

**EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DE AGUAS
SUBTERRÁNEAS POR ACTIVIDADES INDUSTRIALES
EL CASO ACUÍFERO DE MARACAY DISTRITO GIRARDOT
ARAGUA-VENEZUELA.**

Por: Liliana Durán

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magister Scientiae en Gestión de Recursos Naturales
Renovables y Medio Ambiente
(Con Énfasis en Estudios de Impacto Ambiental)

CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO
E INVESTIGACIÓN AMBIENTAL Y TERRITORIAL
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
Mérida, Venezuela
2006

2.4	Características Locales	16
2.4.1	Climáticas	16
2.4.2	Geología local	17
2.4.3	Suelos	17
2.5	Estudios realizados en el área	18
2.6	Información utilizada	19
3	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	
3.1	Fundamentos conceptuales	21
3.1.1	Ciclo hidrológico	21
3.1.2	Aguas Subterráneas	21
3.2	Contaminación de las Aguas Subterráneas	22
3.2.1	Constituyentes químicos las aguas subterráneas	23
3.2.2	Mecanismos de contaminación de las aguas subterráneas	23
3.2.3	Causas de la contaminación de las aguas subterráneas	24
3.2.4	Procesos de Contaminación	25
3.2.5	Agentes causantes de la contaminación de las aguas subterráneas	26
3.2.6	Fuentes de la contaminación de las aguas subterráneas	27
3.2.7	Métodos de tratamiento de acuíferos contaminados	29
3.2.8	Protección de acuíferos	29
3.2.9	Control de la contaminación de las aguas subterráneas	30
3.3	Vulnerabilidad amenazas y riesgos	31
3.3.1	Vulnerabilidad de contaminación de los acuíferos	31
3.3.2	Mapa de vulnerabilidad	33
3.3.3	Metodologías utilizadas para analizar la vulnerabilidad	35
3.4	Amenaza	43
3.4.1	Clasificación de las amenazas	43
3.4.2	La evaluación e identificación de las Amenazas	46
3.4.3	Identificación de amenazas de contaminación	46
3.5	Riesgo	50
3.5.1	Tipos de riesgos	50
3.5.2	Estimación del riesgo	51
3.5.3	Los mapas de riesgos	52
3.5.4	Riesgo de Contaminación	53
3.6	Uso de los sistemas de información geográficos (SIG)	56
4	ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD	
4.1	Información básica utilizada	57
4.1.1	Recolección de la Información	57

	4.1.2 Procesamiento de la Información.....	57
	4.2 Aplicación de Metodologías.....	77
	4.2.1 Metodología DRASTIC.....	77
	4.2.2 Metodología GOD.....	85
5	DETERMINACIÓN DE LAS AMENAZAS	
	5.1 Evaluación de las Amenazas.....	89
	5.1.1. Clasificación de las actividades industriales.....	89
	5.1.2 Contaminación y vulnerabilidad en las aguas subterráneas...	91
	5.1.3 Estudios realizados a la calidad de agua de los pozos.....	92
	5.1.4 Estimación de las cargas contaminantes.....	92
6	ANÁLISIS DE RESULTADO	
	6.1 Características generales del Acuífero.....	103
	6.1.1 Ambientes de sedimentación.....	103
	6.2 Análisis de la Vulnerabilidad.....	104
	6.3 Análisis de la Amenazas.....	104
	6.4 Análisis del Riesgo.....	105
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
	7.1 Conclusiones.....	107
	7.2 Recomendaciones.....	109
	LITERATURA CITADA	111
	ANEXOS.....	117
	APÉNDICES.....	133

AGRADECIMIENTO

A Dios. Todopoderoso

A Universidad de Los Andes, al Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial.

A los Profesores Hervé Jégat, Luís Mora y Angela Henao por su valiosa colaboración y asesoría en la elaboración del presente trabajo.

Al MARNR, Laboratorio de Calidad Ambiental CEA-Aragua por su colaboración en la adquisición de datos.

A los Profesores Miguel Cabezas, Roberto Duque y geógrafos Silvia Pavón y Nerío Ramírez por sus asesorías y estímulo.

A mis amigas: Ana Isabel, Igle, Mimina, Nancy y Malena, por su incondicional amistad, apoyo y consejos en todo el desarrollo de la misma.

A Tina, Johanna, Cheo, Maria José y Rafael por su apoyo en todo momento.

A todos gracias.

RESUMEN

El trabajo que se presenta evalúa la vulnerabilidad y riesgo a la contaminación en un sector perteneciente al Acuífero de Maracay ubicado en la Cuenca Hidrográfica del Lago de Valencia, entre las coordenadas norte 1129800, 1138300 y este 649750, 661500, comprendiendo una superficie aproximada de 100 km², a partir de la información disponible se realizó el análisis de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero por medio de dos métodos. El método GOD un modelo de vulnerabilidad multiplicativo, toma en cuenta las variables de profundidad del agua, substrato litológico y nivel de confinamiento del acuífero, el segundo método elegido fue el DRASTIC un modelo de vulnerabilidad de tipo sumativo, con diferentes factores de ponderación para cada una de las variables: profundidad del agua, recarga neta, tipo de acuífero, tipo de suelo, pendiente del terreno, impacto en la zona no saturada y conductividad hidráulica del acuífero. Parte de este trabajo consistió en calcular o estimar estas variables. Una vez hallados estos parámetros se aplicaron las metodologías ponderando y generando valores del índice de vulnerabilidad del acuífero. Los valores máximo de los índices de vulnerabilidad en ambos métodos se localizan al sur en el área de mayor concentración de industrias, los índices DRASTIC los valores máximo y mínimo de los índices obtenidos fueron 155 y 79, respectivamente, predominando una vulnerabilidad moderada. El índice de vulnerabilidad GOD esta comprendida entre vulnerabilidad 0.060 (muy baja) a 0.144 (baja.)

Las amenazas a la contaminación corresponden a las descargas de las industrias que pueden ser potenciales contaminantes. No se contó con la información del tipo y control de disposición de estos vertidos, otros factores amenazantes considerados fueron la vialidad, tendidos eléctricos, sitios de disposición final de los desechos, Se hizo un inventario de las industrias en el área de estudio arrojando 241, de las cuales solo 77 poseían información de coordenadas para ser ubicadas espacialmente. Al no tenerse información del tipo de vertido se dividieron las industrias en nueve rubros: alimentos y bebidas, beneficiadora, fábrica de muebles, metalmecánica, metalúrgica, mineral no metálicos, química, pulpa y papel, textil, curtido y calzados, siendo la química con un 29.88% principal actividad industrial. Se calculó el índice de la carga de contaminante utilizando la metodología propuesta por Foster (1987), la cual analiza cuatro variables independientes: clase de contaminante, intensidad de contaminación, disposición del contaminante en el subsuelo y tiempo de aplicación de la carga al subsuelo, donde este factor varía desde 0.32 considerado como baja hasta 0.66, alta; este mapa se superpuso al mapa de infraestructuras, obteniéndose el mapa de las amenazas totales al acuífero.

Con la superposición de los mapas de amenaza y vulnerabilidad se obtuvo finalmente el mapa de riesgos, siendo este mayor en el área sur. Los resultados se presentan en forma de mapas mediante un sistema de información geográfica (SIG), permitiendo identificar áreas de mayor o menor vulnerabilidad y riesgo a la contaminación.

Palabras Claves: Vulnerabilidad; contaminación de acuíferos; GOD; DRASTIC; amenaza, riesgo, Sistemas de Información Geográfica.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

La contaminación de las aguas es una alteración de la calidad natural que puede ser causada por la acción humana. Se habla de contaminación de un sistema cuando su estado se encuentra fuera de las normas permitidas, normas que están directamente relacionadas con el uso que el hombre le da a las aguas y con el beneficio que de ella pueda obtener.

Las aguas subterráneas se encuentran en líneas generales mejor protegidas de la contaminación que las aguas superficiales, sin embargo una vez incorporado el agente contaminante al flujo subterráneo resulta muy difícil y costoso reconocer su movimiento, evaluarlo y controlar la contaminación. Además la contaminación del acuífero parece muchas veces como irreversible a corto plazo debido a la reducida velocidad de propagación en comparación con las aguas superficiales.

En Venezuela las actividades industriales han generado una problemática en torno a la contaminación de las aguas, creando grandes preocupaciones a la comunidad en general y a dichas industrias, las cuales han debido tomar acciones contingentes con el fin de controlar tanto los daños causados actualmente como los futuros, reduciendo los niveles de riesgos de contaminación de los acuíferos en sus instalaciones. Aún así las aguas subterráneas, por no ser visibles, han sido afectadas durante años por las actividades industriales,

Una particularidad es el área de la cuenca del Lago de Valencia, donde se ubican las ciudades de Valencia y Maracay, las más importantes de la cuenca, las cuales se han convertido en un polo de atracción de la actividad industrial, dando como resultado densidades de la población de 600 h/km² al desarrollarse la industria se incrementó la demanda de agua tanto, desmejorando la calidad del agua del lago, el cual ha su vez ha subido sus niveles naturales producto de las aguas residuales que le suministran.

En 1988, el MARNR determinó aproximadamente 400 industrias en el área, de las cuales el 40 al 50 % tenían sistemas de tratamiento. Para hacer la problemática mayor, el ritmo de crecimiento es continuo, lo que producirá aún más contaminación, además de la contaminación que ya se está generando y mayor demanda para cubrir sus necesidades, sin contar por supuesto con la demanda doméstica que con esto se genera.

El acelerado desarrollo industrial y urbano ocurrido en los últimos años, ha originado el incremento de la demanda de agua en la cuenca del lago de Valencia, ocasionando un aumento en la importación de agua de cuencas vecinas para su abastecimiento. Para 1988 se estimó la demanda de agua en 10.5 m³/seg y según el estudio de MARN-AUA (2000), corresponde el suministro de agua fuera de la cuenca a 13 m³/seg, de las fuentes de agua proveniente de acuíferos, por medio de explotación de pozos de 2.8 m³/seg y de las fuentes locales superficiales

1,2 m³/seg., con lo que tiene que la cuenca recibe un total de 17 m³/seg de agua.

Por lo anteriormente expuesto, para asegurar la sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo es necesaria una adecuada protección. Conociendo las zonas de mayor vulnerabilidad y riesgo a la contaminación pueden establecerse en ellas programas específicos de inspección y monitoreo de las fuentes de contaminación.

La vulnerabilidad a la contaminación es una característica de los acuíferos difícil de determinar y depende de la interacción entre diferentes factores, como profundidad del nivel freático o techo del acuífero, la capacidad de atenuación de las capas litológicas sobrepuestas al acuífero, la tasa de recarga entre otras. Se ha propuesto aplicar diferentes metodologías para la determinación de la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero, y hacer uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para generar los mapas de vulnerabilidad y de esta forma, tomando en cuenta la amenaza, estimar el riesgo de contaminación.

De esta manera se espera que estos mapas de riesgo y vulnerabilidad del acuífero de Maracay se conviertan en una importante herramienta de planificación que permitan suponer distintos escenarios de explotación, y aportar información necesaria para el manejo racional del recurso subterráneo, tomando en cuenta tanto la administración como la protección de dicho recurso.

1.1 JUSTIFICACIÓN

Las aguas subterráneas, es decir, todas las aguas presentes en el subsuelo son de gran importancia, puesto que constituyen cerca del 95% del agua dulce líquida existente en el planeta. En Venezuela las reservas de aguas subterráneas se estiman en 8 billones de metros cúbicos Coplanarh (1973), citado por Jégat (2003).

La importancia de este recurso hídrico subterráneo para el abastecimiento de agua es incuestionable, el cual ha reemplazado en muchos aspectos a las aguas superficiales en el abastecimiento. En el ámbito general, su uso aumentará en los próximos años, por las necesidades que impone la concentración demográfica, como por la expansión económica y por sus relativas ventajas sobre las aguas superficiales.

Las aguas subterráneas, cumplen un papel importante, y en numerosos casos vital, para el suministro de agua potable de muchas áreas urbanas y rurales, sin embargo, en la mayoría de los casos se ha prestado poca atención a la prevención de la contaminación de las mismas fuentes de aguas subterráneas, y aún menos, a la protección de los acuíferos en su conjunto.

Con la aplicación de metodologías de evaluación de la vulnerabilidad de daños por contaminación de las aguas subterráneas debido a las actividades industriales, se pretende tener mayor sensibilización hacia este recurso, con el objeto de hacerlo aprovechable y sustentable.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

El objetivo principal del estudio es contribuir al control de la contaminación de las aguas subterráneas mediante el estudio de metodologías de evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación y análisis de amenazas por actividades industriales de riesgo de contaminación.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar los parámetros relevantes para la aplicación de metodologías con el fin de evaluar: la vulnerabilidad, la amenaza y el riesgo de contaminación del Acuífero de Maracay por actividades industriales, en el distrito Girardot del estado Aragua.
- Aplicar metodologías existentes para la evaluación de la vulnerabilidad de contaminación del Acuífero de Maracay por actividades industriales, en el distrito Girardot del estado Aragua.
- Determinar las zonas de amenaza a la contaminación del acuífero de Maracay por actividades industriales, en el distrito Girardot del estado Aragua.
- Determinar los sitios de riesgo de contaminación del acuífero de Maracay por actividades industriales, en el distrito Girardot del estado Aragua.

CAPITULO 2

INFORMACIÓN BÁSICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1 UBICACIÓN.

El área de estudio corresponde a un sector perteneciente al Acuífero de Maracay ubicado en la Cuenca Hidrográfica del Lago de Valencia, entre las coordenadas UTM La Canoa, norte 1129800, 1138300 y este 649750, 661500, abarcando una superficie aproximada de 100 km², en la planicie frente a la costa oriental del lago de Valencia, distrito Girardot del estado Aragua., según se muestra en la fig.2.1:

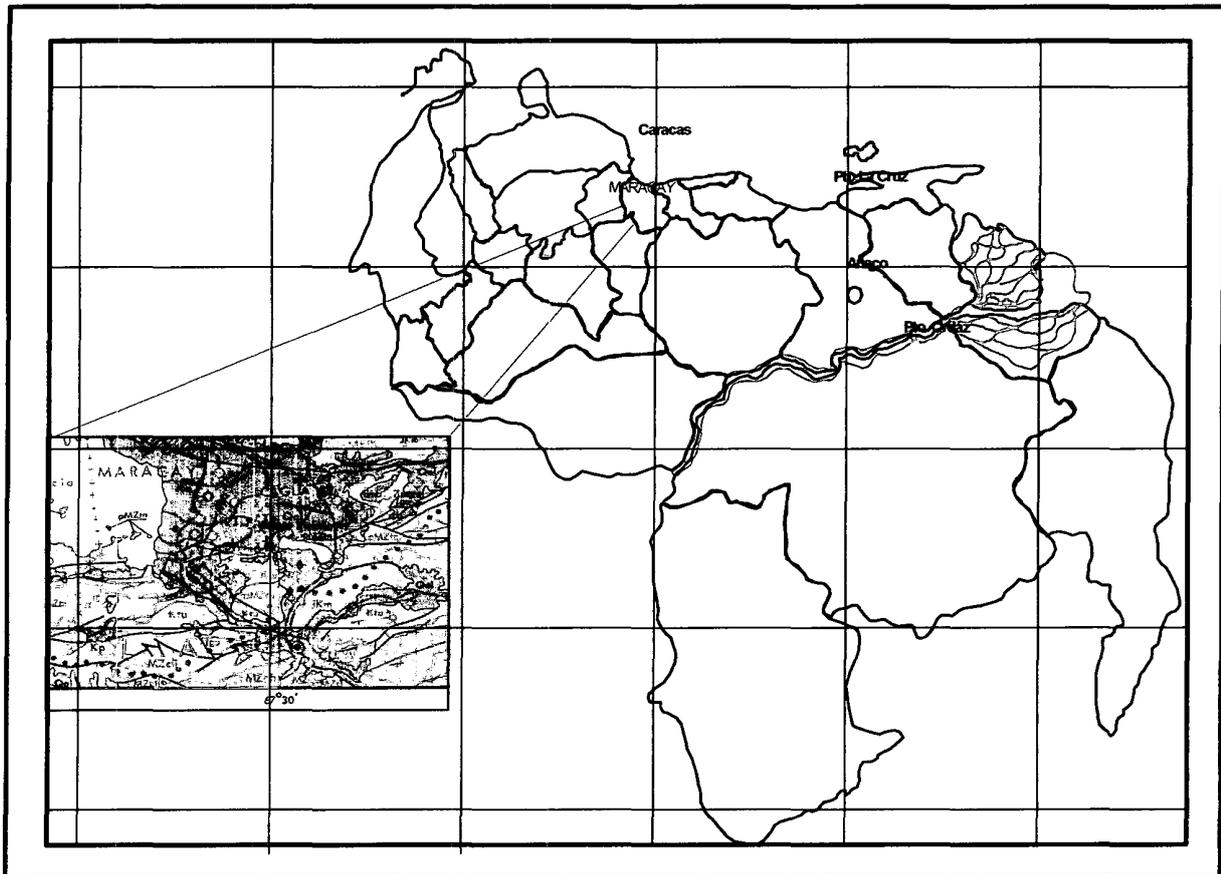


Figura 2.1 Ubicación Geográfica del Área de Estudio.

2.2 CARACTERÍSTICAS REGIONALES

La Cuenca Hidrográfica del Lago de Valencia, ocupa una superficie de 3.035 Km². Se encuentra ubicada en la provincia fisiográfica de la Cordillera de la Costa comprende: las porciones de las Serranías Litoral e Interior por donde se define la divisoria de aguas de la cuenca, abarcando una superficie de 1.044,4 Km², que representa el 34,40% del total de esta; los valles y planicie identificada como la depresión del Lago de Valencia ocupan 1.615,6 Km² que representan el 53,20% del total de la superficie.

2.2.1 Relieve

El relieve de la parte montañosa está dominado por una topografía quebrada o accidentada, con altura hasta de 1.400 m.s.n.m. y pendientes promedios de 40%, pudiendo llegar hasta 80% en algunos sectores. En la depresión propiamente dicha y en algunos sectores del estrecho piedemonte, el relieve es plano, con pendientes menores del 1%, aumentando ligeramente hasta un 5% hacia el suroeste. En este paisaje la altitud varía entre 400 y 50 m.s.n.m. (MARNR, 1998).

La depresión del Lago de Valencia denominada tradicionalmente como Valles de Aragua y Carabobo, situada en una depresión inter montaña de la cordillera de la Costa Central, consiste en un sistema de montañas de rumbo este-oeste, topografía alta y con un relieve accidentado comprende una superficie 3000 km² alrededor del lago, donde se distinguen diferentes paisajes, Alrededor de la planicie: tipo lacustrino de suelos orgánicos y caracolillos entre altitudes de 403 a 427 m; tipo aluvional a lo largo de los diferentes ríos que fluyen hacia el lago, caracterizados por un buen drenaje compuesto de sedimentos fluviales recientes, formando paisajes de valles aluviales.

2.2.2 Clima

Según la clasificación climática de Koëppen, citado por FUNDACITE, Aragua (1999) la cual utiliza como parámetros fundamentales la precipitación y la temperatura en correlación con la fitogeografía regional, se presenta un clima Aw, clima tropical de sabana, en las serranías de la cuenca, con predominio de sabanas (herbazales) y bosques tropófitos, subhúmedos, con un solo máximo de precipitación al año.

- ***Precipitación***

Es un factor esencial, puesto que constituye la materia prima del ciclo hidrológico, es un fenómeno de tipo discontinuo, no se puede hablar de variación diaria o anual, su distribución tanto en el espacio como en el tiempo es sumamente variable.

En la mayor parte del área cubierta por la Cuenca de Lago de Valencia predomina una precipitación media anual entre 1.000 y 2.000 mm. Hacia el suroeste de la hoya hidrográfica asciende a un rango de 1.200 - 1.400 mm. El valor medio de precipitación del conjunto de la cuenca es de 1.129 mm/año. La precipitación anual mínima es de 800 mm y la máxima de 1.800 mm. Los meses secos se extienden de diciembre a marzo y la estación húmeda entre mayo y noviembre. El mes más lluvioso es agosto, con rango de 150 - 200 mm, mientras que los meses más secos son febrero y marzo, con rango de 5 - 15 mm de precipitación mensual.

- **Temperatura**

La temperatura media varía entre 26 °C a 33 °C.

- **Evaporación / evapotranspiración**

Las tres estaciones de evaporación operadas por MARNR en la región (La Cabrera, Surta y Guataparo) arrojan valores medios anuales de evaporación de 2.048, 2.149 y 1.706 mm, respectivamente. Enero-mayo es el período con valores más altos de evaporación, con promedios mensuales entre 175 y cerca de 250 mm. En el período de junio a diciembre los promedios mensuales están por el orden de 125 y 150 mm. MARNR- Fundación POLAR. (1977), citado por FUNDACITE Aragua los valores de Evapotranspiración varían de 9000 a 1000 mm.

- **Humedad relativa**

La humedad relativa media anual está en el rango de 78% a 82%, Durante la sequía puede disminuir a menos de 70% en el área del lago, y durante las lluvias puede aumentar a un rango de 84 - 90%. La humedad relativa mínima absoluta observada en la región en el período 1951-1970 fue del 5% en la estación Maracay, tabla 2.1.

Tabla 2.1 Humedad relativa media cinco estaciones varios años en por ciento.

Mes tiempo	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL ANUAL
7:30	84	78	75	73	79	83	86	88	86	87	88	86	82.59
13:30	48	40	36	42	46	53	64	64	60	60	60	54	51.38
Medio día	67	67	58	62	68	72	77	77	75	76	73	70	69.92

Fuente Tahal 1970.

- **Vientos**

Predominan los vientos alisios, vientos húmedos superficiales que provienen del Océano Atlántico y el Mar Caribe y son causados por la circulación atmosférica en el hemisferio norte, los cuales penetran en la cuenca por diversas abras ubicadas al norte (Las Trincheras, Rancho Grande, Choroní) y los vientos llaneros provenientes del sur (Tinaquillo, Villa de Cura).

Los flujos de aire prevalecientes presentan variaciones estacionales significativas. En enero estos flujos del NE se dirigen hacia el SO con velocidades medias de 1,2 m/s. En abril hay un contraflujo del SO hacia el NE con velocidades medias de 1,2 m/s. En julio hay flujos desde del E y NE hacia el SO en la porción oriental de la cuenca, mientras que en la porción occidental persiste el contraflujo del SO hacia el NE. En octubre se presenta una situación parecida a la de abril, con variaciones en la velocidad media expresada en 1,0 m/s, según el Atlas Climatológico de la Fuerza Aérea., citado por FUNDACITE Aragua (1999).

2.2.3 Vegetación

Alrededor del Lago de Valencia se presentan tres aspectos en su vegetación: la primera de ellas es la llanura lacustre, en la cual, debido a la presencia de suelos fértiles y alto nivel freático, se encuentran árboles como el Camoruco (*Sterculia carthagenensis*), Bucare (*Erythrina glauca*), Ceiba (*Ceiba pentandra*) y Samán (*Samanea saman*). El segundo tipo se presenta sobre las lomas más bajas con fase calcáreas; la vegetación está compuesta por especies típicas como Cardones, Cujies e Indio Desnudo. Sobre las lomas altas hay una vegetación de sabanas con chaparros dispersos la cual se quema periódicamente, según cita FUNDACITE, Aragua (1999).

2.2.4 Fauna

Según un estudio realizado por PROFAUNA y FUNDACITE en 1998 sobre la fauna presente en el Lago de Valencia, se señala que hay un registro de 403 especies de vertebrados. El grupo de las aves fue el más diverso, 255 en total, de las cuales 20 son migratorias y 20 son consideradas aves de cacería se reportaron 52 especies de mamíferos, 35 especies de reptiles, 19 especies de anfibios, 42 especies de peces.

2.2.5 Suelos

- **Suelos de áreas montañosas**

Son suelos en pendientes, desarrollados a partir de materiales in-situ y transportados por movimientos en masa, usualmente pedregosos. Predominan Inceptisoles, Alfisoles, Ultisoles, además de algunos Entisoles poco profundos. Mezzana (1999) citado por Muñoz, (1988).

- ***Suelos de piedemonte***

Desarrollados en una estrecha faja entre montañas y la planicie, con pendientes de alrededor de 5% sobre materiales usualmente de granulometría mixta con fragmentos gruesos. Predominan Inceptisoles, Afisoles y Entisoles esqueleto.

- ***Suelos de valles y planicies***

Constituyen lo más intensos de la depresión del lago y se han desarrollado a partir de sedimentos no consolidados depositados por desbordes a través de la red hidrográfica funcional y no funcional de la cuenca. Algunos suelos poseen altos contenidos calcáreos, derivados de formaciones geológicas con calizas.

Estos suelos son de textura medios y gruesos, con estructura débil, alto contenido de carbonato de calcio, permeabilidad muy rápida e infiltración excesivamente rápida, con alta capacidad de retención de humedad, de bien a imperfectamente drenado, y fertilidad mediana a alta.

- ***Suelos de planicie lacustrina***

Son suelos muy particulares derivados de materiales paretales de origen lacustrino (fondo del lago), expuestas por retiro del cuerpo de agua a la acción de los elementos del entorno emergido.

Son altamente calcáreos, con presencia de caracolillos, con una alta retención y transmisión de humedad y muy fértiles. Tienen una baja capacidad de sustentación mecánica y ofrecen muchos problemas para el desarrollo urbanístico. En esta categoría de suelos predominan los Entisoles.

- ***Suelos de altiplanicie:***

Están ubicados en la altiplanicie de Tocuyito y se han desarrollado sobre materiales sedimentarios relativamente antiguos.

Son suelos rojos, con predominio de Alfisoles e Inceptisoles ácidos la cuenca del Lago de Valencia evidencia una alta disponibilidad de tierras con aptitud para el uso agrícola diversificado, alcanzando una superficie de aproximadamente 25.000 ha, con una muy alta calidad agrológica (clases I y II).

2.2.6 Geología Regional

- **Estratigrafía**

Las laderas que rodean constituyen el Valle de la Valencia como en el fondo del valle están constituidos por rocas metamórficas cretácicas que se encuentran cubiertos por sedimentos aluviales.

Grupo Caracas. Representa la parte inferior de la cordillera de la serie del Caribe superadyacente al granito de Sebastopol un complejo de las rocas metamórficas antiguas. Las formaciones geológicas aflorantes son Las Brisas y Las Mercedes.

Formación Las Brisas. (*Mesozoico Medio –Superior*) Constituida por gneiss con algo de esquistos micáceos y pequeñas intercalaciones de calizas, que se encuentran aflorando en las cordilleras meridionales de la Serranía del Litoral.

Formación Las Mercedes (*Mesozoico Medio –Superior*) Constituida por una serie de esquistos principalmente calcáreos, con zonas grafitosas y localmente micáceas, de color rosada característico, con abundancia de filones de calcita blanca marrón, esquistos con presencia de micas, grafito y cuarzo. En la parte superior se presentan como lentes intensamente deformados vetas de cuarzo en su mayoría paralelas a la esquistosidad, con prominentes sistemas de diaclasas, lentejones de calizas y mármol de variado tamaño.

Augengneis Peña de Mora (*Precámbrico –Superior*) Se encuentra aflorando en las laderas meridionales de la Serranía del litoral. Constituida por gnéis, esquistos micáceos, con pequeñas intercalaciones de calizas, marmoles y anfibolitas.

Formación Tucunemo Constituida por conglomerados metamórficos compuesto por guijarros de cuarzo ahumado compactados por material cuarcita.

Grupo de Villa de Cura Son grupo de rocas de origen volcánico pertenecientes al Cretáceo Superior, esquistos y ftanitas.

Formación Paracotos. Aflora en el Graven tectónico en las márgenes septentrionales de la Serranía del interior, constituida por lutitas negras, areniscas, conglomerados.

Rocas magmáticas: intrusivas Al este del valle de Valencia se encuentran pequeños afloramientos de intrusiones graníticas y dioríticas, e intrusiones de serpentinas aflorando al norte y al sur.

Aluvi3n Sedimentos aluvionales de piedemonte de espesores hasta de 400 metros, formados por procesos de transporte y sedimentaci3n de tipo coluvial, fluvial y lacustre, pobremente granulados, sin estratificaci3n y con tama1o variado desde bloques hasta arcillas. El acuífero de Maracay en la zona de estudio corresponde a este grupo de sedimentos.

FORMACI3N	ERA	PERIODO		LITOLOGÍA	ACUÍFEROS
Aluvi3n	CENozoica	CUATERNARIO	Qla	Dep3sitos no consolidado de granulometría variable arcilla, limo arena y grava	Ítergranulares extensos de alto rendimientos
Las Mercedes	MESozoica	CRETÁCEO	Klm	Esquistos calcáreos y calizas. Esquistos con grafito, esquistos cuarzo mica y filita	Por fractura en canales o discontinuidades Acuíferos cavernosos en calizas
Las Brisas		CRETÁCICO JURÁSICO	J1a	Esquistos cuarzo micáceos gneises más rocas verdes	Por fracturas locales y discontinuos

Figura 2.2 Columna Geológica de la zona de estudio.

- **Estructura**

La cuenca del Lago de Valencia pertenece al Sistema monta1oso del Caribe, es una depresi3n tect3nica, producida por fallas de direcci3n este-oeste, que fallaron a la estructura plegada, siendo el Lago de Valencia la parte mas deprimida de esta regi3n Esta ocupada por cuatro fajas tect3nicas: la de Cordillera de la Costa, la de Cauagua, la de Paracotos y la Faja Tect3nica de Villa de Cura.

- **Evoluci3n Tect3nica**

Relacionada muy probablemente con el empuje de la placa tect3nica del Caribe hacia el suroeste, el sistema del Caribe desarrollo profundidad geoestructuras, y una amplia actividad volcánica seguida de levantamiento, desarrollo de fallamiento normal, inverso y transcurrennte así

como corrimientos y subcorrimientos terminados en el Eoceno Superior –Oligoceno con la orogénesis andina. El área de la cuenca de Valencia representa varias fajas tectónicas las cuales pueden yuxtaponerse formando verdaderas napas de tipo alpino. En la parte norte se encuentra la zona de falla de la Cabrera la cual atraviesa la parte septentrional del lago junto al borde sur de la península de la Cabrera, y la Falla de Mariara .

2.2.7 Hidrografía

La red hidrográfica presenta un patrón dendrítico de escurrimiento cerrado donde los ríos y quebradas convergen en el Lago de Valencia, cuyo espejo de agua varía constantemente con los aportes de los tributarios y en los últimos años los transvases extra cuenca del río Pao.

Varias corrientes de agua descienden de las montañas de la Serranía Litoral y de la Serranía del Interior, que fluyen luego hacia la cuenca del Lago, desde la Serranía Litoral fluyen los ríos Cabriales.

- **Aguas Subterráneas**

Se distinguen en la costa occidental del lago varias unidades acuíferas intercomunicadas entre sí, en Valencia, Tocuyito, Naguanagua, San Diego, y Yagua, ubicadas en la costa oriental los acuíferos de Maracay, El Limón, Santa Cruz, Tocarón y la Victoria, en la costa sur el acuífero de Güigüe, y en la costa norte el acuífero de San Joaquín.

Bueno E. (1979) reconoce formas radiales divergentes de recarga provenientes del valle de El Castaño, otras situadas entre Santa Cruz, Palo Negro y Camburito; hacia la parte sur de la unidad, el flujo subterráneo no está dirigido hacia el lago, y en la parte norte la dirección del flujo se invierte originando por un bombeo intensivo.

- **Hidroquímica**

En los alrededores Güigüe, Mariara y sur de Maracay predominan en las aguas subterráneas cationes de bicarbonato-sodio, siendo apta para el consumo humano. Bueno E. (1979), midió la cantidad de sólido disuelto (TSD), y según normas del Organización Mundial de la Salud el contenido de TSD en el área de estudio y es inferior a 300 ppm.

2.2.8 Servicios Básicos

La población ubicada en zonas urbanas recibe suministro de agua del Acueducto Regional del Centro. Las áreas rurales y asentamientos campesinos se abastecen de aguas subterráneas

principalmente El servicio de cloacas es el más deficiente. En el Estado Carabobo existen cuatro municipios con un máximo de 33% de cobertura y una mínima de 4%, así mismo en el estado Aragua sólo dos municipios tienen servicio de cloacas con cobertura entre 9 y 4%. FUNDACITE Aragua (1999).

- **Vialidad**

Con relación a la vialidad, la Cuenca del Lago de Valencia, está dotada de una red vial muy completa de este a oeste se encuentra la Autopista Regional del Centro Caracas-Valencia, la Carretera Panamericana que comunica Caracas con los Llanos, y las intercomunales que unen distintas ciudades.

La comunicación directa con el Lago se realiza mediante la vialidad agrícola de los diferentes asentamientos campesinos y explotaciones agropecuarias, las cuales son de tierras y granzón en su mayoría.

- **Vivienda**

Según FUNDACITE Aragua (1999) el total de viviendas urbanas registradas en la cuenca para 1990 es de 431.280 viviendas, distribuidas el 54,55% en el Estado Carabobo y 45,45% en Aragua. La vivienda rural en la Cuenca del Lago de Valencia se reportan 11.203 viviendas ocupadas para 1990, de las cuales el 67,81% están ubicadas en el Estado Aragua y el 32,19% en el Estado Carabobo. Buena parte del área que emergió como consecuencia del desecamiento del lago, fue declarada Zona de Uso Protector dentro del Plan de Ordenamiento del Lago de Valencia elaborado por el MARNR. Sin embargo, estas áreas, comprendidas por los sectores litorales de los municipios Diego Ibarra, Girardot, están ocupadas actualmente por viviendas ilegales y están siendo objeto de otros usos no conformes con su zonificación.

2.2.9 Actividades económicas

- **Actividad Industrial**

En Aragua y Carabobo se concentra la mayor parte de la agroindustria, esto se debe a la cercanía a los principales centros de consumo del país, así como los puertos de la Guaira y Puerto Cabello por donde llega la materia prima importada para ser utilizada por la industria de concentrados.

En la Región Central se destacan las industrias de la confección, textiles y papeleras. La industria manufacturera influye altamente en el crecimiento demográfico y en la concentración de la población urbana, lo cual la convierte en un factor clave para la producción que se destina a la

exportación. En la región no existe industria petrolera o empresas básicas de hierro y acero, con excepción de la refinería El Palito ubicada en Morón, Estado Carabobo, donde además se destacan algunas industrias de la rama mecánica.

2.2.10 Caracterización Socio-económica

El crecimiento de las ciudades se dio como consecuencia del aumento industrial concentrándose principalmente en Valencia, Maracay, Mariara y Guacara, reportándose un incremento poblacional de 6,10 % en la última década. Así mismo, la población rural disminuyó un 27% entre los años 1950 - 1971, este desplazamiento respondió al incremento industrial de la zona.

Según FUNDACITE Aragua (1999), actualmente la cuenca de Lago de Valencia, representa aproximadamente el 0,3 % de la superficie del país, donde se ubica más del 10% de la población y cerca del 30% del empleo industrial.

2.3 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL

Los estudios realizados sobre los problemas ambientales en la cuenca del Lago de Valencia, refieren que los problemas se agrupan de acuerdo a los recursos que afectan: contaminación del cuerpo de agua, aguas superficiales, aguas subterráneas, salinización de los suelos, uso inadecuado de la tierra e incendios forestales, como los más importantes. Ver Apéndice A.

2.3.1 La Contaminación del cuerpo de agua

Se evidencia por las aguas servidas procedentes de las poblaciones y de la industria no tratada. La disposición final se hace en drenajes naturales o superficiales existentes, las instalaciones para el tratamiento de los afluentes son pocas y están destinadas a la solución de problemas puntuales como urbanizaciones e industrias.

Al ser la cuenca del Lago un ambiente cerrado, sin desagüe natural hacia otra cuenca, las materias orgánicas, inorgánicas y tóxicas producidas por las actividades industriales, domésticas y agropecuarias se acumulan y se concentran en el vaso receptor del lago sometiéndola a diversos problemas ambientales. Esta situación evidencia que las descargas provenientes de las industrias, los asentamientos agrícolas y las poblaciones ubicadas en la cuenca han venido contaminando el cuerpo de agua y modificando su nivel.

Como resultado, se ha producido un cuadro lamentable de deterioro de los recursos naturales y por ende de la calidad ambiental de la cuenca, la cual ha contado con programas parciales y tardíos para su recuperación que a veces se hacen inoperantes dado el ritmo de

crecimiento y de desarrollo que presiona constantemente sobre los recursos. Según MARNR/Fundación Polar (1995), citado por FUNDACITE Aragua (1999), en las últimas dos décadas, la proliferación de algas verdes \ azules, con afloramientos masivos a la superficie, es un rasgo del lago.

Las fuentes de contaminación del cuerpo de agua se resumen en los siguientes aspectos: aguas negras domésticas originadas en ciudades y poblaciones, las cuales en su mayor parte están empotradas a las redes cloacales que irán a dar a plantas de tratamiento de propiedad pública; aguas negras domésticas de áreas pobladas que no están empotradas a las redes cloacales, que drenarán hacia las obras públicas, industrias y otros establecimientos de mediano a alto potencial contaminante, que están empotrados a la cloaca pública, la industrias y otros establecimientos que descargan directamente al Lago o tributarios de éste.

2.3.2 Las aguas superficiales

Producen inundaciones durante la época de lluvias, debido a la obstrucción de los cauces naturales por acumulación de sedimentos, los desechos sólidos de origen doméstico e industrial que producen contaminación, la modificación de la topografía original y la construcción de viviendas en la planicie inundable.

2.3.3 Las aguas subterráneas

Utilizadas para fines urbanos e industriales están limitadas por los problemas asociados a concentraciones crecientes de sulfatos debido a la intrusión de las aguas del lago a los sectores deprimidos del acuífero. Según estimaciones del MARNR, Bueno R. (1979), existen hasta 1.000 ppm de sólidos disueltos en los sectores sur-occidental y sur oriental del Lago (aguas salobres) y una tendencia irreversible a incrementarse en los años próximos.

En estas condiciones, se reducen los volúmenes de aguas subterráneas disponibles en el futuro, ya que su uso para consumo doméstico requerirá de tratamiento de desmineralización o de ósmosis inversa, y que la sobreexplotación actual de los acuíferos no podrá ser eliminada a muy corto plazo.

2.3.4 La Salinización de los suelos

Está relacionada con las formaciones geológicas Las Mercedes y Las Brisas, ubicadas alrededor de la cuenca del río Aragua, áreas con problemas de salinidad fósil (La Morita. estado. Aragua), excedente de riego en zonas de cultivo de caña de azúcar, altos contenidos de sales en las aguas subterráneas.

2.3.5 El uso inadecuado de la tierra

Se manifiesta por sobre utilización en el área montañosa debido a actividades conuqueras, sobre utilización de la tierra localizada en las micro cuencas del río Guacara, Los Guayos, alrededores de la Colonia Tovar y en el tramo superior de la cuenca del río Aragua, asimismo, se manifiesta subutilización en la planicie aluvial y lacustrina por cultivos como la caña de azúcar que producen deterioro y requieren de suelos de menor calidad.

2.3.6 La expansión urbana

No controlada sobre tierras agrícolas disponibles ha producido pérdida de zonas agrícolas importantes a favor del desarrollo industrial y urbano.

2.3.7 Los incendios forestales

Se propagan con facilidad en las zonas donde nacen los ríos y quebradas que alimentan el Lago y las represas de Taiguaiguay y Suata, produciendo sedimentación como consecuencia de la erosión de las cuencas de los ríos. Igualmente, las quemas contribuyen a la disminución del caudal natural de los afluentes del lago. Por otra parte, las quemas por prácticas agrícolas degeneran fácilmente en incendios y dejan los suelos desnudos, propensos a la erosión.

2.4 CARACTERÍSTICAS LOCALES.

2.4.1 Climáticas.

- ***Precipitación.***

En Maracay hay un promedio de 119.8 días con lluvia mayor de 0.1 mm y el mes más lluvioso posee número de días lluviosos 19.5, el periodo seco solo tiene 23,5 días lluviosos.

- ***Evaporación.***

Posee una evaporación anual entre 1700 y 2300 mm todos los meses con valores mayores de 100 mm y valores máximos de 200 mm, poniendo como evidencia el alta pérdida de agua en el proceso de la evaporación.

2.4.2 Geología Local

- *Estratigrafía*

La zona de estudio esta constituida por los sedimentos aluvionales formado por sedimentos cuaternarios, compuesto de variabilidad de rocas dendríticas de diversos tamaños desde bloques hacia gravas y arenas, limos y arcillas son característicos las variaciones abruptas en composición y espesor entre estas, aun en distancias muy pequeñas. La mayoría de la zona está constituida por aluviones cuaternarios reciente, y secuencias de rocas metamórficas de las formaciones Las Mercedes y Las Brisas, como se puede observar en la figura 2.2.

- *Estructura*

El área de estudio esta ubicada en la Faja Tectónica de la cordillera de la Costa formada por un gran anticlinorio de plegamiento bastante uniforme de rumbo N 80° E, limita por las fallas longitudinales, de rumbo Este al norte la Falla del Caribe y al sur por la Falla de la Victoria. El valle de Maracay es una fosa tectónica que ha sido sometida a deformaciones posteriores que cambiaron ligeramente el drenaje de la cuenca

Evidenciándose estos movimientos en cortes de carretera, terrazas formada por sedimentos gruesos, gravas, arenas, limos arcillas de origen fluvial, sedimentos aluviales ricos en cuarzo mica moscovita, caolinita y montmorillonita, se presenta el cuarzo como el principal componente de los sedimentos gruesos y sedimentos lacustrino.

2.4.3 Suelos

Debido a la mezcla de materiales de diferentes orígenes, tamaño y edad, existe una distribución muy compleja de los suelos que cubren la planicie, hacia el pie de monte los suelos son coluviales, en el área norte y sur se encuentran suelos gravosos, arcillosos, generalmente calcáreos hacia el oeste y noreste del área de estudio.

En dirección del lago los sedimentos van disminuyendo en tamaño hasta llegar a limos y arcillas, con gran contenido de material orgánico en zonas cercanas a su rivera, desde el punto de vista de la permeabilidad los suelos presentan heterogeneidad, en los cuales los suelos permeables predominan sobre los impermeables, localizándose estos hacia la parte central del acuífero y los impermeables hacia el contacto con la roca metamórfica.

2.5 ESTUDIOS REALIZADOS EN EL ÁREA

En el año 1968 el profesor Leo Peters, realizó una revista por medio del Instituto para la Conservación del Lago de Valencia, llamada Origen y Evolución del Lago de Valencia, Venezuela, posteriormente publicó otra similar, denominada Nuevos Datos Acerca de la Evolución del Lago de Valencia, (Venezuela), Durante el Pleistoceno Superior y el Holoceno. De allí en adelante, debido a la gran importancia de las aguas subterráneas en el desarrollo de los centros poblados, se han realizado estudios por medio de instituciones del estado.

Tahal Ingenieros Consultores de Venezuela (1970) realizó el Estudio para el Desarrollo de los Recursos de Aguas Subterráneas Región de Valencia, el cual permite una visión en conjunto de las condiciones hidrogeológicas de la cuenca.

El Ministerio de Obras Públicas, institución ya desaparecida, realizó varios estudios semi detallados de los suelos durante el año 1976.

Emilio Bueno en el año 1979, realizó el Estudio Hidrogeológico e Hidrogeoquímico de la Cuenca del Lago de Valencia, para el Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales Renovables.

GEOCIN, C.A. en el año 1983 realizó solicitado por el Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales Renovables el Estudio hidrogeológico preliminar de la Cuenca del Lago de Valencia Venezuela.

El Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales Renovables en el año 1985, realizó un estudio de balance hidráulico mensual en la Cuenca del Lago de Valencia.

Masurem P. en el año 1987, realizó un trabajo para la Organización Panamericana de la Salud y el Banco Internacional Desarrollo, denominado 'Saniamiento Ambiental y Evaluación de Excedentes de la Cuenca del Lago de Valencia.

El Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales Renovables en el año en el año 1981 en sus Serie de informes técnicos, por medio de Emilio Bueno Romero realizó los trabajos denominados "Estudio hidrogeológico de la Cuenca del Lago de Valencia" y. "Morfometría de la Densidad de la Planicie Cuaternaria de la Cuenca del Lago de Valencia".

Athenaida Muñoz, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Departamento de Geología año 1988 realizó el Estudio Hidrogeológico y Régimen de Aguas subterráneas del Acuífero de Maracay.

En el año 1998, Luis Carmelo Ramos (1998), realizó el Inventario de pozos en el Acuífero de Maracay, solicitado por Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales Renovables.

FUNDACITE Aragua, en el año 1999, realizó una propuesta del uso turístico sostenible de la Cuenca del Lago de Valencia, dando una visión de las características generales de la cuenca.

Todos estos estudios realizan un análisis de las características generales de la cuenca, del Lago de Valencia, pero no se encontraron trabajos sobre estudios de vulnerabilidad de la contaminación en los acuíferos en la zona, sin embargo ayudaron para realizar una caracterización integral del área de estudio.

2.6 INFORMACIÓN UTILIZADA

Para la caracterización del área de estudio se utilizó la información de los trabajos realizados en este, sin embargo gran parte de la información fue la proveniente del Estudio para el Desarrollo de los Recursos de Aguas Subterráneas Región de Valencia, realizado por Tahal (1970), el cual ha sido uno de los trabajos más importantes y completos ejecutados en la Cuenca del Lago de Valencia, este permite una visión en conjunto de las condiciones hidrogeológicas de la misma, siendo referido en todos los trabajos posteriores utilizándolo como fuente de adquisición de datos.

Para la aplicación de la metodología de análisis de vulnerabilidad se solicitó y recabó información hidrogeológica existente al Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales Renovables (MARN), Instituto de Edafología de la Universidad Central de Venezuela Facultad de Agronomía Maracay y en la Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Departamento de Geología y, al Instituto Cartográfico Simón Bolívar.

En el MARN con sede en Caracas, Dirección de Hidrología y Meteorología División de Estudio e Investigación al Departamento de Hidrogeología existe un banco de datos computarizado (hoja cartográfica 6646), Apéndice C, que contiene información básica de los pozos, organizando por parámetros constantes (identificador, sitio/localidad, propietario, latitud, longitud, profundidad, nivele estático fecha del inventario, caudal, cota, e indica la información complementaria que posee como lo son análisis químicos y características litológicas).

Actualización del Inventario de pozos en el Acuífero de Maracay MARNR realizada por Luis Carmelo Ramos.

Sistema de ambiental de la Cuenca del Lago de Valencia (SIACLAV 1990. 1993) realizado por la Fundación Polar y el MARNR

Mapa escala 1:25000 Mapa hidrogeológico de Venezuela elaborado en 1952 por el Ministerio de Minas e Hidrocarburos.

Convenio MARN – JICA, Agencia de Cooperación Internacional del Japón 2000.

Se solicitó al MARN el registro de actividades susceptibles de degradar el ambiente. RASDA, en el área d estudio.

CAPITULO 3

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En la revisión bibliográfica, se plantea de manera general una conceptualización del ciclo hidrológico, del papel desempeñado por las aguas subterráneas, la importancia de los acuíferos, sus mecanismo, causas, fuentes de contaminación, métodos de tratamiento y control de las aguas subterráneas, para de esta manera estudiar la amenaza vulnerabilidad y riesgo de la contaminación de las aguas subterráneas. Seguidamente se define los procesos asociados y los elementos a estudiar.

3.1 FUNDAMENTOS CONCEPTUALES

3.1.1 Ciclo hidrológico

Es el constante movimiento y transformación a que está sometida permanentemente el agua del planeta, pasando de un estado físico a otro, es un proceso de continua circulación de humedad y de agua sobre nuestro planeta desde la evaporación en los depósitos de agua, mares y lagos, pasando por estado gaseoso, mientras ocurre la circulación atmosférica para llegar a los procesos de precipitación. La cantidad de precipitación que se absorbe en el suelo depende de varios factores: la cantidad y la intensidad de la precipitación, la condición anterior del suelo, la inclinación del paisaje, y la presencia de vegetación, factores que pueden a veces interactuar de manera sorprendente, muchas veces, una intensa lluvia en un suelo muy árido no se absorbe en el suelo y crea inundaciones instantáneas, o que se absorbe en el suelo también puede seguir absorbiéndose a través del suelo hacia unas reservas terrestres formando los acuíferos.

3.1.2 Aguas Subterráneas

Las aguas subterráneas, es decir, todas las aguas presentes en el subsuelo son mas que una fase o etapas de las agua del ciclo hidrológico, suelen ser más difíciles de contaminar que las superficiales, pero cuando esta contaminación se produce, es más difícil de eliminar, porque las aguas del subsuelo tienen un ritmo de renovación muy lento. Se calcula que mientras el tiempo de permanencia medio del agua en los ríos es de días, en un acuífero es de cientos de años, lo que hace muy difícil su purificación.

La explotación incorrecta de las aguas subterráneas origina varios problemas, porque como estas no se ven, puede tardar en hacerse evidente, en muchas ocasiones la situación se agrava por el reconocimiento tardío de que se está deteriorando el acuífero.

- **Acuíferos**

Las áreas donde existen grandes cantidades de aguas subterráneas que pueden abastecer pozos o manantiales se llaman acuíferos, palabra que significa "portador de agua". Estos acumulan el agua entre los espacios de arena, grava, y rocas. La reserva subterránea depende en gran medida de la porosidad del acuífero, o la cantidad de espacios que hay para sostener el agua. La capacidad del acuífero de transmitir agua, o su permeabilidad, se basa en parte en el tamaño de estos espacios y la manera en que están interconectados.

- **Tipos de Acuíferos**

Según Kruseman, G.P. y N.A de Ridder, (1970) citados por Amisial y Jégat (1976) se pueden reconocer los siguientes tipos de acuíferos conforme a su comportamiento hidráulico:

Acuífero Confinado Sinónimo de acuífero artesano está limitado por el techo superior o capa limitante mantiene el agua bajo presión, la capa confinante tiene una permeabilidad nula, puede salir o no agua saltante de un pozo perforado en este tipo de acuífero. Los puntos a los que llega el agua forman una superficie ficticia llamada piezométrica.

Acuífero Semi-Confinado Cuando la capa confinante de un acuífero confinado es semi-impermeable, es decir, tiene una permeabilidad inferior a la del acuífero, es considerado insignificante el movimiento horizontal de agua tomando en cuenta solo el movimiento o filtración vertical del agua de la capa confinante.

Acuífero Semi-Libre Difiere del acuífero semi-confinado, en que la permeabilidad de la capa superior es inferior pero del mismo orden de magnitud de la capa inferior.

Acuífero Libre Es caracterizado por la presencia de superficie libre formado por una sola capa.

3.2 CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

En términos generales, la contaminación se refiere al efecto nocivo que cualquier sustancia ajena al medio ambiente, sea esta sólida, líquida o gaseosa, produce en los sistemas de la naturaleza. Es importante considerar la contaminación de aguas subterráneas como un fenómeno relativo, puesto que todos los acuíferos en mayor o menor grado, están contaminados con alguna sustancia indeseable. Más aún, se debe considerar al subsuelo no solamente como una reserva para explotación, sino como un almacenamiento de aguas sobrantes y como medio purificador de las aguas, al infiltrarse a través de él.

Antes de la década de 1970, se creía que las aguas subterráneas tenían cierto nivel de protección natural contra la contaminación, que los suelos y las capas de arena, grava y rocas en el subsuelo, funcionaban como filtros, atrapando contaminantes antes de que estos pudieran llegar hasta las aguas subterráneas. Ahora se sabe que algunos contaminantes pueden atravesar todas las capas de filtración, y llegan a la zona de saturación, y contaminar las aguas subterráneas.

3.2.1 Constituyentes químicos las aguas subterráneas

El agua subterránea contiene una gran variedad de constituyentes químicos inorgánicos disueltos en varias concentraciones, como resultado de las interacciones químicas y bioquímicas entre el agua subterránea y los materiales geológicos a través de los cuales fluye y, en un menor grado, debido a las contribuciones de la atmósfera y cuerpos de agua superficial, Echeverri (1998), sostiene que los principales constituyentes inorgánicos presentes en el agua subterránea El : Ácido Carbónico, Bicarbonatos, Calcio, Cloruros, Magnesio, Silicio, Sodio y Sulfatos; éstos están presentes fundamentalmente en forma iónica y denominados iones principales (Na^+ , Mg_2^+ , Ca_2^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4).

Los constituyentes menores son el Hierro, los Nitratos, el Potasio, etc., y los constituyentes trazas: Molibdeno, Niobio, Níquel, Oro, Plata, Platino, Plomo, Rubidio, Selenio, Uranio, Zinc, etc. Tanto los elementos menores como los elementos trazas están controlados por la disponibilidad de estos constituyentes en el suelo y las rocas que encuentra el agua en su camino. Cada vez es más común que las concentraciones de los constituyentes inorgánicos disueltos en el agua subterránea, generados por los procesos geológicos y geoquímicos, estén influenciados por las actividades del hombre citado de Echeverri (1998).

La materia orgánica disuelta está siempre presente en el agua subterránea natural, aunque las concentraciones son generalmente bajas en comparación con las de los constituyentes inorgánicos.

Los gases disueltos más abundantes en el agua subterránea son N_2 , O_2 , CO_2 , CH_4 , H_2S y N_2O ; los tres primeros componen la mayor parte de la atmósfera terrestre y por lo tanto es común que se encuentren en aguas superficiales, mientras que los restantes existen frecuentemente en el agua subterránea en concentraciones significativas, debido a que son productos de los procesos bioquímicos que le suceden en zonas subsuperficiales no aireadas.

3.2.2 Mecanismos de contaminación de las aguas subterráneas

Cuando el agua entra en contacto con los minerales, la disolución de estos comienza y continúa hasta que se alcancen las concentraciones de equilibrio en el agua o hasta que se consuman todos los minerales donde la solubilidad de un mineral esta definida como la masa que se disolverá en un volumen unitario de solución bajo condiciones específicas y presenta un

amplio intervalo de valores. Así, dependiendo de los minerales que el agua subterránea encuentre durante la trayectoria de su flujo, puede resultar ligeramente con mayor cantidad de sólidos disueltos que el agua de lluvia o varias veces más salada que el agua de mar.

Muchos minerales que afectan la evolución química del agua subterránea se disuelven incongruentemente; esto es, uno o más de los productos de la disolución ocurren como minerales o sustancias sólidas amorfas, por ejemplo, los silicatos de aluminio también es el caso de la albita que se disuelve por la acción lixiviante del ácido carbónico (H_2CO_3) para producir especies disueltas y el mineral de arcilla caolinita. Esta es una reacción común en zonas de aguas subterráneas de terrenos con presencia de cuerpos graníticos.

La tendencia en los sistemas de aguas subterráneas es hacia la disminución de oxígeno y en condiciones reductoras, debido a que el agua que circula a través del subsuelo generalmente está aislada de la atmósfera y a que no se recupera el oxígeno que se consume por reacciones hidroquímicas y bioquímicas. Si el ambiente se convierte en un ambiente fuertemente reductor, los compuestos orgánicos pueden sufrir degradación anaeróbica.

Los materiales geológicos porosos, que contienen un porcentaje apreciable de partículas de tamaño coloidal, tienen la capacidad de intercambiar constituyentes iónicos adsorbidos en la superficie de dichas partículas. Estas tienen diámetros en el rango de 10^{-3} a 10^{-6} mm, las cuales son grandes en comparación con el tamaño molecular, pero son suficientemente pequeñas para que las fuerzas interfaciales sean significativas en el control de su comportamiento.

La mayoría de los minerales de arcilla son de tamaño coloidal; así como los productos de la alteración geoquímica de las rocas que frecuentemente son coloides inorgánicos y amorfos en un estado meta estable persistente. Los procesos de intercambio iónico están limitados exclusivamente a partículas coloidales y por lo tanto a la tendencia de adsorción de cationes o de aniones.

Echeverri (1998), sostiene que la contaminación de agua en un medio poroso es un proceso complejo, donde intervienen varios fenómenos, siendo los predominantes: la difusión molecular, que consiste en el mezclado entre dos fluidos, por ejemplo, en este caso pueden considerarse agua limpia y agua con cierto grado de contaminación; la dispersión mecánica, que es el mezclado generado por las fluctuaciones de velocidad de un fluido en movimiento; la adsorción, producida por la transferencia de un material disuelto en un fluido a la superficie de un sólido por medio del contacto directo; y las reacciones químicas o procesos físicos o biológicos que pueden limitar el tiempo de existencia de un cierto compuesto en su forma original.

3.2.3 Causas de la contaminación de las aguas subterráneas

El deterioro de la calidad del agua y los requerimientos para el control de la contaminación están en función directa de la evolución y el crecimiento de las actividades productivas y el desarrollo urbano.

La contaminación de las aguas subterráneas puede venir de la superficie de la tierra, de los suelos sobre el nivel freático, o de sedimentos debajo del nivel freático. Los sitios donde los contaminantes entran al ambiente subterráneo influyen en el impacto sobre la calidad de las aguas subterráneas, como el derramar un contaminante sobre la superficie de la tierra o la inyección dentro del suelo sobre el nivel freático, los cuales pueden resultar en diferentes niveles de contaminación. En el caso de derramar sobre la tierra, quizás el contaminante tenga que atravesar varias capas de materiales antes de que alcance las aguas subterráneas, y esto disminuye el nivel de contaminación.

3.2.4 Procesos de Contaminación

Se suelen distinguir dos tipos de procesos contaminantes de las aguas subterráneas: los "puntuales" que afectan a zonas muy localizadas, y los "difusos" que provocan contaminación dispersa en zonas amplias, en las que no es fácil identificar un foco principal.

- ***Contaminación Puntual***

Suele ser más intensa junto al lugar de origen y se va diluyendo al alejarnos. La dirección que sigue el flujo del agua del subsuelo influye de forma muy importante en determinar en que lugares los pozos tendrán agua contaminada y en cual no. Puede suceder que un lugar relativamente cercano al foco contaminante tenga agua limpia, porque la corriente subterránea aleja el contaminante de ese lugar, y viceversa. Las actividades que suelen provocar la contaminación puntual son los lixiviados de vertederos de residuos urbanos y fugas de aguas residuales que se infiltran en el terreno, lixiviados de vertederos industriales, derrubios de minas, depósitos de residuos radiactivos o tóxicos mal aislados, gasolineras con fugas en sus depósitos de combustible, pozos sépticos etc.

- ***Contaminación Difusa***

Puede provocar situaciones especialmente preocupantes con el paso del tiempo, al ir acumulándose la contaminación, lenta pero continuamente, ocurre en zonas muy extensas y suelen estar provocadas por: el uso excesivo de fertilizantes y pesticidas en la agricultura o en las prácticas forestales. La explotación excesiva de los acuíferos facilita el que las aguas salinas invadan la zona de aguas dulces, por desplazamiento de la interfase entre los dos tipos de aguas.

El movimiento del contaminante a través de capas de sedimento funciona como un proceso de filtración, dilución, y descomposición que puede disminuir el impacto final en las aguas subterráneas. Si el contaminante es introducido directamente en el área debajo del nivel freático, la dilución será el proceso principal que puede disminuir el impacto del contaminante citado de Foster (1991).

3.2.5 Agentes causantes de la contaminación de las aguas subterráneas

- ***Agentes causadas por actividades humanas.***

Las sustancias que pueden contaminar las aguas son las que ocurren naturalmente y las sustancias introducidas por las actividades humanas.

Lixiviación de depósitos de basura (Líquidos que se han filtrado del depósito y que llevan sustancias disueltas de la basura) que contienen sustancias como metales pesados.

Sustancias químicas orgánicas: Petróleo, plásticos, plaguicidas, detergentes que amenazan la vida. Incluyen sal, bacterias y virus, productos químicos e hidrocarburos (por ejemplo los solventes, pesticidas, y productos petrolíferos.

- ***Agentes naturales.***

Las sustancias que ocurren de manera natural incluyen. compuestos minerales: como sustancias tóxicas, metales pesados (plomo, mercurio, etc.), nitratos, nitritos, otros pueden afectar a las propiedades organolépticas (olor, color y sabor) del agua como los son el cobre, el hierro, etc el fósforo.

Agentes patógenos: Bacterias virus, protozoarios, parásitos que entran al agua proveniente de desechos orgánicos. La contaminación microbiológica se produce principalmente por la presencia de fenoles, bacterias, virus, protozoos, algas unicelulares.

Desechos que requieren oxígeno: Los desechos orgánicos pueden ser descompuestos por bacterias que usan oxígeno para biodegradarlos. Si hay poblaciones grandes de estas bacterias, pueden agotar el oxígeno del agua, matando así las formas de vida acuáticas.

Sustancias químicas inorgánicas: Ácidos, compuestos de metales tóxicos (Mercurio, Plomo), envenenan el agua.

Sedimentos o materia suspendida: Partículas insolubles de suelo que enturbian el agua, y que son la mayor fuente de contaminación.

Calor: Ingresos de agua caliente que disminuyen el contenido de oxígeno y hace a los organismos acuáticos muy vulnerables. La contaminación térmica provoca una disminución de la solubilidad del oxígeno en el agua.

3.2.6 Fuentes de la contaminación de las aguas subterráneas

Las fuentes de contaminación están clasificadas de acuerdo a su origen y en este caso pueden ser puntuales y no puntuales, las fuentes puntuales descargan contaminantes en localizaciones específicas a través de tuberías y alcantarillas. (Fábricas, plantas de tratamiento de aguas negras, minas, pozos petroleros, etc), las fuentes no puntuales son grandes áreas de terreno que descargan contaminantes al agua sobre una región extensa. (Vertido de sustancias químicas, tierras de cultivo, lotes para pastar ganado, construcciones, tanques sépticos.).

- ***Letrinas y pozos sépticos***

Una de las mayores causas de contaminación de las aguas subterráneas es el efluente, o derrame de estos. Si estos no están situados, diseñados, construidos o mantenidos correctamente, pueden contaminar las aguas subterráneas con bacterias, nitratos, virus, detergentes sintéticos, sustancias químicas caseras, y cloruros. Aunque cada sistema contribuye una porción insignificante a la contaminación de las aguas subterráneas, la gran cantidad de sistemas sépticos en lugares que no tienen sistemas públicos de tratamiento de aguas negras crea una amenaza a la calidad de aguas subterráneas.

- ***Embalses superficiales***

Como depósitos, empleados por municipalidades, industrias, y negocios para almacenar, tratar o disponer de una variedad de residuos líquidos y aguas negras. A pesar de que los fondos de estos embalses por especificaciones técnicas deberían ser impermeabilizados con suelos arcillosos firmes o con forros de plástico, no es factible prevenir completamente el escape de líquidos contaminados.

- ***Actividades agrícolas***

Pueden contribuir significativamente a la contaminación de aguas subterráneas debido a la gran cantidad de fertilizantes y pesticidas utilizado en los campos. En el caso de la aplicación de fertilizantes, frecuentemente hay un volumen de nitrógeno residual no asimilado por las plantas, cuyo transporte por lixiviación le conduce hasta la zona saturada. También la lixiviación de estiércol de ganado puede contaminar las aguas subterráneas. El uso de sustancias químicas en

céspedes y huertos de hortalizas también contribuye a la contaminación de las aguas subterráneas.

- ***Vertederos***

En las instalaciones para el desecho de productos peligrosos, vertederos de otros tipos. para proteger las aguas subterráneas, se le exige a estas instalaciones que construyan forros de arcilla o de sustancias sintéticas, y sistemas de recolección de lixiviantes., donde estos requerimientos son recientes y a través de los años miles de vertederos fueron construidos, usados y abandonados sin regulación, pudiendo estas instalaciones pueden causar problemas graves de contaminación a las aguas.

- ***Tanques de depósitos subterráneos.***

Tanques para almacenar una gran variedad de sustancias que incluyen la gasolina, el aceite de combustión, y otros materiales químicos que pudieran estar perdiendo sustancias tóxicas que contaminan las aguas subterráneas.

- ***Pozos abandonados***

Representan otro origen de contaminación a las aguas subterráneas. Antes de que existieran los sistemas de abastecimiento de agua municipal, mucha gente dependía de pozos para obtener agua potable. Pero si se abandona un pozo sin sellarlo correctamente, el pozo puede conducir los contaminantes de actividades humanas hacia las aguas subterráneas.

- ***Accidentes y desechos prohibidos***

Los accidentes también pueden causar la contaminación de las aguas subterráneas. Pueden ocurrir derrames químicos o petrolíferos. Si estos accidentes no son manejados con cuidado, pueden resultar en la contaminación de aguas subterráneas, frecuentemente, el instinto de quienes llega a un derrame es de echar grandes cantidades de agua para diluir la sustancia química.

- ***Derivados de hidrocarburos***

Este tipo de contaminación es muy frecuente, cuyas consecuencias pueden ser muy graves, puede producirse por fugas de depósitos, vertidos accidentales, enterramiento de residuos que lo contiene, lavado de aglutinantes, caminos asfaltado, riego de camino de tierra entre otros

La mayoría de los vertidos terrestres de hidrocarburos son debidas a fugas de depósitos enterrados accidentales de los vehículos de transporte y reboses en el llenado de depósitos, negligencia y falta de atención de los operarios.

3.2.7 Métodos de tratamiento de acuíferos contaminados.

Varios factores determinan cuál es la mejor opción, incluyendo el tipo y magnitud de contaminación, las condiciones geológicas, si las leyes requieren ciertas acciones específicas, y cuanto dinero es disponible para el proyecto, todas estas opciones son costosas. Los métodos de tratamiento tienen costos muy altos y muchas dificultades técnicas, y de manera que muchas comunidades optan por abandonar el acuífero cuando se enfrentan con contaminación de su agua subterránea. La comunidad entonces tiene que encontrar otro abastecimiento de agua, o taladrar nuevos pozos más lejos del área contaminada.

- Retener los contaminantes para prevenir su migración desde el punto de origen.
- Extraer los contaminantes del acuífero.
- Tratar las aguas subterráneas en el lugar de extracción o antes de usarlas.
- Rehabilitar el acuífero por medio de inmovilización o detoxificación de los contaminantes, mientras que estos todavía se encuentren en el acuífero.
- Abandonar el uso del acuífero y buscar manantiales alternativos para agua potable.

3.2.8 Protección de acuíferos

Considerando la importancia de las aguas subterráneas en el suministro para diferentes usos, urge la necesidad de implementar o consolidar políticas para proteger los acuíferos contra la explotación excesiva o irracional y contra el deterioro de su calidad debido a la contaminación. Este es especialmente el caso dentro y alrededor de las áreas urbanas, donde las captaciones de aguas subterráneas se encuentran bajo una presión ambiental causada por el rápido desarrollo.

Los programas de protección de la calidad de las aguas subterráneas en varios países, revelan dos líneas básicas y casi siempre independientes de conducta: una dirigida a los pozos de captación, estableciendo alrededor de la obra perímetros de protección, definidos a partir de los tiempos de tránsito específico, distancia de la fuente o el comportamiento hidráulico del acuífero; otra dirigida al acuífero, donde son definidas restricciones de uso de la tierra frente a la vulnerabilidad de contaminación de los acuíferos y a la importancia del recurso como fuente de abastecimiento público

La creciente diversidad química de contaminantes potenciales del agua subterránea, que están siendo manufacturados, distribuidos y usados, la amplia disposición de efluentes domésticos e industriales al terreno, debido al alto costo de métodos alternativos de eliminación, el enorme crecimiento en la aplicación de fertilizantes y pesticidas en la producción agrícola de muchas naciones desde los años 1970.

Efectos en la salud potencialmente insidiosos, asociados con la contaminación de los suministros de agua subterránea, a consecuencia del crecimiento lento pero persistente en la concentración de contaminantes con toxicidad desconocida, el costo excesivo y la falta de práctica técnica en la restauración de acuíferos contaminados.

3.2.9 Control de la contaminación del agua subterránea

La contaminación del agua subterránea es mucho más difícil de detectar y controlar que la contaminación del agua superficial, además es un proceso muy costoso, debido al tipo de sistemas de monitoreo de la contaminación que se necesita, al problema de su localización, y a que se necesita bombear el agua subterránea a la superficie para limpiarla y luego regresarla al manto acuífero.

Pruebas recientes para bombear y tratar mantos acuíferos subterráneos contaminados y con flujo lento, indican que se requiere décadas, incluso cientos de años de bombeo de las aguas subterráneas antes de que toda la contaminación salga a la superficie. Siendo la única manera efectiva de proteger el agua subterránea es evitar su contaminación, y proteger los recursos de agua subterránea, requiriéndose para ello:

- Disponer controles muy estrictos sobre la aplicación de plaguicidas y fertilizantes en la agricultura y en los jardines.
- Prohibir el depósito de desechos peligrosos en rellenos sanitarios por inyección en pozos profundos.
- Monitorear los mantos acuíferos cercanos a los rellenos sanitarios y de desechos peligrosos, tanques subterráneos y otras fuentes potenciales de contaminación subterránea.
- Exigir el análisis periódico de las aguas de los pozos utilizados para sacar agua para beber, mínimo una vez al año.
- Establecer niveles máximos de contaminantes arrojados a los drenajes y al campo, por las actividades humanas.

3.3 VULNERABILIDAD AMENAZAS Y RIESGOS

CEPREDENAC, (1998), ha definido a la vulnerabilidad como cualquier condición de susceptibilidad a impactos externos que pudieran amenazar las vidas y estilos de vida de las personas, los recursos naturales, las propiedades e infraestructura, la productividad económica y la prosperidad de una región. En términos generales, la "vulnerabilidad" puede entenderse, entonces, como la predisposición intrínseca de un sujeto o elemento a sufrir daño debido a posibles acciones externas, y por lo tanto su evaluación contribuye en forma fundamental al conocimiento del riesgo mediante interacciones del elemento susceptible con el ambiente peligroso.

Según BID, (1999) una amenaza es la probabilidad de que se produzca un fenómeno de origen natural o humano. Las amenazas naturales pueden clasificarse de varias maneras, pero para fines prácticos, se pueden separar en dos grandes grupos: (1) los fenómenos meteorológicos, como los huracanes, tormentas, sequías e inundaciones; y (2) la actividad geofísica, como terremotos, erupciones volcánicas, deslizamientos de tierra, avalanchas y tsunamis.

Cardona, (1993); establece que la amenaza o peligro, o factor de riesgo externo de un sujeto o sistema, representado por un peligro latente asociado con un fenómeno físico de origen natural o tecnológico que puede presentarse en un sitio específico y en un tiempo determinado produciendo efectos adversos en las personas, los bienes y/o el medio ambiente, matemáticamente expresado como la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un evento con una cierta intensidad en un cierto sitio y en cierto período de tiempo.

CNE (1992), señala que cuando las fuerzas de los fenómenos citados anteriormente, interactúan con la vulnerabilidad, de origen humano y/o ambiental, la relación entre la amenaza y la vulnerabilidad genera una condición de riesgo y cuando ésta es atendida incorrecta o insuficientemente, ocurren los desastres no queriendo decir que sean siempre resultado del manejo inadecuado de los riesgos, pues cierto grado de riesgo es tolerable.

Según Fournier (1985) citado por Cardona (1996), la diferencia fundamental entre la amenaza y el riesgo está en que la amenaza esta relacionada con la probabilidad de que se manifieste un evento natural o un evento provocado, mientras que el riesgo está relacionado con la probabilidad de que se manifiesten ciertas consecuencias, las cuales están íntimamente relacionadas no sólo con el grado de exposición de los elementos sometidos sino con la vulnerabilidad que tienen dichos elementos a ser afectados por el evento.

3.3.1 Vulnerabilidad de contaminación de los acuíferos

Zaporozec y Vrba (1994) citado por España (2005) establece que la vulnerabilidad es la propiedad intrínseca de un sistema de agua subterránea que depende de su sensibilidad a impactos humanos y/o naturales, hidrogeológicos que determinan tanto la inaccesibilidad de la zona saturada a la penetración de contaminantes como la capacidad de atenuación de los estratos

por encima de ella. Las propiedades del medio varían de un punto a otro, lo que hace variable el potencial de un acuífero para protegerse, razón para que algunas áreas sean más vulnerables que otras.

El medio físico puede darle cierto grado de protección a los acuíferos al actuar de purificador del agua contaminada cuando ésta percola a través del suelo y otros estratos de la zona no saturada, y cuando viaja a través del acuífero. El grado de atenuación que el ambiente físico pueda efectuar determina el potencial relativo con que el acuífero se contamina. La vulnerabilidad depende del uso que hace o se podría hacer del acuífero.

En algunas ocasiones, las características propias del sistema natural determinan que la cantidad, accesibilidad y en especial la calidad del agua subterránea se torne inadecuada para algunos o todos los usos requeridos. Por lo tanto, es importante dejar claro que el agua subterránea no siempre es sinónimo de recurso disponible. En muchas ocasiones, los recursos hídricos subterráneos suelen perder tal categoría al estar afectados por distintas actividades contaminantes que incorporan al agua subterránea una variedad de sustancias tóxicas (metales pesados, compuestos orgánicos, organismos patógenos, etc.).

Foster (1987) uso el término de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero para representar las características intrínsecas que determinan la susceptibilidad del acuífero a ser adversamente afectado por una carga contaminante.

Según Séller y Canter (1980), Le Grand (1983) y Carter et al, (1987) citado por Foster e Hidrata (1987) es preferible evaluar individualmente la vulnerabilidad a cada contaminante o cada clase de contaminante (nutrientes, patógenos, metales pesados, microorganismos etc) o separadamente a cada grupo de actividades contaminantes (disposición de efluentes industriales, cultivos agrícolas, saneamiento in situ etc).

De acuerdo al National Academy Council (1993) el concepto de Vulnerabilidad del Agua Subterránea se refiere a la tendencia o probabilidad que un contaminante alcance una posición especificada en el sistema acuífero, después de su introducción en algún punto sobre el terreno. Citado por Foster e Hidrata (1987).

- **Tipos de Vulnerabilidad**

Augue (2003) sostiene que hasta la fecha, no se ha logrado consenso sobre el alcance del término existiendo dos grandes corrientes, una orientación, que establece la vulnerabilidad intrínseca representada por aquellos investigadores que consideran a la vulnerabilidad como una propiedad referida exclusivamente al medio (tipo de acuífero y cobertura, permeabilidad, profundidad, recarga, etc.), sin tener en cuenta la incidencia de las sustancias contaminantes; y otra orientación, vulnerabilidad específica donde los investigadores otorgan, además del comportamiento del medio, trascendencia al tipo y carga del contaminante.

Vulnerabilidad intrínseca Según Auge (2003), la vulnerabilidad intrínseca tiene mayor utilidad en los trabajos de planificación de uso del territorio y del agua, particularmente en lo que respecta a la preservación de la calidad del recurso, en los sitios donde no está afectado, ni se realizan prácticas como fertilización, aplicación de plaguicidas, riego, cría concentrada de ganado, ni actividades domésticas, urbanas, o industriales, que por su intensidad pudieren afectarlo, es por tanto una vulnerabilidad relacionada al acuífero.

Vulnerabilidad específica Este término incluye parcialmente el concepto de riesgo, toda vez que se refiere al peligro de deterioro en relación a sustancias contaminantes específicas. Auge (2003).

3.3.2 Mapa de vulnerabilidad

La mejor forma de representar la vulnerabilidad del acuífero es en forma de mapas, hay que tener en cuenta que los estudios de vulnerabilidad de acuíferos ayudan a establecer estrategias de protección del agua subterránea ya que el uso de los mapas de vulnerabilidad permite determinar el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, lo cual a su vez se puede utilizar para identificar los acuíferos, o zonas de los acuíferos, más vulnerables y establecer que actividades pueden causar riesgo de contaminación.

La construcción de mapas de vulnerabilidad, es una de las técnicas existentes para identificar, dentro de un área, las zonas más susceptibles a la contaminación., su elaboración implica combinar varios mapas temáticos, correspondientes a los factores hidrogeológicos elegidos para la evaluación. Los cambios en el sistema acuífero hacen que el mapa de vulnerabilidad no sea estático, sino que deba ser revisado en el correr del tiempo.

Los mapas de vulnerabilidad tienen múltiples propósitos y son útiles sobre todo a nivel gubernamental, sendo su principal función servir de guía en la planificación del uso de las tierras, convirtiéndose en una herramienta fundamental para definir qué uso pueden tener determinadas zonas; así como el desarrollo de políticas de protección para las aguas subterráneas, pudiéndolos clasificar como mapas de protección preventiva derivados de los mapas hidrogeológicos, siendo estos distintos de los mapas hidrogeológicos ya que no presentan los parámetros individuales del sistema de las aguas subterráneas, es decir, que sólo toman en cuenta aquellas características que influyen en la vulnerabilidad de las aguas subterráneas.

El objetivo, el contenido y la escala tienen una influencia decisiva en la selección del método de la presentación de vulnerabilidad en el mapa, estos mapas se construyen con base en índices cualitativos cuyos valores dependen de los parámetros hidrogeológicos que más influyen en la vulnerabilidad.

- ***Uso de los mapas de vulnerabilidad de las aguas subterráneas***

En general, los mapas de vulnerabilidad deben ser vistos como una de las herramientas principales para el manejo del medio ambiente y pueden ser usados con tres propósitos fundamentales:

En procesos de toma de decisión concierne a la protección y manejo de los recursos hídricos subterráneos puesto que proveen información valiosa que permitirá que organismos competentes tomen las medidas necesarias para evaluar y proteger zonas de alto riesgo. Si las actividades contaminantes de determinadas empresas no pueden ser evitadas, se deberán tener en cuenta las zonas que tengan menor deterioro ambiental o que presenten un nivel de tolerancia mayor.

Para identificar áreas susceptibles a la contaminación y decidir sobre las investigaciones y redes de monitoreo necesarias.

En planes informativos y educativos sobre la necesidad de proteger los acuíferos y evitar la contaminación del agua subterránea, insistiendo en que los acuíferos forman parte de un sistema ecológico interconectado que está siendo afectado por la actividad humana.

- ***Limitaciones de los mapas de vulnerabilidad de las aguas subterráneas***

Uno de los componentes del proceso de evaluación de la vulnerabilidad, lo constituyen los mapas que representan un producto indispensable y más tangible, el cual debe ser aceptado con una capacidad crítica, con respecto al usuario, puesto que esta la imposibilidad de tomar en cuenta todos los detalles debido a que los mapas son tan buenos como la información utilizada para elaborarlos.

La principal limitación para la construcción de mapas de vulnerabilidad lo constituye la falta de datos representativos y la relación de esta definida con la escala del mapa afectando de manera considerable la calidad y confiabilidad de los resultados.

Ausencia o deficiencia de datos representativos en calidad y cantidad, lo que puede impedir la construcción de los mapas a la escala necesaria.

Descripción incorrecta o incompleta de las características geológicas e hidrogeológicas del acuífero, lo cual es punto de partida para la construcción de los mapas de vulnerabilidad.

Ausencia de una metodología universal para la construcción de estos mapas. Muchos investigadores coinciden en cuáles son los parámetros a tener en cuenta para evaluar la vulnerabilidad de un acuífero, pero no en la metodología a aplicar para ello. Esto provoca que diferentes autores partiendo de los mismos datos, puedan arribar a conclusiones diferentes.

Escasa experiencia en la validación y verificación de los mapas de vulnerabilidad a nivel mundial.

3.3.3 Metodologías utilizadas para analizar la vulnerabilidad

Existen metodologías que permiten evaluar la susceptibilidad de un sistema acuífero y su interacción con una carga contaminante, esencialmente coinciden en la determinación de la vulnerabilidad debido a las características intrínsecas del medio, por lo que algunas metodologías la denominan vulnerabilidad intrínseca.

Algunos otros métodos como el de Factores de atenuación están íntimamente relacionados con el tipo de contaminante y resultan más complejos. Para efecto de este trabajo se utilizarán las metodologías DRASTIC y GOD.

- **El Método DRASTIC**

El método DRASTIC, o CRIPTA para otros autores, fue desarrollado en los Estados Unidos de Norte América, con el objeto de crear una herramienta para evaluar sistemáticamente el potencial de contaminación del agua subterránea de cualquier ambiente hidrogeológico con la información existente, es probablemente el método más utilizado en los estudios de vulnerabilidad de acuíferos según indican Aller et al (1987).

Este método se basa en la identificación de los ambientes hidrogeológicos y en el establecimiento de la vulnerabilidad del acuífero con base a un esquema jerárquico numérico de los elementos que componen el acróstico de las siglas en inglés:

D (Depth water table) Profundidad al nivel freático.

R (Net Recharge) Recarga neta.

A (Aquifer media) Tipo de acuífero.

S (Media Soil) Tipo de suelo.

T (Topography) Topografía.

I (Impact) Impacto de la zona no saturada o vadosa.

C (Hydraulic Conductivity). Conductividad hidráulica.

Para evaluar el potencial de contaminación, se utiliza un sistema numérico, formado por pesos, rangos como lo indica la tabla 3.1.

Tabla 3.1 - Pesos asignados a los distintos factores.

Parámetros		Contexto general	Agroquímicos
D	Profundidad del agua	5	5
R	Recarga neta	4	4
A	Acuífero	3	3
S	Tipo de Suelo	2	5
T	Pendiente del terreno	1	3
I	Zona no saturada	5	4
C	Conductividad Hidráulica	3	2
Rango total de variación		23-226	26-256

Con las ponderaciones de cada uno de los parámetros se haya un índice numérico para cada punto mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{I} = D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + S_R S_W + T_R T_W + I_R I_W + C_R C_W \quad (3.1)$$

Donde:

I: Índice de vulnerabilidad

R rango

W peso de los parámetros

De acuerdo a los parámetros propuestos, el método DRASTIC toma en cuenta diferentes aspectos que condicionan el transporte del contaminante en el medio subterráneo y los procesos de atenuación. Es importante notar que de esta forma se cubren los aspectos más importantes que influyen tanto en la inaccesibilidad al acuífero, como en los fenómenos de atenuación de los contaminantes.

Para ser aplicada, esta metodología debe reunir una serie de condiciones entre ellas que el contaminante sea introducido en la superficie del terreno, que penetre con el agua de recarga, que tenga la movilidad del agua y que el área evaluada sea mayor o igual a 45 Ha., cuando no se cumplen estas condiciones, no es confiable la evaluación del potencial de contaminación del agua subterránea mediante este método.

Profundidad (D) Este parámetro representa rangos de variación de la profundidad del agua y un valor asignado al parámetro de cada intervalo de clase, para un acuífero libre la profundidad es la distancia desde la superficie del terreno al agua, y en un acuífero confinado es la distancia desde la superficie del terreno a la base de la capa confinante. En acuíferos pocos profundos el valor asignados es el mayor, puesto que la probabilidad de contaminación es más elevada (Tabla 3.2).

Tabla 3.2 - Puntajes utilizados para la profundidad del agua D (metros).

Intervalo de profundidades	Valor del atributo
0-1,5	10
1,5- 4,5	9
4,5 – 9	7
9 – 15	5
15 – 23	3
23 – 31	2
> 31	1

Recarga (R) Es la cantidad de agua total que se aplica a toda la superficie del terreno. Se observa que a mayor recarga mayor será el parámetro R. (se puede notar que el método no contempla la posible dilución que se produciría, a igual carga de contaminante, ante a un aumento del volumen de recarga) en la tabla se presentan los rangos de este parámetro Tabla 3.3

Tabla 3.3 - Rangos y puntajes para la recarga neta.

Intervalo	Valor del atributo
0-50	1
50-100	3
100-175	6
175-250	8
>250	9

Pendiente topográficas (T). Referido a la pendiente o variabilidad de la pendiente en la superficie del terreno. Para la topografía los valores están definidos para diferentes intervalos de clase de pendientes, para pendientes baja, el valor el parámetro es elevado y la infiltración será preferencial al escurrimiento superficial (tabla 3.4).

Tabla 3.4 - Rangos y puntajes para la topografía.

Pendiente del terreno (%)	Valor del atributo
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
>18	1

Tipo de acuífero (A). Se identifican los diferentes tipos de litologías para la zona saturada, la misma permite en función del grado de conocimiento del acuífero, elegir entre un intervalo de valores, los autores del método sugieren un valor típico. Se puede observar que el valor para Arenas y gravas es de 8, mientras que para Esquisto / pizarras masivas son de 2, indicando una menor probabilidad de contaminación. (Tabla 3.5)

Tabla 3.5 - Puntajes utilizados para los materiales componentes del acuífero.

Tipo de material	Puntaje	Valor típico
Esquisto macizo	1-3	2
Roca metamórfica o ígnea	2-5	3
Roca metamórfica alterada	3-5	4
Depósitos glaciares	4-6	5
Intercalaciones finas (gres/calizas/esquistos)	5-9	6
Gres macizo	4-9	6
Calizas macizas	4-9	6
Arenas y gravas	4-9	8
Basalto	2-9	9
Calizas cársticas	9-10	10

Litología del suelo (S). Se define en función de las características granulométricas del suelo como lo indica la tabla 3.6.

Tabla 3.6 - Puntajes utilizados para el tipo de suelos.

Tipo de suelo	Valor de atributo
Inexistente	10
Gravas	10
Arenas	9
Turbas	8
Arcillas fisuradas	7
Limo arenoso	6
Limoso	5
Franco limoso	4
Limo arcilloso	3
Arcilloso compacto	2

Impacto en la Zona vadosa (I) Se refiere a la característica granulométrica que constituye la zona no saturada. En la tabla 3.7 se muestran los parámetros que contienen los diferentes tipos de zonas no saturada.

Tabla 3.7 - Puntajes utilizados para el impacto de la zona vadosa.

Tipo de material	Valor típico	Rango
Impermeable	1	1
Arcilla/limo	3	2-6
Esquistos	3	2-5
Calizas	6	2-7
Gres	6	4-8
Intercalaciones rocosas	6	4-8
Roca metamórfica	4	2-8
Arenas y gravas	8	6-9
Basalto	9	2-10
Calizas cársticas	10	8-10

Conductividad Hidráulica (C) Esta referido a la habilidad del material del acuífero de transmitir agua, los valores asignados son considerados en la tabla 3.8.

Tabla 3.8 - Rangos y puntajes para la conductividad hidráulica.

Intervalo	Valor del atributo
0,04- 4.5	1
4,5-13	2
13- 30	4
30- 45	6
45-90	8
> 90	10

Como resultado final se obtiene un mapa de índice DRASTIC. Este índice varía de 65 a 223 para todos los ambientes hidrogeológicos típicos (Tabla 3.9). Una vez implementada esta

metodología, es posible identificar áreas de mayor o menor susceptibilidad a la contaminación del agua subterránea.

El mapa final puede ayudar a planificadores y administradores en la tarea de evaluar la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea por fuentes contaminantes en un área.

Sin embargo, la aplicación del método en un mismo acuífero puede dar resultados muy variables con lo cual la validez de estos resultados es relativa. Ante esta situación es necesario evaluar las metodologías ya elaboradas que se aplican en los estudios de vulnerabilidad de acuíferos y modificarlas teniendo en cuenta los escenarios existentes en la región y/o establecer nuevos métodos con base a las condiciones y medios disponibles.

Tabla 3 9 Clase de Vulnerabilidad por el Método DRASTIC.

Clase de vulnerabilidad	Valor del índice DRASTIC.
Muy baja	<80
Baja	80-135
Moderada	135-150
Alta	150-190
Muy alta	>190

A la hora de inferir el potencial de contaminación de un acuífero, es indispensable conocer las características del ambiente hidrogeológico, así como también haber definido su modelo conceptual de funcionamiento.

En la aplicación de los métodos paramétricos de valoración de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos se cartografían los valores determinados en el campo y se elaboran los índices de vulnerabilidad.

- **Método GOD**

El método de GOD fue desarrollado por Fóster en el CEPIS en 1991, citado de Jégat (2001) El método determina la vulnerabilidad intrínseca por lo que no toma en cuenta el tipo de contaminante, estableciendo la vulnerabilidad como una función de la inaccesibilidad de la zona saturada, desde el punto de vista hidráulico a la penetración de contaminantes y la capacidad de atenuación de los estratos encima de la zona saturada, como resultado de su retención física y la reacción química con los contaminantes según indican Foster e Hirata (1991).

Se trata de un método empírico que establece la vulnerabilidad relativa como la interacción entre la inaccesibilidad hidráulica y la capacidad de atenuación, factores que poseen relaciones complejas que dependen de gran cantidad de variables difíciles sino imposibles de cuantificar. Para solventar este inconveniente la metodología utiliza la clasificación de tres fases discretas: la distancia del agua, ocurrencia del agua subterránea y el substrato litológico

El índice GOD es el producto de tres índices que toman en cuenta las características de zona estudiada. GOD es el acrónimo de Groundwater occurrence - Overlying material -Depth to water Distancia al agua.

$$I = G * O * D \quad (3.2)$$

Donde:

G = (Groundwater occurrence) ocurrencia del agua subterránea en función del tipo de acuífero

O = (Overall aquifer class). Tipo de material entre la superficie del suelo y el acuífero (zona no saturada)

D = (Depth). Profundidad del nivel del agua o techo del acuífero confinado

Cada uno de los factores posee valores entre cero y uno, entre mayor es el valor, más desfavorable es la condición. Este método solo asigna un peso indirecto a las variables a través de sus valores.

En la Figura 3.1 Esquema de aplicación de la metodología GOD (Foster e Hirata, 1991) se reproduce el diagrama para cualificar la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación. Los 3 índices que se multiplican entre sí, resultan en uno final que puede variar entre 1 (vulnerabilidad máxima) y 0 (mínima).

Tabla 3.10 Vulnerabilidad de contaminación del acuífero según el esquema de aplicación de la metodología GOD

Clase de vulnerabilidad	Valor del índice GOD
Muy baja	< 0.10
Baja	0.10 - 0.30
Moderada	0.30 - 0.50
Alta	0.50 - 0.70
Muy alta –extrema	> 0.70

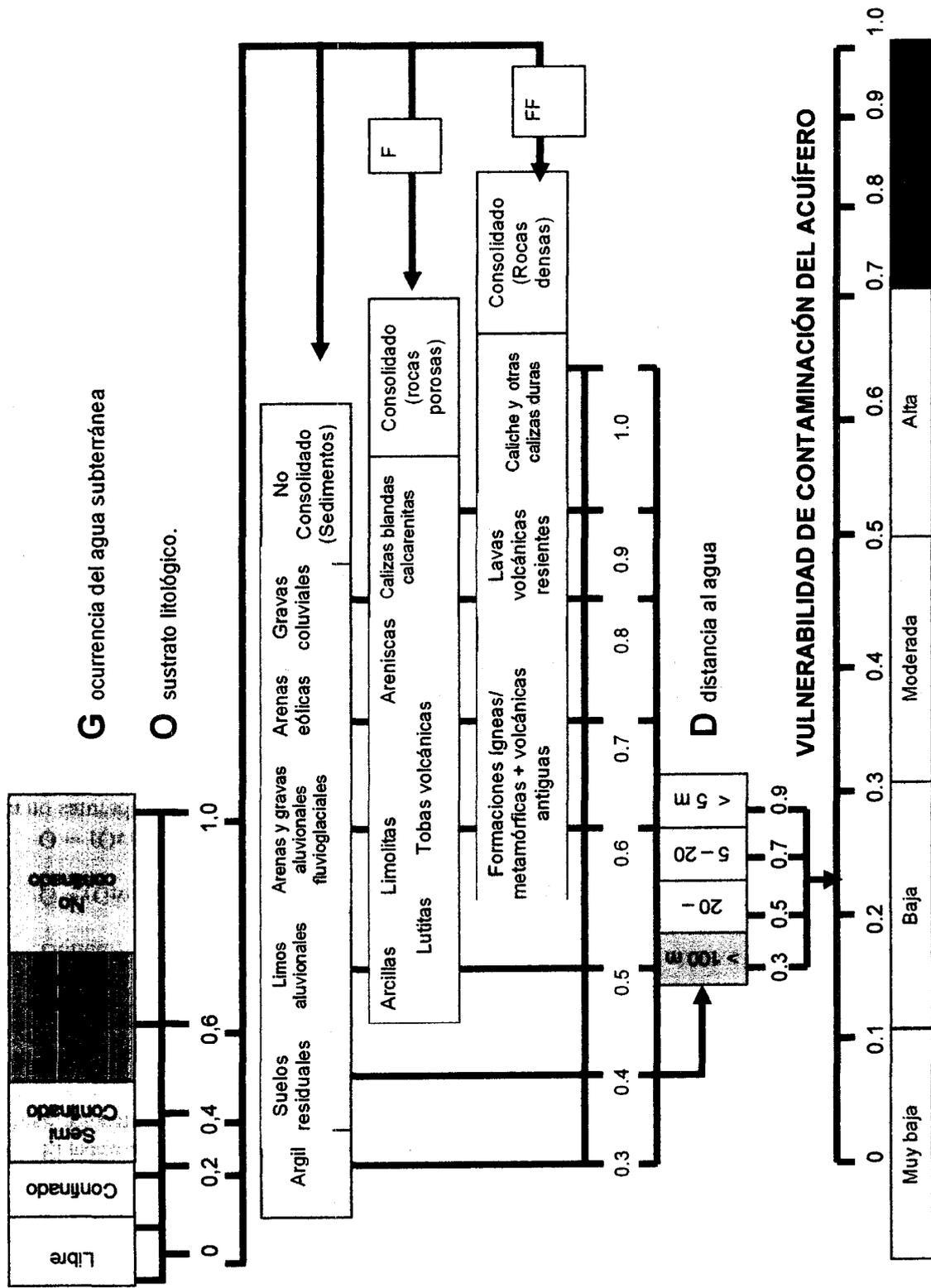


Figura 3.1 Esquema de aplicación de la metodología GOD (Tomado de Foster (1991))

EL método solo toma en cuenta la posible atenuación antes de alcanzar la zona saturada, sin tomar en cuenta la dilución y dispersión en el acuífero

Se obtiene un mapa de índice GOD, donde se considera vulnerabilidad muy baja si el valor es menor a 0.1, baja si el valor está entre 0.1 y 0.3, moderada si está entre 0.3 y 0.5, alta si está entre 0.5 y 0.7 y extrema si es mayor a 0.7. Ver tabla 3.10

Según Auge (2003) en método GOD: posee como mayor ventaja, la sencillez de su operación y el escaso número de parámetros requeridos para su empleo. Esto a su vez resulta en definiciones menos claras que DRASTIC y SINTACS. Otra deficiencia es no considerar la incidencia del suelo, que es un factor de gran trascendencia como filtro natural para la contaminación.

3.4 AMENAZA

Amenaza o peligro (hazard - H), definida por Cardona 1993 como la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente desastroso durante cierto período de tiempo en un sitio dado, peligro latente que representa la posible manifestación dentro de un período de tiempo y en un territorio particular de un fenómeno de origen natural, socio-natural o antrópogenico, que puede producir efectos adversos en las personas, la producción, la infraestructura, los bienes y servicios y el ambiente.

3.4.1 Clasificación de las amenazas

Las amenazas son un factor del riesgo que diversos autores suelen dividir en "amenazas naturales" y "amenazas tecnológicas". Lavell, 1994 considera cuatro categorías básicas de amenaza: "naturales", "socio naturales", "antrópico-contaminantes" y "antrópico-tecnológicas"

- **Las Amenazas Naturales**

La dinámica terrestre y atmosférica produce manifestaciones de la naturaleza que se tipifican por su intensidad y violencia. Estas son normales, completamente naturales y forman parte de la historia y de la coyuntura de la formación de la tierra y de la dinámica geológica, geomorfológica, climática y oceánica.

Comprenden parte del medio ambiente natural del ser humano, quien no incide en sentido significativo en su aparición ni puede intervenir (con ciertas excepciones) para que no sucedan.

Este conjunto de amenazas se interrelaciona en el sentido de que una de ellas puede tener o tiene relación con otras (p.e., sismos y deslizamientos; huracanes e inundaciones; sequía y agotamiento de acuíferos) Sobre estos tipos de fenómenos no hay intervención humana directa o significativa posible. Se han clasificado este tipo de amenaza, que afecta tanto a ciudades y campo por igual, en cuatro tipos:

Geotectónico. Entre los que se consideran los sismos, actividad volcánica, desplazamientos verticales y horizontales de porciones de la tierra, y los tsunamis o maremotos.

Geomórfico (geodinámico): Entre los que se tienen en cuenta los fenómenos tales como los deslizamientos y avalanchas, hundimientos y la erosión terrestre y costera.

Meteorológico o climático: Entre los que se hallan los huracanes, tormentas tropicales, tornados, trombas, granizadas, sequías, tormentas de nieve, oleajes fuertes, incendios espontáneos

Hidrológico.: Entre los que se incluyen las inundaciones, desbordamientos, anegamientos y agotamiento de acuíferos.

- **Las Amenazas Socio Naturales**

Algunos fenómenos típicos de las amenazas naturales tienen una expresión o incidencia que es socialmente inducida, es decir, se producen o se acentúan por algún tipo de intervención humana sobre la naturaleza, y se confunden a veces con eventos propiamente naturales.

Las expresiones más comunes de las amenazas socio naturales se encuentran en las inundaciones, deslizamientos, hundimientos, sequías (y desertificación), erosión costera, incendios rurales y agotamiento de acuíferos. Donde la deforestación y la destrucción de cuencas, la desestabilización de pendientes por el minado de sus bases, la minería subterránea, el arrojado de desechos industriales y domésticos a los cauces fluviales, la sobreexplotación de la tierra, la destrucción de manglares, entre otras cosas, se constituyen en variables explicativas de varios de estos fenómenos.

Dentro del contexto urbano, los problemas más agudos y crecientes son las inundaciones, deslizamientos, hundimientos y sequía (por agotamiento de acuíferos, falta de opciones económicas de explotar fuentes próximas, y desperdicios en tuberías) se perfilan, sin lugar a dudas.. son resultado del impacto de determinadas prácticas sociales, algunas derivadas de la búsqueda de ganancia, en el sentido económico (deforestación comercial, cambios en los

patrones agrícolas en zonas de ecología frágil, la construcción comercial urbana en terrenos no aptos, etc.), o de la búsqueda de sobrevivencia entre grupos pobres (p.e., el corte de manglares o la deforestación por leña); por crisis fiscal del estado o de los gobiernos municipales (falta de infraestructuras de drenaje pluvial, combinado con densificación del uso del suelo, p.e.); y otras, de malas prácticas asociadas, a veces, con la ausencia de adecuados servicios públicos (la eliminación de basura en los cauces de ríos, causando presas artificiales, o en las calles, bloqueando los alcantarillados).

- **Las amenazas antrópico-contaminantes**

Las amenazas antrópico-contaminantes son una serie de amenazas que toman la forma de elementos de la naturaleza "transformados" (aire, agua y tierra), están basadas y construidas sobre elementos de la naturaleza, pero que no tienen una expresión en la naturaleza misma. Sin embargo, por la importancia de los elementos naturales para la existencia humana, su transformación presenta un desafío importante para la sobrevivencia y la vida cotidiana de importantes sectores de la población local, regional, nacional y hasta internacional.

Estas amenazas se relacionan principalmente con los procesos de contaminación derivados de derrames, dispersiones o emisiones de sustancias químico-tóxicas hacia el aire, tierra y agua, como es el caso del petróleo, los plaguicidas, los gases tóxicos producto de la combustión, los clorofluorocarbonos y la contaminación nuclear, es decir, estas amenazas son producto o de la negligencia y de la falta de controles (legales o tecnológicos), aún cuando estos existan en teoría, o de diversos tipos de "accidente" (concepto que siempre implica algún grado de negligencia). Son producto de la falta de control sobre los procesos económicos de producción y distribución.

Los procesos de eliminación o depósito de desechos líquidos y sólidos, de origen doméstico, sin canalización o procesamiento constituyen otras amenazas antrópico-contaminantes. El resultado, en términos de la contaminación biótica de aire y aguas, presenta serios peligros de salud para la población, desembocando a veces en epidemias. A diferencia de las amenazas producto de la falta de control sobre procesos económicos, estas amenazas son, en general, producto de la pobreza, de la falta de opciones por la ausencia de infraestructura y servicios urbanos adecuados, o de la negligencia.

A diferencia de las amenazas socio naturales, que ponen en peligro a la población a través de impactos externos, las amenazas antrópico-contaminantes profundizan la base de la existencia biológica y de la salud de la población.

- **Las amenazas antrópico-tecnológicas**

Los procesos de producción y distribución industrial moderna, principalmente concentrada en los centros urbanos o próximos a ellos, y las dotaciones de infraestructura urbana, principalmente para la distribución y consumo energético, encierran problemas para la seguridad ciudadana debido al uso de un número importante de procesos potencialmente de gran peligro.

La posibilidad de fallas en estos procesos, por negligencia, falta de controles adecuados y la imprevisión de la ciencia, genera una serie de amenazas cuya concreción, aún cuando afecte a extensiones territoriales limitadas, puede generar un impacto en gran número de pobladores, debido a la densidad de la ocupación humana en zonas circundantes a la fuente de la amenaza.

La importancia de estas amenazas, en términos de un potencial desastre, reside, de hecho, en el problema de la ocupación humana en torno a ellas, producto en gran número de casos de la pobreza (falta de opciones de ubicación alternativa para la vivienda) y de la falta de implementación de controles y zonificación en el uso del suelo (planificación urbana). La mayoría de estas amenazas se concretan a través de "accidentes" que, por los impactos que tengan, pueden convertirse en verdaderos desastres.

Entre los ejemplos más conocidos de este tipo de amenaza se incluyen los casos de las plantas nucleares Chernobyl (26 de abril de 1986) Ucrania, y la central nuclear de la Isla de las Tres Millas, (28 de marzo de 1979), Pensilvania Estados Unidos. En Venezuela las explosiones en la planta termoeléctrica Tocoa (19 diciembre 1982), estado Miranda y la del gasoducto en Tejerías, (28 de septiembre de 1993), estado Aragua.

Los procesos y eventos naturales establecen límites o fronteras "naturales" al desarrollo de la sociedad y de las ciudades, son inmutables, en gran medida, a pesar de que la tecnología permite, en determinadas circunstancias, una modificación de su comportamiento e impacto en la sociedad, como es el caso con la construcción de presas, diques, paredes de retención etc.

La construcción de la ciudad implica automáticamente un cambio en los sistemas ecológicos y ambientales originarios, donde el ambiente natural se transforma en un ambiente construido, o social; convirtiéndose los suelos naturales en tierras urbanas con la remoción de la cobertura vegetal natural y su sustitución con asfalto, cemento u otros materiales industriales cambiando la dinámica de las descargas pluviales y la dinámica fluvial de los ríos "urbanos", con graves consecuencias en términos de inundaciones, si el proceso natural de control pluvial y fluvial no es compensado por la construcción de adecuados sistemas de drenaje urbanos.

3.4.2 La evaluación e identificación de las amenazas

La Agencia de Protección de Ambiente de los Estados Unidos (EPA) en 1970, estandarizo los procesos de clasificación así:

- Altos o al menos medianos, en todos los tipos de amenazas: normas sobre contaminantes del aire, agotamiento del ozono en la estratosfera, residuos de pesticidas en alimentos y otros riesgos de pesticidas.
- De altos, en amenazas a la salud, pero bajos en amenazas ecológicas y del bienestar: contaminantes del aire peligrosos, radón en interiores y otra contaminación del aire en interiores, exposición de productos de consumo y exposición de trabajadores a pesticidas y otros productos químicos.
- De alto en amenaza ecológica y del bienestar, pero bajo en amenaza a la salud: calentamiento del globo terrestre, fuentes de contaminación de agua superficial en el lugar y fuera de él y alteración de los hábitat acuáticos (por ejemplo estuarios o pantanos).
- De bajo o mediano amenaza en todo tipo: agua subterránea.

Según sondeos de opinión realizados por Kolluru (1998), citado por España (2005), establece que los criterios de la EPA parecen alinearse más con la opinión pública que con el juicio de los expertos, y donde hay correspondencia entre las prioridades de la agencia de protección y la opinión del pueblo, siendo la evaluación e identificación de las amenazas es inherente a la condición humana más aun las amenazas naturales.

3.4.3 Identificación de amenazas de contaminación

Foster, 1987, establece que desde un punto de vista teórico, se necesita establecer cuatro características semindependientes de la carga contaminante al subsuelo para cada actividad contaminante: Cada una de estas características depende de dos o más factores, cuyos estimados permitirían clasificar los componentes contaminantes, en una escala relativa de 0-1.

- ***Clase de contaminante***

La clase de contaminante involucrado en una actividad contaminante o episodio de contaminación, (Figura 3.2), esta determinada por la tendencia hacia la degradación o transformación in-situ, como resultado de actividad bacteriológica o reacción química, y por su tendencia hacia el retardo con respecto al flujo de agua subterránea como resultado de procesos

como intercambio de cationes, adsorción, etc.; el cual variará ampliamente para muchos contaminantes según las características litológicas del medio geológico involucrado, pero lo que es de interés es su posición relativa de la carga.

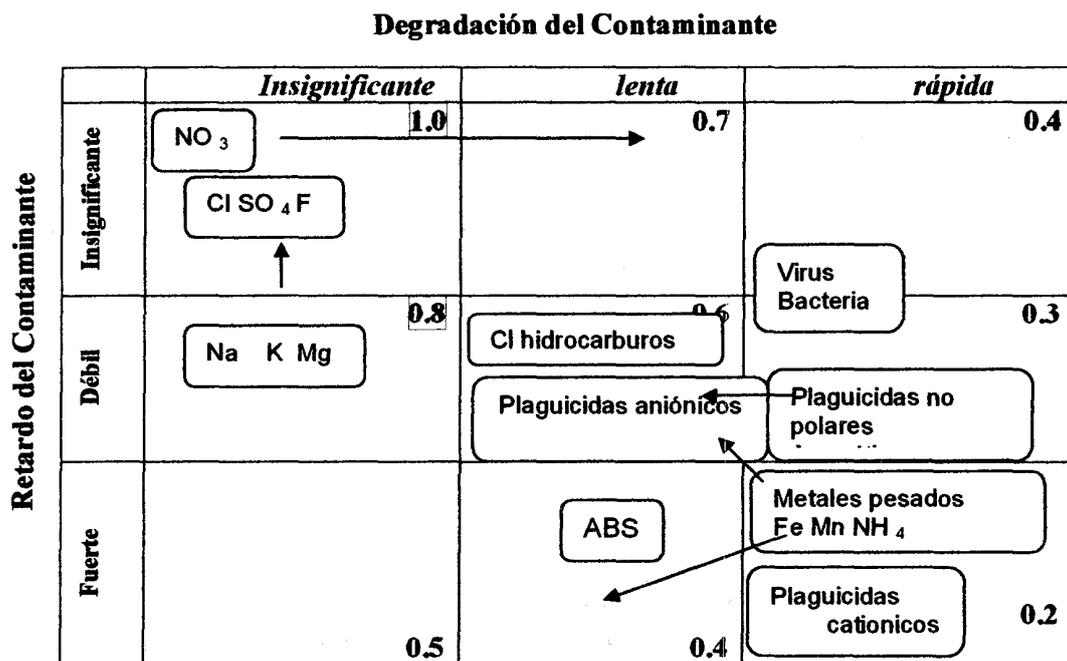


Figura 3.2 Clase de contaminante. Tomado de Foster (1991).

Intensidad de contaminación

Foster (1991) define la Intensidad de contaminación como la concentración relativa de cada contaminante involucrado en relación a los valores recomendados por la OMS para la calidad de agua potable, de igual forma es la proporción de la recarga local del agua subterránea afectada por la contaminación.

Disposición del contaminante en el subsuelo

Según Foster (1991) la disposición del contaminante al subsuelo es carga hidráulica asociada al contaminante, incluyendo infiltración natural de precipitación m./día, considerada en conjunto con la profundidad bajo la superficie a la que el efluente es descargado o donde la lixiviación de residuos sólidos ocurre, ver Figura 3.4.

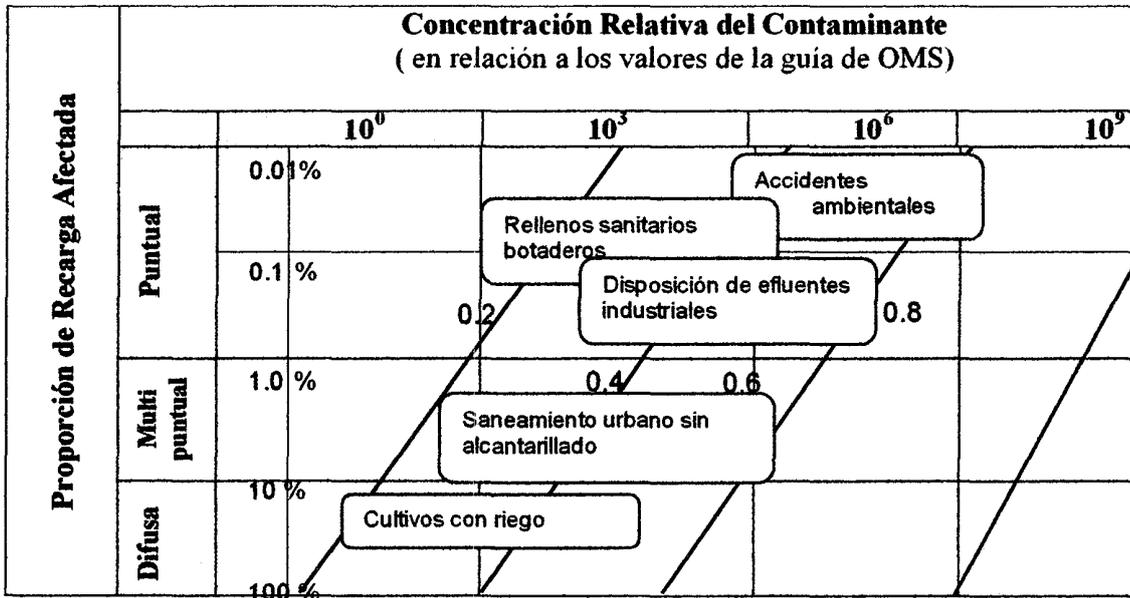


Figura 3.3 Intensidad de contaminación Tomado de Foster (1991).

Tiempo de aplicación de la carga contaminante

El tiempo de aplicación de la carga contaminante definido por Foster (1991) como la probabilidad de que el contaminante sea descargado al subsuelo, que en la mayoría de las situaciones será alta, con la excepción del caso de accidentes ambientales, siendo el periodo durante el cual se aplica la carga, de una amplia variación, de horas a décadas. Ver Figura 3.5.

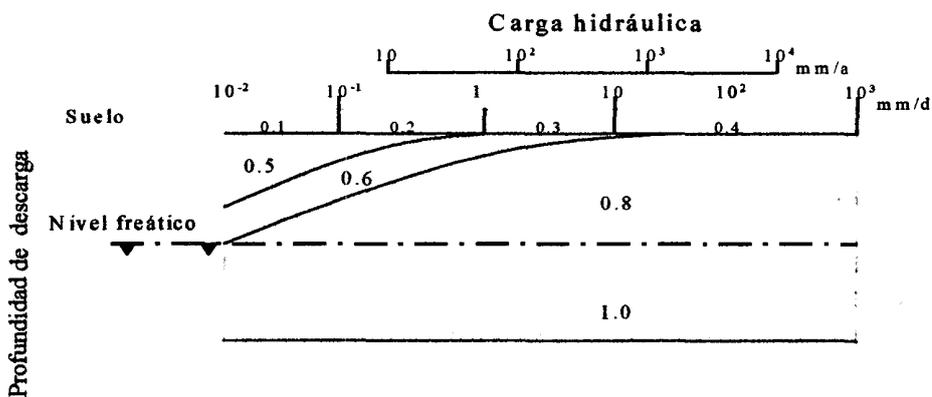


Figura 3.4 Disposición del contaminante en el suelo tomado de Foster (1991).

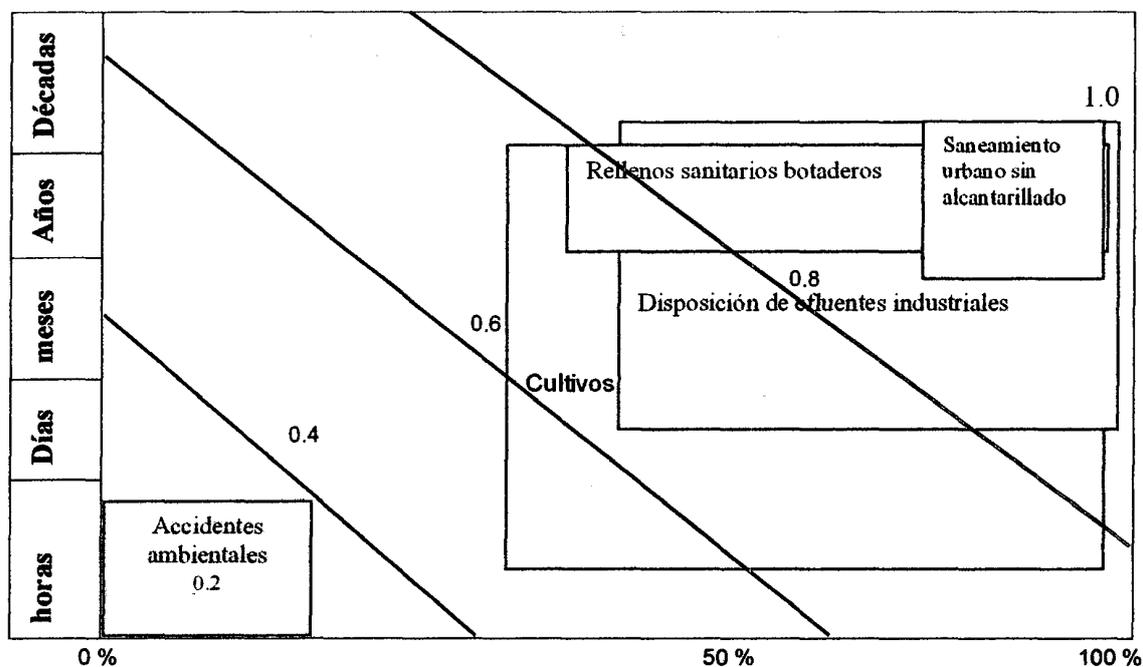


Figura 3.5 Probabilidad de recarga tomado de Foster (1991).

3.4 RIESGO

Es la probabilidad que se presente un nivel de consecuencias económicas, sociales o ambientales en un sitio particular y durante un período de tiempo definido. Se obtiene de relacionar la amenaza con la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

3.5.1 Tipos de riesgos

- *Riesgo aceptable*

Posibles consecuencias sociales, económicas y ambientales que, implícita o explícitamente, una sociedad o un segmento de la misma asume o tolera por considerar innecesario, inoportuno o imposible una intervención para su reducción.

Es el nivel de probabilidad de una consecuencia dentro de un período de tiempo, que se considera admisible para determinar las mínimas exigencias o requisitos de seguridad, con fines de protección y planificación ante posibles fenómenos peligrosos.

- **Riesgo específico** (specific risk -RS)

Es el grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un evento particular y como una función de la Amenaza y la Vulnerabilidad.

- **Elementos Bajo Riesgo** (E)

Son la población, las edificaciones y obras civiles, las actividades económicas, los servicios públicos, las utilidades y la infraestructura expuesta en un área determinada.

- **Riesgo total** (total risk - RT)

Son el número de pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica debido a la ocurrencia de evento desastroso, es decir el producto del Riesgo Específico (Rs) y los elementos bajo riesgo (E).

3.5.2 Estimación del riesgo

El riesgo se obtiene de relacionar la amenaza, o probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de una intensidad específica, con la vulnerabilidad de los elementos expuestos. Por lo tanto, el riesgo puede ser de carácter geológico, hidrológico, atmosférico también, tecnológico, dependiendo de la naturaleza de la amenaza a la cual está referido.

Según Cardona (1993) el riesgo específico desde el punto de vista físico, es la pérdida esperada en un período de tiempo, que puede ser expresada como una proporción del valor o costo de reemplazo de los elementos bajo riesgo.

Usualmente, el riesgo específico representa pérdida de vidas, heridos y pérdidas de inversiones de capitales., debido a la dificultad que significa estimar el riesgo total es decir, la cuantificación acumulativa del riesgo específico de cada uno de los elementos expuestos y para cada una de las amenazas.

Se acepta referirse al riesgo haciendo referencia a un riesgo específico representativo para la región, como por ejemplo: el riesgo por inundación para las cosechas, el riesgo sísmico de las edificaciones, el riesgo de las líneas vitales por deslizamientos, etc.

Comúnmente el riesgo es estimado solamente en términos físicos, debido a que la vulnerabilidad social es difícil de evaluar en términos cuantitativos, para estos casos, en forma relativa o mediante indicadores de "riesgos relativos", que igualmente permiten tomar decisiones y definir prioridades de prevención y mitigación.

Cardona (1993), establece que una vez evaluado el riesgo y teniendo en cuenta que no es posible reducirlo a cero, para efectos de la planificación y el diseño de obras de infraestructura y de protección es necesario definir un nivel de "riesgo aceptable", o sea un valor admisible de probabilidad de consecuencias sociales y económicas que, a juicio de las autoridades que regulan este tipo de decisiones, se considera lo suficientemente bajo para permitir su uso en la planificación física, la formulación de requerimientos de calidad de los elementos expuestos o para fijar políticas socio-económicas afines.

Es decir, para evaluar el riesgo deben seguirse tres pasos: La evaluación de la amenaza o peligro, el análisis de la vulnerabilidad y por último la estimación del riesgo como resultado de relacionar los dos parámetros anteriores.

3.5.3 Los mapas de riesgos

Un mapa de riesgo es un gráfico, un croquis, o una maqueta, donde se identifican y se ubican las zonas de la comunidad, las áreas habitacionales o las principales obras de infraestructura que podrían verse afectadas durante la ocurrencia de un evento adverso.

Cardona (1991), establece que los mapas de riesgo representan un "escenario", o sea la distribución espacial de los efectos potenciales que puede causar un evento de una intensidad definida sobre un área geográfica, de acuerdo con el grado de vulnerabilidad de los elementos que componen el medio expuesto.

En los mapas de riesgos se utilizan símbolos o dibujos, para identificar determinados lugares que sirven de puntos de referencia, por ejemplo: la Cruz Roja; Centros de Salud; la Policía; los Bomberos; las Iglesias; el edificio de la Municipalidad; el río que pasa por la comunidad entre otras.

Los colores para señalar mejor las zonas de riesgo específicos representan por ejemplo: el color rojo para zonas de mucho peligro; el color amarillo para zonas de riesgo medio; el color verde para zonas sin riesgo.

- ***Utilidad los mapas de riesgos***

Permite la participación de los diferentes entes de la sociedad percibir todas las situaciones.

Conocer e identificar los peligros y amenazas. Saber ¿cuáles son? que tenemos y para saber qué podemos y qué debemos hacer.

Ubicar los riesgos y las amenazas. Saber ¿dónde están?

Tomar decisiones el mapa ofrece a las autoridades y a las organizaciones criterios compartidos por la comunidad para la toma de decisiones sobre las acciones y los recursos que se necesitan.

Registrar eventos históricos que han afectado negativamente a la comunidad e impactado significativamente a la población.

- ***Importancia de los mapas de riesgos***

Los mapas son de fundamental importancia para la planificación de la intervención de la amenaza y/o la vulnerabilidad a través de los planes de desarrollo, y para la elaboración de los planes de contingencia que los organismos operativos deben realizar durante la etapa de preparativos para emergencias.

Un plan operativo elaborado con base en un mapa de riesgo es mucho más eficiente que uno realizado sin conocer el escenario de efectos potenciales, puesto que el primero permite definir procedimientos de respuesta más precisos para atender a la población en caso de desastre.

3.5.4 Riesgo de contaminación aguas subterráneas

El riesgo de contaminación de las aguas subterráneas es definida por Foster, (1987) como la interacción entre la carga contaminante y la vulnerabilidad del acuífero, donde la carga contaminante, pudiera ser aplicada al subsuelo como resultado de actividad humana y la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, es debida a las características naturales de los substratos que se cubren y se separan de la superficie.

Con lo citado anteriormente, se puede obtener una alta vulnerabilidad sin riesgo de contaminación, por la ausencia de una carga significativa de contaminantes, y viceversa. Ambos son perfectamente lógicos en la práctica, donde, la carga contaminante puede ser controlada o modificada, pero no la vulnerabilidad del acuífero. Ver Figura 3.6.

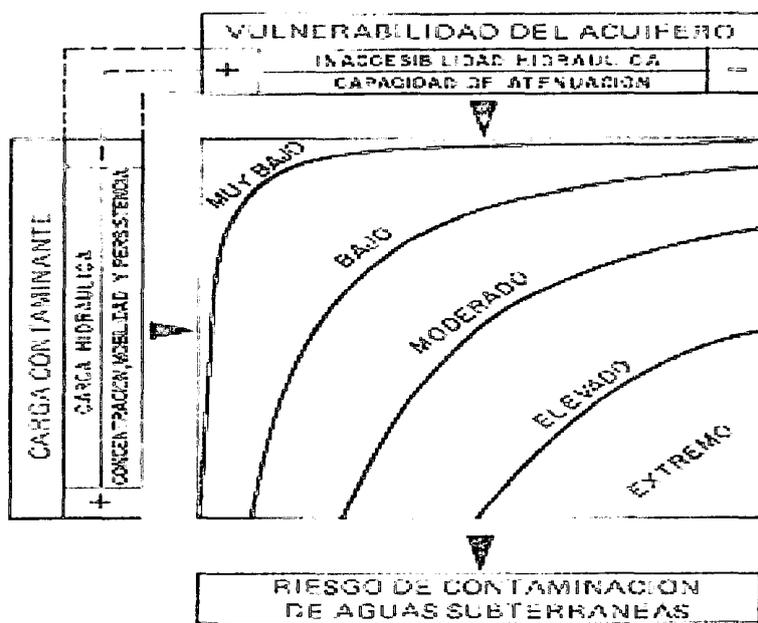


Figura 3.6 Esquema conceptual del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Tomado de Foster (1991).

Auge (2003) y Foster (1987), definen al riesgo como el peligro de deterioro en la calidad de un acuífero, por la existencia real o potencial de sustancias contaminantes en su entorno, Zaporozec y Vrba, (1994) la asemejan a la vulnerabilidad específica, referida al peligro de contaminación del agua subterránea respecto a un contaminante o familia de contaminantes, de características y comportamientos similares (nitratos, hidrocarburos livianos o pesados, plaguicidas, materia orgánica, fenoles, metales, etc.).

- ***Estimación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas***

En un nivel simple la estimación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas se realiza mediante el diagrama de flujo de la Figura 3.7.

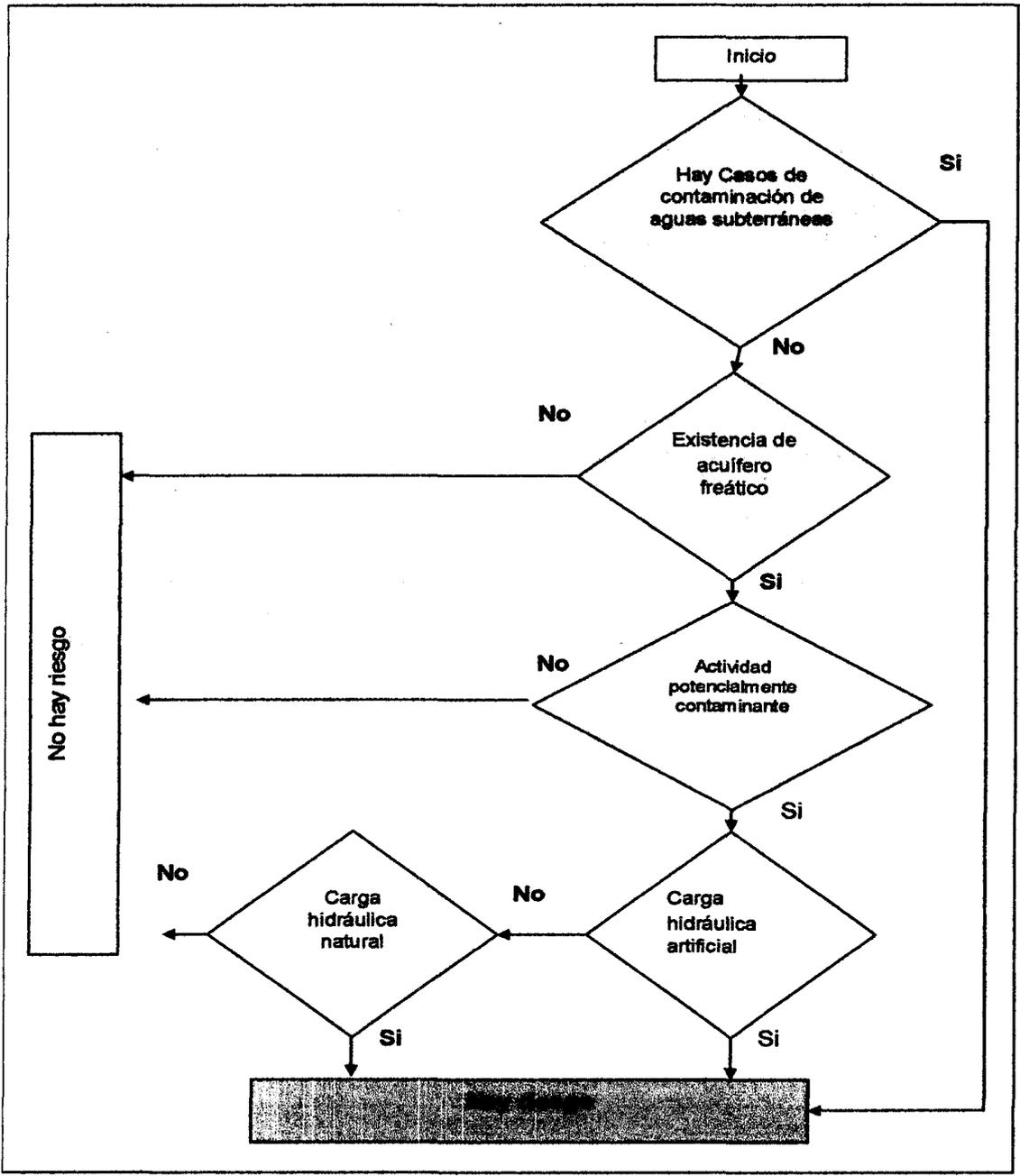


Figura 3.7 Nivel más simple de estimación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas Tomado de Foster (1991)

3.6 Uso de los Sistemas de Información Geográficos (SIG)

Los Sistemas de Información Geográficos (SIG) son una nueva tecnología que permite centralizar una importante cantidad de información es un sistema que trata con información georeferenciada, es decir, procesa datos de eventos o entidades geoespaciales con el fin de generar nueva información mediante informaciones de manipulación y análisis que ayuden a la toma de decisiones., es decir, que maneja las propiedades espaciales y no espaciales de las entidades o eventos geoespaciales: posición, geometría, topología, tiempo y atributos.

Unos de los aspectos más importantes es la capacidad de producir nueva información a través de funciones analíticas espaciales agilizando los cálculos.

El empleo de un SIG permite la visualización de los resultados y la generación de cartografía temática, por lo que la inclusión de los resultados en labores de planificación es directa, como puede ser la identificación de áreas especialmente sensibles o la posible ubicación de nuevas actividades en el entorno.

Los datos básicos sobre los cuales están basados los estudios de vulnerabilidad y mapas de riesgos son introducidos directamente dentro de un Sistemas de Información Geográficos (SIG) y posteriormente estos índices son evaluados e interpretados. (Apéndice B para ver más información).