdo con Espinoza *et al.*, en el 2004, el 75 por ciento de la población tenía menos de 18 años asentada en el Alamar, lo cual se corresponde con el primer crecimiento importante de población que se dio en el área en la década de 1980. La zona 3 presentaba el mayor número de ocupantes con más antigüedad, a diferencia de la zona 2, que en la margen sur presentaba asentamientos de pocos años, es decir, en un rango de cero a cuatro años.

Según este estudio, también, un alto porcentaje de la población económicamente activa, se empleaba en la industria maquiladora, vecina a estos asentamientos. El 46 por ciento de la población del Alamar trabajaba en las maquiladoras, el 31 por ciento en actividades agropecuarias, y el 23 por ciento restante se dedicaba a otras actividades como la albañilería, los servicios y el comercio (Espinoza *et al.*, 2004).

En las tres zonas predomina el suministro de agua mediante los vehículos pipa, mientras que carecen de infraestructura de drenaje en su totalidad. De esta manera impactan directamente sobre la calidad del agua del arroyo y del acuífero (IMPLAN, 2007).

#### **II.4.3 Actividad agropecuaria.**

La actividad agrícola en el Valle del Arroyo Alamar incluye cultivos y ganadería; mientras que en la zona 1 esta se caracteriza por ser básicamente de subsistencia, en las zonas 2 y 3 se practican la agricultura comercial y la ranchería. En términos de calidad del agua los plaguicidas y, en menor medida, los fertilizantes utilizados en los cultivos representan un riesgo potencial de contaminación tanto para las fuentes superficiales, como para las subterráneas. La mayor parte de los campos de cultivo en el Alamar son irrigados con agua proveniente del suministro local subterráneo, es decir del acuífero (Michel *et al.*, 2001).

#### **II.4.4 Actividad extractiva.**

La actividad extractiva que se realiza en el lecho del Arroyo Alamar también ha generado la transformación de la zona, la explotación de los recursos pétreos, como la explotación de arena y grava para actividades de la construcción, es una actividad concesionada por la autoridad federal sobre las cuales no se mantiene un control estricto en materia de impacto ambiental y urbano (IMPLAN, 2007).

Este tipo de actividad puede causar impactos en la calidad del agua subterránea como resultado de modificaciones hidráulicas de los sistemas de flujo del agua subterránea, directa o indirectamente, a consecuencia de las excavaciones superficiales y subsuperficiales. Además, producen un incremento de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos como resultado de la remoción física de partes de la zona no saturada o de las capas confinantes que proveían protección natural.

#### **II.4.5 Actividad industrial.**

El comportamiento de la actividad industrial en la zona de estudio no se conoce con exactitud, debido a la falta de un inventario industrial que permita su identificación y fácil actualización. Esto ha traído como consecuencia que este rubro permanezca en muchos casos sin información suficiente (IMPLAN, 2007).

Las actividades industriales son capaces de generar una seria contaminación del suelo y cargas contaminantes de consideración al subsuelo como resultado del volumen, concentraciones y tipo de productos químicos y residuos que manipulan. En términos generales, cualquier actividad industrial puede generar una carga contaminante al subsuelo como resultado de la liberación de efluentes líquidos, la inadecuada disposición de residuos sólidos, conjuntamente con accidentes que involucran fugas de productos químicos peligrosos.

Es importante señalar que, aunque no se encuentran dentro del área del Alamar, hay que tener en cuenta las industrias que se encuentran en la parte sur de la Mesa de Otay, ya que por la pendiente y cercanía en que se hallan con respecto al Alamar, pueden contribuir al deterioro del lugar. Existen dos parques industriales en este caso FINSA o Internacional Tijuana y la Ciudad Industrial Nueva Tijuana (CINT). En el caso de la Ciudad Industrial, se creó para convertir a Tijuana en un municipio próspero e industrial. De este modo los criterios esbozados para su conformación fueron puramente técnicos y operativos, en ningún apartado se contemplan regulaciones para las industrias. La CINT tiene la mayor concentración de maquiladoras de todo el municipio de Tijuana y la mayoría se encuentran desarrollando sus procesos productivos de forma activa (Rentería y Riemann, 2007).

Las industrias más contaminantes, a consecuencia de los residuos peligrosos que manejan y por el tamaño de las plantas, son: la electrónica, la metálica, autopartes, artículos de plástico, la química, artículos de madera, artículos de piel, imprenta y artículos de vidrio; siendo que este tipo de industrias es el que impera en la Ciudad Industrial (Rentería y Riemann, 2007), así como en FINSA, el otro parque industrial.

No obstante a que de acuerdo con lo establecido por la ley, las aguas de drenaje de las maquiladoras son descargadas hacia la red de drenaje sanitario y son reguladas por la Secretaría de Protección al Ambiente del Estado, dichas industrias cuentan con canales de drenaje pluvial que drenan directamente al Arroyo Alamar y a la zona de recarga del acuífero. Esto pudiera traer como consecuencia el arrastre de sustancias contaminantes hacia el acuífero o el vertido directo en caso de que ocurra algún accidente.

#### **II.4.6 Contaminación del área.**

El área recorrida por el Arroyo Alamar presenta numerosos problemas de contaminación. Las causas de este fenómeno, aunque diversas, son consecuencia de la falta de control y vigilancia sobre las actividades que se están desarrollando en la zona, las cuales no necesariamente cumplen con la vocación del suelo (SEDESOL-IMPLAN, 2005).

De acuerdo al Instituto Municipal de Planeación los problemas de contaminación pueden asociarse a dos tipos de fuentes que difieren en cuanto a su localización y forma de atención (IMPLAN, 2007). Estas son:

- Fuentes de carácter interno a la zona: son aquellas que se hallan ubicadas dentro del cauce del arroyo y dentro de su planicie de inundación, siendo estos los vinculados a los asentamientos irregulares, empresas y actividades agrícolas que se desarrollan en el lugar asociados directamente con las mezclas de usos del suelo.
- Fuentes externas: son aquellas que, no obstante a que su fuente generadora se localiza fuera del cauce y planicie de inundación del arroyo, su depósito final ocurre dentro de este; tal es el caso de residuos sólidos domésticos e industriales, aguas residuales que escurren de las industrias ubicadas sobre el parteaguas del arroyo y de redes de drenaje con roturas y vehículos abandonados entre otros.

Por otra parte, desde la perspectiva de cuenca la contaminación del agua no solo proviene de fuentes puntuales o tuberías (tales como las descargas industriales), sino también de múltiples fuentes difusas o no puntuales. En el corredor del Arroyo Alamar se identificaron tres tipos fundamentales de fuentes de contaminación al agua: las descargas incontroladas de aguas residuales, las fuentes contaminantes no puntuales y la contaminación proveniente de aguas arriba, del Río Tecate. La carencia y el mal estado de la infraestructura de drenaje existente en la zona, unido a las fuentes de contaminación no puntuales derivadas de los usos de suelo agrícola y urbano, degradan la calidad del agua del Arroyo Alamar (Michel *et al.*, 2001).

De acuerdo a estudios realizados (Guzmán, 1998) el acuífero conformado tanto por el Río Tijuana como por el Arroyo Alamar, se encuentra contaminado. Las fuentes de contaminación provinieron de aguas residuales con materia orgánica de origen doméstico en primer lugar y, en segundo término se observó la presencia de algunos metales como bario, hierro y zinc.

## **II.5 Estudios previos del área.**

A partir de la década pasada, varios proyectos y estudios académicos se han elaborado para el Arroyo Alamar y han generado importante información (urbana, sustentable, ecológica, social, hidrológica) que ha servido para fortalecer y justificar el futuro desarrollo urbano del arroyo (SEDESOL-IMPLAN, 2005).

- Cuenca Arroyo el Alamar, Tijuana, B.C: estudio hidrológico (1993).

Realizado por la Comisión Nacional del Agua (CNA), a través de su Gerencia Estatal en Baja California, Subgerencia de Administración del Agua, en 1993. Su objetivo principal fue el análisis de las condiciones hidrológicas del mencionado arroyo. Se identificaron la frecuencia y probabilidad de escurrimientos, así como la avenida del diseño. El estudio también consideró el gasto del diseño correspondiente a la canalización del Arroyo Alamar, consistente en una sección de concreto, con una longitud de 1.8 km, construida como parte de la primera etapa de canalización del Río Tijuana, completada en 1970.

- Proyecto de Rehabilitación del Arroyo Alamar (2000).

Presentado por el H XVI Ayuntamiento de Tijuana. Este trabajo presentó un análisis geohidrológico, hidrológico, fluvial y un estudio ecohidrológico. Con posterioridad este mismo proyecto se actualizó (Roda Arkhos Ingenieros S.C. y Unidad Municipal de Urbanización de Tijuana, Septiembre 2003) y constituyó la base para el Programa de Mejoramiento y Conservación del Arroyo Alamar.

- El corredor del Río Alamar: un oasis de parque urbano en Tijuana, B.C., México (2001).

Realizado por el Instituto para Estudios Regionales de las Californias, de la Universidad Estatal de San Diego. Este presentó información general acerca del arroyo, contemplando el análisis del recurso agua dentro del ecosistema del arroyo, la problemática social y ambiental en la zona, así como el uso de suelo y algunas consideraciones sobre la vegetación.

- Hidrología de avenidas del arroyo binacional Cottonwood-Alamar, California y Baja California (2001).

Estudio financiado por el Consorcio de Investigación y Política Ambiental del Suroeste. Dicho estudio presentó cálculos sobre las descargas de avenida en el Arroyo Alamar para dos períodos de retorno (2 y 10 años), y su objetivo fundamental fue la modelación del proceso de precipitación-escorrentía de la cuenca binacional. Como objetivo secundario se estimó mediante modelación hidrológica, el volumen de recarga del acuífero que se perdería si el canal se revistiera con concreto, satisfaciendo así el objetivo de control de inundaciones.

- Caracterización hidroecológica del Arroyo Alamar, Tijuana, B. C., México (2003).

Estudio que fue financiado por el Consorcio de Investigación y Política Ambiental del Suroeste. Este estudio sirvió para identificar al arroyo en términos de una serie de funciones hidroecológicas y socioeconómicas, incluyendo el control de inundaciones, la recarga de agua subterránea, la preservación de corredores riparios, la conformidad con los reglamentos referentes a la dimensión de la zona federal y el uso múltiple de la zona de inundación.

- Arquitectura fluvial sustentable en el Arroyo Alamar, Tijuana, B.C., México (2004).

Proyecto presentado por Espinoza y colaboradores. Planteó un diseño espacial de diez kilómetros del arroyo, buscando un balance entre las funciones naturales, tales como: la mitigación de los daños causados por las inundaciones, la recarga del agua subterránea y la preservación del corredor ripario; y las funciones antropogénicas, tales como: la necesidad de implementar parques, áreas de recreación y deporte, así como el embellecimiento y la estética del paisaje.

- Programa Parcial de Conservación y Mejoramiento Urbano para la zona del Arroyo Alamar: Primera etapa (2005).

El objetivo de este proyecto fue establecer las bases para regular e inducir el desarrollo urbano, las actividades productivas y recreativas bajo una perspectiva que compatibilice los usos y aprovechamiento del suelo con la conservación de los recursos naturales. Las metas del estudio abarcaron la caracterización ambiental actualizada de la zona en cuestión, la generación de planos temáticos digitales, así como bases de datos digitales (SEDESOL-IMPLAN, 2005).

- Impacto de una corriente de agua superficial contaminada en su acuífero adyacente: el caso de la zona del Alamar, Tijuana, México (2005).

Estudio realizado por la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, de la Universidad Autónoma de Baja California. El objetivo de este fue investigar los niveles de contaminación del sistema acuífero que subyace bajo el Arroyo Alamar y hacer una evaluación preliminar sobre la relación entre la contaminación del agua superficial y la subterránea. Los resultados mostraron que la calidad del agua del acuífero era mala, la cual se atribuyó en gran medida a la infiltración del agua contaminada del arroyo y a la carencia de sistema de drenaje.

- Programa Parcial de Desarrollo Urbano del Arroyo Alamar 2007-2018 (2006).

Presentado por el XVIII Ayuntamiento de Tijuana, por conducto del IMPLAN, en el año 2006. El objetivo de este programa fue integrar la zona del Alamar al contexto urbano-regional para lograr al crecimiento urbano, por medio de la definición de los usos del suelo, el encauzamiento de las aguas del arroyo y el diseño de la estructura vial como complemento del sistema vial actual. Dicho trabajo analizó el estado y las perspectivas de la situación urbana en el contexto del medio físico y los recursos naturales, el desarrollo socio-demográfico y económico; mientras que en el contexto urbano realizó un análisis de los componentes en términos de los usos del suelo, la infraestructura y el equipamiento urbano existente.

Algunos trabajos de tesis presentados en El Colef también han abordado el tema del Arroyo Alamar, desde diferentes perspectivas. Algunos de ellos han sido:

- “La contaminación del acuífero del Río Tijuana. Efectos y riesgo potencial en el ámbito local, regional e internacional debido a la descarga de aguas residuales al acuífero del río Tijuana (1998).”

Tesis presentada en El Colef, para obtener el grado de Maestro en Administración Integral del Ambiente, por Saúl Guzmán. Dicha investigación abordó la contaminación del acuífero del Río Tijuana, del cual el Arroyo Alamar es afluente. Se tomaron muestras de pozos a todo lo largo de la cuenca, incluido el Alamar. Los resultados mostraron que la calidad del agua del acuífero se hallaba seriamente deteriorada, sobre todo por contaminación orgánica proveniente de aguas residuales no tratadas. El material hace mención a la carencia de estudios integrales sobre las zonas industriales, donde se demuestre la existencia de niveles de contaminación por descargas de aguas residuales industriales no tratadas adecuadamente.

- “Condiciones de salud ambiental de la colonia Chilpancingo en la Ciudad Industrial Nueva Tijuana, 1998-2003 (2004).”

Tesis presentada en El Colef, para obtener el grado de Maestro en Administración Integral del Ambiente, por Yunia Sidney Rentería y posteriormente publicada como artículo, en el 2007. Este trabajo abordó el problema de la contaminación industrial, desde el punto de vista de la salud ambiental, centrándose en una de las colonias que se hallan en el área del Arroyo Alamar. La colonia Chilpancingo se encuentra adyacente a la Ciudad Industrial, el Parque Industrial más extenso de la ciudad de Tijuana y con la mayor concentración de maquiladoras, y que a su vez, se localiza sobre el parteaguas derecho del Alamar. Los principales hallazgos mostraron a las maquiladoras como un factor de riesgo ambiental que produce y, en otros casos favorece la aparición de padecimientos que ponen en peligro la vida de los habitantes de la colonia.

- “Gobernación ambiental en la frontera México-Estados Unidos: El caso de Metales y Derivados en Tijuana B.C. (1986-2004), (2004).”

Tesis presentada en El Colef, para obtener el grado de Maestro en Administración Integral del Ambiente, por Clementina Rivera y posteriormente publicada como artículo, en el 2007. El mencionado trabajo abordó el problema de contaminación generado en la Planta de Metales y Derivados, ubicada en la Ciudad Industrial, situada en el parteaguas derecho del Arroyo Alamar, desde una perspectiva de gobernación ambiental. Apuntando la importancia del trabajo conjunto gobierno-sociedad para resolver este tipo de problemas.

- “Análisis de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero del Arroyo Alamar y actitud social hacia su protección (2006).”

Tesis presentada en El Colef, para obtener el grado de Maestro en Administración Integral del Ambiente, por Arizbé Gutiérrez. Estudio que aportó un mapa de vulnerabilidad del acuífero, en el que se muestran las zonas más sensibles a la contaminación, de acuerdo a las características físicas del dicho acuífero. Por otra parte, la investigación arrojó datos sobre la actitud hacia la protección del acuífero de los habitantes del lugar, concluyendo que esta era favorable; así como de los funcionarios públicos, hallando que la atención de las autoridades, al respecto, era insuficiente.

- “Gestión ambiental local y buen gobierno: La propuesta de rehabilitar el arroyo urbano Alamar en la Ciudad de Tijuana, B.C. (2006).”

Tesis presentada en El Colef, para obtener el grado de Maestro en Administración Integral del Ambiente, por Carolina Trejo. Investigación que abordó la coordinación existente entre los tres órdenes de gobierno, la participación ciudadana y el desempeño del IMPLAN, en cuanto a la gestión del Proyecto de Rehabilitación Ecohidrológico del Arroyo Alamar.

En el capítulo recién concluido se describen las características del área de estudio desde el punto de vista físico y socio- económico. En él se expusieron los problemas más comunes que se presentan en la zona del Alamar y la incidencia que estos poseen sobre la contaminación del agua subterránea. También, en este apartado se hizo una breve reseña acerca de algunos trabajos realizados sobre el Arroyo Alamar. Esta sección del trabajo facilita la comprensión de los capítulos que siguen a continuación, en los que se aborda la metodología empleada y los resultados obtenidos a partir de la aplicación de esta.

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO.**

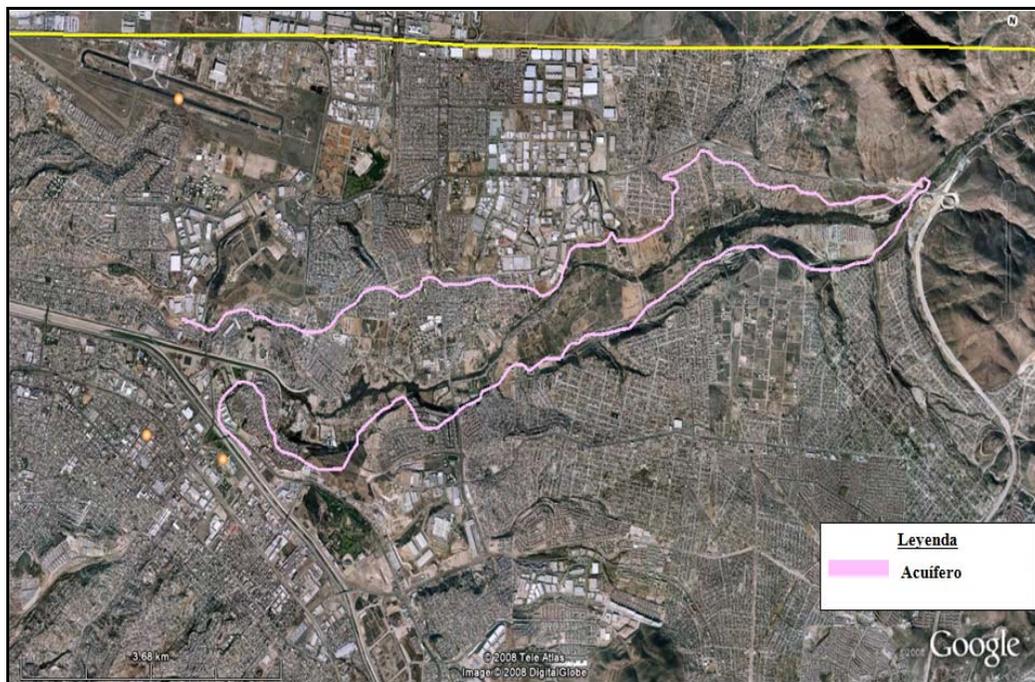
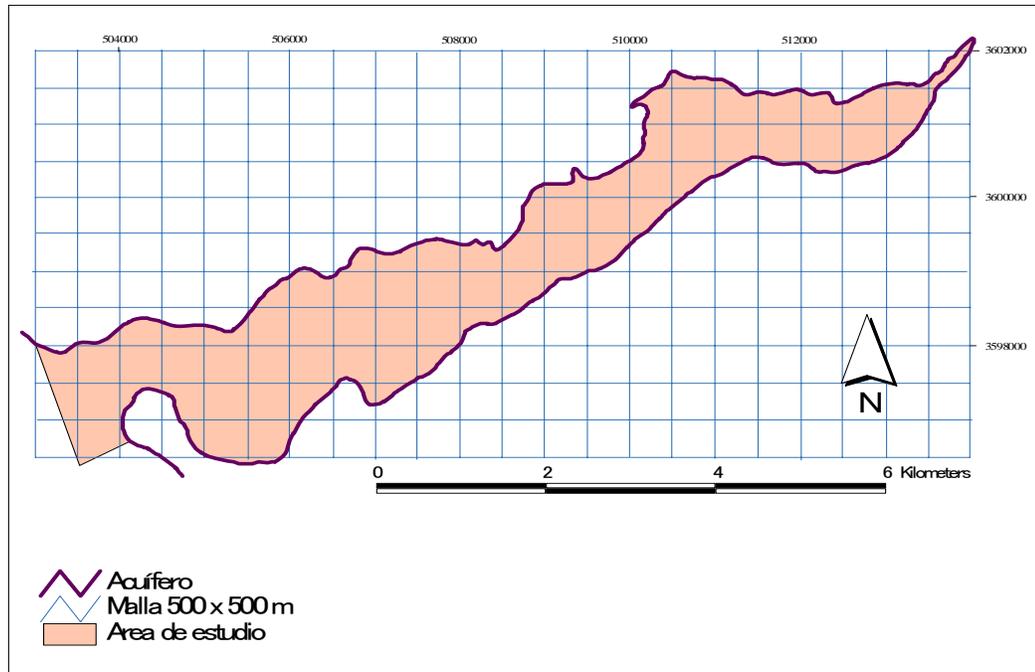
Este capítulo tiene como objetivo brindar una descripción de los pasos seguidos y las metodologías empleadas para la evaluación del peligro de contaminación del acuífero del Arroyo Alamar. En él se explican y justifican las simplificaciones asumidas durante el trabajo. También se hace alusión a las limitaciones presentadas como consecuencia de la escasa información disponible acerca de las fuentes potencialmente contaminantes. Se parte de la delimitación del área de estudio, seguida por el inventario de fuentes contaminantes. Posteriormente se plantea la clasificación y estimación de la carga contaminante, se describe la elaboración del mapa con esta información y se ofrece una breve reseña sobre la metodología para determinar la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero.

#### **III.1 Delimitación del área de estudio.**

Este trabajo de tesis tiene como objetivo evaluar el peligro de contaminación al que se halla expuesto el acuífero del Arroyo Alamar, mediante la obtención de un mapa, el cual, a su vez, resultará del solapamiento de los mapas de vulnerabilidad (generado por Gutiérrez, 2006) y de carga contaminante al acuífero (a generar en esta tesis). De ahí que en la delimitación del área de estudio se tuvieron en cuenta varios factores:

- 1- Área del acuífero: se empleó como plano base el generado por Gutiérrez (2006), con una escala 1:10 000, donde se muestra el contorno del acuífero y la superficie abarcada por él. En éste, el área de estudio se dividió en celdas de 500 x 500 metros, de lo que resultó que la superficie del acuífero quedó distribuida en 89 celdas de 0.25 km<sup>2</sup> cada una. Todo esto con el propósito final de elaborar el mapa de vulnerabilidad de este cuerpo de agua. El plano se realizó en la proyección cartográfica UTM considerando el datum horizontal WGS-84, contemplando las coordenadas que van desde la longitud 503000 E a 514000 E y desde la latitud 3596500 N a 3602000 N. Este plano se obtuvo a partir de un plano topográfico de la misma escala elaborado por la Unidad de Sistema de Información Geográfica del Instituto Municipal de Planeación (IMPLAN) (Figura III.1).

Figura III.1: Área del acuífero del Arroyo Alamar. (A) Cuadrícula del área de estudio. (B) Contorno del acuífero sobre imagen satelital.



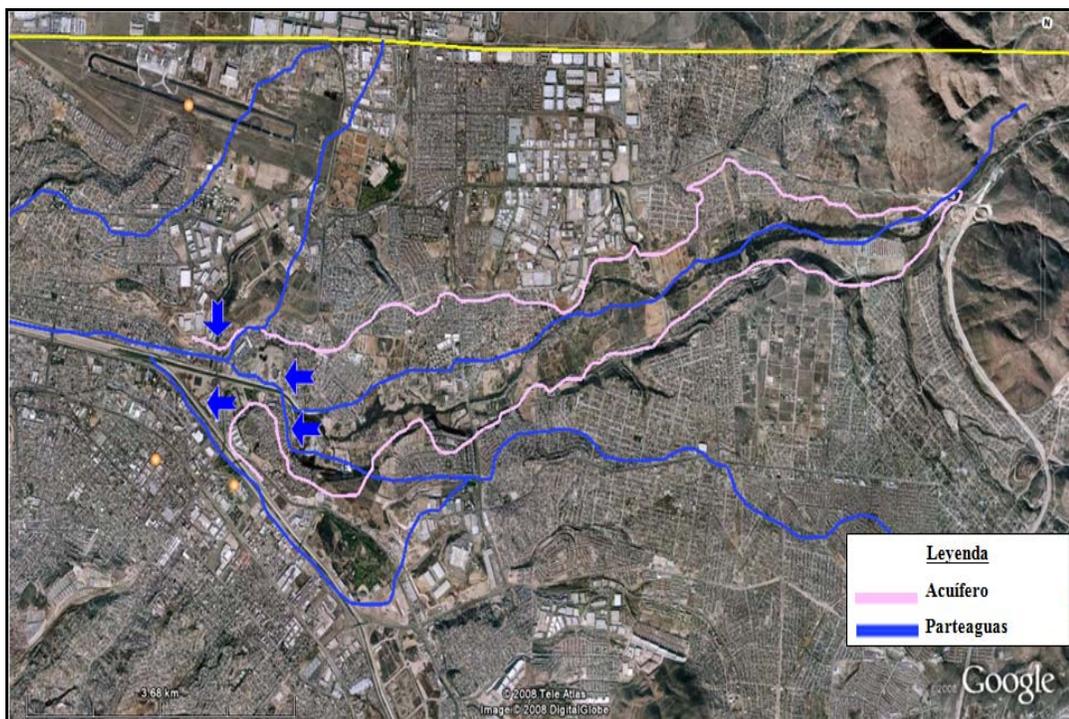
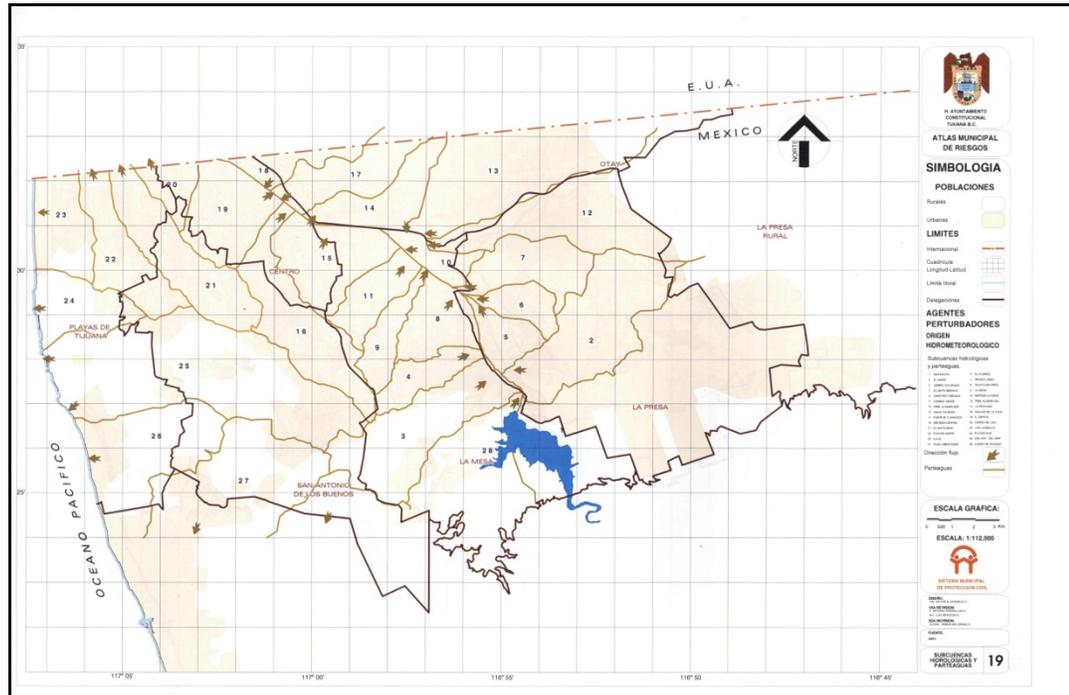
Fuentes: (A) Gutiérrez, 2006. (B) Elaboración propia. Imagen base Google Earth.

- 2- Parteaguas del Arroyo Alamar: estos constituyen las zonas de la ciudad que escurren al arroyo y al área de recarga del acuífero a consecuencia de las características topográficas del lugar. Los parteaguas se extienden al norte y al sur del arroyo y abarcan un área mayor que la del acuífero; sin embargo como el trabajo debe tener en cuenta las fuentes potencialmente contaminantes del acuífero, estas zonas que, aunque quedan fuera de su área, escurren a él, deben ser consideradas en el estudio por cuanto contribuyen a la contaminación de su agua subterránea (Figura III.2).
  
- 3- Cercanía al acuífero: teniendo en cuenta la distancia a la que se encuentran del acuífero las fuentes potencialmente contaminantes (esto da una idea de su nivel de influencia sobre la contaminación de este cuerpo de agua), así como la disponibilidad de tiempo e información, al delimitar el área de estudio no fueron consideradas las áreas abarcadas por los parteaguas del arroyo en su totalidad; sino que se decidió reducir el área dentro de estas, en cuanto a latitud. De esta manera se tomó como límite superior (al norte del acuífero), el Boulevard Industrial, que posteriormente continúa en la Carretera de cuota Tijuana-Tecate y como límite inferior (al sur del acuífero), el Boulevard Cucapah, el cual continúa en la Calzada Guaycura.

Por todo lo planteado anteriormente el área de estudio quedó delimitada de la siguiente manera. Al norte por el Boulevard Industrial, que posteriormente continúa en la Carretera de cuota Tijuana-Tecate y al sur por el Boulevard Cucapah, el cual continúa en la Calzada Guaycura. Ambos límites coinciden con las coordenadas UTM que delimitan al norte y al sur las latitudes del plano del área del acuífero, obtenido por Gutiérrez (2006). Del mismo modo, los límites este y oeste, se mantuvieron según el mencionado plano.

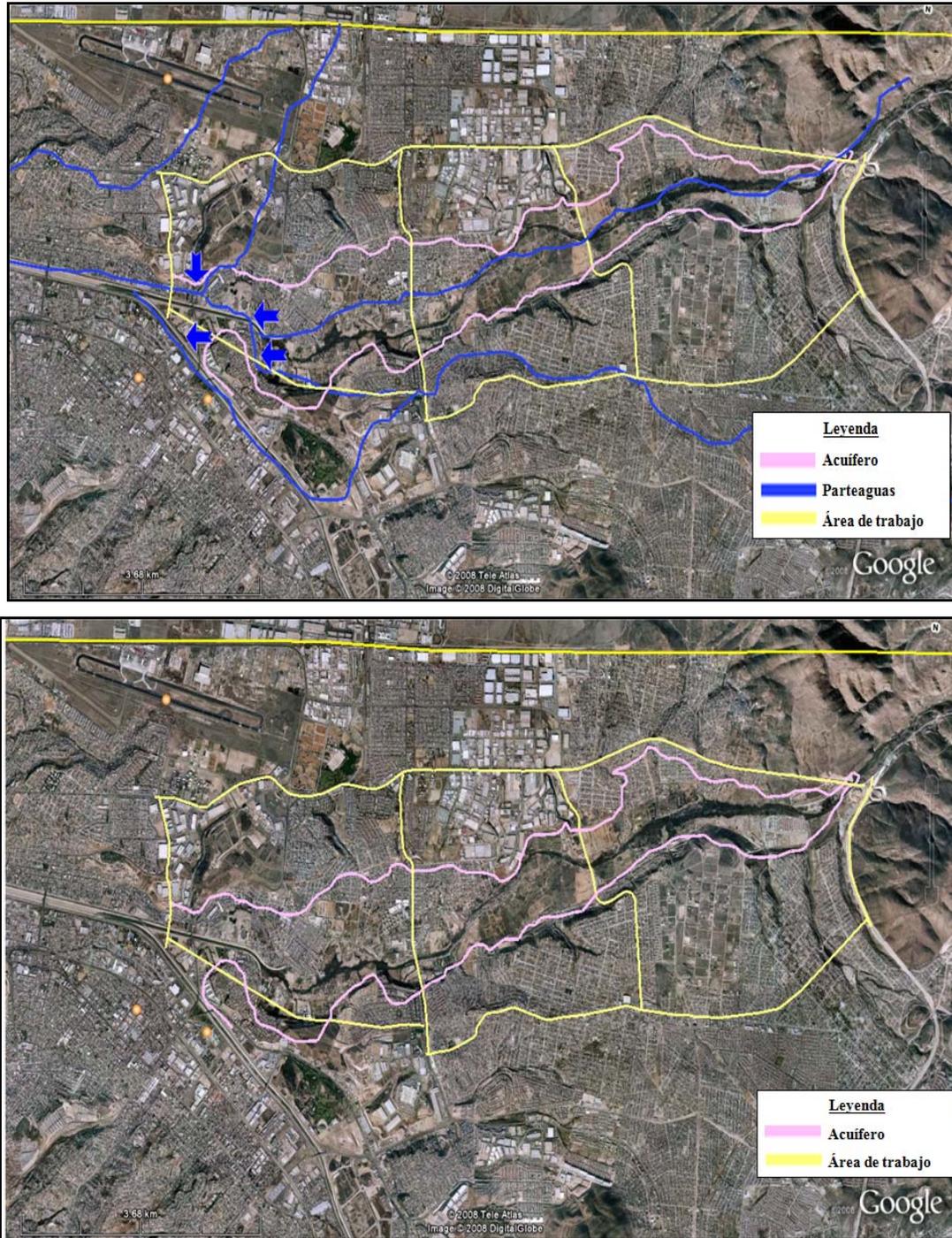
Por otra parte, y a los fines de este trabajo, se conservó la fragmentación física del Arroyo Alamar en tres zonas delimitadas en sentido oeste-este por el Boulevard Manuel J. Clouthier y el Boulevard Terán Terán, según lo planteado por Espinoza *et al.* (2004), mostrado en la Figura II.2, del Capítulo II; aunque, como se explicó previamente, el área de norte a sur fue ampliada. La delimitación completa del área de estudio puede observarse en la Figura III.3.

Figura III.2: Parteaguas del Arroyo Alamar. (A) Parteaguas de la ciudad de Tijuana (12, 13 y 14: Arroyo Alamar. (B) Parteaguas del Alamar.



Fuentes: (A) Atlas Municipal de Riesgos. (B) Elaboración propia. Imagen base Google Earth.

Figura III.3: Delimitación del área de estudio. (A) Superposición de los parteaguas, el acuífero y el área de estudio. (B) Área de estudio.



Fuente: Elaboración propia. Imagen base Google Earth.

### III.2 Inventario de fuentes contaminantes.

El conocimiento de las fuentes potenciales de contaminación es crítico para cualquier programa de protección de la calidad del agua subterránea, ya que ellas son las que generan las emisiones de contaminantes (Foster *et al.*, 2002). Una gran cantidad de actividades antrópicas son potencialmente capaces de generar importantes cargas contaminantes, aunque sólo algunas son generalmente responsables de la mayoría de los casos importantes de contaminación del agua subterránea. Estas se relacionan en la Tabla III.1.

El diseño de un inventario de fuentes potencialmente contaminantes comprende la identificación, localización espacial y la caracterización sistemática de todas las fuentes. Esta información servirá de base para la evaluación de cuáles actividades tienen el mayor potencial de generación de cargas contaminantes peligrosas para el subsuelo (Foster *et al.*, 2002).

*Tabla III.1: Resumen de las actividades potencialmente generadoras de una carga contaminante al subsuelo.*

Tipo de actividad	Características de la carga contaminante			
	Categoría de distribución	Principales tipos de contaminantes	Sobrecarga hidráulica	Aplicada debajo de la capa de suelo
<b>Desarrollo Urbano</b>				
Saneamiento sin red de drenaje	u/r P-D	n f o t	+	+
Redes de drenaje con fugas (a)	u P-L	o f n t	+	
Lagunas de oxidación de aguas residuales (a)	u/r P	o f n t	++	+
Descarga de aguas residuales en el suelo (a)	u/r P-D	n s o f t	+	
Aguas residuales en ríos influentes (a)	u/r P-L	n o f t	++	++
Lixiviación de rellenos sanitarios o tiraderos de basura	u/r P	o s h t		+
Tanques de almacenamiento de combustible	u/r P-D	t		
Sumideros de drenaje de las carreteras	u/r P-D	s t	+	++

<b>Producción Industrial</b>				
Tanques o tuberías con fugas (b)	u P-D	t h		
Derrames accidentales	u P-D	t h	+	
Aguas de proceso o lagunas de efluentes	u P	t o h s	++	+
Descarga de efluentes en el suelo	u P-D	t o h s	+	
Descargas hacia ríos influentes	u P-L	t o h s	++	++
Tiraderos de residuos con lixiviación	u/r P	o h s t		
Desagües de drenaje	u/r P	t h	++	++
Precipitación aérea de sustancias	u/r D	s t		
<b>Actividad Agropecuaria (c)</b>				
a) Cultivo				
- Con agroquímicos	r D	n t		
- Con irrigación	r D	n t s	+	
- Con lodo proveniente de agua residual	r D	n t s o		
- Riego con agua residual	r D	n t o s f	+	
b) Cría de ganado o procesos de cosecha				
- Lagunas de efluentes	r P	f o n t	++	+
- Descarga de efluentes en el suelo	r P-D	n s o f t		
- Descarga hacia ríos influentes	r P-L	o n f t	++	++
<b>Extracción Minera</b>				
Alteración del régimen hidráulico	r/u P-D	s h		
Descarga de aguas de drenaje	r/u P-D	h s	++	++
Aguas de proceso o lagunas de lodos	r/u P	h s	+	+
Tiraderos de residuos con lixiviación	r/u P	s h		
(a) Puede incluir componentes industriales (b) Puede ocurrir también en áreas no industriales (c) La intensificación representa el principal riesgo de contaminación u/r urbana rural P/L/D puntual/lineal/difusa		n: compuestos orgánicos f: patógenos fecales o: carga orgánica general s: salinidad m: metales pesados		t: microorganismos patógenos + incrementa la importancia

*Fuente: Foster et al., 2002.*

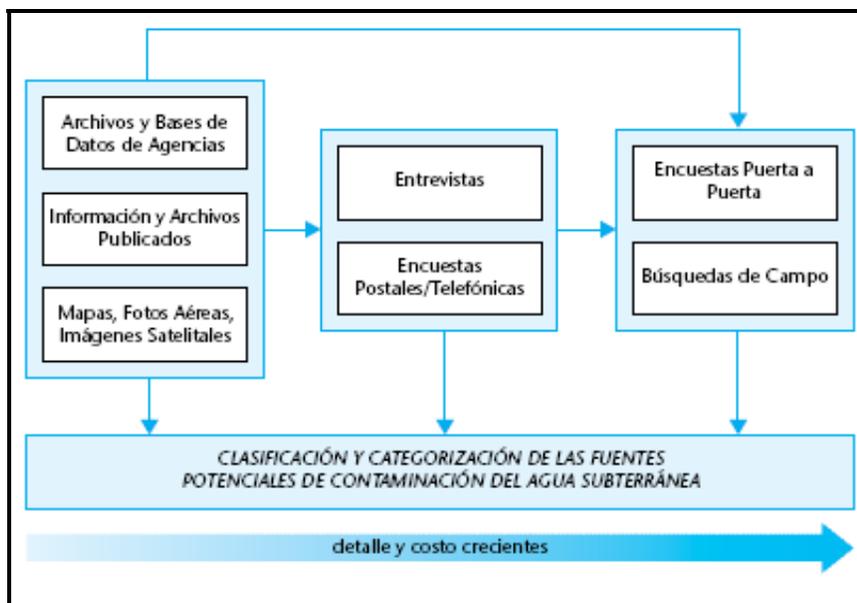
El inventario de actividades potencialmente contaminantes puede ser dividido en tres fases (Zaporozec, 2001):

- Diseño del inventario: incluye la identificación de las fuentes de información y el presupuesto financiero disponible.
- Implementación del inventario: comprende la organización del censo y el proceso de obtención de datos.
- Evaluación y síntesis: comprende el análisis de los datos generados, incluyendo la verificación de su consistencia y confiabilidad, la clasificación de las actividades contaminantes y la construcción de una base de datos que puede arrojar información en forma de mapas o sistema de información geográfico (SIG).

La identificación de fuentes de información es particularmente importante para el trabajo. Existe un abanico de metodologías disponibles para realizar inventarios (Figura III.4) (US-EPA, 1991):

- Evaluación exclusivamente de gabinete de fuentes de información secundaria.
- Reconocimientos de campo básicos, en los cuales los equipos de campo inspeccionan áreas seleccionadas para verificar la existencia de fuentes potenciales de contaminación.

Figura III.4: Metodologías para la recolección de datos para detectar fuentes potenciales de contaminación del agua subterránea.



Fuente: Foster et al., 2002.

El tipo de inventario y el grado de detalle requerido deben ser función del objetivo final del programa de trabajo, del tamaño del área bajo estudio, de la variedad de actividades presentes, de la disponibilidad de datos existentes, del presupuesto financiero y del personal técnico disponible (Foster et al., 2002). De ahí que en el estudio no se hayan tenido en cuenta determinadas fuentes contaminantes, por la falta de información acerca de estas y por la escasa disponibilidad de tiempo.

En el caso del presente trabajo, en primera instancia, se partió de establecer los tipos de actividades generadoras de contaminación a ser inventariadas en el área de estudio, es decir cuáles resultaban las actividades realizadas en la zona que potencialmente podrían afectar más la calidad del agua del acuífero. A partir de la revisión bibliográfica (SEDESOL-IMPLAN, 2007; Espinoza et al., 2004) y de recorridos de campo se pudieron establecer cuáles eran estas actividades.

Una vez identificados los tipos de actividades que se realizaban en el área, se procedió a buscar las fuentes de información a partir de las cuales fuera posible obtener datos acerca de las fuentes contaminantes (Tabla III.2).

*Tabla III.2: Fuentes de información empleadas para el inventario de los diferentes tipos de actividades generadoras de carga contaminante al acuífero del Arroyo Alamar*

<b>Actividades del área de estudio</b>	<b>Fuentes de información usadas en el inventario</b>
Asentamientos humanos irregulares	- Recorrido de campo - Imagen satelital del Google Earth
Prácticas agropecuarias (agrícolas)	- Recorrido de campo - Imagen satelital del Google Earth
Extracción de materiales inertes o pétreos	- Recorrido de campo - Imagen satelital del Google Earth
Industrial	- Directorios de Fabricantes y de Maquilas de Baja California - Listado de Parques Industriales de Tijuana
Urbanas varias	- Recorrido de campo - Imagen satelital del Google Earth

*Fuente: Elaboración propia.*

Con este fin se realizó evaluación de gabinete de fuentes de información secundaria. Primero, se emplearon los Directorios de Fabricantes y de Maquilas de Baja California, de la Secretaría de Desarrollo Económico (2007) y el listado de Parques Industriales de Tijuana, del Directorio de la Industria Maquiladora de Baja California (2007). La información obtenida a partir de estas fuentes fue corroborada y rectificada mediante llamadas telefónicas a estas industrias. En segundo lugar se utilizó la imagen satelital del Google Earth para ubicar e identificar estas y otras actividades.

También se realizaron recorridos de campo con equipo de GPS (sistema de posicionamiento global) y cámara fotográfica que permitieron identificar, documentar y ubicar algunas fuentes generadoras de contaminación; así como verificar parte de la información obtenida durante el trabajo de gabinete.

Para la ubicación geográfica de todas las fuentes contaminantes identificadas se empleó la Traza Urbana de la ciudad de Tijuana, a escala 1:10 000, con proyección cartográfica UTM, proporcionada por el IMPLAN (2006). Este plano permitió, además, extrapolar las coordenadas de las fuentes contaminantes identificadas a partir de información secundaria. Toda la información obtenida a partir del inventario de cargas contaminantes fue ordenada y sistematizada en bases de datos. Para ubicar estas fuentes en el mapa que aparece en la Figura III.1 se empleó el programa Arc View SIG 3.2; mientras que para tener una imagen visual del área ocupada por las fuentes potencialmente contaminantes, estas también se ubicaron sobre la imagen satelital del Google Earth.

### **III.3 Clasificación y estimación de la carga contaminante (Método POSH).**

Una vez inventariadas las fuentes potencialmente contaminantes del área de estudio se procedió a la clasificación y estimación de la carga contaminante que se halla asociada a estas. Existen diversos criterios de clasificación para las fuentes contaminantes (Capítulo I), en el presente trabajo el criterio que se tuvo en cuenta fue de acuerdo a la distribución geométrica o espacial que estas poseen. La clasificación asumida proporciona una impresión directa y visual del tipo de peligro de contaminación del agua subterránea y de este modo facilita identificar las medidas de control que son requeridas para cada tipo de actividad. De acuerdo a este criterio las fuentes de contaminación se clasificaron en:

- Fuentes de contaminación difusa.
- Fuentes de contaminación puntual.

Independientemente del tipo de clasificación espacial que se le haya otorgado a cada fuente contaminante identificada, la carga contaminante generada por cada una de ellas se debe caracterizar y estimar. Como se mencionó en el Capítulo I, desde un punto de vista teórico, la carga contaminante al subsuelo generada por una actividad dada tiene cuatro características fundamentales y semi-independientes (Foster e Hirata, 1991), e idealmente se requiere información acerca de cada una de ellas:

- Clase de contaminante involucrado.
- Intensidad de la contaminación.
- Modo en que el contaminante es descargado al subsuelo.
- Duración de aplicación de la carga contaminante.

De hecho, sería aún mejor si se pudieran estimar las concentraciones reales y los volúmenes de descarga de contaminantes al subsuelo, lo que casi nunca ocurre en la práctica. Este tipo de estimación se vuelve compleja por la alta densidad con que frecuentemente se encuentran las fuentes de contaminación y su considerable diversidad.

En general todas las técnicas de inventario y clasificación de contaminantes están sujetas a imperfecciones y limitaciones significativas, debido a la imposibilidad de controlar todas las actividades contaminantes. De acuerdo a esto, y de manera simplificada, las fuentes potenciales de carga contaminantes se pueden caracterizar sobre la base de dos características (Foster *et al.*, 2002):

- La posibilidad de presencia de contaminantes que se conoce o se espera sean persistentes y móviles en el subsuelo.
- La existencia de una carga hidráulica (sobrecarga o incremento en la tasa de recarga natural) asociada capaz de generar el transporte de contaminantes hacia los sistemas acuíferos.

Esta información no está fácilmente disponible y es necesario realizar las hipótesis de simplificación que asume el método POSH.

En el caso de esta tesis, de acuerdo a la información disponible acerca de las fuentes potenciales de carga contaminante al subsuelo en el área de estudio, estas fueron caracterizadas de acuerdo a la metodología POSH, desarrollada por Foster *et al.* (2002). Este método fue propuesto en una guía para la protección de la calidad del agua subterránea, dirigida a las empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. El método POSH permite caracterizar las fuentes potenciales de carga contaminantes sobre la base de dos características fácilmente estimables y que dan lugar a su nombre:

- El origen del contaminante (**P**ollutant **O**rigen): se obtiene asociando la posibilidad de presencia de una sustancia contaminante del agua subterránea con el tipo de actividad antrópica (Tabla III.1).
- La sobrecarga hidráulica asociada (**S**urcharge **H**idraulically): se obtiene sobre la base del uso del agua en la actividad relacionada.

Este método genera tres niveles cualitativos de potencial de generación de una carga contaminante al subsuelo: reducido, moderado y elevado, los cuáles fueron asociados en este trabajo con los valores 1, 2 y 3 respectivamente (Tablas III.3 y III.4).

Para la estimación de la carga contaminante en esta tesis cada fuente potencial de contaminación inventariada fue clasificada según el tipo de actividad que la generaba y de acuerdo a su distribución espacial, con lo que fue posible ubicarla en las Tablas III.3 o III.4, lo cual permitió asociarle un potencial de carga contaminante.

Tabla III.3: Clasificación y categorización de fuentes de contaminación difusa de acuerdo al método POSH.

Potencial de carga contaminante al subsuelo	Fuente de contaminación	
	Saneamiento <i>in situ</i>	Prácticas agropecuarias
<b>Elevado</b>	Cobertura del servicio de drenaje menor al 25% y densidad poblacional superior a 100 personas/ha	Cultivos comerciales intensivos y la mayoría de los monocultivos en suelos bien drenados en climas húmedos o con baja eficiencia de riego.  Pastoreo intensivo sobre praderas altamente fertilizadas.
<b>Moderado</b>	Intermedio entre elevado y reducido	
<b>Reducido</b>	Cobertura del servicio de drenaje mayor al 75% y densidad poblacional inferior a 50 personas/ha	Rotación de cultivos tradicionales.  Pastoreo extensivo.  Sistemas de granjas ecológicas.  Cultivos baja riego de alta eficiencia en áreas áridas.

Fuente: Foster et al., 2002.

Tabla III.4: Clasificación y categorización de fuentes puntuales de contaminación de acuerdo al método POSH

Potencial de carga contaminante al subsuelo	Fuente de contaminación				
	Disposición de residuos sólidos	Sitios industriales*	Lagunas de efluentes	Urbanas varias	Actividad minera
<b>Elevado</b>	Residuos de industrias tipo 3, residuos de origen desconocido	Industrias tipo 3, cualquier actividad que maneje > 100 kg/día de sustancias químicas	Todas las industrias tipo 3, cualquier efluente (excepto aguas residuales residenciales) si el área es > 5 ha		Operación de campos de petróleo, minas de metales
<b>Moderado</b>	Precipitación > 500 mm/año, con residuos residenciales/industriales tipo 1/agroindustriales  Todos los otros casos	Industrias tipo 2	Agua residual residencial si el área es > 5 ha, otros casos que no figuran en las categorías anterior y posterior	Gasolineras, rutas con tráfico regular de sustancias químicas peligrosas	Algunas minas  Canteras de materiales inertes
<b>Reducido</b>	Precipitación < 500 mm/año, con residuos residenciales/industriales tipo 1/agroindustriales	Industrias tipo 1	Efluente residencial, urbano mezclado, agroindustrial y minero no metálico si el área < 1 ha	Cementerios o panteones	

\* los terrenos contaminados por industrias abandonadas deberían tener la misma categoría que las propias industrias

- Industrias tipo 1: carpinterías, fábricas de alimentos y bebidas, destilerías de alcohol y azúcar, procesamiento de materiales no metálicos
- Industrias tipo 2: fábricas de caucho, pulpa y papel, textiles, artículos eléctricos, fertilizantes, detergentes y jabones
- Industrias tipo 3: talleres mecánicos, refinerías de gas y petróleo, manufacturas de pesticidas, plásticos, productos farmacéuticos y químicos, curtidurías, fábricas de artículos electrónicos, procesamiento de metal

Fuente: Foster et al., 2002.

### **III.4 Elaboración del mapa de carga contaminante.**

Para la elaboración del mapa de carga contaminante se usó como plano base el generado por Gutiérrez (2006), el cual se describe y se muestra en el apartado III.1 de este capítulo (Figura III.1). En dicho apartado se explican las características del mencionado mapa. Es pertinente mencionar nuevamente, por su importancia en el procedimiento que se describirá a continuación, que el área de estudio se dividió en celdas de 500 x 500 metros, de lo que resultó que la superficie del acuífero quedó distribuida en 89 celdas de 0.25 km<sup>2</sup> cada una.

Una vez clasificadas y estimadas las cargas contaminantes (potencial de carga contaminante) se procederá a asociar por cada cuadrícula, de las 89 que conforman el acuífero, la carga contaminante a la que está siendo sometido en esa área en específico. En el caso de las cuadrículas donde coincidan varias fuentes contaminantes con diferente potencial de carga (elevado, moderado o reducido), les será asignado a esa cuadrícula el máximo valor de potencial de carga contaminante que posean las fuentes ubicadas en ella. Esto asumiendo que de haber actividades que generen un potencial de carga más elevado (elevado o moderado) que otras ubicadas en la misma cuadrícula (moderado o reducido), serán las más significativas en cuanto al potencial de carga generado en esa cuadrícula en cuestión.

Por ejemplo, de existir una cuadrícula donde se ubiquen cuatro fuentes contaminantes, de las cuales una de ellas posea un potencial de carga clasificado como “elevado”, mientras las otras tres fuentes posean un potencial de carga clasificado como “bajo”, el valor final de potencial de carga contaminante asociado a esa cuadrícula será “elevado”; ya que la carga contaminante aportada por esta actividad sobre el acuífero será más representativa del nivel de contaminación del acuífero que las otras tres, cuyo potencial de carga es “bajo”.

Por último, en los casos donde las fuentes potencialmente contaminantes se ubiquen en cuadrículas fuera de las 89 que conforman el acuífero, su potencial de carga contaminante se asignará a la celda inmediata inferior, que sí sea parte del acuífero. Tal es el caso de las industrias del sur de la Mesa de Otay, que aunque se ubican fuera del área del acuífero escurren a él.

### III.5 Estimación de la vulnerabilidad (Método DRASTIC).

Los datos de vulnerabilidad intrínseca del acuífero del Arroyo Alamar no fueron estimados durante el desarrollo del presente trabajo; sino que fueron tomados del trabajo realizado por Gutiérrez (2006). El método empleado para la estimación de la vulnerabilidad del acuífero fue el denominado DRASTIC, el cual fue desarrollado por Aller *et al.* (1987), con el financiamiento de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos (Gutiérrez, 2006).

La técnica DRASTIC se denomina así por las siglas en inglés de los siete parámetros que se consideran para determinar la vulnerabilidad:

- D: profundidad del agua subterránea (*Depth to water*)
- R: tasa de recarga (*net Recharge*)
- A: litología del acuífero (*Aquifer media*)
- S: tipo de suelo (*Soil media*)
- T: topografía (*Topography*)
- I: impacto de la zona vadosa (*Impact of vadose zone*)
- C: conductividad hidráulica del acuífero (*Hydraulic conductivity of the aquifer*)

Los siete parámetros fueron estimados para cada una de las 89 celdas en que fue dividida el área del acuífero. La suma de los siete parámetros para cada celda constituye su índice de vulnerabilidad. Este índice se traduce en cuatro tipos de vulnerabilidad: muy alta, alta, media y baja, obteniéndose un mapa final con la vulnerabilidad del acuífero en toda el área que abarca. En el presente trabajo, a los niveles cualitativos de clasificación de vulnerabilidad (baja, media, alta y muy alta) se le asociarán los valores 1, 2, 3 y 4 respectivamente, con el propósito de estimar el peligro de contaminación.

### **III.6 Evaluación del peligro de contaminación.**

Como se mencionó en el Capítulo I el peligro de contaminación de los acuíferos puede ser determinado considerando la interacción entre la carga contaminante aplicada al subsuelo, como resultado de las actividades humanas, y la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación. Así, en términos prácticos, la evaluación del peligro involucra la consideración de esta interacción (Foster *et al.*, 2002) mediante la superposición de los resultados del inventario de cargas contaminantes al subsuelo con el mapa de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos.

En el caso de este trabajo se multiplicarán los valores de potencial de carga contaminante por los valores de vulnerabilidad en cada una de las 89 celdas, determinando así el peligro de contaminación al que se halla expuesto el acuífero. A las celdas donde no se encuentren ubicadas fuentes contaminantes se les asignará un valor de potencial de carga contaminante igual a cero.

De esta manera, teniendo en cuenta las clasificaciones de carga contaminante, planteadas por el método POSH, así como las clasificaciones de vulnerabilidad, planteadas por el método DRASTIC, se elaboró la siguiente matriz, la cual permite evaluar el peligro de contaminación al que se halla expuesto el acuífero del Arroyo Alamar (Tabla III.5).

Tabla III.5: Matriz para evaluar el peligro de contaminación del acuífero del Arroyo Alamar.

Peligro de contaminación		Vulnerabilidad a la contaminación			
		Baja (1)	Media (2)	Alta (3)	Muy alta (4)
Carga contaminante al subsuelo (potencial)	Nulo (0)	0	0	0	0
	Reducido (1)	1	2	3	4
	Moderado (2)	2	4	6	8
	Elevado (3)	3	6	9	12

Fuente: Elaboración propia.

El rango de los valores para el peligro de contaminación del acuífero es el siguiente:

- Muy elevado: 8, 9, 12 (■)
- Elevado: 4, 6 (■)
- Moderado: 2, 3 (■)
- Reducido: 1 (■)
- Nulo: 0 (□)

La evaluación del peligro de contaminación de los acuíferos es un prerequisite esencial para la protección de los recursos hídricos subterráneos, ya que identifica aquellas actividades humanas que tienen la mayor probabilidad de tener impactos negativos sobre el acuífero y así indica la priorización de las medidas de control y mitigación necesarias (Foster *et al.*, 2002).

En este tercer capítulo fueron abordados los aspectos metodológicos en los que se fundamenta el presente trabajo. La aplicación de estos principios hizo posible la obtención de los resultados que el siguiente capítulo plantea.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

Este capítulo tiene como objetivo presentar los resultados obtenidos durante el desarrollo del presente trabajo de tesis, así como el análisis y la interpretación derivados de estos. Para el análisis de los resultados se tuvieron en cuenta los antecedentes del tema aportados por la revisión de literatura y plasmados en los capítulos previos. Lo anterior con el fin de integrar la información existente con la generada durante la presente investigación, lo cual, a su vez, permite un enfoque más cercano al peligro de contaminación al que se encuentra expuesto el acuífero del Arroyo Alamar. Además, en este apartado se constata el cumplimiento de los objetivos de este trabajo y se da respuesta a la interrogante que lo motivó.

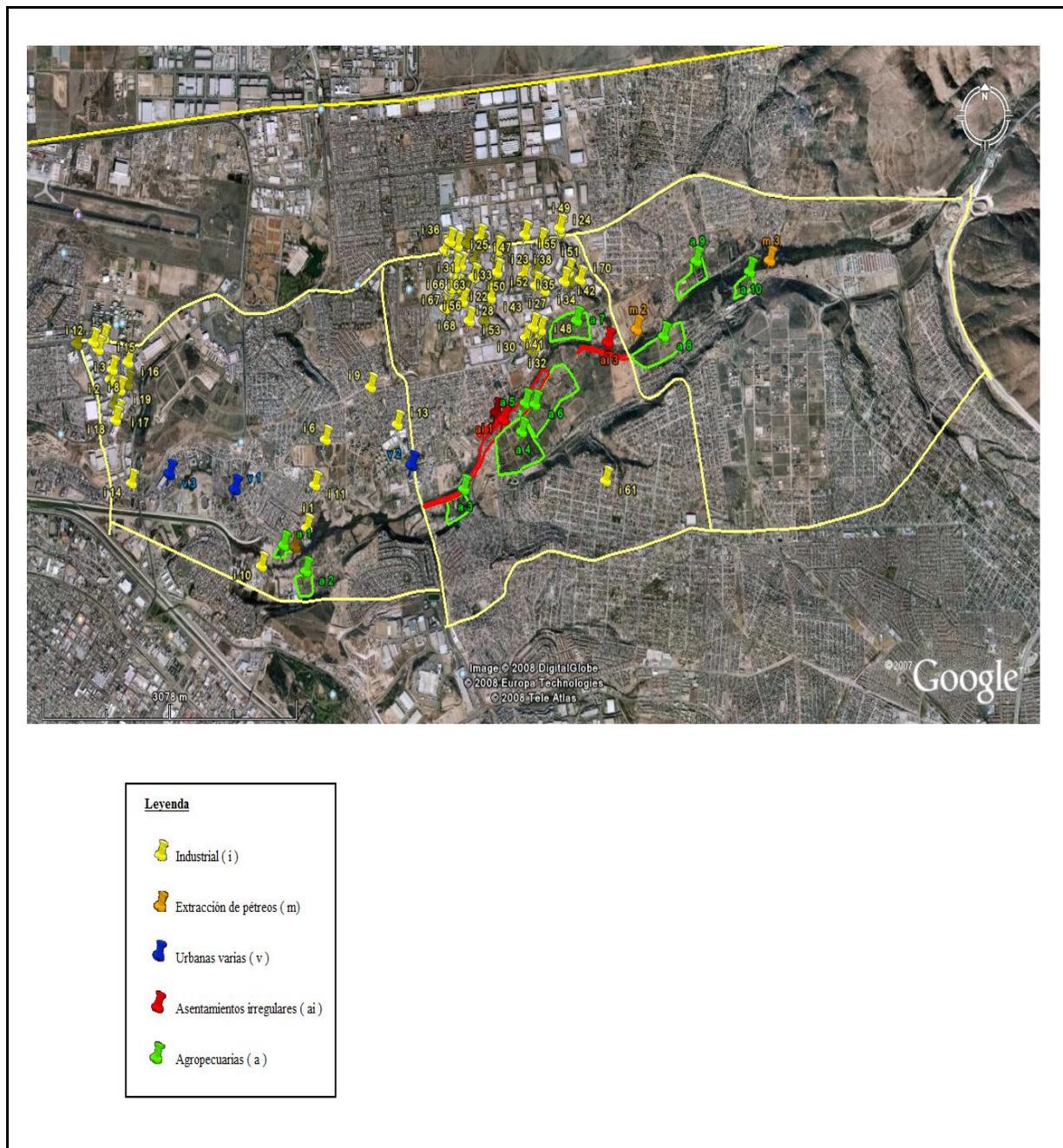
#### **IV.1 Evaluación de la carga contaminante.**

##### **IV.1.1 Inventario de fuentes contaminantes.**

Una vez identificadas las actividades que co-existen en el área de estudio (Tabla III.2) y que, por ende constituyen los tipos de fuentes contaminantes potenciales del acuífero del Arroyo Alamar consideradas en este trabajo, se procedió a recopilar información acerca de cada una de ellas.

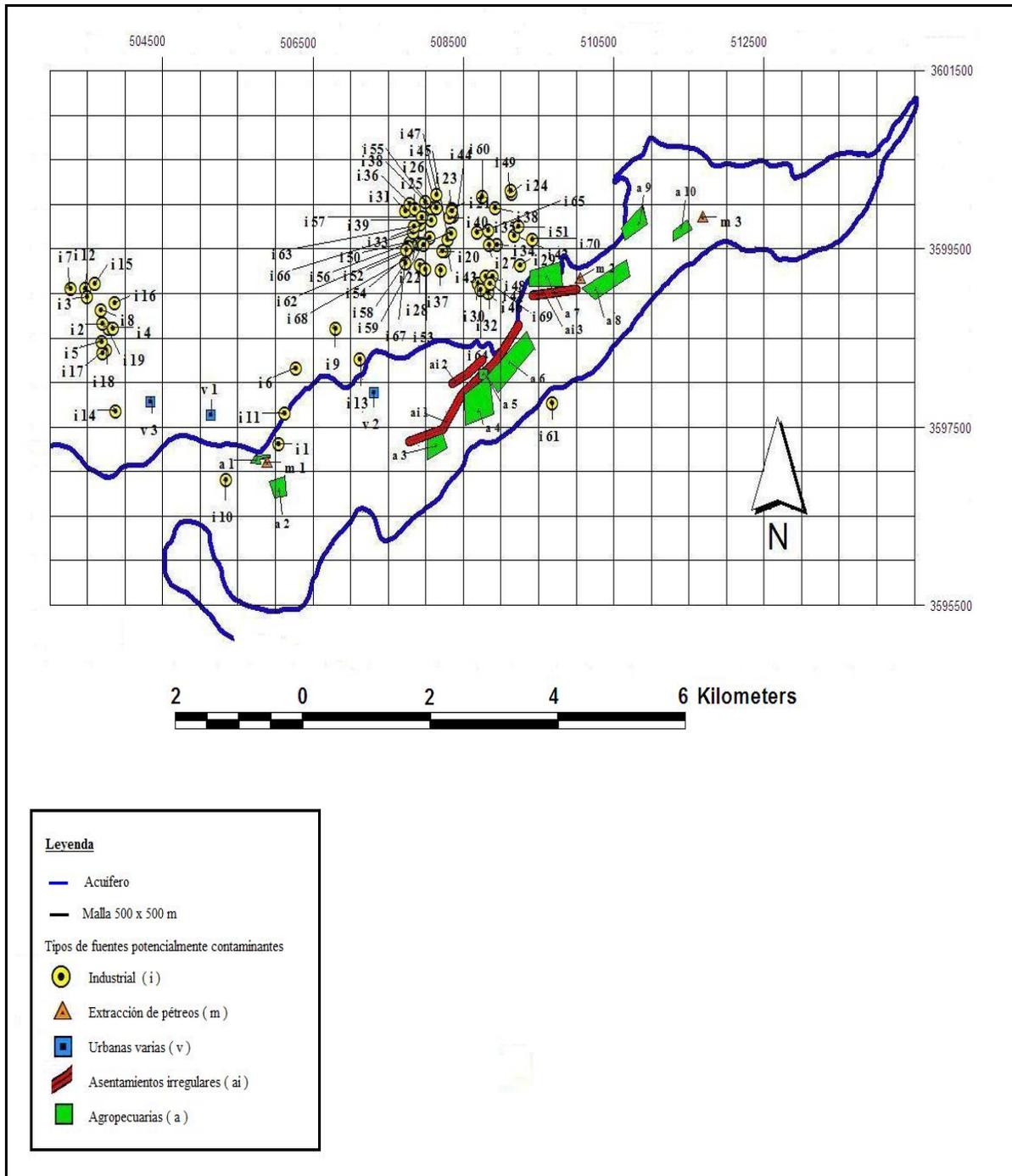
El inventario de fuentes contaminantes arrojó un total de 89 sitios distribuidos en toda el área de estudio. La localización geográfica de cada una de ellas se puede observar en las Figuras IV.1 y IV.2, donde se pueden identificar mediante el código que cada una lleva asignado. Los datos de cada una de las actividades, incluyendo las coordenadas geográficas y el potencial de carga contaminante asociado, se pueden consultar en los Anexos 1, 2, 3 y 4.

Figura IV.1: Imagen satelital de la localización geográfica de las fuentes contaminantes potenciales del acuífero del Arroyo Alamar.



Fuente: Elaboración propia. Imagen base Google Earth.

Figura IV.2: Localización geográfica de las fuentes contaminantes potenciales del acuífero del Arroyo Alamar.

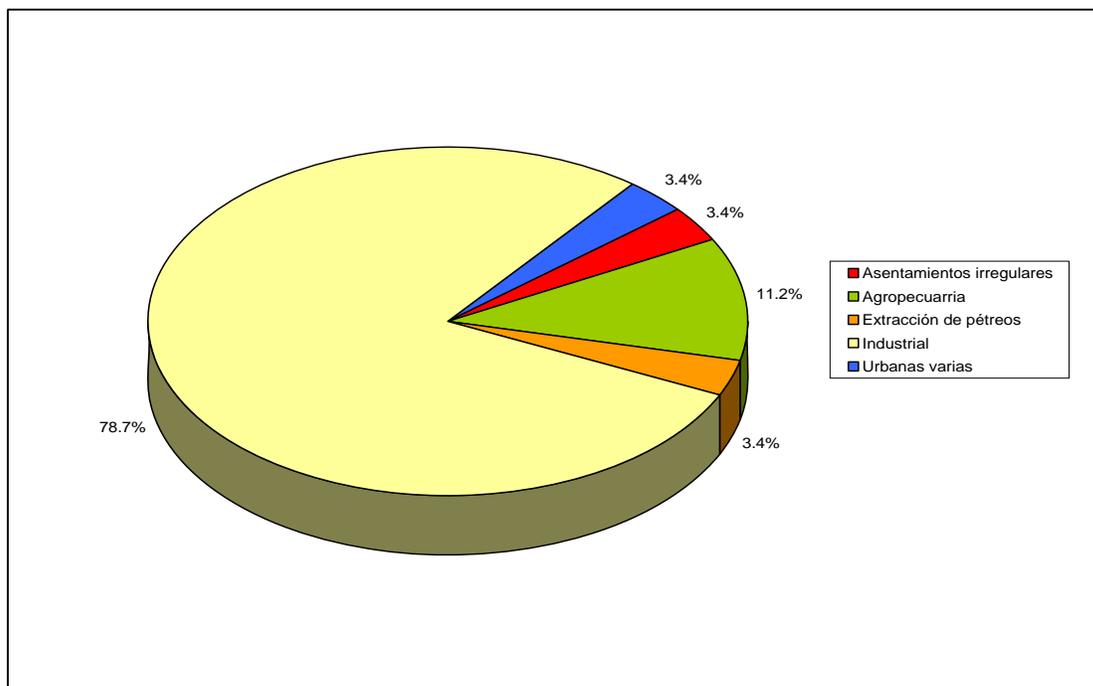


Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar la mayoría de las fuentes contaminantes se localizan en las zonas 1 y 2 del área de estudio, que ocupan las porciones occidental y central del Alamar respectivamente, y, que a su vez, corresponden con las zonas más cercanas al perímetro urbano de la ciudad de Tijuana y por ende, son las más urbanizadas.

Cada una de las fuentes identificadas quedó incluida en uno de los cinco tipos de actividades realizadas en la zona (asentamientos humanos irregulares, prácticas agropecuarias, extracción de materiales pétreos, industrial y urbanas varias). De estos grupos de actividades, el más representativo fue el conformado por el de actividades de tipo industrial, el cual constituye más de la tercera parte de las actividades realizadas en el área de estudio y representa un 78.7 por ciento de estas. El resto de las actividades en conjunto representan un 21.4 por ciento. La distribución porcentual correspondiente a cada uno de los otros cuatro tipos de actividades dentro de todas las identificadas se puede observar en la Figura IV.3.

*Figura IV.3: Porcentaje de fuentes contaminantes, por tipo de actividad.*



*Fuente: Elaboración propia.*

- Asentamientos irregulares:

Se identificaron tres áreas bien definidas, a ambas márgenes del arroyo, localizadas dentro de la zona 2. Para asignar los valores de potencial de carga contaminante a este tipo de fuente se consideró la densidad poblacional (Censo IMPLAN, 2006) y la cobertura de drenaje. La clasificación se efectuó de acuerdo a la planteada por Foster *et al.*, (2002) en la Tabla III.3, resultando que los tres asentamientos irregulares aportan al acuífero un potencial de carga contaminante elevado. Esto se debe a la alta densidad poblacional (mayor a 100 habitantes por hectárea) y a la carencia total de sistema de drenaje. Los datos correspondientes a estas actividades se pueden consultar en el Anexo 1.

- Prácticas agropecuarias:

Se identificaron diez fuentes de este tipo, de las cuales, ocho resultaron campos de cultivo y dos resultaron establos, vacuno y porcino, respectivamente. Este tipo de prácticas se encontró distribuida a todo lo largo del área del acuífero, en particular los campos de cultivo. Para asignar los valores de potencial de carga contaminante a este tipo de fuente se consideró el área ocupada por los campos de cultivo y por los establos, así como la eficiencia de riego y el tipo de pastoreo, en el caso de los establos. Como la agricultura realizada en el Alamar es prácticamente de subsistencia se consideró que la eficiencia de riego y el uso de agroquímicos eran bajos. Por su parte el tipo de pastoreo realizado en los establos se consideró intensivo, ya que en un área pequeña se encontraban concentrados todos los animales. La clasificación se efectuó de acuerdo a la planteada por Foster *et al.*, (2002) en la Tabla III.3, resultando que los ocho campos de cultivo aportan al acuífero un potencial de carga contaminante moderado, mientras que los establos aportan un potencial de carga contaminante elevado. Los datos correspondientes a estas actividades se pueden consultar en el Anexo 2.

- Extracción de materiales pétreos:

Se identificaron tres sitios donde se efectúa la extracción de materiales inertes en las márgenes del arroyo. De estos, dos resultaron ser sitios de extracción y almacenamiento de grava y arena; mientras que el restante resultó ser un sitio de elaboración de ladrillos, para lo cual también se extraen materiales del lugar. Este tipo de actividad se encontró en las zonas 1 y 3 del acuífero. La clasificación se efectuó de acuerdo a la planteada por Foster *et al.*, (2002) en la Tabla III.4, y de esta resultó que los sitios de extracción de pétreos aportan al acuífero un potencial de carga contaminante moderado. Los datos correspondientes a estas actividades se pueden consultar en el Anexo 3.

- Urbanas varias:

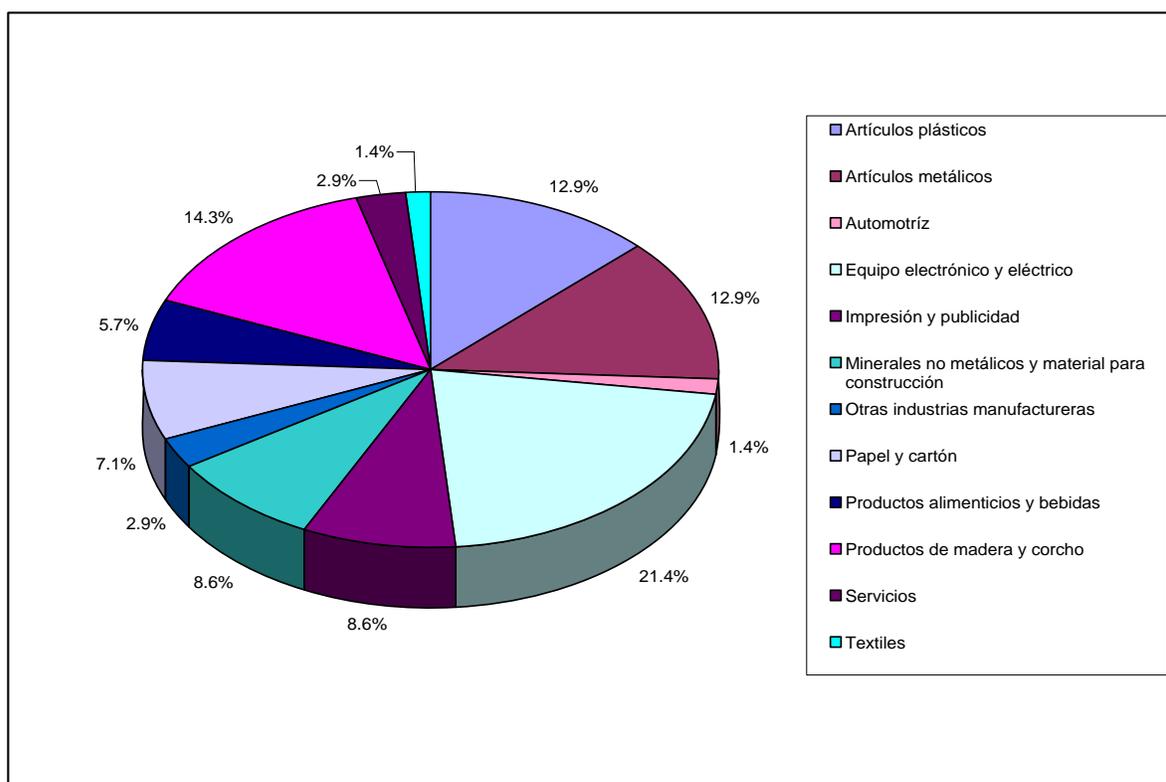
Se identificaron tres sitios catalogados dentro de este tipo de actividades. De estos, dos resultaron ser centros de acopio de chatarra automotriz y el sitio restante fue la central camionera de la ciudad. Todas estas fuentes se localizaron dentro de la zona 1, la cual constituye la más urbanizada de las tres que conforman el área de estudio. La clasificación se efectuó de acuerdo a la planteada por Foster *et al.*, (2002) en la Tabla III.4, y de esta resultó que las fuentes de este tipo aportan al acuífero un potencial de carga contaminante moderado. Los datos correspondientes a estas actividades se pueden consultar en el Anexo 3.

- Actividad industrial:

Se identificaron 70 sitios donde se desarrolla este tipo de actividad, dentro de la superficie de estudio. Todas se localizaron dentro de las zonas 1 y 2 del Alamar, coincidiendo con lo antes mencionado de que corresponden con las más urbanizadas. Dentro de la zona 1 la mayor parte de las industrias se encuentran ubicadas dentro del parque industrial FINSA, mientras que en la zona 2 la mayoría de estas se encuentran localizadas en Ciudad Industrial Nueva Tijuana. Ambos grupos de fuentes se pueden distinguir como altas concentraciones de puntos amarillos en las Figuras IV.1 y IV.2. Mediante los datos del

inventario industrial (Anexo 4) las industrias quedaron agrupadas en 12 sectores de actividad diferentes (Figura IV.4), siendo los más representativos el de equipo electrónico y eléctrico, el de artículos metálicos y el de artículos plásticos, los cuales constituyen en conjunto un 47.2 por ciento de las fuentes industriales. La estimación del potencial de carga contaminante, asociado a estas fuentes, se efectuó de acuerdo a la planteada por Foster *et al.*, (2002) en la Tabla III.4, de lo cual resultó que un 32.9 por ciento de las industrias aportaban un potencial de carga contaminante reducido, un 18.6 por ciento contribuía con un potencial moderado y la mayoría, un 48.6 por ciento, aportaban un potencial de carga elevado (Figura IV.5) el cual coincide con el hecho de que las industrias más contaminantes son aquellas que corresponden a los sectores más representados en el inventario industrial.

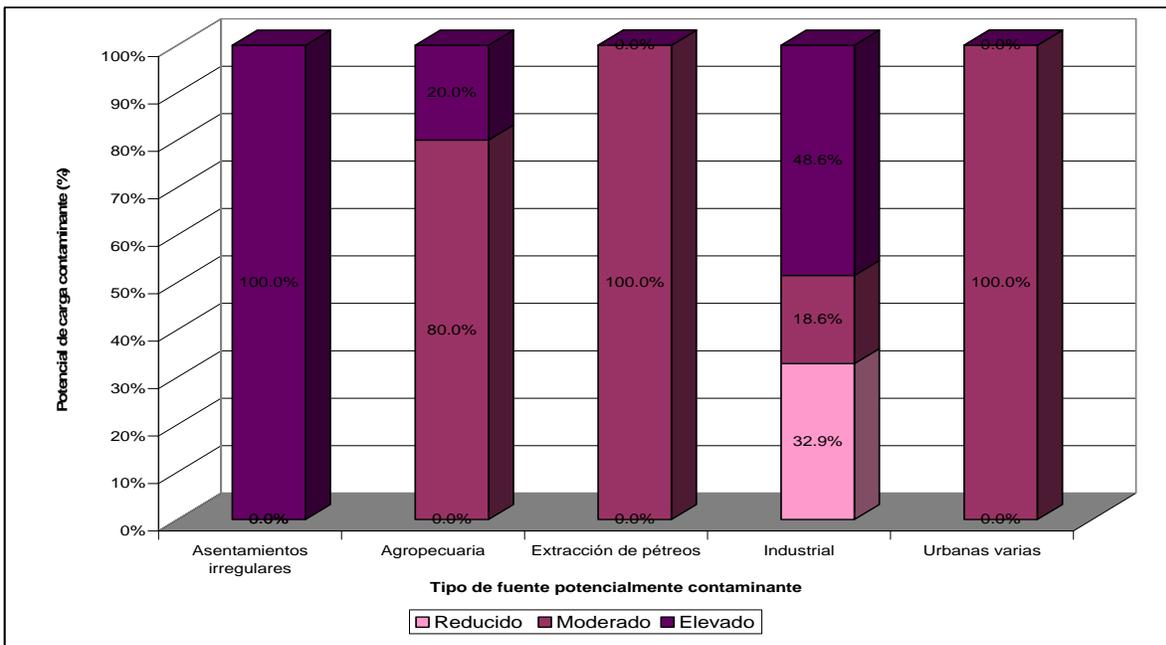
Figura IV.4: Porcentaje de sectores industriales identificados en el área de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura IV.5 se pueden observar los porcentajes que representaron cada categoría de potencial de carga contaminante, dentro de cada uno de los cinco tipos de actividades que se desarrollan en el área de estudio.

*Figura IV.5: Porcentaje de potencial de carga contaminante de acuerdo al tipo de actividad contaminante.*

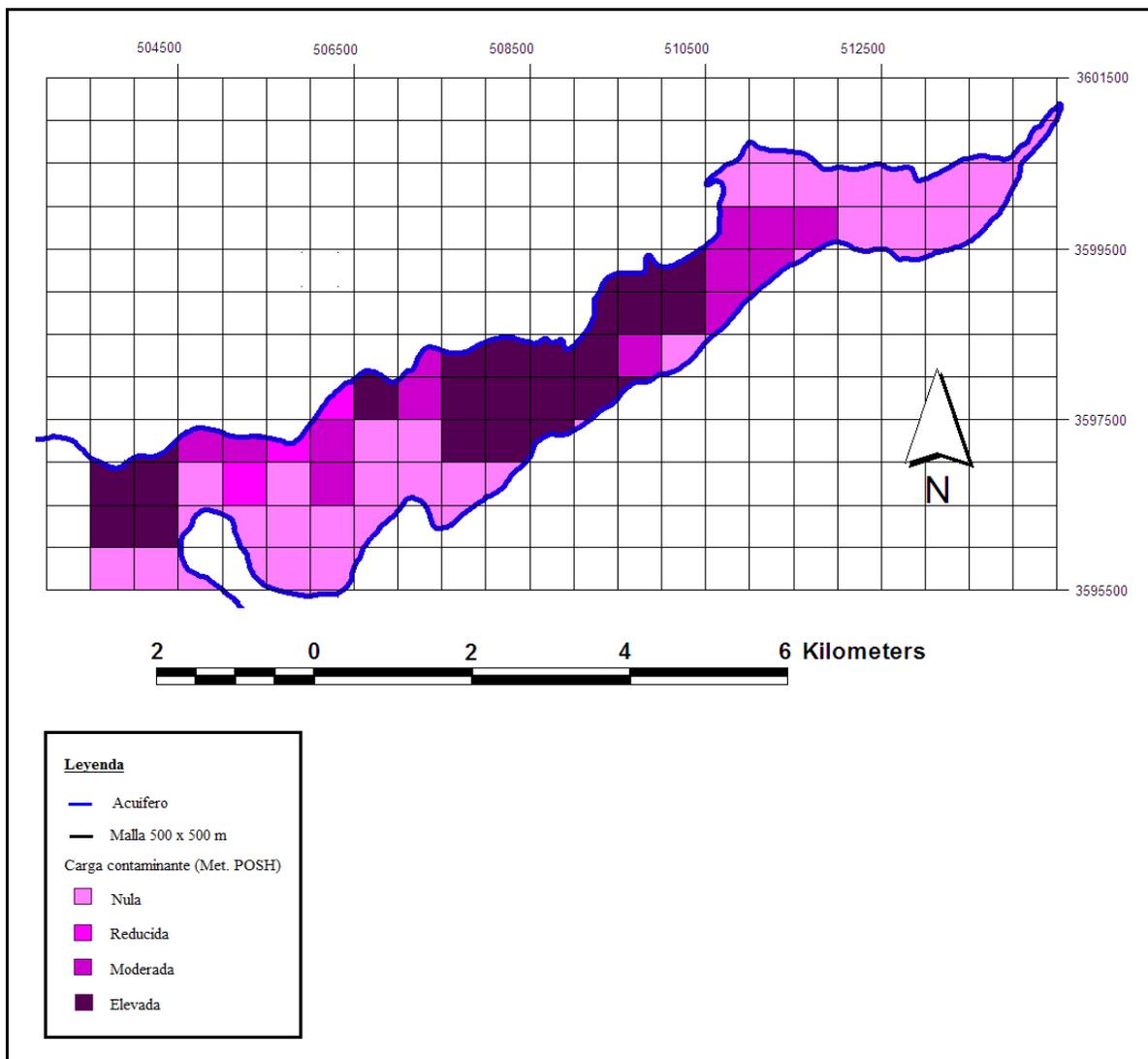


*Fuente: Elaboración propia.*

#### **IV.1.2 Estimación de la carga contaminante del acuífero.**

A partir de los datos del inventario de fuentes contaminantes y de la asignación de un potencial de carga contaminante a cada una de las actividades, se obtuvo el mapa de carga contaminante del acuífero del Arroyo Alamar (Figura IV.6). Los datos para la elaboración de este mapa se encuentran en el Anexo 5.

Figura IV.6: Mapa de carga contaminante del acuífero del Arroyo Alamar.



Fuente: Elaboración propia.

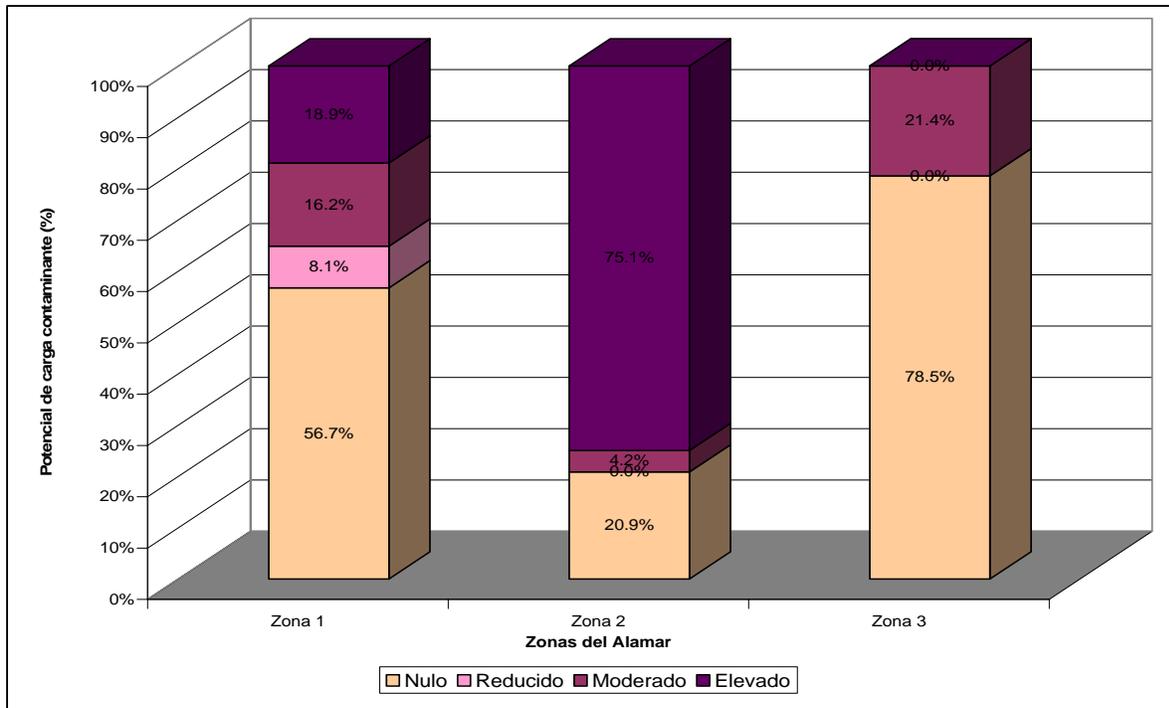
En este mapa se puede observar la distribución de los diferentes potenciales de carga contaminante a lo largo de toda el área del acuífero. En él se distinguen claramente dos áreas donde el potencial de carga contaminante es elevado, las cuales coinciden con las áreas donde se encuentran altamente concentradas las fuentes de origen industrial, correspondientes con los dos parques industriales de la parte sur de la Mesa de Otay (FINSA y Ciudad Industrial Nueva Tijuana). En estas dos zonas de potencial de carga contaminante elevado, también inciden

otros tipos de actividades como son las urbanas varias, los asentamientos irregulares, los campos de cultivo y los establos y, en menor medida la extracción de pétreos.

Es visible también la existencia de dos áreas, en los extremos sur-occidental y oriental, en donde el potencial de carga contaminante es nulo. Esto viene a representar las áreas del acuífero donde no fueron localizadas actividades potencialmente contaminantes. En el caso de la porción más oriental coincide con la parte menos urbanizada del acuífero y más alejada de la ciudad, por lo cual se desarrollan un menor número de actividades que pudieran generar contaminación a este cuerpo de agua.

En la Figura IV.7 se puede observar el porcentaje de la distribución de los diferentes potenciales de carga contaminante, en las tres zonas que conforman el acuífero.

*Figura IV.7: Porcentaje de los potenciales de carga contaminante por cada zona del acuífero.*



*Fuente: Elaboración propia.*

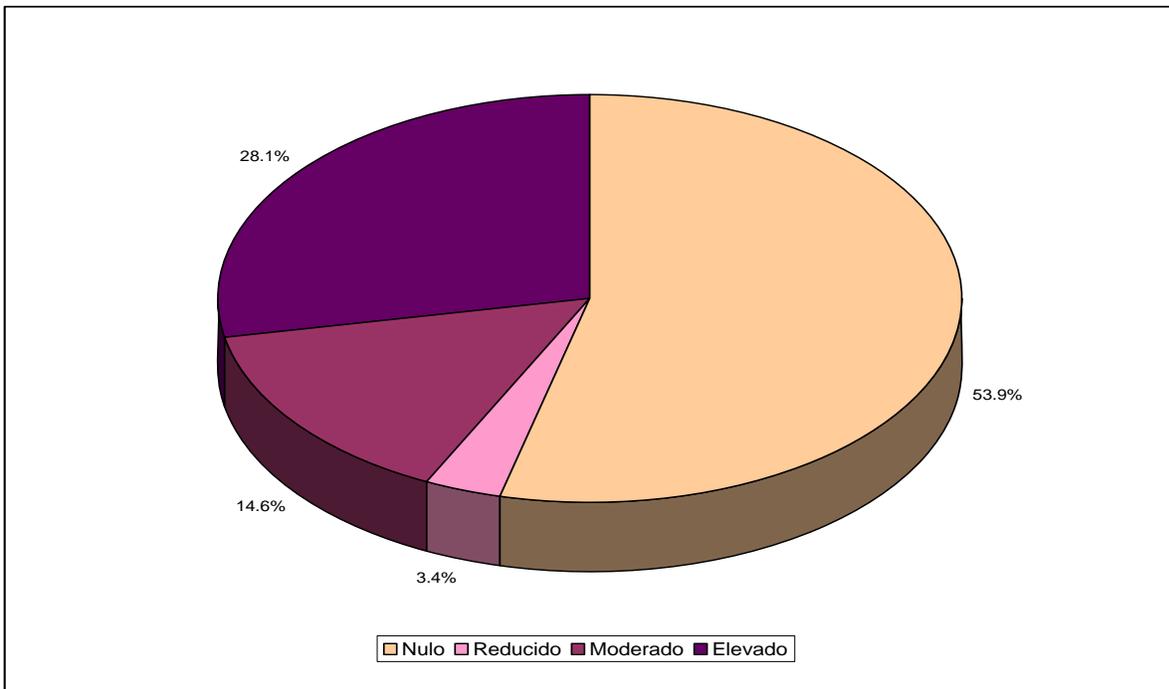
En este gráfico se ve que en la zona 1 del Alamar se establece casi un “equilibrio” entre el potencial de carga contaminante nulo, con un 56.7 por ciento del área y el resto de los potenciales de carga contaminante en su conjunto, que suman un 43.3 por ciento. Esto se debe a que la zona 1 del Alamar es la más extensa y concentra las fuentes contaminantes en su porción noroccidental, las cuales se corresponden, en su mayoría con las industrias del parque industrial FINSA.

Por otra parte, en la zona 2 del Alamar se observa un predominio del potencial de carga contaminante elevado, 75.1 por ciento, el cual se corresponde con el aportado por las industrias de Ciudad Industrial Nueva Tijuana, por los asentamientos irregulares ubicados en esta zona del acuífero y en menor medida por los establos y campos de cultivo. La zona 2 del Alamar es donde se observa una mayor concentración de actividades potencialmente contaminantes.

Por último, se puede ver como en la zona 3 del Alamar existe un predominio del potencial de carga contaminante nulo (78.5 %), lo cual es resultado de las pocas fuentes contaminantes situadas en esa zona del acuífero. Un 21.4 por ciento del potencial de carga asociado a la zona resultó moderado, este se corresponde con las actividades extractivas y agropecuarias que son las únicas identificadas en esta sección del acuífero. El escaso número de actividades realizadas en esta zona hacen de ella la del menor potencial de carga contaminante dentro del área de estudio, lo cual se debe a que es la menos urbanizada de las tres que la conforman.

En la Figura IV.8 se pueden ver los porcentajes de las cuatro categorías de carga contaminante en toda el área del acuífero.

*Figura IV.8: Porcentaje de los potenciales de carga contaminante en toda el área del acuífero.*



*Fuente: Elaboración propia.*

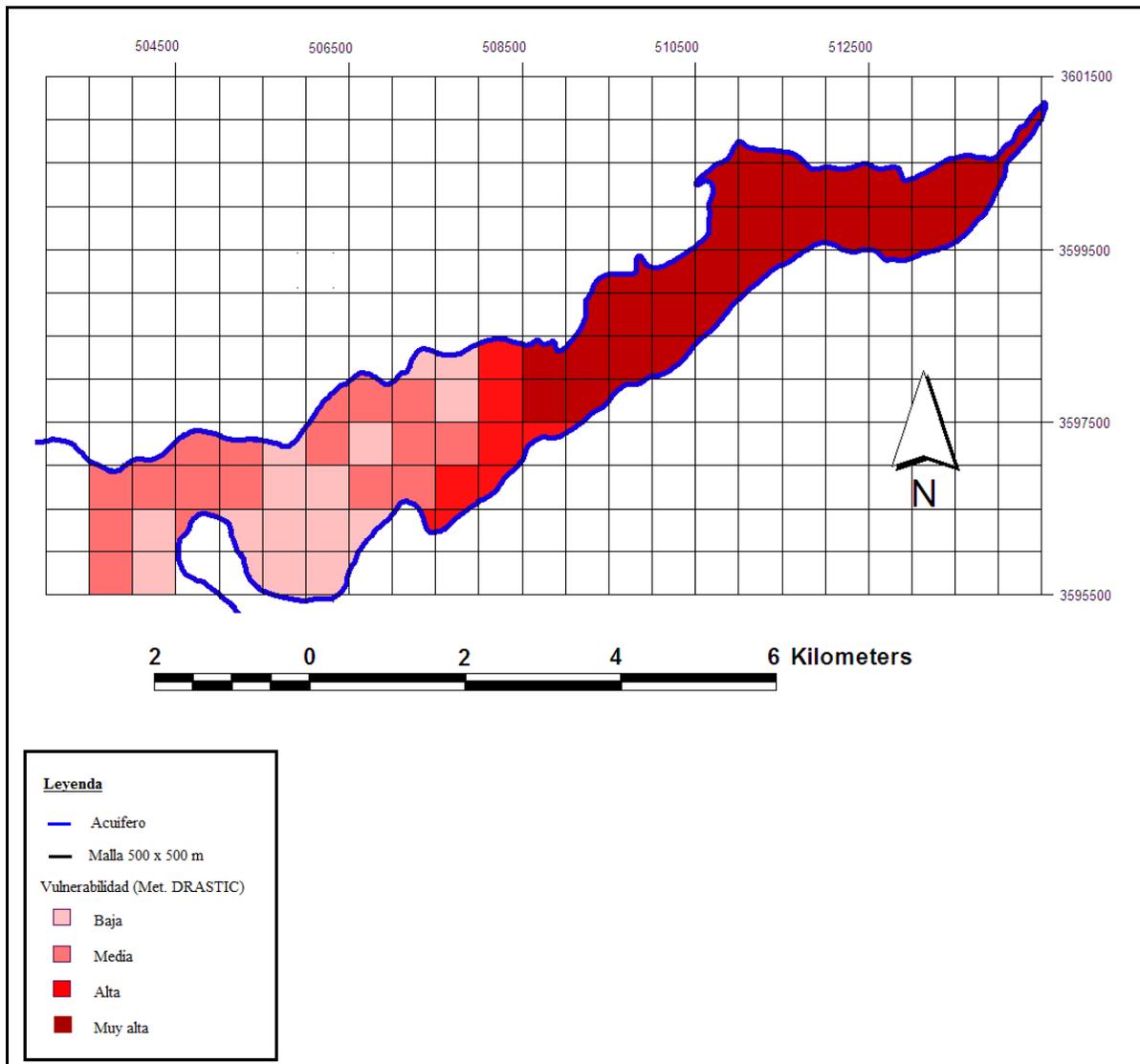
De este gráfico se desprende que en el acuífero existe prácticamente un “balance” entre las áreas donde no se realizan actividades potencialmente contaminantes (53.9 %) y aquellas en que sí se localizan fuentes que potencialmente podrían contaminar este cuerpo de agua (46.1 %), con un ligero predominio de las zonas donde la carga contaminante es nula. Estas zonas se corresponden con los extremos suroccidental y oriental del acuífero. En cuanto a las áreas donde existe carga contaminante se puede decir que hubo un predominio de la categoría elevado (28.1 %), sobre las áreas con potencial de carga moderado y reducido. Esto implica que las actividades realizadas en el área de estudio poseen una elevada probabilidad de contaminar el agua del acuífero, de ahí que requieran un elevado control y constante monitoreo.

## **IV.2. Mapa de vulnerabilidad.**

Los datos de vulnerabilidad intrínseca fueron retomados del trabajo elaborado por Gutiérrez, (2006), de modo que no se obtuvieron como resultado de este trabajo de tesis. No obstante, como el propósito final del presente trabajo es brindar una evaluación del peligro de contaminación al que se halla expuesto el acuífero del Arroyo Alamar, y este es el resultado de la interacción entre la carga contaminante y la vulnerabilidad, se hace necesario hacer un breve análisis sobre este segundo componente del peligro de contaminación del acuífero.

En la Figura IV.9 se muestra el mapa de vulnerabilidad del acuífero. En esta se puede observar que una gran parte de él posee una vulnerabilidad muy elevada, desde su porción central hasta la oriental; mientras que la vulnerabilidad baja y media predominan hacia su porción occidental.

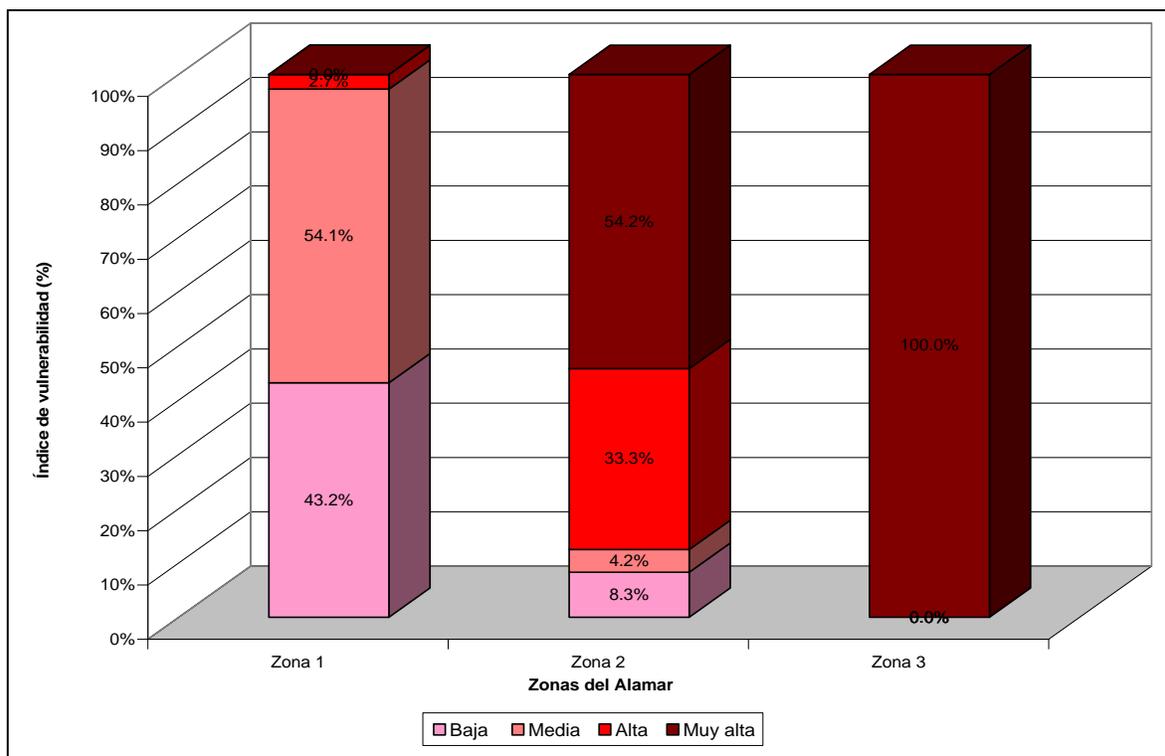
Figura IV.9: Mapa de vulnerabilidad del acuífero del Arroyo Alamar.



Fuente: Gutiérrez 2006.

En la Figura IV.10 se puede apreciar cómo se comportó el índice de vulnerabilidad en cada una de las tres zonas en que se divide el Alamar.

Figura IV.10: Porcentaje del índice de vulnerabilidad por cada zona del acuífero.

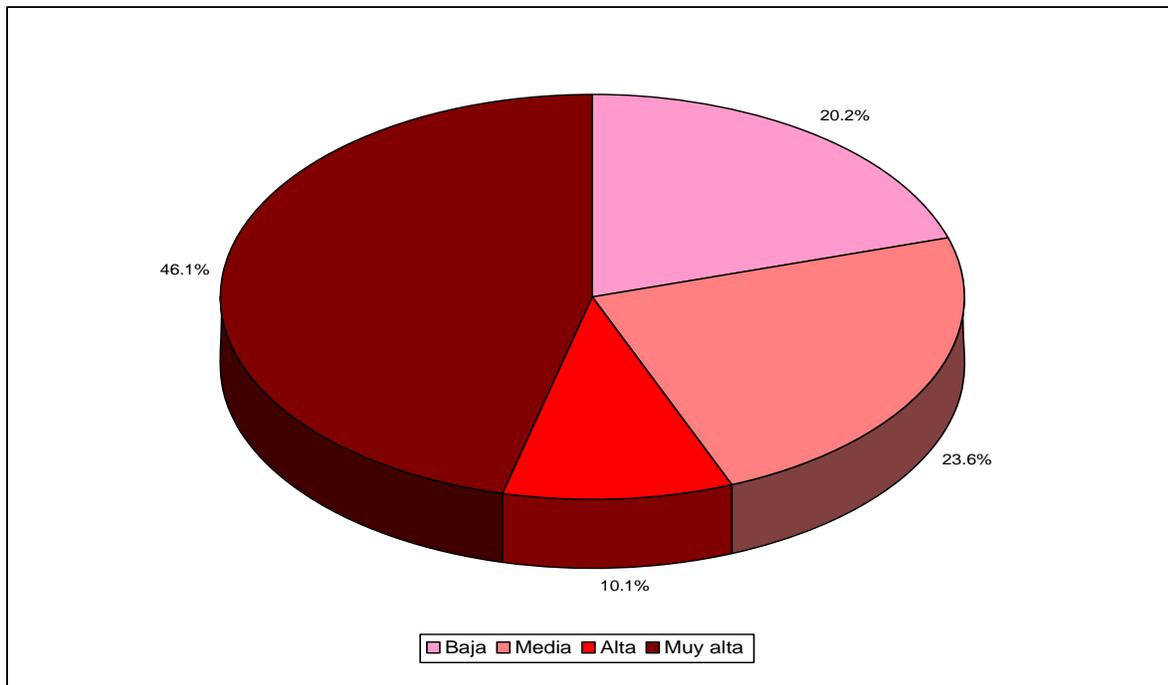


Fuente: Elaboración propia. Datos tomados de Gutiérrez, 2006.

El gráfico muestra que en la zona 1 predominan la vulnerabilidad media y la baja, que en conjunto representan un 97.3 por ciento de la vulnerabilidad en esa porción del acuífero. Por otra parte, en la zona 2 predominan la vulnerabilidad alta y muy alta, que en conjunto suman un 87.5 por ciento, aunque cabe mencionar que esta fue la zona del acuífero en que la vulnerabilidad se mostró más heterogénea. Por último, en la zona 3, la vulnerabilidad del acuífero resultó completamente homogénea, categorizándose el 100 por ciento como muy elevada.

En la Figura IV.11 se muestra cómo se comportó el índice de vulnerabilidad en toda el área del acuífero.

*Figura IV.11: Porcentaje de los índices de vulnerabilidad en toda el área del acuífero.*



*Fuente: Gutiérrez, 2006.*

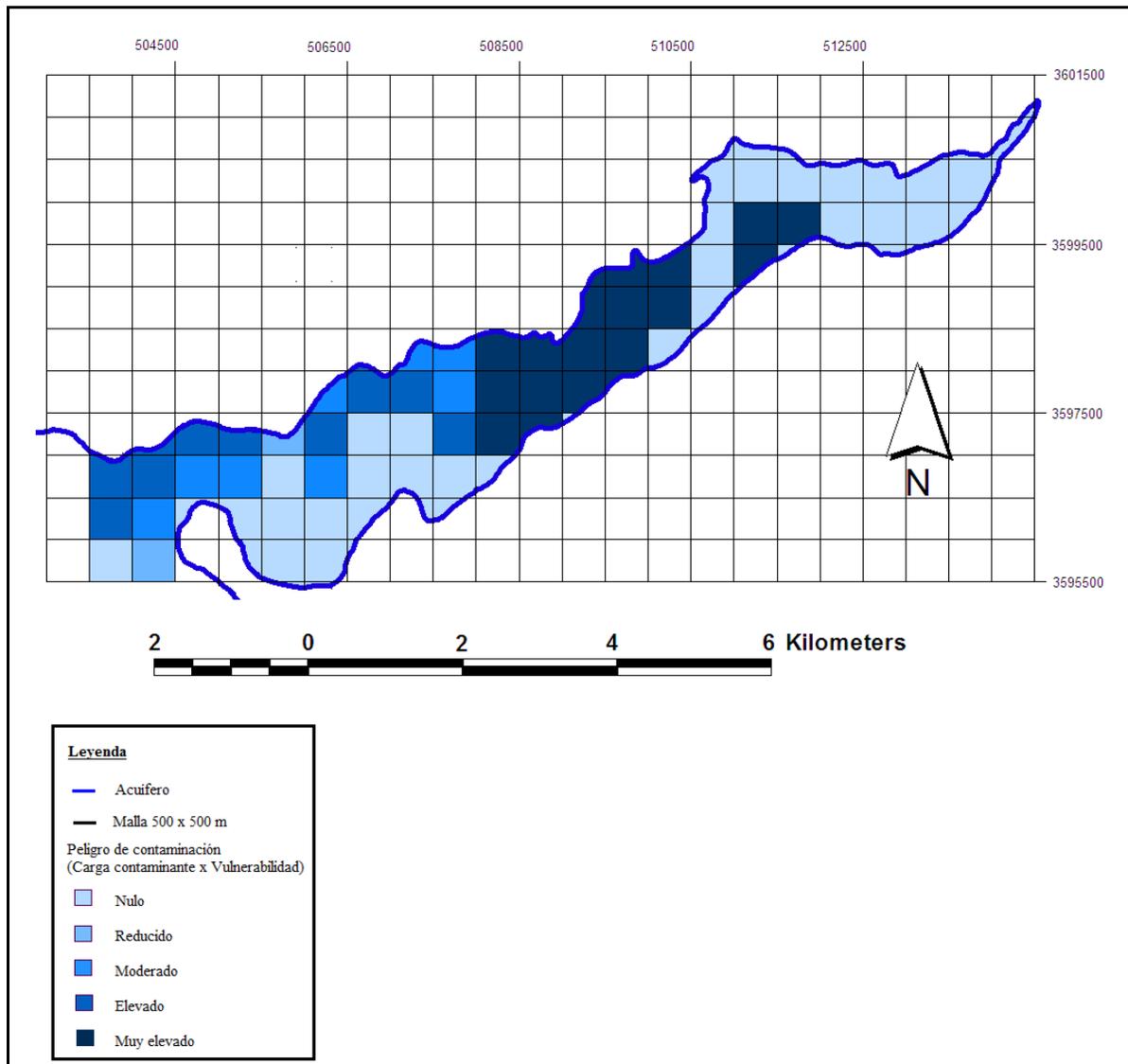
En este gráfico se puede ver que la mayor parte del acuífero posee una vulnerabilidad elevada, conformada por las categorías muy elevada y elevada, las que en conjunto representan un 56.2 por ciento del área del acuífero, la cual corresponde con las porciones central y oriental de este. Por otra parte las categorías de vulnerabilidad media y baja representaron el 23.6 y 20.2 por ciento respectivamente y predominan en la porción occidental del acuífero. Esto implica que las propiedades físicas del acuífero, en general, lo hacen propenso a la contaminación.

### **IV.3 Evaluación del peligro de contaminación.**

Una vez obtenidos los mapas de carga contaminante y de vulnerabilidad intrínseca del acuífero se procedió a solaparlos para generar el mapa de peligro de contaminación del acuífero del Arroyo Alamar (Figura IV.12). Para más detalles sobre los valores del peligro de contaminación del acuífero se puede consultar el Anexo 6. Es importante mencionar que este mapa es válido sólo si se tienen en cuenta las fuentes contaminantes identificadas en este trabajo. De hacerse otro inventario de cargas contaminantes, o de incorporarse nuevas actividades potencialmente contaminantes en el área de estudio, habría que volver a elaborar dicho mapa, para contemplar la carga contaminante que aportan estas nuevas actividades.

En el mapa se puede observar cómo queda distribuido el peligro de contaminación en toda el área del acuífero. Se pueden distinguir dos zonas bien definidas donde el peligro es muy elevado, una hacia la porción central del acuífero y otra hacia la porción suroriental, lo cual se explica porque en ellas coinciden potenciales de carga elevado y moderado, con una vulnerabilidad muy alta, lo cual favorece la contaminación del acuífero en esas zonas. Esto resulta de la combinación de las características que tienen las actividades realizadas, así como de las propiedades físicas que posee el acuífero en esas zonas. También son visibles dos zonas hacia el noroeste del acuífero donde el peligro de contaminación es elevado. Por otra parte, se observan dos zonas homogéneas donde el peligro de contaminación es nulo, correspondientes a las porciones suroccidental y oriental. Estas son el resultado de no ubicarse fuentes contaminantes en el lugar (de las inventariadas durante este trabajo), haciendo nulo el potencial de carga contaminante, lo cual conduce a que no exista peligro de contaminación en esas áreas del acuífero, aunque sus propiedades físicas lo favorezcan.

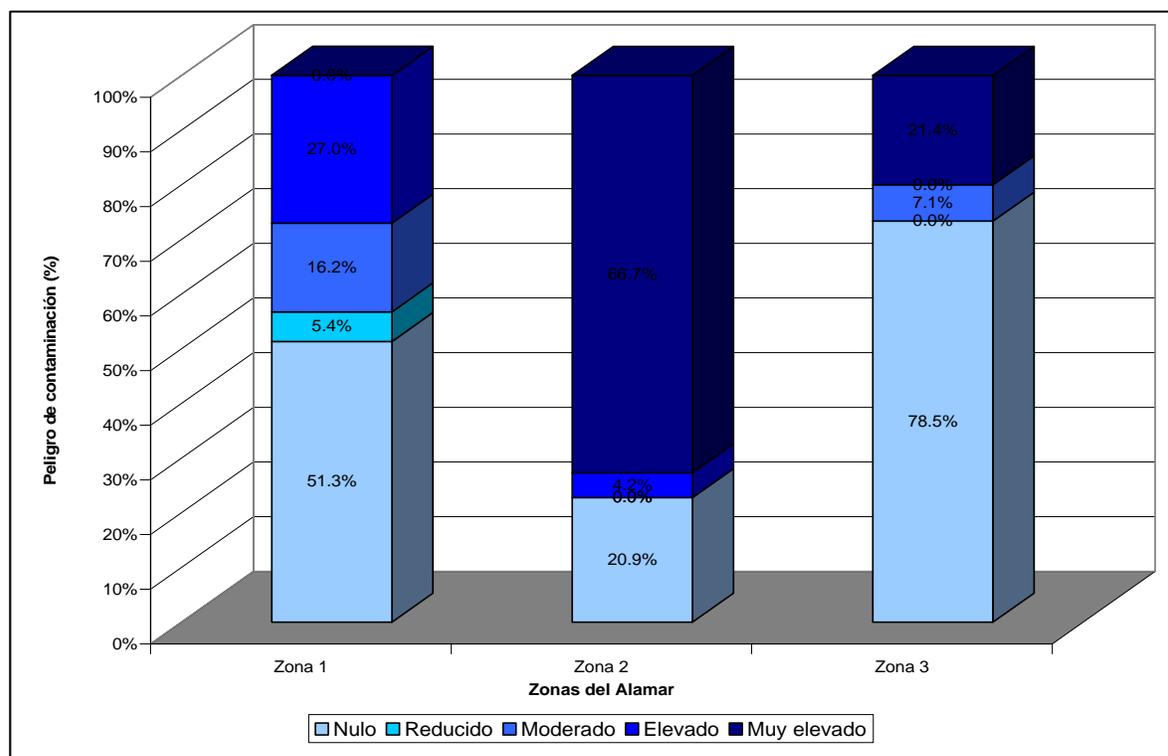
Figura IV.12: Mapa de peligro de contaminación del acuífero del Arroyo Alamar.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura IV.13 se muestra cómo se comportó el peligro de contaminación en cada una de las tres zonas en que queda dividido el Alamar.

*Figura IV.13: Porcentaje del índice de vulnerabilidad por cada zona del acuífero.*



*Fuente: Elaboración propia.*

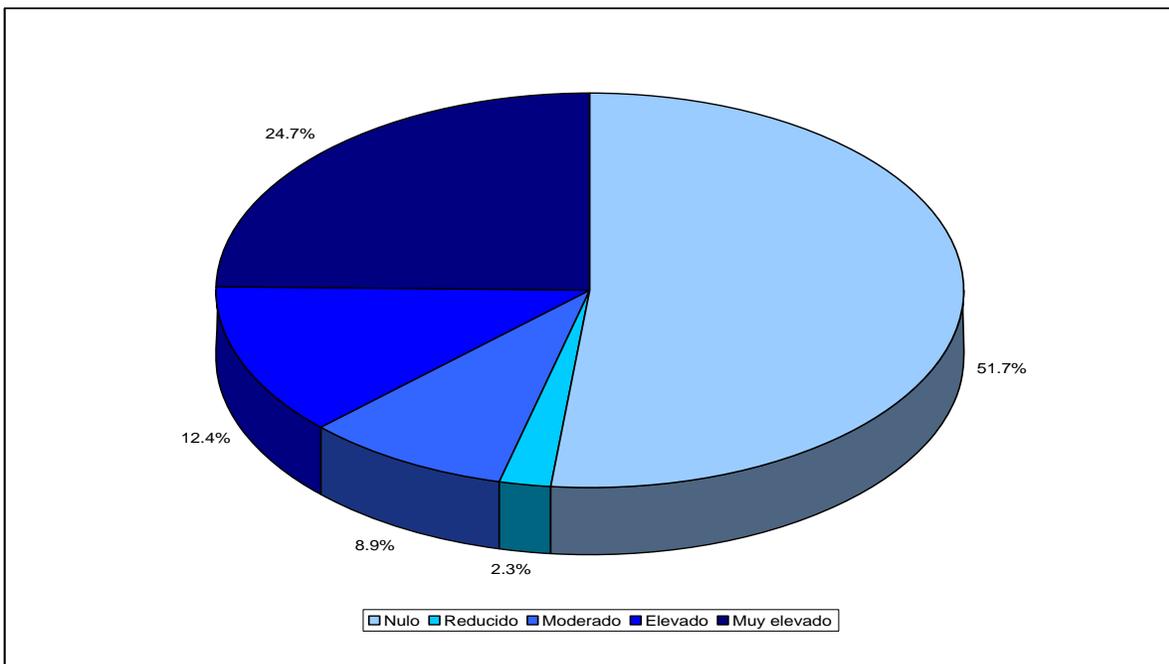
Del gráfico se desprende que en la zona 1 el comportamiento del peligro de contaminación fue el más heterogéneo dentro de todo el acuífero, lo que resulta del comportamiento también heterogéneo del potencial de carga contaminante y del índice de vulnerabilidad en esta zona. En la zona 1 se establece prácticamente un balance entre el área con nulo peligro de contaminación (51.3 %) y el área en que este existe con diferentes categorías (48.7 %).

Por su parte, la zona 2 del Alamar mostró ser la más propensa a contaminarse, con un 70.9 por ciento de peligro de contaminación muy elevado y elevado. Esto se debe a que en dicha zona la carga contaminante resultó mayormente elevada y la vulnerabilidad resultó muy alta y alta, lo cual condujo al elevado peligro de contaminación que se observa en ella.

Con respecto a la zona 3 del Alamar se puede observar que es la menos propensa a contaminarse (78.5 %), a pesar de que resultó ser la de vulnerabilidad más elevada. Esto se puede explicar por el hecho de que aunque la zona 3, físicamente es la más sensible a la contaminación, en ella no se identificaron prácticamente fuentes generadoras de carga contaminante, por lo cual al no existir actividades que produzcan contaminantes, el peligro de que la zona se contamine es bajo o nulo.

En la Figura IV.14 se muestra cómo se comportó el peligro de contaminación en toda el área del acuífero.

*Figura IV.14: Porcentaje del peligro de contaminación en toda el área del acuífero.*



*Fuente: Elaboración propia.*

Aproximadamente la mitad del área del acuífero mostró un peligro de contaminación nulo (51.7 %), correspondiente con las áreas donde no existe carga contaminante (de acuerdo con las actividades inventariadas durante el estudio). En la otra mitad del área del acuífero (48.3 %) existió peligro de contaminación, el cual se distribuyó en las cuatro categorías restantes (muy elevado, elevado, moderado y reducido). Las zonas con peligro de contaminación elevado (muy elevado y elevado) representaron un 37.1 por ciento del área del acuífero, es decir poco más de la tercera parte de la superficie de este, siendo estas zonas sobre las cuales se debe centrar la atención y extremar las medidas de prevención y control.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Durante el desarrollo de este trabajo de tesis y con la obtención de los resultados se pudo llegar a las siguientes conclusiones:

- Aproximadamente la mitad del área que abarca el acuífero del Arroyo Alamar está en peligro de hallarse contaminada. De esta, el mayor porcentaje está representado por un peligro de contaminación que va desde muy elevado a elevado. Estas áreas coinciden con las porciones noroccidental, central y suroriental, donde la interacción entre la vulnerabilidad y la carga contaminante impuesta al acuífero resultó en zonas altamente expuestas a la contaminación.
- La otra mitad del área recorrida por este acuífero presentó un peligro de contaminación nulo, lo cual se corresponde con las áreas dentro de él donde no se identificaron fuentes potencialmente contaminantes durante el inventario realizado. Estas áreas están localizadas en la porción suroccidental y extremo oriental, que tienen como característica común estar menos urbanizadas.
- De las fuentes potencialmente contaminantes identificadas durante el inventario efectuado, la actividad industrial fue la que se mostró más significativa dentro del área de estudio y además, con los potenciales de contaminación más elevados. Estos altos potenciales de carga contaminante se deben a que la mayoría de las industrias identificadas pertenecen a sectores industriales altamente contaminantes, por el tipo de sustancias que manejan. Estos sectores son: electrónico-eléctrico, artículos metálicos y artículos de plástico.
- De los otros tipos de actividades identificadas la que siguió a la industrial, en representatividad, fue la agropecuaria; sin embargo por las características que esta presenta en el área de estudio: pequeñas extensiones de terreno, prácticamente de subsistencia y por tanto, con bajo empleo de agroquímicos, esta no aportó altos índices de carga contaminante al peligro de contaminación del acuífero.

- El otro tipo de actividad que tiene lugar en el área de estudio y que resultó significativa, en cuanto a la carga contaminante que está aportando al acuífero, fue el saneamiento *in situ*, representado en este trabajo por los asentamientos humanos irregulares que están ubicados en las márgenes del Arroyo Alamar y que carecen por completo de infraestructura de drenaje.
- En el caso de los otros tipos de actividades identificadas, cuyo potencial de carga contaminante asociado resultó moderado o bajo, cobraron importancia al hallarse en zonas donde coincidieron con otras actividades que sí aportaban una carga contaminante considerable al acuífero. Esto se vio reflejado en varias partes del Alamar, donde se observó que en un mismo sitio incidían diferentes actividades, y por tanto, diferentes tipos de carga contaminante. Cada una de ellas contribuye a la carga contaminante general que le está siendo impuesta al acuífero.
- Con respecto a la hipótesis planteada inicialmente en este trabajo, podemos decir que se confirmó de manera parcial, ya que el peligro de contaminación al que se halla expuesto el acuífero del Arroyo Alamar es elevado en poco más de la tercera parte de su área. Teniendo en cuenta los antecedentes de falta de control en el sitio y la contaminación que se viene dando a consecuencia de ello, podemos inferir que la hipótesis no se cumplió en la totalidad del área del acuífero porque el inventario de fuentes contaminantes realizado tuvo limitaciones de tiempo y por ende no pudo ser del todo detallado.
- Otros factores que pudieron haber influido en la evaluación de las cargas contaminantes, y por tanto en subvalorar el peligro de contaminación del acuífero, pudieron ser las limitaciones inherentes a la metodología empleada como consecuencia de la disponibilidad de información acerca de las fuentes contaminantes. La metodología POSH no considera las concentraciones, ni los volúmenes de contaminantes emitidos por cada una de las fuentes, lo cual hace difícil conocer el área de influencia real de cada una de estas actividades y hasta dónde contribuyen en realidad a la contaminación del acuífero.

- El mayor peligro de contaminación del acuífero del Arroyo Alamar se encontró en la zona 2, donde convergen una vulnerabilidad muy alta con una carga contaminante elevada. Es en esta zona donde se identificaron un mayor número de fuentes potencialmente contaminantes, de ahí que sea en esa sección del acuífero donde se debe prestar una mayor atención a las actividades que se realizan.
- La zona del Alamar con menor peligro de contaminación del acuífero es la 3, ya que no obstante a ser la de vulnerabilidad más alta, fue donde se identificaron un menor número de actividades potencialmente contaminantes y por tanto, una menor carga contaminante fue asociada a esta sección del acuífero.

Este trabajo de tesis constituye una aproximación al problema de contaminación de las escasas fuentes de agua subterránea con que cuenta la ciudad de Tijuana, en particular la contaminación del acuífero del Arroyo Alamar. De ahí que pretenda llegar de alguna manera hasta los tomadores de decisiones y autoridades que puedan emplearlo como herramienta para hacer cumplir lo establecido en materia de protección del agua subterránea, así como en la regulación y control de las actividades que se vienen realizando en el entorno del área de recarga del acuífero. Con este propósito se realizan las siguientes recomendaciones:

- Realizar en el área de estudio, y teniendo en cuenta las zonas de los parteaguas del Arroyo Alamar, un inventario de fuentes contaminantes más detallado que el efectuado durante el desarrollo de este trabajo.
- Recopilar más información acerca de las fuentes contaminantes identificadas en el inventario, tales como las concentraciones y volúmenes de las sustancias contaminantes que manejan. Esto con el propósito de poder estimar con mayor exactitud la carga contaminante que aportan al acuífero.
- Tener en cuenta las áreas residenciales del Alamar que tampoco tienen cobertura de drenaje en un 100 por ciento de su superficie.

- Tener en cuenta los tiraderos clandestinos de basura que se encuentran a todo lo largo del Alamar.
- Establecer medidas de control y vigilancia en las áreas del acuífero donde se observó un mayor peligro de contaminación. De ya existir estas, implementar mecanismos que obliguen a que sean cumplidas.
- Reubicar los asentamientos humanos irregulares que se localizan en las márgenes del Arroyo Alamar y sobre el área de recarga del acuífero. Implementar medidas de vigilancia y control en la zona que eviten que una vez reubicados, las personas se vuelvan a asentar en estos lugares.
- Considerar en el Plan Parcial de Desarrollo de la zona el mapa de vulnerabilidad del acuífero, ya que este brinda información invariable acerca de las características físicas de este cuerpo de agua subterránea.
- De proyectarse nuevas actividades en la zona, incluirlas en el inventario de fuentes contaminantes y renovar el mapa de peligro de contaminación del acuífero del Arroyo Alamar.
- Crear programas de educación ambiental para la comunidad que la sensibilicen con el cuidado, importancia y protección del agua subterránea.
- Establecer una mayor cooperación entre los diferentes niveles de gobierno, entidades que manejan datos relacionados con el área de estudio, instituciones académicas, organizaciones no gubernamentales y la comunidad en general, todo esto con el propósito de conseguir la protección del acuífero, de lo que se desprende una mejor calidad del agua subterránea proporcionada por este y la garantía para la ciudad de Tijuana de una fuente de agua localizada dentro de su propio territorio, lo cual se traduce

en una menor dependencia del suministro externo de agua y en una disminución del gasto en que incurre la ciudad al transportar este recurso desde el Río Colorado.

## BIBLIOGRAFÍA

- Auge, Miguel, *Agua subterránea. Deterioro de calidad y reserva*, Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Departamento de Ciencias Geológicas. Cátedra de Hidrogeología, Universidad de Buenos Aires, 2006.
- CEA-SIDUE (Comisión Estatal del Agua- Secretaria de Infraestructura y Desarrollo Urbano, México), *Programa Estatal Hidráulico 2003-2007, Baja California, México*, 2003.

En línea: <http://www.bajacalifornia.gob.mx/coplade/subcomites/phidraulico.pdf>

Consultado: Mayo 2008.

- CESPT (Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana, México), *Reporte Técnico: Arroyo Alamar*. Agosto, 2006. No publicado, citado en Gutiérrez Anima, Arizbé 2006.
- CNA (Comisión Nacional del Agua, México), *Cuenca del Arroyo Alamar, Tijuana, B.C., Estudio Hidrológico*, 1993.
- CNA (Comisión Nacional del Agua, México), *Estudio de simulación hidrodinámica de los acuíferos de Tijuana y La Misión, Baja California*, 1999.
- *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. Diario Oficial de la Federación, 2004.

En línea: <http://pdba.georgetown.edu/Constitutions/Mexico/mexico2004.html>

Consultado: Mayo 2008.

- Directorio de Fabricantes y Directorio de Maquilas de Baja California. Secretaría de Desarrollo Económico, 2007.

En línea:

[http://www.bajacalifornia.gob.mx/sedeco/web\\_2005/documentos/DIRECTORIO%20FABRICANTES.pdf](http://www.bajacalifornia.gob.mx/sedeco/web_2005/documentos/DIRECTORIO%20FABRICANTES.pdf)

[http://www.bajacalifornia.gob.mx/sedeco/web\\_2005/documentos/DIRECTORIO%20MAQUILADORAS%20TIJUANA.pdf](http://www.bajacalifornia.gob.mx/sedeco/web_2005/documentos/DIRECTORIO%20MAQUILADORAS%20TIJUANA.pdf)

Consultado: Febrero-Junio 2008.

- Directorio de la Industria Maquiladora de Baja California, (2007),.  
En línea: [www.industriamaquiladora.com](http://www.industriamaquiladora.com)  
Consultado: Febrero 2008.
- EPA (Environmental Protection Agency) *Guide for conducting contaminant source inventories for public drinking water supplies: technical assistance document*, Washington D.C., Environmental Protection Agency, Office of Water, 1991.
- Espinoza, Ana Elena, Pietero Magdaleno y Víctor Miguel Ponce, *Arquitectura fluvial sustentable en el Arroyo Alamar, Tijuana, Baja California, México*, San Diego, California, Centro de Estudios Sociales y Sustentables, Tijuana, Baja California y San Diego State University, 2004.  
En línea: [http://ponce.sdsu.edu/alar\\_architectura\\_sustentable\\_reporte1.html](http://ponce.sdsu.edu/alar_architectura_sustentable_reporte1.html).  
Consultado: Mayo 2008.
- Figueroa Trujillo, Mario G. y Rosa Sánchez Castellanos, *Inventario de fuentes potenciales de contaminación acuífera. Simposium Gestión Integral del Agua. Tema 1: El agua y su entorno*. Guanajuato México, Universidad Iberoamericana plantel León. Comisión Estatal del Agua, 2001.
- Fornez Azcoiti, Juan. y Ramón Llamas Madurga, *Vulnerabilidad y protección de acuíferos en España: Visión desde la investigación*. Valencia, España, Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente. AIH-GE, 1998, pp. 339-355.
- Foster, Stephen y Ricardo Hirata, *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Una metodología basada en datos existentes*, 2<sup>da</sup> edición, Lima, Perú, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Organización Mundial de la Salud. Programa de Salud Ambiental, 1991.
- Foster, Stephen *et al.*, *Estrategias para la protección del agua subterránea. Una guía para su implementación*, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.

División de Salud y Ambiente. Organización Panamericana de la Salud- Organización Mundial de la Salud. UK Overseas Development Administration, 1992.

- Foster, Stephen *et al.*, *Protección de la calidad del agua subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales*, Washington D.C., Banco Mundial, 2002.
- Gutiérrez Anima, Arizbé, “*Análisis de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero del Arroyo Alamar y actitud social hacia su protección.*”, tesis de maestría, Tijuana, México, El Colegio de la Frontera Norte- Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, 2006.
- Guzmán García, Saúl, “*La contaminación del acuífero del Río Tijuana. Efectos y riesgo potencial en el ámbito local, regional e internacional debido a la descarga de aguas residuales al acuífero del Río Tijuana.*”, tesis de maestría, Tijuana, México, El Colegio de la Frontera Norte- Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, México, 1998.
- IMPLAN (Instituto Municipal de Planeación, Tijuana, B.C., México), *Programa Parcial de Desarrollo Urbano del Arroyo Alamar 2007-2018. Versión abreviada*, 2007.
- IMPLAN (Instituto Municipal de Planeación, Tijuana, B.C., México), *Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Tijuana 2002-2025*, Tijuana, México, 2002. En línea: <http://www.tijuana.gob.mx/dependencias/sedum/pducpt.asp>

Consultado: Mayo 2008.

- *Ley de Aguas Nacionales. México*. Diario Oficial de la Federación (texto vigente). Cámara de Diputados del H Congreso de la Unión. Secretaría General. Secretaría de Servicios Parlamentarios. Centro de Documentación, Información y Análisis.

En línea: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16.pdf>

Consultado en: Mayo 2008.

- *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)*, en: *Legislación de Ecología*, México, Editorial SISTA, 2006.
- Michel, Suzanne y Carlos Graizbord, *Los ríos urbanos de Tecate y Tijuana: Estrategias para ciudades sustentables*, San Diego, California, Institute for Regional Studies of the Californias, San Diego State University, 2002, pp. 9-31.
- Michel, Suzanne *et al.*, *The Alamar River corridor: An urban river park oasis in Tijuana, Baja California, México*, San Diego, California, Institute of the Regional Studies of the Californias, San Diego State University, 2001.

En línea: <http://irsc.sdsu.edu/bdrlnk2000.pdf>

Consultado: Mayo 2008.

- Ponce, Víctor Manuel *et al.*, *Caracterización hidroecológica del Arroyo Alamar, Tijuana, Baja California, México*. Número de Proyecto: NR-02-01, 2001.

En línea: <http://alamar.sdsu.edu/alamar/alamar.html>

Consultado: Mayo 2008.

- Ponce, Víctor Manuel, *Hidrología de avenidas del arroyo binacional Cottonwood-Alamar, California y Baja California*, San Diego, California, San Diego State University, 2001.
- *Programa de Ordenamiento Ecológico de Baja California*. México.

En línea: <http://www.bajacalifornia.gob.mx/ecologia/doctos/OrdenamientoVG.pdf>

Consultado: Mayo 2008.

- *Reglamento de Protección al Ambiente para el Municipio de Tijuana, B.C.*, Tijuana, México, 2001.

En línea:

<http://www.ordenjuridico.gob.mx/Estatal/BAJA%20CALIFORNIA/Municipios/Tijuana/TijuanaReg15.pdf>

Consultado: Mayo 2008.

- Rentería Castro, Yunia, “*Condiciones de salud ambiental de la colonia Chilpancingo en la Ciudad Industrial Nueva Tijuana, 1998-2003.*”, tesis de maestría, Tijuana, México, El Colegio de la Frontera Norte- Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, 2004.
- Rentería Castro, Yunia y Hugo Riemann, “*Riesgos para la preservación de la salud ambiental, asociados a la dinámica industrial: una experiencia local en Tijuana.*” En: Sánchez Munguía, Vicente (Coordinador), *Gestión ambiental y de recursos naturales en México: los modos imperantes*, Tijuana, México, 2007, pp. 97-122.
- Rivera R, Clementina, “*Gobernación ambiental en la frontera México-Estados Unidos: El caso de Metales y Derivados en Tijuana, B. C. (1986-2004).*”, tesis de maestría, Tijuana, México, El Colegio de la Frontera Norte- Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, 2004.
- Sánchez Munguía, Vicente, “*La gestión del agua en Tijuana, Baja California*”, En: Bakin D. (Coordinador), *La gestión del agua urbana en México: retos, debate y bienestar*, Guadalajara, Universidad de Guadalajara, 2006, pp. 265-285.
- SEDESOL-IMPLAN (Secretaría de Desarrollo Social- Instituto Municipal de Planeación, México), *Programa Parcial de Conservación y Mejoramiento Urbano para la Zona del Arroyo Alamar: Primera Etapa. Caracterización Ambiental del Arroyo Alama*, 2005.

En línea:

<http://www.bienesraicesenlinea.com.mx/biblioteca/2/Programa%20de%20Desarrollo%20y%20Mejoramiento%20Urbano%20ALAMAR.pdf>

Consultado: Mayo 2008.

- SEDUM (Secretaría de Desarrollo Urbano Municipal- XIX Ayuntamiento de Tijuana), *Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Tijuana 2002-2025, México*, 2002.

En línea: <http://www.tijuana.gob.mx/dependencias/sedum/pducpt.asp>

Consultado: Mayo 2008.

- Trejo Alba, Carolina, “*Gestión ambiental local y buen gobierno: La propuesta de rehabilitar el arroyo urbano Alamar en la ciudad de Tijuana, B. C.*”, tesis de maestría, Tijuana, México, El Colegio de la Frontera Norte- Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, 2006.
- Wakida, Fernando T. *et al.*, “*Impact of a polluted stream on its adjacent aquifer: the case of the Alamar zone, Tijuana, Mexico*”, En: *Bringing groundwater quality research to the watershed scale (Proceedings of GQ2004, the 4<sup>th</sup> International Groundwater Quality Conference, held at Waterloo, Canada, Canada, 2005, 141-147.*
- Yoshinaga Pereira, Sueli y Geroncio Albuquerque Rocha, “*Recursos hídricos.*” En: Repetto L., Fernando y Claudia Karez C. (Editores), *II Curso Internacional de Aspectos Geológicos de Protección Ambiental*, Campinas, SP- Brasil, Oficina Regional de Ciencia de la UNESCO para América Latina y el Caribe, 2002 pp 138-178.
- Zaporozec, Alexander, “*Contaminant source inventory.*” En: Zaporozec, Alexander (Editor), *Groundwater contamination inventory. A methodological guideline.* Paris, Francia: UNESCO, 2001.

## ANEXOS

### Anexo 1: Inventario de fuentes contaminantes (Asentamientos irregulares).

Fuente datos: Google Earth; Recorrido de campo con GPS, IMPLAN 2006

Clasificación índice de contaminación potencial del A.S.: Método POSH (Foster e Hirata, 2001). Elevado: 3, Moderado: 2, Reducido: 1

D.P.: densidad poblacional

C.A.: cobertura de alcantarillado

C.C.: carga contaminante

Código	Actividad	Zona	Área (ha)	D.P. (hab/ha)	C.A. (%)	Potencial de C.C.	Coordenadas UTM
ai 1	Asentamientos irregulares 1	2	16.0	119	0	3	i: 3597595 N; 507031 E f: 3598895 N; 508490 E
ai 2	Asentamientos irregulares 2	2	1.4	96	0	3	i: 3598282 N; 507668 E f: 3598550 N; 508064 E
ai 3	Asentamientos irregulares 3	2	1.9	186	0	3	i: 3599120 N; 508912 E f: 3599048 N; 509502 E

## Anexo 2: Inventario de fuentes contaminantes (Prácticas agropecuarias).

Fuente datos: Google Earth; Recorrido de campo con GPS

Clasificación índice de contaminación potencial del A.S.: Método POSH (Foster e Hirata, 2001). Elevado: 3, Moderado: 2, Reducido: 1

E.R.: eficiencia de riego

NO.: noroeste

T.P.: tipo de pastoreo

NE.: noreste

N.A.: no aplica

SO.: soroeste

C.C.: carga contaminante

SE.: sureste

Código	Actividad	Zona	Área (ha)	E.R.	T.P.	Potencial de C.C.	Coordenadas UTM
a 1	Campo de cultivo 1	1	1.6	Baja	NA	2	NO: 3597172 N; 505231 E; NE: 3597185 N; 505430 E SO: 3597090 N; 505430 E; SE: 3597157 N; 505430 E
a 2	Campo de cultivo 2	1	3.4	Baja	NA	2	NO: 3596694 N; 505238 E; NE: 3596694 N; 505238 E SO: 3596710 N; 505494 E; SE: 3596736 N; 505651 E
a 3	Campo de cultivo 3	2	4.3	Baja	NA	2	NO: 3597633 N; 507294 E; NE: 3597709 N; 507497 E SO: 3597443 N; 507567 E; SE: 3597549 N; 507562 E
a 4	Establo 1	2	18.8	NA	Intensivo	3	NO: 3598232 N; 507887 E; NE: 3598455 N; 508220 E SO: 3597887 N; 507916 E; SE: 3598050 N; 508462 E
a 5	Establo 2	2	0.12	NA	Intensivo	3	NO: 3598496 N; 508173 E; NE: 3598503 N; 508190 E SO: 3598496 N; 508194 E; SE: 3598460 N; 508214 E
a 6	Campo de cultivo 4	2	18.1	Baja	NA	2	NO: 3598457 N; 508225 E; NE: 3598946 N; 508735 E SO: 3598253 N; 508372 E; SE: 3598750 N; 508860 E
a 7	Campo de cultivo 5	2	11.9	Baja	NA	2	NO: 3599368 N; 508605 E; NE: 3599454 N; 508985 E SO: 3599188 N; 508600 E; SE: 3599200 N; 509034 E
a 8	Campo de cultivo 6	3	12.4	Baja	NA	2	NO: 3599040 N; 509554 E; NE: 3599362 N; 510148 E SO: 3598920 N; 509730 E; SE: 3599180 N; 510192 E
a 9	Campo de cultivo 7	3	5.1	Baja	NA	2	NO: 3599730 N; 510103 E; NE: 3599980 N; 510383 E SO: 3599602 N; 510147 E; SE: 3599778 N; 510444 E
a 10	Campo de cultivo 8	3	3.6	Baja	NA	2	NO: 3599706 N; 510793 E; NE: 3599828 N; 510002 E SO: 3599598 N; 510796 E; SE: 3599706 N; 510043 E

### Anexo 3: Inventario de fuentes contaminantes (Extracción de materiales pétreos y actividades urbanas varias).

Fuente datos: Google Earth; Recorrido de campo con GPS

Clasificación índice de contaminación potencial del A.S.: Método POSH (Foster e Hirata, 2001). Elevado: 3, Moderado: 2, Reducido: 1

v: urbanas varias

m: extracción de materiales pétreos

C.C.: carga contaminante

<b>Código</b>	<b>Actividad</b>	<b>Zona</b>	<b>Potencial de C.C.</b>	<b>Coordenadas UTM</b>
v 1	Deshuesadero de carros 1	1	2	3597632N; 504652 E
v 2	Deshuesadero de carros 2	1	2	3597884 N; 506820 E
v 3	Central camionera	1	2	3597782 N; 503852 E
m 1	Extracción de arena y grava	1	2	3597104 N; 505393 E
m 2	Extracción de arena y grava	3	2	3599176 N; 509562 E
m 3	Ladrillera	3	2	3599859 N; 511191 E

#### Anexo 4: Inventario de fuentes contaminantes (Actividad industrial).

Fuente datos: Secretaría de Desarrollo Económico; Google Earth

Clasificación índice de contaminación potencial del A.S.: Método POSH (Foster e Hirata, 2001). Elevado: 3, Moderado: 2, Reducido: 1

P.I.: parque industrial

C.I.N.T.: Ciudad Industrial Nueva Tijuana

C.C.: carga contaminante

#### Sectores industriales

M.N.M.C.: minerales no metálicos y material para construcción

I.P.: impresión y publicidad

P.C.: papel y cartón

P.M.C.: productos de madera y corcho

E.E.E.: equipo electrónico y eléctrico

P.A.B.: productos alimenticios y bebidas

A.M.: artículos de metal

A.P.: artículos de plástico

O.I.M.: otras industrias manufactureras

S: servicios

T: textiles

A: automotriz

Código	Nombre	Dirección	Colonia	Sector	Zona	Coordenadas	Potencial de C.C.
i 1	Bloquera Colima	Calle Andalucía # 2	Alamar	M.N.M.M.C.	1	3597300 N; 505550 E	1
i 2	Brandon Converting; S. de R.L. de C.V.	Av. Universidad 7-B	P. I. FINSA	I.P.	1	3598650 N; 503200 E	2
i 3	Ensung Mexicana; S.A. de C.V.	Av. Corporativo # 4-B	P. I. FINSA	P.C.	1	3598950 N; 503000 E	2
i 4	Filtec de México; S.A. de C.V.	Av. Producción # 15-A	P. I. FINSA	I.P.	1	3598600 N; 503340 E	2
i 5	Industrias Paesano Printing de B.C.; S. de R.L. de C.V.	Av. Producción # 5	P. I. FINSA	I.P.	1	3598450 N; 503190 E	2
i 6	Interframe; S.A. de C.V.	Blvd. Murua # 1000	Murua	P.M.C.	1	3598150 N; 505770 E	1
i 7	Kyocera Mexicana; S.A de C.V.	Blvd. Acceso Buena Vista Otay # 2055	P. I. FINSA	E.E.E.	1	3599050 N; 502780 E	3
i 8	Legrís Industrias Unidas de B.C.; S.A de C.V.	Av. Universidad, Edif. 6-A	P. I. FINSA	E.E.E.	1	3598800 N; 503180 E	3
i 9	Manufacturera Bajamex; S.A. de C.V.	Calle Altata # 18615	Campestre Murua	E.E.E.	1	3598600 N; 506300 E	3
i 10	Marmolería Los Alamitos	Blvd. Las Joyas # 731	Los Álamos	M.N.M.M.C.	1	3596900 N; 504850 E	1
i 11	Productos de Uva; S.A.	Av. Cañón Johnson # 2108	Hidalgo	P.A.B.	1	3597650 N; 505630 E	1
i 12	Pulse Power de México; S.A. de C.V.	Av. Corporativo # 3	P. I. FINSA	E.E.E.	1	3599050 N; 502980 E	3

i 13	Santana Packaging de México; S.A. de C.V.	Ahome # 18633, Nave 5	P. I. Murua	P.C.	1	3598250 N; 506630 E	2
i 14	Sensent Imaging Technology; S.A. de C.V.	Privada Misiones # 1119	P. I. Misiones	I.P.	1	3597670 N; 503380 E	2
i 15	Smiths Health Care Manufacturing; S.A. de C.V.	Av. Calidad # 4	P. I. FINSA	A.M.	1	3599100 N; 503100 E	3
i 16	SSD Plásticos Mexicana; S.A. de C.V.	Av. Producción # 17	P. I. FINSA	A.P.	1	3598880 N; 503370 E	3
i 17	Suntron Cooperation; S. de R.L. de C.V.	Av. Producción # 20, módulo C	P. I. FINSA	E.E.E.	1	3598360 N; 503250 E	3
i 18	Tyco Electronics Tecnologías; S.A. de C.V.	Av. Producción # 20	P. I. FINSA	E.E.E.	1	3598320 N; 503200 E	3
i 19	Vigobyte de México; S.A. de C.V.	Av. Producción # 13	P. I. FINSA	E.E.E.	1	3598600 N; 503280 E	3
i 20	Bo Kwang Printing; S.A. de C.V.	Calle 1 Oriente # 11	C. I. N. T. Otay	I.P.	2	3599470 N; 507730 E	2
i 21	Café EMA; S.A. de C.V.	Calle 5 Sur # 140	C. I. N. T. Otay	P.A.B.	2	3599940 N; 507850 E	1
i 22	Cali Resources; S.A. de C.V.	Calle 1 Oriente # 19045	C. I. N. T. Otay	O.I.M.	2	3599580 N; 507360 E	1
i 23	CandyColor de México; S.A. de C.V.	Calle 5 Sur # 148	C. I. N. T. Otay	P.A.B.	2	3599920 N; 507850 E	1
i 24	CCA de Baja California; S.A. de C.V.	Calle Maquiladora # 320; Sección Dorada	C. I. N. T. Otay	P.C.	2	3600110 N; 508650 E	2
i 25	CIA Mexicana de Impermeabilizantes; S.A.	Calle 9 <sup>na</sup> y Alivio Norte	C. I. N. T. Otay	M.N.M.M.C.	2	3599940 N; 507360 E	1
i 26	Clayton Maquiladora; S.A. de C.V.	Calle 7 Sur # 108	C. I. N. T. Otay	A.M.	2	3599950 N; 507650 E	3
i 27	Compañía General de Aguas; S.A. de C.V.	Av. Industrial # 1801; Sección Dorada	C. I. N. T. Otay	P.A.B.	2	3599540 N; 508350 E	1
i 28	Corrugados de B. C.; S.A. de C.V.	Calle 6 Oriente # 19026	C. I. N. T. Otay	P.C.	2	3599310 N; 507430 E	2
i 29	Crystal Art Gallery; S.A. de C.V.	Calle Maquiladora # 1410; Sección Dorada	C. I. N. T. Otay	P.M.C.	2	3599630 N; 508760 E	1
i 30	Douglas Furniture Mexicana; S. de R.L. de C.V.	Calle Exportadores # 118; Sección Dorada	C. I. N. T. Otay	P.M.C.	2	3599100 N; 508200 E	2
i 31	Elbeck de México; S.A. de C.V.	Calle 4 <sup>ta</sup> Sur # 1915	C. I. N. T. Otay	P.M.C.	2	3599920 N; 507230 E	1
i 32	Ensamblados Hyson; S.A. de C.V.	Av. Industrial # 333; Sección Dorada	C. I. N. T. Otay	A.P.	2	3599040 N; 508340 E	3
i 33	Especialidades Médicas Kenmex; S.A. de C.V.	Calle 9 Sur # 123	C. I. N. T. Otay	S.	2	3599770 N; 507430 E	1

i 34	Fabricación y manufactura de México; S.A. de C.V.	Calle Maquiladoras # 1387-1; Sección Dorada	C. I. N. T. Otay	A.M.	2	3599540 N; 508450 E	3
i 35	Fabricantes Consolidados; S. de R.L. de C.V.	Calle Maquiladoras # 310; Sección Dorada	C. I. N. T. Otay	A.M.	2	3599680 N; 508190 E	3
i 36	Fanosa del Pacífico; S.A. de C.V.	2 <sup>do</sup> Eje Poniente # 19536	C. I. N. T. Otay	A.P.	2	3600000 N; 507290 E	3
i 37	Ferromesa; S.A de C.V.	Calle 2 Oriente # 20207	C. I. N. T. Otay	A.M.	2	3599250 N; 507700 E	3
i 38	Hitachi Consumer Products de México; S.A. de C.V.	Av. Industrial # 105; Sección Dorada	C. I. N. T. Otay	E.E.E.	2	3599950 N; 508430 E	3
i 39	Industria Eléctrica AG; S.A. de C.V.	Calle 7 Sur # 507	C. I. N. T. Otay	E.E.E.	2	3599820 N; 507580 E	3
i 40	Industria Mexicana de Ensamble Electrónico; S.A.	Calle 5 Sur # 155	C. I. N. T. Otay	E.E.E.	2	3599860 N; 507860 E	3
i 41	Industrias APON; S.A. de C.V.	Av. Industrial # 3321; Sección Dorada	C. I. N. T. Otay	A.P.	2	3599180 N; 508300 E	3
i 42	Industrias María de Tijuana; S.A. de C.V.	Calle Maquiladora # 36; Sección Dorada	C. I. N. T. Otay	P.M.C.	2	3599640 N; 508680 E	1
i 43	KB FOAM de México; S.A. de C.V.	Calle 5 Sur # 1546	C. I. N. T. Otay	A.P.	2	3599470 N; 507760 E	3
i 44	Lamkin de México; S.A. de C.V.	Calle 5 Sur # 156	C. I. N. T. Otay	A.M.	2	3599850 N; 507820 E	3
i 45	Logotek; S.A. de C.V.	Calle 5 Sur # 1111	C. I. N. T. Otay	O.I.M.	2	3599600 N; 507800 E	1
i 46	Marcos Calidad; S.A. de C.V.	Av. Industrial # 339; Sección Dorada	C. I. N. T. Otay	A.P.	2	3599000 N; 508330 E	3
i 47	Materiales Pétreos La Salle; S.A. de C.V.	Blvd. Alivio Norte # 2002 (Blvd. Industrial)	C. I. N. T. Otay	M.N.M.M.C.	2	3600100 N; 507650 E	1
i 48	Maxell de México; S.A. de C.V.	Av. Industrial # 321; Sección Dorada	C. I. N. T. Otay	E.E.E.	2	3599180 N; 508390 E	3
i 49	Mogami México; S.A. de C.V.	Calle Maquiladoras # 320-A; Sección Dorada	C. I. N. T. Otay	P.C.	2	3600150 N; 508630 E	2
i 50	Mundo Corporación; S. de R.L. de C.V.	Calle 7 Sur # 1111	C. I. N. T. Otay	S.	2	3599620 N; 507560 E	1
i 51	Mutsutech; S.A. de C.V.	Calle Dorada # 111; Sección Dorada	C. I. N. T. Otay	A.P.	2	3599740 N; 508740 E	3
i 52	Nicoak; S.A. de C.V.	Calle 5 Sur # 151-A	C. I. N. T. Otay	P.M.C.	2	3599670 N; 507840 E	1
i 53	Ópticas Sola de México	Calle 2 Oriente # 133	C. I. N. T. Otay	A.P.	2	3599260 N; 507500 E	3
i 54	Organización Diseño Industrial; S.A.	Calle 1 Oriente # 126	C. I. N. T. Otay	P.M.C.	2	3599550 N; 507440 E	1

i 55	Panasonic AVC Networks de B.C.; S.A. de C.V	2 <sup>do</sup> Eje Oriente Poniente (Blvd.Ind.) # 19400	C. I. N. T. Otay	E.E.E.	2	3600020 N; 507500 E	3
i 56	Paranetics Technology	Calle 9 Sur # 118-A	C. I. N. T. Otay	T.	2	3599559 N; 507290 E	2
i 57	Plásticos AMC de México; S.A. de C.V.	Calle 9 Sur # 1510	C. I. N. T. Otay	A.P.	2	3599850 N; 507450 E	3
i 58	Portable Energy de México; S.A de C.V.	Calle 1 Oriente # 128	C. I. N. T. Otay	E.E.E.	2	3599550 N; 507400 E	3
i 59	Prefabricados de Concretos de Tijuana; S.A. de C.V.	Calle 1 Oriente y 7 Sur	C. I. N. T. Otay	M.N.M.M.C.	2	3599540 N; 507470 E	1
i 60	Pulidos Industriales; S.A. de C.V.	Blvd. Industrial # 20206	C. I. N. T. Otay	A.	2	3600080 N; 508250 E	3
i 61	Relieves Mexicanos; S.A. de C.V.	Calle San Felipe # 20657-A	Buenos Aires Norte	A.M.	2	3597760 N; 509190 E	3
i 62	Royal Window Coverings; S. de R.L. de C.V.	Calle 9 Sur # 121	C. I. N. T. Otay	P.M.C.	2	3599480 N; 507250 E	1
i 63	RSI Home Products; S.A. de C.V.	Calle 3 <sup>ra</sup> Oriente # 19906	C. I. N. T. Otay	M.N.M.M.C.	2	3599750 N; 507350 E	1
i 64	Sanoh Manufacturing de México; S.A. de C.V.	Calle Exportadores # 115; Sección Dorada	C. I. N. T. Otay	A.M.	2	3599030 N; 508230 E	3
i 65	Santoni; S.A. de C.V.	Calle Maquiladoras # 300; Sección Dorada	C. I. N. T. Otay	E.E.E.	2	3599700 N; 508340 E	3
i 66	Sung Moon de México; S.A. de C.V.	Calle 9 Sur # 111	C. I. N. T. Otay	E.E.E.	2	3599680 N; 507340 E	3
i 67	T.T.B. de México; S.A. de C.V.	Calle 9 Sur # 118	C. I. N. T. Otay	I.P.	2	3599520 N; 507270 E	2
i 68	Tecnol; S. de R.L. de C.V.	Calle 9 Sur # 974	C. I. N. T. Otay	A.M.	2	3599330 N; 507230 E	3
i 69	Tocabi; S.A. de C.V.	Av. Industrial # 330; Sección Dorada	C. I. N. T. Otay	P.M.C.	2	3599100 N; 508360 E	1
i 70	Valero de México; S.A. de C.V.	Calle Maquiladora # 1614; Sección Dorada	C. I. N. T. Otay	P.M.C.	2	3599600 N; 508920 E	1

**Anexo 5: Carga contaminante asignada a cada cuadrícula de las 89 que componen el acuífero del Arroyo Alamar.**

# Cuadrícula	Fuente	Potencial de carga por fuente	Potencial de carga por cuadrícula
A (1, 2, 4, 5, 6)	i 2	2	3
	i 3	2	
	i 4	2	
	i 5	2	
	i 7	3	
	i 8	3	
	i 12	3	
	i 14	2	
	i 15	3	
	i 16	3	
	i 17	3	
	i 18	3	
	i 19	3	
	1	A	
2	A	3	3
3	0	0	0
4	A	3	3
	v 3	2	
5	A	3	3
6	A	3	3
7	0	0	0
8	v 3	2	2
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	v 1	2	2
13	i 10	1	1
14	0	0	0
15	0	0	0
16	a 1	2	2
	m 1	2	
17	i 10	1	1

18	0	0	0
19	0	0	0
20	0	0	0
21	i 6	1	1
	i 11	1	
22	i 1	1	2
	m 1	2	
23	a 2	2	2
24	0	0	0
25	0	0	0
26	0	0	0
27	i 9	3	3
28	i 9	3	3
29	0	0	0
30	0	0	0
31	0	0	0
32	0	0	0
33	i 13	2	2
34	v 2	2	2
35	0	0	0
36	0	0	0
37	0	0	0
B (38, 39, 43, 44)	i 20	2	3
	i 21	1	
	i 22	1	
	i 23	1	
	i 25	1	
	i 26	3	
	i 28	2	
	i 31	1	
	i 33	1	
	i 36	3	
	i 37	3	
	i 39	3	
	i 40	3	
	i 43	3	
i 44	3		

	i 45	1	
	i 47	1	
	i 50	1	
	i 52	1	
	i 53	3	
	i 54	1	
	i 55	3	
	i 56	2	
	i 57	3	
	i 58	3	
	i 59	1	
	i 60	3	
	i 61	3	
	i 62	1	
	i 63	1	
	i 66	3	
	i 67	2	
38	B	3	3
39	B	3	3
40	ai 1	3	3
	i 68	3	
41	0	0	0
42	0	0	0
43	ai 2	3	3
	B	3	
44	ai 1	3	3
	ai 2	3	
	B	3	
45	ai 1	3	3
	a 3	2	
46	0	0	0
C (47, 48, 50, 51, 52, 53, 55)	i 24	2	3
	i 29	1	
	i 30	2	
	i 32	3	
	i 34	3	
	i 35	3	
	i 38	3	

	i 41	3	
	i 42	1	
	i 46	3	
	i 48	3	
	i 49	2	
	i 51	3	
	i 64	3	
	i 65	3	
	i 69	1	
	i 70	1	
47	ai 1	3	3
	ai 2	3	
	a 4	3	
	a 5	3	
	a 6	2	
	C	3	
48	ai 1	3	3
	ai 2	3	
	a 4	3	
	a 5	3	
	a 6	2	
	C	3	
49	a 4	3	3
50	a 7	2	3
	C	3	
51	ai 1	3	3
	C	3	
52	ai 1	3	3
	a 6	2	
	C	3	
53	a 6	2	3
	C	3	
54	0	0	0
55	ai 3	3	3
	a 7	2	
	C	3	
56	ai 3	3	3

	a 7	2	
57	a 6	2	2
58	i 61	3	3
59	ai 3	3	3
	a 8	2	
	m 2	2	
60	ai 3	3	3
	a 8	2	
61	0	0	0
62	0	0	0
63	0	0	0
64	a 9	2	2
65	a 8	2	2
66	a 8	2	2
67	0	0	0
68	0	0	0
69	0	0	0
70	a 10	2	2
71	a 10	2	2
72	0	0	0
73	0	0	0
74	a 10	2	2
	m 3	2	
75	0	0	0
76	0	0	0
77	0	0	0
78	0	0	0
79	0	0	0
80	0	0	0
81	0	0	0
82	0	0	0
83	0	0	0
84	0	0	0
85	0	0	0
86	0	0	0
87	0	0	0
88	0	0	0
89	0	0	0

**Anexo 6: Peligro de contaminación asignado por cuadrícula (Carga contaminante x Vulnerabilidad)**

<b>Cuadrícula</b>	<b>Carga contaminante</b>	<b>Vulnerabilidad</b>	<b>Peligro de contaminación</b>
1	3	2	6
2	3	2	6
3	0	2	0
4	3	2	6
5	3	2	6
6	3	1	3
7	0	1	1
8	2	2	4
9	0	2	2
10	0	2	0
11	0	2	0
12	2	2	4
13	1	2	2
14	0	1	0
15	0	1	0
16	1	1	1
17	0	1	0
18	0	1	0
19	0	1	0
20	0	1	0
21	1	2	2
22	2	2	4
23	2	1	2
24	0	1	0
25	0	1	0
26	0	1	0
27	3	2	6
28	3	2	6
29	0	1	0
30	0	2	0
31	0	1	0
32	0	1	0

33	2	1	2
34	2	2	4
35	0	2	0
36	0	2	0
37	0	3	0
38	3	1	3
39	3	1	3
40	3	2	6
41	0	3	0
42	0	3	0
43	3	3	9
44	3	3	9
45	3	3	9
46	0	3	0
47	3	4	12
48	3	4	12
49	3	3	9
50	3	3	9
51	3	4	12
52	3	4	12
53	3	4	12
54	0	3	0
55	3	4	12
56	3	4	12
57	2	4	12
58	3	4	12
59	3	4	12
60	3	4	12
61	0	4	0
62	0	4	0
63	0	4	0
64	2	4	8
65	2	4	8
66	2	4	8
67	0	4	0
68	0	4	0

69	0	4	0
70	2	4	8
71	2	4	8
72	0	4	0
73	0	4	0
74	2	4	8
75	0	4	0
76	0	4	0
77	0	4	0
78	0	4	0
79	0	4	0
80	0	4	0
81	0	4	0
82	0	4	0
83	0	4	0
84	0	4	0
85	0	4	0
86	0	4	0
87	0	4	0
88	0	4	0
89	0	4	0