

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
UNIDAD DE POSGRADO



**Evaluación del riesgo de contaminación por plomo en agua
subterránea en el Cantón Sitio del Niño, Municipio de San
Juan Opico**

PRESENTADO POR

JULIO ERNESTO PAYES HERNÁNDEZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE

**MAESTRO EN GESTIÓN DE RECURSOS
HIDROGEOLOGÍCOS**

CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE DE 2014.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

UNIDAD DE POSGRADO

JEFA DE UNIDAD :

MSc. PATRICIA HAYDEÉ ESTRADA DE LÓPEZ

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
UNIDAD DE POSGRADO

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

MAESTRO EN GESTIÓN DE RECURSOS HIDROGEOLÓGICOS

Título :

**Evaluación del riesgo de contaminación por plomo en agua
subterránea en el Cantón Sitio del Niño, Municipio de San
Juan Opico**

Presentado por :

JULIO ERNESTO PAYES HERNÁNDEZ

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director :

MSc. JULIO RENÉ ACOSTA MARTÍNEZ

San Salvador, octubre de 2014.

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director :

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and a vertical line crossing through them.

MSc. JULIO RENÉ ACOSTA MARTÍNEZ

RESUMEN

Se han realizado mediciones de concentración de plomo en muestras de suelo y de agua de pozos excavados en el Cantón Sitio del Niño, Municipio de San Juan Opico, departamento de La Libertad, con el propósito de evaluar el riesgo de contaminación por plomo del agua subterránea en esa zona. Las mediciones de plomo (Pb) en suelo revelaron concentraciones en el rango de 108 a 339481 mg Pb/kg de suelo, algunos de estos valores son superiores a los límites que el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) ha considerado como ambientalmente permisibles. Dichos límites se estiman en este trabajo de investigación, como una carga contaminante al subsuelo, con base en concentraciones mayores de 400 mg Pb/kg de suelo, establecida como referente por la Agencia Ambiental Estadounidense (EPA 40 CFR Part 745, 2001). Los resultados de los análisis en agua de pozos excavados no sobrepasan el valor de referencia de concentración de plomo de 0.01 mg Pb/l de agua, especificada en la Norma Salvadoreña Obligatoria vigente al momento del estudio (NSO 13.07.01:08, AGUA. AGUA POTABLE. Segunda actualización).

La concentración de plomo es uno de los parámetros incluidos en distintas normativas que debe cumplir el agua para usos específicos, y cobra relevancia dado que muchos de los habitantes en la zona de estudio recurren a pozos excavados con el fin de suplir necesidades de abastecimiento de agua para consumo humano, ganadería y actividades agrícolas.

En el sitio de muestreo donde se encontró la máxima concentración de plomo en suelo, se perfilaron verticalmente las concentraciones de plomo y se constató la evolución de una pluma contaminante en el subsuelo, atenuada por procesos de adsorción. Un modelo de correlación del perfil de profundidad, de 1 a 45 cm desde la superficie del suelo, ha permitido estimar el avance vertical del plomo, encontrando concentraciones en el subsuelo de 339481 a 1095 mg Pb/kg de suelo, en las condiciones de pH y de óxido-reducción analizadas en el suelo al momento de efectuar el muestreo.

La investigación tiene como objetivo general evaluar el riesgo de contaminación por plomo, del sistema de flujo del agua subterránea que subyace al sitio de estudio, y su finalidad es

aportar información que puede ser útil a quienes deciden sobre las gestiones requeridas para atender sustentablemente el manejo del recurso hídrico subterráneo, ante el estado de Emergencia Ambiental por contaminación por plomo declarado por el MARN en la zona de estudio. Para ello se ha empleado una metodología propuesta por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria (CEPIS) que, mediante un inventario de fuentes potenciales de contaminación y su respectiva caracterización como cargas potencialmente contaminantes al subsuelo, relaciona dichas cargas potencialmente contaminantes con la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación; la información obtenida se ha procesado utilizando herramientas de sistema de información geográfica (SIG) y se presenta en mapas temáticos; en estos mapas se integran datos que definen tanto las zonas de peligro potencial de contaminación por actividad industrial puntual, como las zonas de alto riesgo de contaminación por plomo al agua subterránea. Para los objetivos del presente estudio, se define la Vulnerabilidad como la sensibilidad de un acuífero a ser afectado en forma adversa por una carga contaminante impuesta; en tanto que el Peligro de contaminación del agua subterránea se define como la probabilidad de que el agua subterránea se contamine a concentraciones superiores a las especificadas en los límites para agua potable, cuando una carga contaminante sub-superficial específica se genere en la superficie del terreno por actividad industrial puntual; el Riesgo de contaminación del agua subterránea se define como la amenaza a la salud humana por la contaminación de una fuente específica de suministro de agua subterránea, o amenaza a un ecosistema por contaminación de una descarga natural específica de un acuífero.

La vulnerabilidad del acuífero a la contaminación se evaluó mediante la metodología GOD obteniendo una clasificación de vulnerabilidad de alta, media y baja. GOD es un acrónimo de G: Grado de Confinamiento Hidráulico, O: Ocurrencia del Substrato Suprayacente y D: Distancia al Nivel del Agua Subterránea, que son atributos cuya superposición cartográfica origina el mapa de vulnerabilidad. En esta investigación se encontró que la zona de vulnerabilidad alta corresponde a las márgenes del río Sucio, el área de vulnerabilidad media se ubica en el cantón Sitio del Niño y la región de vulnerabilidad baja se encuentra hacia el norte del cantón Sitio del Niño.

El mapa de los peligros potenciales de contaminación al agua subterránea por actividad industrial puntual, muestra que la mayor parte de las empresas se ubican en la zona de vulnerabilidad media. Aplicando criterios de evaluación de peligros potenciales, se encontró que se requiere un nivel de acción prioritario para el control de las fuentes potenciales de contaminación del agua subterránea, con base en la vulnerabilidad del acuífero y la carga potencialmente contaminante, independientemente del rubro industrial al que se dedique la empresa.

La evaluación del riesgo se hizo superponiendo el mapeo de las concentraciones de plomo en suelo con la vulnerabilidad obtenida. Teniendo en cuenta la intensidad del impacto potencial que tales concentraciones representan y la sensibilidad del agua subterránea a dicho impacto, se ha determinado que las zonas de riesgo alto de contaminación por plomo al sistema de flujo de agua subterránea subyacente al sitio de estudio, se encuentran en el área de vulnerabilidad media.

Con base en los resultados obtenidos de las concentraciones de plomo en suelo y el mapa de riesgo potencial de contaminación por plomo al acuífero, se concluye que los suelos de la zona de estudio, en sitios que sobrepasan límites máximos permisibles, constituyen una amenaza a la salud humana por la potencial contaminación del agua subterránea subyacente de la cual dependen fuentes específicas de suministro de agua subterránea para consumo humano y por lo tanto, deben ser retirados y sometidos a procesos de remoción del plomo para su restitución y para que no representen peligro de dispersión de la contaminación hacia la población y los ecosistemas a futuro.

El presente estudio constituye el primer paso en la gestión del impacto y del riesgo de contaminación por plomo del acuífero que subyace al área evaluada en el Cantón Sitio del Niño y ofrece una base cartográfica para que las instituciones involucradas en planes de ordenamiento y desarrollo territorial y las que administran el recurso hídrico permitan justificar, orientar y priorizar acciones tendientes a la protección del agua subterránea en el área mencionada.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirme ser lo que soy y estar donde estoy.

A mi madre, a quien debo la vida y por sus consejos; gracias mamá por estar siempre ahí...

A mi hermana, con amor fraternal.

A mi amadísima esposa Norma, el tiempo que compartimos parece que nunca transcurre...

A mis hijos Fran, Naty y Leslie: son las personas más maravillosas que Dios me ha permitido conocer...

A la Red CARA, la Unidad de Posgrado y las autoridades de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, por concederme los recursos para estudiar la Maestría; la mejor manera de agradecerles es y será en el desempeño de mi trabajo.

A mis Profesores, por sus valiosas enseñanzas; especialmente a la MSc. Tania Torres.

A mi Asesor, MSc. Julio Acosta por su paciencia y orientación.

A mis Profesores y evaluadores de Tesis, MSc. Laura Gil, MSc. Dagoberto Arévalo, MSc. Randy Merlos, por sus valiosas observaciones que han enriquecido el presente trabajo.

A la Dra. Mónica D'Elia, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina, por sus acertadas sugerencias y aportes conceptuales.

A todos mis compañeros de Maestría, particularmente al MSc. Mario Guevara con quien compartimos las vicisitudes de las tareas de campo.

A todas las personas que gentilmente me otorgaron su ayuda y me animaron en las etapas más difíciles del desarrollo y culminación del trabajo de Tesis.

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO I. ALCANCES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. MARCO CONTEXTUAL.....	2
1.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.4. HIPÓTESIS DE TRABAJO Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	5
1.5. OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	6
1.6. JUSTIFICACIÓN.....	7
1.7. BENEFICIOS ESPERADOS.....	9
1.8. ANTECEDENTES.....	9
1.9. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	11
1.9.1. Contexto geológico.....	14
1.9.1.1. Geología regional.....	14
1.9.1.2. Geología local.....	15
1.9.2. Geomorfología.....	18
1.9.3. Tipo de suelos.....	18
1.9.3.1. Usos del suelo.....	20
1.9.4. Características hidrológicas e hidrogeológicas.....	23
1.9.4.1. Hidrología.....	23
1.9.4.2. Hidrogeología.....	24
CAPITULO II. MARCO CONCEPTUAL.....	26
2.1. CONCEPTOS DE PELIGRO Y DE RIESGO.....	27
2.2. CONCEPTO DE EVALUACIÓN DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA.....	28
2.2.1. Análisis de la intensidad del riesgo.....	30
2.2.2. Análisis de la sensibilidad al riesgo.....	31
2.2.3. Gestión del riesgo.....	31

2.2.4. Cartografía del riesgo.....	32
2.3. CONCEPTO DE VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA.....	32
2.3.1. Vulnerabilidad intrínseca.....	32
2.3.2. Vulnerabilidad específica.....	33
2.3.3. Vulnerabilidad integrada.....	34
2.3.4. Aplicación del concepto de vulnerabilidad.....	34
2.4. EL PLOMO COMO CONTAMINANTE.....	36
2.4.1. Procesos de transporte del plomo desde el suelo.....	38
2.4.2. El agua en el suelo.....	38
2.4.2.1. Influencia del pH.....	40
2.4.2.2. Influencia del ORP.....	41
2.4.3. Propiedades fisicoquímicas del suelo.....	41
2.4.3.1. Adsorción de cationes en el suelo.....	42
2.5. CARACTERIZACIÓN DEL PLOMO COMO CARGA CONTAMINANTE.....	43
CAPITULO III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	46
3.1. DISEÑO METODOLÓGICO.....	47
3.1.1. Criterios para la recolección de muestras de agua de pozos y de suelos.....	48
3.1.1.1. Muestreo de agua de pozos excavados.....	48
3.1.1.2 Muestreo de suelos.....	49
3.2. ENSAYOS DE INFILTRACIÓN.....	50
3.3. METODOLOGÍA ANALÍTICA.....	52
3.3.1. Medición de pH y ORP.....	52
3.3.2. Análisis de plomo en suelo aplicando fluorescencia de rayos X.....	52
3.3.2.1. Procedimiento analítico.....	53

3.4. METODOLOGÍA PARA EVALUAR EL RIESGO DE CONTAMINACIÓN.....	54
3.4.1. Estimación de la vulnerabilidad: metodología GOD.....	55
3.4.1.1. Cartografía de la vulnerabilidad GOD.....	59
3.4.2. Metodología POSH.....	61
3.4.2.1. Inventario de fuentes potenciales de contaminación.....	61
3.4.2.2. Fuentes de Contaminación Puntual. Actividad Industrial.....	63
3.5. Evaluación del peligro y del riesgo de contaminación al agua subterránea.....	66
CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	68
4.1. ANÁLISIS DE MUESTRAS AMBIENTALES Y ENSAYOS DE INFILTRACIÓN...	68
4.1.1. Determinación de plomo en suelos.....	68
4.1.2. Determinación de plomo en agua de pozos excavados.....	74
4.1.3. Pruebas de infiltración.....	75
4.2. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO A LA CONTAMINACIÓN.....	76
4.3. EVALUACIÓN DE LOS PELIGROS POTENCIALES DE CONTAMINACIÓN.....	80
4.4. EVALUACIÓN Y GESTIÓN DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN POR PLOMO AL ACUÍFERO.....	82
CAPITULO V. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....	87
BIBLIOGRAFÍA.....	93

ANEXOS

- Anexo I-1 Inventario de fuentes potenciales de contaminación y clasificación POSH

- Anexo I-2 Mapa de fuentes potenciales de contaminación por actividad industrial

- Anexo II-1 Usos del plomo

- Anexo III-1 Inventario de pozos excavados

- Anexo III-2 Modelo del flujo de agua subterránea en el cantón Sitio del Niño en época lluviosa

- Anexo III-3 Procedimiento de muestreo de agua de pozos excavados

- Anexo III-4 Protocolo para identificación de muestras

- Anexo III-5 Procedimiento de medición de pH y ORP

- Anexo III-6 Procedimiento de preparación de muestras de suelo

- Anexo IV-1 Certificados de materiales de referencia de suelos

- Anexo IV-2 Resultados de análisis de plomo en agua de pozos seleccionados

- Anexo IV-3 Concentraciones de plomo en suelo publicadas por en MARN

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Área definida por el MARN en la declaratoria de Emergencia Ambiental.....	8
Figura 1.2	Mapa de ubicación de la zona de estudio	13
Figura 1.3	Mapa geológico de la zona de estudio.....	17
Figura 1.4	Mapa de tipos de suelo en la zona de estudio.....	19
Figura 1.5	Usos del suelo en Sitio del Niño.....	22
Figura 1.6	Mapa hidrogeológico en la zona del cantón Sitio del niño.....	25
Figura 2.1	Esquema conceptual del riesgo de contaminación al acuífero mostrando fuentes de agua potable y ecosistemas acuáticos como posibles receptores.....	30
Figura 2.2	Evaluación de la intensidad del riesgo de contaminación del agua subterránea considerando los efectos de los peligros y la vulnerabilidad.....	31
Figura 2.3	Especies químicas del plomo a distintos valores de pH y p_e en disolución acuosa.....	40
Figura 2.4	Adsorción de cationes en el complejo arcilloso-húmico del suelo.....	42
Figura 2.5	Caracterización de la carga contaminante al subsuelo, considerando la influencia del pH y del potencial de oxido reducción.....	45
Figura 3.1	Mapa de ubicación de los sitios de muestreo de suelos, pozos excavados y ensayos de infiltración.....	51
Figura 3.2	Método GOD para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos.....	58
Figura 3.3	.Esquema del proceso de cartografía de la vulnerabilidad GOD.....	60
Figura 3.4	Esquema conceptual para evaluación del peligro de contaminación de los recursos hídricos subterráneos.....	66
Figura 3.5	Niveles de acción para el control de la contaminación del agua subterránea basados en la vulnerabilidad del acuífero y carga potencialmente contaminante...	67
Figura 4.1	Distribución espacial de plomo en suelo en el área circular, citado en partes por millon.....	71
Figura 4.2	Gráfica del perfil de profundidad de las concentraciones de plomo en suelo.....	72

Figura 4.3	Diagrama redox del plomo en agua de pozos excavados.....	74
Figura 4.6	Mapa del grado de confinamiento hidráulico, Índice G.....	76
Figura 4.7	Mapa de distribución del Índice O.....	77
Figura 4.8	Mapa de la distancia al agua, Índice D.....	78
Figura 4.9	Mapeo de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea.....	79
Figura 4.10	Mapa de peligros potenciales de contaminación al agua subterránea.....	81
Figura 4.11	Aplicación de los esquemas conceptuales de peligro de contaminación y de nivel de acción requerido para proteger el agua subterránea en la zona de estudio.....	82
Figura 4.12	Esquema de la evaluación del riesgo, a partir del análisis de sensibilidad e intensidad del riesgo.....	83
Figura 4.13	Mapa de riesgo de contaminación por plomo al agua subterránea.....	85
Figura 4.14	Evaluación del riesgo de contaminación por plomo en el agua subterránea en la zona de estudio.....	86

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1	Columna crono estratigráfica del sitio de estudio.....	16
Tabla 2.1	Normas para plomo en suelo en algunos países.....	37
Tabla 3.1	Factores hidrogeológicos que controlan la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos.....	56
Tabla 3.2	Clasificación de la vulnerabilidad y su definición.....	59
Tabla 3.3	Clasificación y categorización de fuentes puntuales de contaminación, método POSH.....	63
Tabla 3.4	Compendio de características químicas e índices de peligro para actividades industriales comunes.....	65
Tabla 4.1	Datos y gráfica de dispersión de lecturas de XRF en función de concentraciones de plomo en suelos de referencia.....	69
Tabla 4.2	Concentraciones de plomo encontradas en las muestras de suelo y su ubicación.....	70
Tabla 4.3	Concentraciones de plomo en perfil de profundidad.....	72
Tabla 4.4	Análisis de variaciones del pH y del ORP en suelo.....	73
Tabla 4.5	Mediciones de pH-pe en agua de pozos excavados.....	74
Tabla 4.6	Resultados de los ensayos de infiltración.....	75
Tabla 4.7	Grado de confinamiento hidráulico.....	76
Tabla 4.8	Ocurrencia del sustrato litológico.....	77
Tabla 4.9	Distancia al agua subterránea.....	78

Lista de abreviaturas y unidades

ANDA	Asociación Nacional de Acueductos y Alcantarillados
CARA	Red Centroamericana de Manejo de Recursos Hídricos
CEPIS	Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente
CIAN	Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares (UES)
OIEA	Organismo Internacional de Energía Atómica
MARN	Ministerio de Medioambiente y Recursos Naturales
MINSAL	Ministerio de Salud
MOP	Ministerio de Obras Públicas
NSO	Norma Salvadoreña Obligatoria
OPS	Organización Panamericana de la Salud
OMS	Organización Mundial de la Salud
PDDH	Procuraduría para la Defensa de los Derechos Humanos
QXAS	Quantitative X Ray Analysis System
UES	Universidad de El Salvador
USEPA	United States Environmental Protection Agency
XRF	fluorescencia de rayos x
mBq	mega bequerelios
kg	kilogramo
mg	miligramo
µg	micro gramo
l	litro

CAPITULO I. ALCANCES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 INTRODUCCIÓN

La zona de estudio se ubica en el Cantón Sitio del Niño, municipio de San Juan Opico, departamento de La Libertad. En este lugar se desarrollan actividades agrícolas e industriales, distribuidas entre asentamientos urbanos y rurales. Esta dinámica de los usos del suelo genera diversos materiales que, si no reciben tratamiento adecuado, pueden ocasionar contaminación del ambiente.

Desde el año 2005, autoridades del Ministerio de Salud (MINSAL) reportan casos de personas intoxicadas con plomo en la mencionada zona. En agosto de 2010, el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) al confirmar, mediante determinación de concentraciones de plomo en muestras de suelo y agua, que persiste contaminación ambiental por plomo en niveles que constituyen un peligro para la salud de la población, declaró el Estado de Emergencia Ambiental en el área comprendida dentro del radio de 1,500 metros a partir de las instalaciones de donde funcionó, hasta el año 2007, la planta de fabricación y reciclaje de baterías ácido plomo de la Sociedad Baterías de El Salvador, S.A. de C.V., ubicada en el Km.31.5, carretera a San Juan Opico, municipio de San Juan Opico, departamento de La Libertad (MARN, 2010).

El plomo (Pb) es un elemento químico que puede estar presente en el ambiente, sobre todo en suelos, teniendo por tanto origen natural; por otra parte, el plomo tiene aplicaciones diversas por lo que también se le procesa en cantidades industriales, con el consiguiente riesgo de ser liberado al ambiente como contaminante (Astete, J.,2009).

Debido a las propiedades químicas y biológicas del plomo y de sus compuestos derivados, se han establecido límites de concentración para distintas matrices ambientales, por ejemplo, suelo y agua (ASTDR, 2007).

Un abordaje integral de la problemática engloba, entre otros, los ámbitos de la salud pública y del medio ambiente. En este contexto, el presente trabajo de investigación titulado

“Evaluación del riesgo de contaminación por plomo en el agua subterránea en el Cantón Sitio del Niño, municipio de San Juan Opico”, en el departamento de la Libertad, surge ante la necesidad de enfrentar el problema de la contaminación por plomo en su dimensión ambiental, específicamente en relación a la calidad del agua subterránea que podría ser afectada por procesos físicos y químicos implicados en el transporte de sustancias contaminantes desde el suelo.

1.2 MARCO CONTEXTUAL

De acuerdo con el Plan Nacional de Ordenamiento y Desarrollo Territorial, del Ministerio de Obras Públicas (MOP), la sub-región centro-occidente abarca una sola micro-región, centrada en cuatro ciudades: Lourdes, municipio de Colón, Quezaltepeque, San Juan Opico y Ciudad Arce, correspondiendo a la parte occidental del Centro de la Gran Región Metropolitana Salvadoreña y estructurada en torno a la planicie de la cuenca del río Sucio, en proceso acelerado de transformación territorial. Esta transformación se apoya en las carreteras CA-1 y CA-8 que conectan San Salvador con Santa Ana y Sonsonate (MOP, 2010).

El ámbito de la sub-región centro-occidente coincide con diez municipios cuyas cabeceras se sitúan dentro de la subcuenca del río Sucio, entre ellas el municipio de San Juan Opico.

En relación al crecimiento poblacional, han emergido nuevos asentamientos urbanos de tamaño considerable, sobre todo en la nueva Ciudad de Lourdes y el conglomerado de Ciudad Arce; también, esta micro región se considera el principal polo industrial y logístico del país y ejerce funciones de articulación entre San Salvador y Occidente.

Los asentamientos humanos y las actividades productivas pueden tener consecuencias en su interacción con el medio ambiente, por la generación de residuos y desechos sólidos, líquidos o gaseosos, lo cuales si no se tratan adecuadamente, inciden en el riesgo de ocasionar efectos que repercuten en la calidad del ambiente y en la salud de los habitantes; por ejemplo, y en el caso particular del presente estudio, instituciones como el MARN y el MINSAL, atribuyen a

procesos industriales ciertos casos de contaminación ambiental e intoxicación humana con plomo en el Cantón Sitio del Niño.

El Cantón Sitio del Niño pertenece al municipio de San Juan Opico y desde el punto de vista de los usos de la tierra, en este lugar destacan tres rubros que condicionan el uso del espacio físico: actividad agrícola, urbanismo y producción industrial.

En relación a la actividad productiva, se distingue el sector agrícola dado que el área rural es la que presenta mayor extensión, disponiendo de terrenos para la siembra de cultivos ya sea para consumo local o para distribución comercial.

La población urbana aledaña a Sitio del Niño ha incrementado en años recientes con proyectos urbanísticos importantes.

Por otra parte, la actividad industrial tiene presencia en la zona comprendiendo distintas plantas de producción entre las cuales pueden mencionarse (Gómez y Martínez, 2004):

- PRINEL (mantenimiento de maquinaria industrial y montaje de plantas generadoras de energía)
- SCAES (Cooperativa de Apicultores de El Salvador de R.L.),
- PAVOS S.A., (elaboración de productos cárnicos)
- PROTECNO DE C.V. (fabricación de aspersores manuales)
- AGROFERRETERIA (venta de insumos agrícolas, repuestos para automóviles y materiales de construcción)
- Z-GAS (Distribución de gas propano)
- CORPORIN CL S.A. DE C.V. (Venta de repuestos usados para cabezales)
- BATERÍAS DE EL SALVADOR S.A. DE C.V. (procesamiento de metal en la fabricación de baterías para vehículos, actualmente clausurada)
- KIMBERLY CLARK (Procesamiento y fabricación de papel y otros)

- MONELCA (Montaje Electromecánico de C.A., procesamiento de metal, fabricación de productos de hierro y fibra de vidrio)
- DURAFLEX (Fabricación de tela de algodón y estampados).

Fuente adicional: Alcaldía de San Juan Opico, sitio Internet <http://www.alcaldiasanjuanopico.gob.sv/economia.php>, consultado 20 de junio de 2011.

Un inventario detallado se encuentra en el Anexo I-1 y su ubicación geográfica se muestra en el mapa del Anexo I-2.

La industria metalúrgica puede ser una fuente potencial de contaminación por plomo (Vargas, Z., Felix-Navarro, R., Lin, S. 2006).

1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La contribución de las fuentes naturales a la contaminación ambiental por plomo es poco significativa; después de las actividades de minería, la principal fuente antropogénica es la industrial (Howson, Hernández-Avila y Rall, 1996). Históricamente, el plomo se ha usado como ingrediente en muchos productos industriales como pinturas, gasolina, baterías y soldadura; de esto resultó una amplia migración del plomo hacia el suelo (Stilwell, et al, 2008). Las partículas de este elemento, al ser eliminadas de la atmósfera mediante la lluvia, pueden contaminar los cursos de aguas superficiales.

En el Cantón Sitio del Niño se registra actividad productiva que involucra el procesamiento a escala industrial de materiales con plomo (MARN,2010a); ante la opinión pública, los casos de intoxicación en personas son atribuidos a este metal, a causa de la diseminación ambiental de partículas conteniendo plomo (MINSAL,2010); por otra parte, el plomo que se encuentre en la superficie del suelo puede infiltrarse al subsuelo mediante procesos de transporte por arrastre del agua de lluvia, constituyéndose en fuente potencial de contaminación a los sistemas de flujo de agua subterránea .

Los acuíferos que subyacen a la zona de estudio constituyen un recurso de captación de agua subterránea, principalmente para consumo humano tanto de los habitantes locales como del

área metropolitana de San Salvador y siendo una zona en expansión poblacional, se espera mayores demandas de agua potable.

Considerando los planteamientos anteriores, la evaluación del riesgo de contaminación por plomo en el agua subterránea del cantón Sitio del Niño es un insumo que aporta a la solución del problema de la contaminación ambiental por dicho metal, en el marco de la declaratoria de emergencia ambiental.

1.4 HIPÓTESIS DE TRABAJO Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

Para definir la hipótesis y las interrogantes, se ha tomado en cuenta la relación de causalidad entre la problemática identificada y los efectos y consecuencias, considerando los elementos planteados en el marco contextual; se establece la siguiente hipótesis:

Existe presencia de plomo en suelo en concentraciones tales que pueden contaminar el sistema de flujo de agua subterránea que subyace al Cantón Sitio del Niño, Municipio de San Juan Opico.

Las preguntas de investigación son:

- 1) ¿existe presencia de plomo en suelo suprayacente al sistema de flujo subterráneo?
- 2) ¿existe presencia de plomo en las aguas subterráneas del Cantón Sitio del Niño, municipio de San Juan Opico?
- 3) ¿qué factores físicos y químicos inciden en la distribución del plomo como contaminante en el subsuelo y en agua subterránea?
- 4) ¿quiénes son los principales afectados?

Respecto a la unidad de análisis, se delimita el sitio de estudio como el área donde se registran concentraciones de plomo en suelo que sobrepasan valores ambientalmente permisibles, con base en información obtenida de fuentes como el MARN y el MINSAL en el texto del Decreto Ejecutivo No 12, Órgano Ejecutivo, Ramo de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN, 2010).

En cuanto a la operacionalización de la hipótesis, se identifican los siguientes indicadores que constituyen las variables de estudio: concentraciones de plomo en muestras de suelo y agua de pozos excavados, mediciones de potencial de acidez (pH) y potencial de óxido-reducción (ORP) en muestras de suelo y agua de pozos excavados, y mediciones de conductividad hidráulica en las unidades geológicas de la zona.

1.5 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Objetivo general

Evaluar el riesgo de contaminación por plomo, del agua subterránea mediante la caracterización de la carga contaminante al suelo, a partir de un inventario de fuentes contaminantes, y de la vulnerabilidad del acuífero del área del cantón Sitio del Niño, municipio de San Juan Opico, departamento de La Libertad.

Objetivo específico 1

Determinar concentraciones de plomo e indicadores fisicoquímicos en muestras de suelo y de agua de pozos ubicados en distintos puntos de la zona de estudio.

Objetivo específico 2

Obtener parámetros para determinar el índice GOD, como indicador que permita estimar la vulnerabilidad a la contaminación por plomo en el subsuelo y agua subterránea, en la zona de estudio.

Objetivo específico 3

Identificar las fuentes potenciales de contaminación por plomo en suelo mediante la tipificación de actividades generadoras de cargas contaminantes a partir de un inventario de cargas contaminantes al subsuelo, para realizar el mapeo de fuentes potenciales de contaminación e identificar áreas poblacionales que podrían estar en riesgo de ser afectadas por la contaminación por plomo del agua subterránea.

Objetivo específico 4

Caracterizar las cargas contaminantes asignándoles valores índices con base en la clasificación propuesta en la metodología POSH (Foster e Hirata, 1988, Foster et al., 2002), para evaluar los peligros potenciales de contaminación del agua subterránea).

1.6 JUSTIFICACIÓN

La declaración de emergencia ambiental decretada por el MARN en 2010, tiene su origen en una problemática que abarca tanto el ámbito de la salud humana como del medio ambiente. Con el fin de aportar información que contribuya a los esfuerzos institucionales para solventar la situación en el contexto ambiental, se realiza un estudio para caracterizar la presencia de plomo y evaluar el riesgo de contaminación por este metal, considerándolo como fuente potencial de contaminación, en el agua subterránea en el Cantón Sitio del Niño, estimando que esta agua se utiliza para el consumo humano y para distintas actividades como las agrícolas e industriales.

Desde el punto de vista de la salud pública, existe preocupación en los residentes del Cantón Sitio del Niño, debido a que se han detectado casos de personas, entre adultos e infantes, en quienes se reportan niveles de plomo en sangre en valores superiores al valor de referencia, situado en 10 microgramos por decilitro por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Distintas organizaciones gubernamentales han considerado que la diseminación ambiental de partículas conteniendo plomo ha causado los problemas de intoxicación atribuidas a este metal, por el procesamiento de materiales con plomo a escala industrial en la zona (PDDH, 2007 y MINSAL, 2010).

En la Figura 1.1 se ubican sitios de muestreo en los cuales el Ministerio de Medio Ambiente publica con concentraciones de plomo fuera de límites máximos permisibles en muestras de suelo y agua. Este Ministerio ha delimitado un área circular comprendida dentro del radio de 1,500 metros a partir de las instalaciones de donde funcionó, hasta el año 2007, la planta de fabricación y reciclaje de baterías ácido plomo de la Sociedad Baterías de El Salvador, S.A. de C.V., ubicada en el Km. 31.5, carretera a San Juan Opico, municipio de San Juan Opico, departamento de La Libertad (MARN, 2010).

A partir de los datos reportados por el MARN respecto a concentraciones de plomo en suelo, se desconoce si el plomo ha sido transportado al sistema de flujo subterráneo, lo cual podría extender el problema de contaminación a otras áreas.

Los valores de concentración de plomo en suelo y en agua subterránea obtenidos en el desarrollo de este trabajo de investigación, conllevan a hacer una estimación del impacto ambiental global; así mismo, con la caracterización de la carga contaminante y de la vulnerabilidad, el estudio proporciona elementos que contribuyen a evaluar del riesgo de contaminación del agua subterránea.

Este aporte incluye la ubicación de sitios geográficos con mayor concentración de plomo en la superficie del suelo, definidos mediante un mapa de distribución espacial en la zona de estudio, considerándolos como fuentes potenciales de contaminación al agua subterránea, con el propósito de focalizar y orientar las acciones correctivas que se consideren pertinentes.

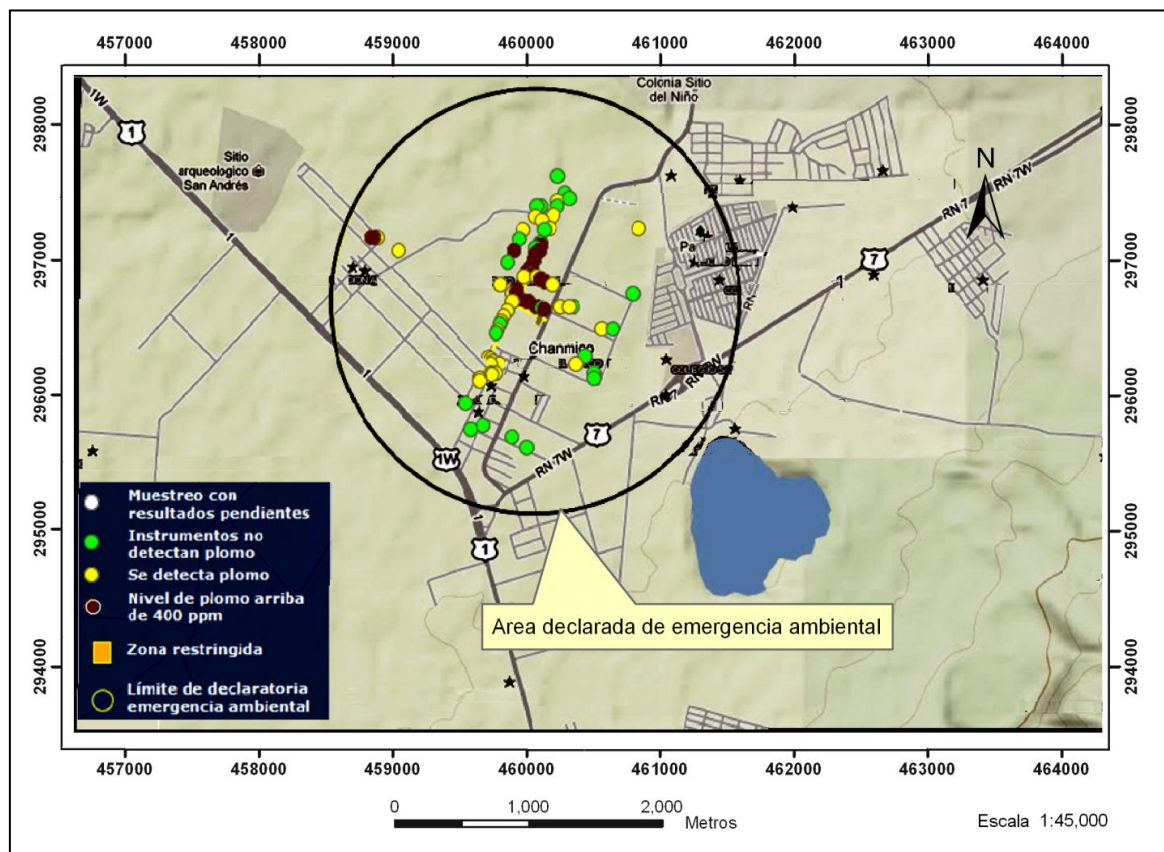


Figura 1.1 Área definida por el Ministerio de Medio Ambiente en la declaratoria de Emergencia Ambiental (Fuente: www.marn.gob.sv, consultado el 28 de junio de 2011).

1.7 BENEFICIOS ESPERADOS

Mediante los resultados obtenidos, las conclusiones y recomendaciones del estudio, se espera que quienes toman decisiones, planificadores y profesionales en el ámbito de la salud y del medio ambiente, tengan información básica para guiar acciones encaminadas a resolver la problemática planteada en beneficio de la población.

Los beneficiarios inmediatos son los pobladores de la zona de estudio, que asciende a cerca de 75,000 habitantes (Equipo RTI/CECI, 2011).

Por otra parte, esta investigación provee mapas y datos de campo y laboratorio, que las instituciones que administran el recurso hídrico pueden utilizar para justificar acciones necesarias para proteger la calidad del agua subterránea en la zona de estudio. Las acciones pueden incluir controles y monitoreo de efluentes industriales en las zonas más vulnerables e iniciar tareas de mitigación del riesgo.

1.8 ANTECEDENTES

No se encontró información sobre mediciones sistemáticas de plomo nativo en suelo en el territorio salvadoreño para tener en cuenta como referencia.

En el contexto de la determinación de plomo en la zona de estudio y lugares aledaños, varias instituciones han investigado la superficie del suelo y agua de pozos excavados y perforados; en esta oportunidad se presenta un estudio de la distribución de las concentraciones de plomo en suelo con enfoque en la gestión de riesgo de contaminación al sistema de flujo subyacente, siguiendo la metodología POSH (Pollutant Origin and Surcharge Hydraulically), es decir, origen del contaminante y su sobrecarga hidráulica.

Existen, no obstante, trabajos de investigación tanto académicos como institucionales, que abordan aspectos relevantes acerca de la contaminación ambiental por distintas sustancias, incluyendo metales pesados y la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca en la subcuenca del río Sucio.

- Esquivel, O. y López, A. (1998) realizaron un estudio sobre el “Monitoreo de la calidad del recurso hídrico en las cuencas Sucio y Acelhuate y protección de las márgenes del río Sucio” encontrando “... altas concentraciones (fuera de los estándares de calidad) de plomo... en pozos de Opico y la Zona Norte y Guluchapa...”.
- Dueñas, H. (2001) propuso “Estrategias de protección contra la contaminación del Campo Occidental de pozos de Opico de ANDA, acuífero Opico-Playón-Quezaltepeque”, estableciendo índices de vulnerabilidad de moderada a alta en el área del campo occidental de pozos, situado al nor-oeste de la zona de estudio delimitada para el presente trabajo de investigación.
- Arévalo, D. (2005) presentó la tesis “Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca del Acuífero Opico- Quezaltepeque, a través de Datos Geofísicos, Pozos y Análisis Hidrogeoquímicos”, encontrando que el acuífero se ubica en materiales piroclásticos sin consolidar, con alternancias de lavas andesíticas fracturadas y presenta, en general, una vulnerabilidad intrínseca que va de baja a extrema, siendo en las lavas escoriáceas y los materiales piroclásticos, donde varía de media a alta. En cuanto a la hidrogeoquímica de las aguas subterráneas, las clasifica en dos grupos: bicarbonatadas-sódicas y bicarbonatadas-magnésicas, siendo éstas últimas las que están cerca de la laguna Chanmico y en materiales piroclásticos, esta similitud hidrogeoquímica indicaría que todas pertenecen a un mismo sistema acuífero.
- La Universidad de El Salvador, atendiendo solicitud de la Procuraduría para la Defensa de los Derechos Humanos (PDDH) en agosto de 2006, delegó personal del Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares (CIAN) para realizar muestreo y análisis de agua superficial y suelo en el Cantón Sitio del Niño. Se encontró concentraciones de plomo en suelo superiores a la normativa de la Agencia de Protección Ambiental estadounidense, la cual se tomó como referencia al momento de presentar el informe. La Procuraduría emitió un documento cuyas valoraciones se sustentaron parcialmente en dicho informe (PDDH, 2007).
- El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales en su sitio de Internet, consultado en junio de 2011, detalla en mapas los lugares donde ha encontrado concentraciones de plomo que sobrepasan niveles ambientalmente aceptables,

destacando estudios de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) realizados en 2010, con la recolección de evidencias que comprobaron la existencia de contaminación por plomo; presentan además, información sobre diversas acciones realizadas en torno al caso. En septiembre 2010, este Ministerio organizó un simposio, del que realizó una publicación, con el propósito de intercambiar experiencias y conocer algunas investigaciones y trabajos desarrollados sobre el tema de la contaminación ambiental e intoxicación por plomo en Sitio del Niño, para establecer una estrategia y planes de acción y cooperación entre diferentes sectores que investigan la problemática causada por la contaminación por plomo.

- El Ministerio de Salud, ha emitido comunicados de prensa informando sobre la atención de salud que brinda a los pacientes afectados por la contaminación. (MINSAL, Boletines de Prensa, 2010)
- La prensa nacional describe casos de personas con detalle de sintomatología y alguna información estadística, además de resúmenes cronológicos sobre denuncias y aspectos judiciales (El Diario de Hoy, 2008 y 2009; La Prensa Gráfica, 2007 y 2009).

1.9 DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Desde el punto de vista del manejo integral de la subcuenca del río Sucio y de la declaratoria de emergencia ambiental declarada por el MARN en 2010, para delimitar la zona de estudio se consideran distintos factores como las características poblacionales, ubicación geográfica, geología, hidrología e hidrogeología, usos del suelo y usos domésticos del agua subterránea.

El municipio de San Juan Opico, departamento de La Libertad, ocupa el segundo lugar en cuanto a la mayor población a nivel departamental, con un área urbana de 2 km² y un área rural de 217 km², se compone de 28 cantones y 79 caseríos, siendo los cantones Chanmico y El Jabalí los de mayor extensión rural del municipio (Gómez y Martínez, 2004).

El sitio de estudio se ubica al centro de la subcuenca del río Sucio, en la parte media de la cuenca del río Lempa. Cartográficamente, el área de estudio se localiza en un cuadrante con los siguientes límites: (299,000 – 295,500) m norte (N) y (458,500 – 462,500) m este (E) en coordenadas geográficas Lambert para El Salvador, y comprende un área de 14,000 m²; en

esta área se ha incluido parte del perímetro declarado por el MARN como zona de emergencia ambiental.

Dentro del área de estudio se delimitó una zona circular de 1 km de radio, con centro en un sitio de muestreo donde se encontró la máxima concentración de plomo en suelo durante el presente estudio; en esta zona circular se ubicó la mayor cantidad de puntos de muestreo. El criterio para asignar el radio de dicha área se debió a la factibilidad para la recolección de las muestras, dado que no hay lugares con acceso restringido, a excepción de los alrededores y al interior del terreno que ocupa la fábrica de baterías ahora clausurada. Esta situación requirió el acompañamiento de personal de seguridad durante las campañas de muestreo y desarrollo de las pruebas de infiltración; además, redujo el plan de muestreo de suelos.

En la Figura 1.2 se muestra la zona de estudio y la información arriba detallada.

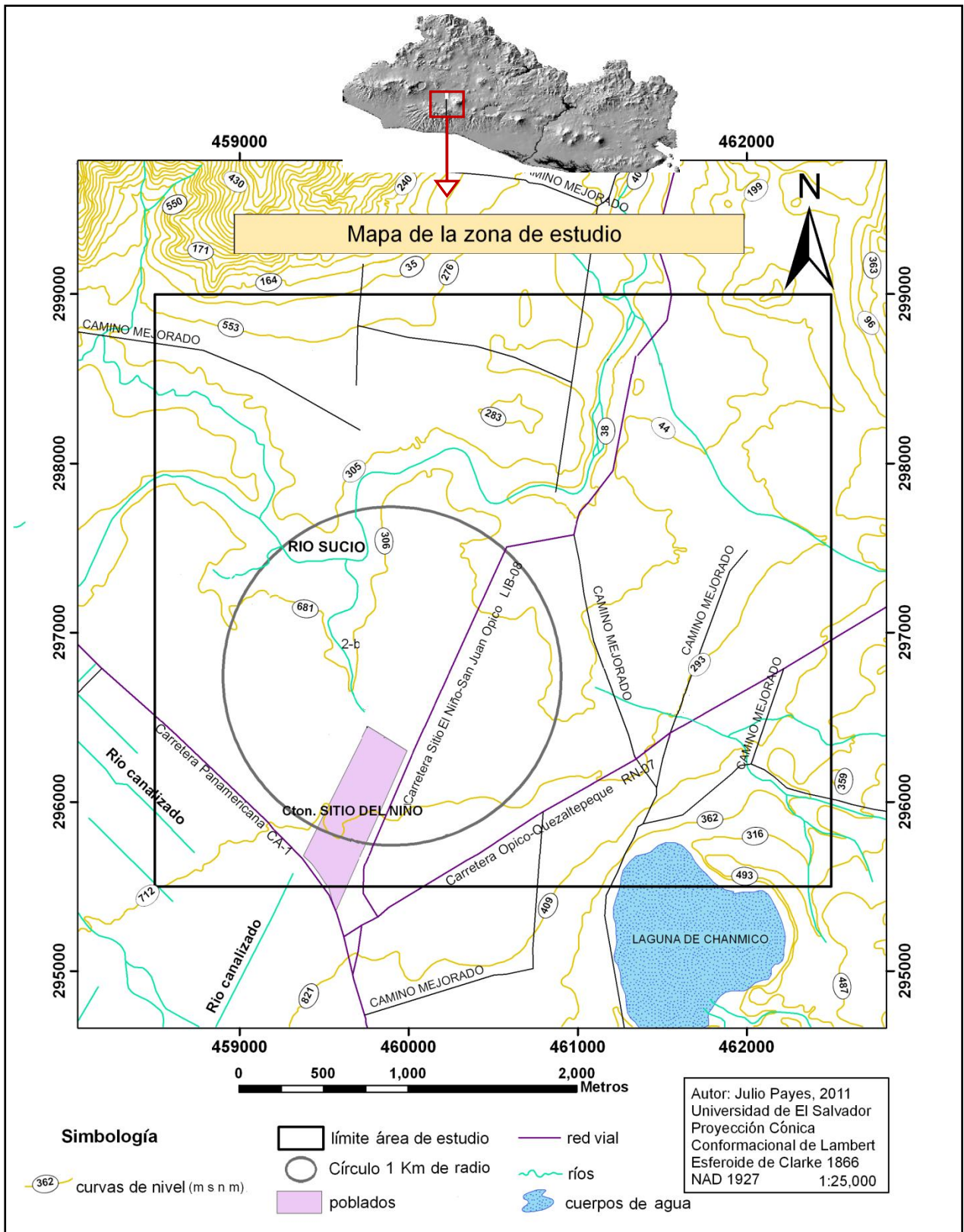


Figura 1.2 Mapa de ubicación de la zona de estudio

1.9.1 Contexto geológico

El área de estudio se localiza en una planicie conformada por materiales aluviales y sedimentarios, resultado de procesos erosivos y deposiciones piroclásticas del Volcán de San Salvador. Se mencionan brevemente los aspectos geológicos y estratigráficos para definir las formaciones rocosas del área, sus características físicas y estructurales que pueden ser afectados por los usos del suelo actuales y por el desarrollo de planes de ordenamiento territorial.

Las fuentes de información principales son los cuadrantes geológicos a escala 1:100,000 publicados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN, 1978), complementadas con datos de geología regional, litología y geomorfología elaborados por la Misión Geológica Alemana (1978).

1.9.1.1 Geología regional

Desde el punto de vista de la geología, el sub-continente centroamericano se puede diferenciar en dos partes: una septentrional y otra meridional (FORGAES, SNET; 2005).

Su evolución en el periodo entre el Paleozoico y el Terciario, ha procedido de forma independiente entre ambas. Durante el Cuaternario se ha desarrollado, a lo largo del margen del Pacífico, una intensa actividad volcánica, común a los dos sectores.

Por otra parte, el fenómeno de subducción, producto del desplazamiento hacia el NE de la Placa de Cocos bajo la Placa del Caribe, es responsable tanto del desarrollo del Graben Centroamericano, paralelo a la fosa oceánica Mesoamericana, como de la edificación de la cordillera volcánica.

El Graben está dividido en varios segmentos menores cuyos bordes corresponden a fallas dispuestas transversalmente al Graben. Uno de los segmentos, de 230 km de longitud aproximada, abarca casi todo el territorio salvadoreño y comprende todos los volcanes de El Salvador. Dicha estructura se conoce como “Graben Central” y es una depresión que

atraviesa todo el país con rumbo WNW – ESE e incluye la cadena de volcanes del Cuaternario, cuyos productos eruptivos han rellenado esa depresión.

La parte central del Graben y gran parte de su lado meridional se encuentra encubierta por los edificios de los volcanes San Salvador-Boquerón, Ilopango-Islas Quemadas, San Vicente, Tecapa-Chinameca, San Miguel y Conchagua.

1.9.1.2. Geología local

La litología de El Salvador, está formada en un 90 o 95 % por rocas volcánicas (Lavas, Tobas, Piroclastos) en su mayoría de composición intermedia de tipo andesítico; se encuentra un poco de sedimentario calcáreo en la parte norte del país (Metapán); también se encuentran algunas rocas plutónicas en forma de pequeños intrusivos asociados a las cadenas volcánicas tanto del vulcanismo joven de la cadena costera como en la parte norte del país; también estos tienen una composición que va del tipo intermedio a rocas de composición ácida, estas últimas se encuentran más que todo en la parte norte, Chalatenango, norte de Santa Ana y Morazán (Geólogo Aida Santana, entrevista personal, septiembre 2011).

En cuanto al escenario geológico de la zona de San Juan Opico, los materiales que lo conforman son piroclásticos y sedimentos aluviales, siendo sus características de sedimentos fluvio-lacustres, constituidos por mezcla de materiales piroclásticos (Esquivel, López, 1998).

En términos generales, en el sector del Valle de Zapotitán, se observan afloramientos de aluviones intercalados con piroclastos y subyacen materiales extrusivos de la Formación San Salvador y de la Formación Cuscatlán (MARN, 2008). Por tanto, se considera que el agua subterránea se encuentra en una zona en la que predomina la formación geológica San Salvador, cuya secuencia consiste en piroclastitas ácidas y efusivas-básicas intercaladas, las cuales ocupan la depresión descrita como “graben” Olomega-Ilopango y Zapotitán, como se muestra en la Figura 1.3. Dicha Formación sobreyace principalmente a la Formación Cuscatlán y varios autores la ubican cronológicamente en el Pleistoceno superior o reciente (Baxter, 1994); se subdivide en 8 miembros, de los cuales en la zona de estudio se encuentran los siguientes, en la secuencia cronológica mostrada en la Tabla 1.1:

- Q'f: Depósitos sedimentarios constituidos principalmente por secciones intercaladas de rocas piroclasticas, depósitos de estuario, depósitos colubiales y conos de deyección. Se ubican en la Laguna Ciega de Zapotitán.
- s5'c: secuencia volcánica constituida por cenizas volcánicas y tobas de lapilli principalmente
- S2: secuencia de rocas efusivas básicas-intermedias y piroclastitas subordinadas

Millones de años	Era	Sistema	Edad	Formación	Miembros de la Formación
0.01	Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	F. San Salvador	Q'f
0.08			Pleistoceno		s5'c
0.12				s5'b	
0.35				s5'a	
0.6				s4	
2.0			s3'b		
5.0	s3'a				
					s2
					s1

Tabla 1.1 Columna crono estratigráfica del sitio de estudio (Adaptado de IGN, 1978).

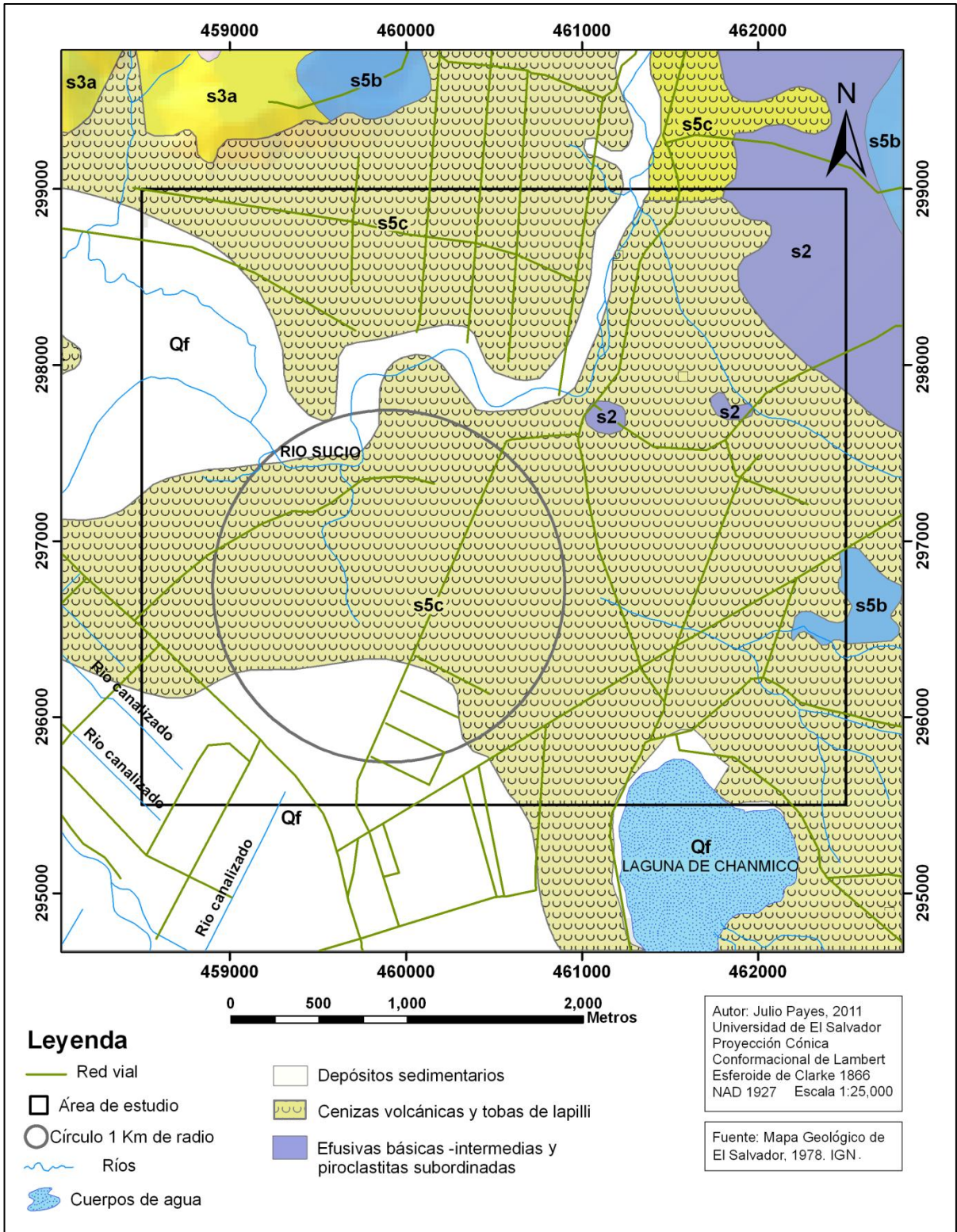


Figura 1.3 Mapa geológico de la zona de estudio

1.9.2. Geomorfología

Geomorfológicamente, la zona de estudio se conforma al norte por un complejo interior muy erosionado de depresiones y relieves bajos; se localiza al centro del valle de Zapotitán–San Andrés, hacia el Oeste se ubica el Distrito de Riego de Zapotitán, al Este aflora la colada del Playón, producto de la erupción del Volcán de San Salvador de 1917 y hacia el sur, formando un semicírculo, se encuentran las estribaciones de la Sierra del Bálsamo y el Volcán de San Salvador.

El rango de alturas oscila entre los 400 msnm en el valle y 1800 msnm en el Volcán de San Salvador.

Las pendientes son muy suaves, inferiores al 15% a excepción de las pendientes escarpadas del Volcán de San Salvador, o de las estribaciones de la Sierra del Bálsamo.

1.9.3. Tipo de suelos

La aptitud de los suelos de la sub-región es primordialmente suelos agrícolas, adecuados para el cultivo permanente y se encuentran en el valle de Zapotitán, San Andrés, zonas Central de la cuenca del río Suquiapa y del río Sucio, como se muestra en la Figura 1.4.

La colada de lava del Playón, situada hacia el oeste de la zona de estudio, se considera como suelo con fuerte limitaciones para uso agrícola y es además, zona natural protegida.

Específicamente en el sitio de estudio, predominan los suelos aluviales compuestos de materiales transportados o depositados en las planicies costeras y valles interiores, Se ubican en áreas ligeramente inclinadas o casi a nivel en las planicies costeras y valles interiores en donde el manto freático está cerca de la superficie y el drenaje por lo general es pobre. Son suelos de alta productividad permitiendo agricultura intensiva y mecanizada, son aptos para toda clase de cultivos.

En menor cantidad se encuentran suelos litosoles que son arcillosos y de poca profundidad, con texturas que varían desde gruesa, arenas y gravas hasta muy pedregosos sobre roca dura. La mayoría son suelos cuyos horizontes superficiales han sido truncados a causa de una severa erosión laminar.

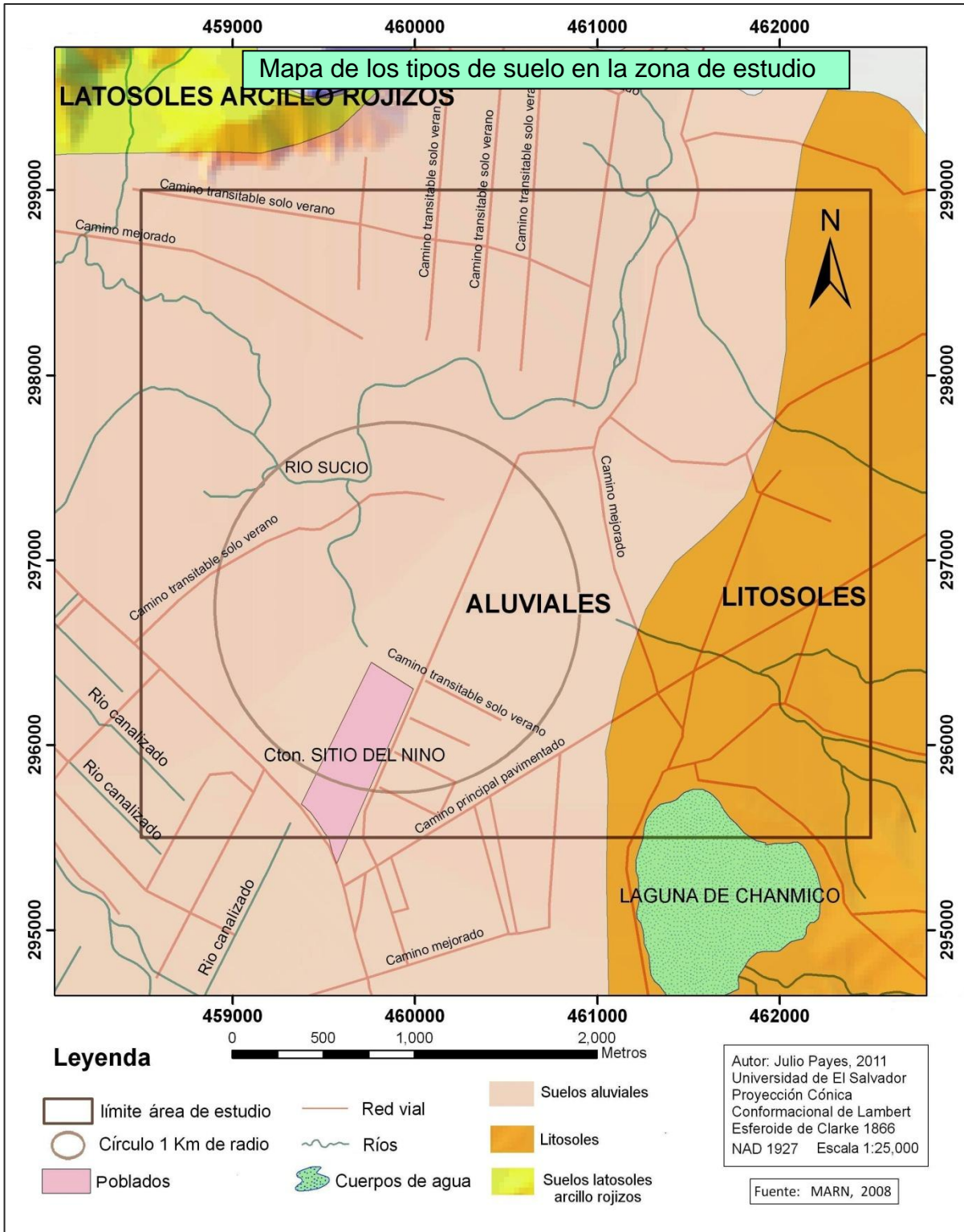


Figura 1.4 Mapa de los tipos de suelo en la zona de estudio.

1.9.3.1 Usos del suelo

De acuerdo al Plan Estratégico Municipal de Prevención Social de San Juan Opico (Equipo RTI/CECI, 2011), este municipio se divide en tres zonas claramente diferenciadas, en su orden: a) Zona Norte, formada por áreas montañosas, en la que destacan el cultivo de café, b) Zona Central, en la que se asienta la mayor parte de la población y se caracteriza por el cultivo de los cítricos y granos básicos, y c) Zona Sur, caracterizada por su desarrollo industrial.

De las visitas de campo realizadas para obtener la información necesaria, se observó que los usos del suelo están condicionados por diversos factores, que pueden agruparse en tres rubros: asentamientos humanos, actividades agrícolas y actividades industriales; es notable la coexistencia de sectores habitacionales, desde viviendas rurales a proyectos residenciales, entre terrenos con distintos tipos de cultivo y naves industriales de múltiples tamaños, que compiten por aprovechar los recursos naturales, como se muestra en la Figura 1.5.

- Asentamientos humanos

La Sub-región del Valle de San Andrés está formada por una sola micro-región con el mismo nombre; en ella residen 363 mil personas distribuidas en 10 municipios.

San Juan Opico, forma parte del departamento de La Libertad, siendo el municipio de mayor extensión territorial (219 km²) de los 22 que forman el departamento. Está limitado al Norte por San Pablo Tacachico y El Congo; al Este por San Matías y Quezaltepeque; al Sur por Ciudad Arce, Santa Tecla y Colón y al Oeste por Coatepeque. Cuenta con una población de 74,280 habitantes, con un 60.6% de la población clasificada como urbana y un 39.4% como rural. La población de Opico es equivalente al 1.29% de población del país, lo cual ubica al municipio dentro de los quince municipios mayormente poblados, con una importante población en el área urbana que requiere y demanda un mayor número de servicios. La densidad poblacional es de 339 habitantes por kilómetro cuadrado.

Con respecto a la vivienda, en el municipio de San Juan Opico existen en la actualidad un total de 25,510 viviendas, de las cuales 17,423 están habitadas, representando un 69.7% del total; el promedio de habitantes por vivienda es de 4.3 (Equipo RTI/CECI, 2011).

- Actividades agrícolas

La parte central del valle se divide entre la producción de cultivos industriales en el distrito de Zapotitán y el cultivo de caña de azúcar.

En general se considera que existe un potencial de intensificación de las actividades primarias en el valle que compiten con el desarrollo industrial que está teniendo lugar.

En cuanto a la explotación agropecuaria es principalmente cultivo de cereales (maíz y frijol), visualizándose áreas significativas de café, caña de azúcar y frutas, así como pastos para ganadería y otros cultivos.

Adicionalmente muchos productores cuentan con sistemas de riego explotando mantos freáticos superficiales y subterráneos en forma individual.

- Actividades industriales

En conjunto, se localizan más de 100 establecimientos industriales de diverso tamaño y dedicación entre las que destacan las manufacturas.

Se ubican 4 parques industriales con zonas de industrialización. La producción de estos centros está orientada enteramente a la exportación. En total cuentan con una superficie de techo industrial de 384 mil metros cuadrados.

En San Juan Opico se ubica un ingenio azucarero que cuenta con una capacidad de procesamiento de 4 toneladas diarias, y concentra el 6% del mercado nacional.

También se localizan en la sub-región algunos importantes beneficios de café.

- Aspectos institucionales

La “Micro-región” Valle de San Andrés es considerada como una de las asociaciones municipales con mayor proyección institucional.

Existe un Grupo Gestor que representa a la sociedad civil, gobiernos locales, instituciones gubernamentales, instituciones no gubernamentales y el sector empresarial.

El Vice ministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano (VMVDU) cuenta con la Oficina de Planificación del Valle de San Andrés –OPVSA-.

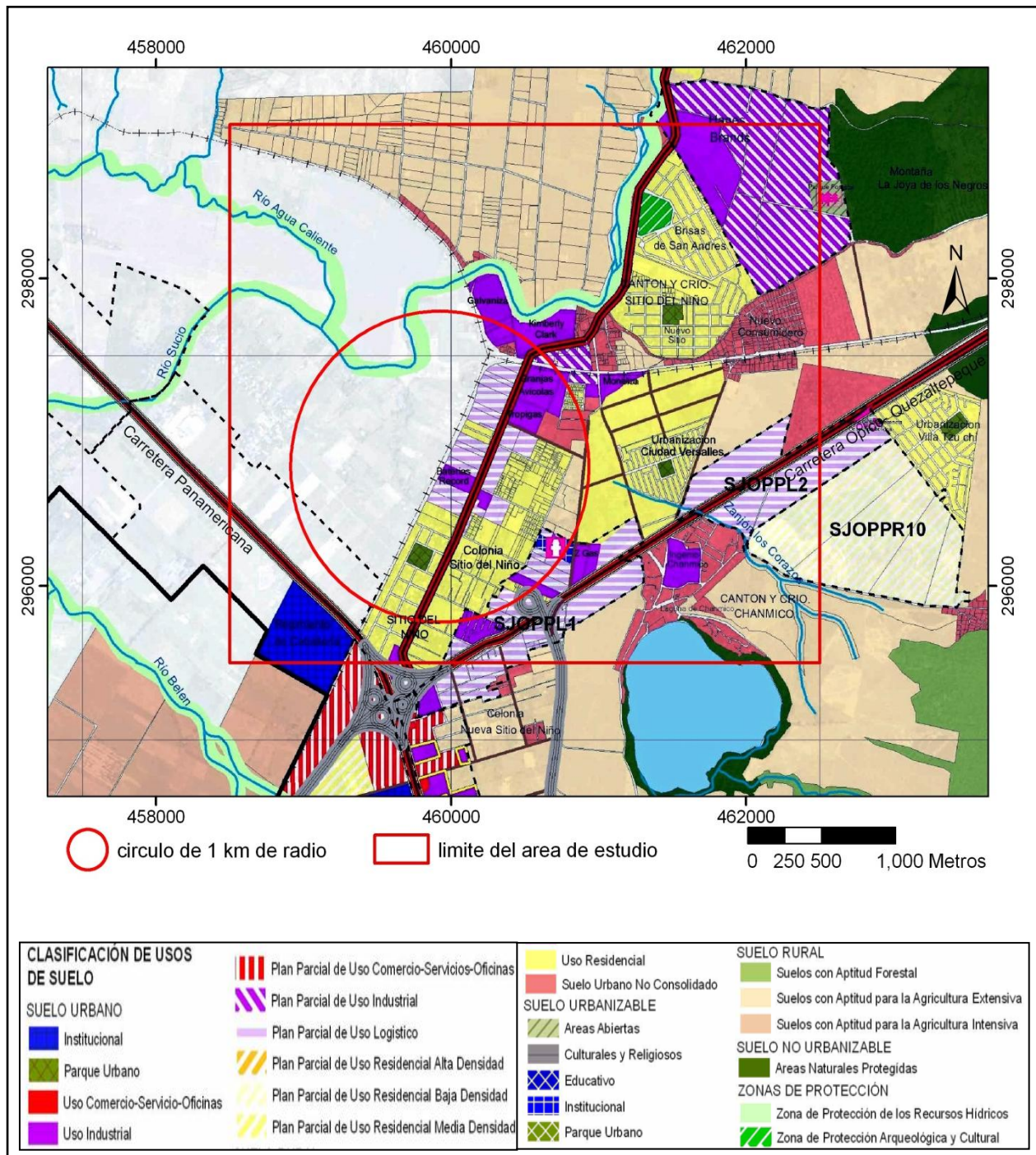


Figura 1.5 Usos del suelo en Sitio del Niño (Adaptado de MOP, 2008).

1.9.4. Características hidrológicas e hidrogeológicas.

1.9.4.1 Hidrología

Respecto a la hidrología, la recarga anual del acuífero de San Juan Opico es de $100 \times 106 \text{ m}^3$. El caudal de aguas subterráneas en la zona se estima en $106 \times 106 \text{ m}^3/\text{año}$ de los cuales $37 \times 106 \text{ m}^3/\text{año}$ descargan como manantiales y unos $35 \times 106 \text{ m}^3/\text{año}$ son explotados como pozos (Losilla, 2005).

En cuanto a la hidrología superficial, el río Sucio es el curso fluvial que drena la sub-región y discurre desde el Oeste continuando de Sur a Norte hasta el río Lempa. Los ríos Gumero, Talnique, Agua Fría y Agua Caliente, afluentes del río Sucio, son ríos de menor extensión. Las lagunas de Chanmico, hacia el Este del valle de Zapotitán, y Caldera hacia el Norte, constituyen también parte de la red hidrográfica de la sub-región.

La dirección del flujo del agua subterránea es principalmente en las direcciones Este-Oeste y Oeste-Este, proviniendo de los macizos volcánicos San Salvador y Coatepeque respectivamente. El flujo es hacia el centro del valle hacia el curso del río Sucio que funciona como un interceptor del flujo.

Otro componente de flujo es en dirección Sur-Norte, siguiendo la trayectoria del río Talnique y del río Colón hasta su continuación con el curso del río Sucio. Véase la Figura 1.6.

En materia de aguas subterráneas, existe de moderada a grandes cantidades de agua dulce en flujos lávicos y piroclastitas intercalada con aluviones (MARN, 2009). El nivel freático se localiza en el acuífero somero a profundidades que pueden variar entre 1 y 20 m. Entre más se acerca el acuífero al río Sucio, las profundidades del nivel freático se hacen menores, y por el contrario entre más se aleja el acuífero del río Sucio y se acerca al Volcán de San Salvador y de Coatepeque, las profundidades al nivel freático se hacen mayores.

De acuerdo con perfiles litológicos estudiados (MARN, 2005), se distingue un acuífero somero y un acuífero profundo separados por estratos confinantes de arcilla. El acuífero somero alcanza una profundidad de 20 metros; debajo de este, se distingue un estrato de arcilla de aproximadamente 6 metros de espesor que lo separa del acuífero profundo, el cual

puede alcanzar profundidades de 100 metros; el acuífero somero está constituido principalmente por materiales piroclásticos s3'a y por rocas efusivas ácidas, s3'b. El acuífero profundo está constituido por materiales piroclásticos y sedimentos aluviales.

La zona vadosa o intermedia alcanza valores de espesores de 1 m en el centro del valle y de 5 m en la periferia del Distrito de Riego Zapotitán y de 15 m al comenzar a subir los terrenos hacia los volcanes.

Las transmisividades o mayores permeabilidades en las formaciones geológicas se dan en el sector oriental del Valle de Zapotitán, al pie del Volcán de San Salvador en las cercanías de Lourdes y carretera a Santa Ana donde alcanzan valores de 993 m²/día (MARN, 2009).

1.9.4.2 Hidrogeología

En la zona de estudio se distinguen tres unidades hidrogeológicas, las cuales se extienden a todo el Valle de Zapotitan (ANDA, 2008) y se muestran en la Figura 1.6:

- *Unidad acuífero volcánico fisurado de extensión limitada y productividad media*, constituida por flujos y coladas de lavas basálticas y andesíticas de eyección volcánica sin alcanzar grandes extensiones, pueden estar intercalados con materiales piroclásticos. Presentan conductividades hidráulicas medias. Pueden tener espesores de 10 a 20 m.
- *Unidad acuífero poroso de gran extensión y productividad media*, conformada principalmente por materiales retrabajados (pómez, lapillo y tobas), teniendo una distribución granulométrica que varía de fina a gruesa. Las conductividades hidráulicas varían de medianas a bajas. Esta unidad puede tener más de 50 m de espesor.
- *Unidad rocas no acuíferas*, compuesta por flujos de lavas intercalados con tobas aglomeradas y brechosas y lahares cementados, presentando conductividades hidráulicas de bajas a nulas. La profundidad a que se encuentra puede ser mayor a 100 m.

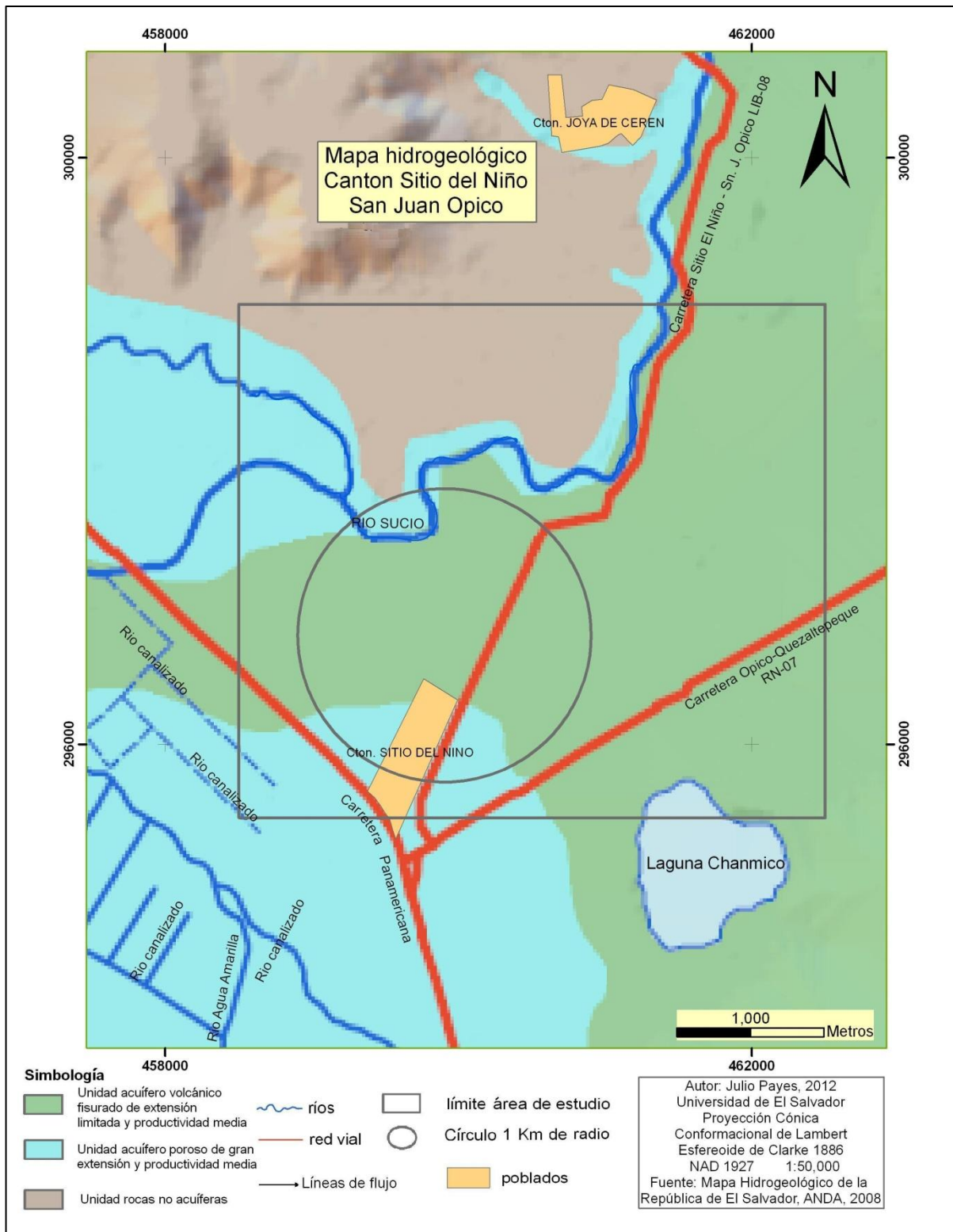


Figura 1.6 Mapa hidrogeológico en la zona del cantón Sitio del Niño, municipio de San Juan Opico. (Adaptado del Mapa Hidrogeológico de la República de El Salvador, ANDA, 2008).

CAPITULO II. MARCO CONCEPTUAL

La composición y concentración de sustancias disueltas en el agua subterránea está condicionada por las reacciones químicas y biológicas que ocurren entre la matriz del suelo y el agua lluvia que infiltra, también por la composición mineral de los acuíferos y de las capas confinantes; todo ello constituye el medio natural a través del cual se mueve el agua.

La calidad de las aguas subterráneas depende por tanto, de las sustancias disueltas en el agua y de ciertas propiedades y características que estas sustancias imparten al agua, en relación a evaluar la conformidad con determinados parámetros definidos previamente en normas nacionales e internacionales; esta conformidad permite asignar los usos del agua.

Las cualidades originales del agua subterránea pueden verse degradadas por actividades antrópicas derivadas de los usos del suelo. Si tales actividades involucran la generación de productos de desecho, existe el peligro de que sustancias contaminantes puedan ser liberadas al ambiente y, consecuentemente, se genera el riesgo de producir un impacto negativo.

Una fuente potencial de contaminación del agua superficial y subterránea, es el aporte de sustancias desde el suelo (Nofuentes, M., et al., 2005). La deposición en suelo de materiales de origen antrópico conteniendo plomo no solo degrada ambientalmente al suelo, también constituye una fuente potencial de contaminación, tanto para aguas superficiales debido a escorrentía, como para aguas subterráneas por lixiviación, sobre todo en época lluviosa y en menor grado por actividades agrícolas; así mismo, ocurren procesos de adsorción y desorción de las sustancias por las partículas de suelo y el transporte advectivo y difusivo de las sustancias una vez incorporadas al flujo superficial y vertical (Ahuja, L., 1989).

De manera general, en el presente trabajo se hace una estimación de los peligros potenciales de contaminación al agua subterránea por actividad industrial puntual, a partir de un inventario de emprendimientos industriales y, de forma específica, se evalúa el riesgo de que el plomo encontrado en suelo contamine el agua subterránea subyacente a la zona de estudio.

Para ello, se consideran las circunstancias que determinan la probabilidad de degradación del agua como recurso y se identifican los factores que pueden afectar la calidad del agua subterránea. En este contexto, el criterio de “evaluación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas” implica la estimación de la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, de la carga contaminante en suelo (Foster, S; Hirata, R.; 1991) y del impacto potencial al agua subterránea (Foster et al., p.100, 2002; Zwahlen, 2003).

Para desarrollar este enfoque, es necesario considerar distintas propiedades de la zona no saturada y caracterizar la carga contaminante en suelo; además, en esta investigación se define en qué concentraciones el plomo se considera un contaminante del agua y del suelo, según distintas normas, y se revisan las interacciones fisicoquímicas que se dan entre el plomo y la matriz del suelo.

2.1 CONCEPTOS DE PELIGRO Y DE RIESGO

En términos generales, se ha entendido que el riesgo es inherente a todas las actividades humanas, debido a la probabilidad de que ocurra una consecuencia adversa originada a partir de una actividad consciente, es decir, de una actividad antrópica. El riesgo se caracteriza por la estimación de la consecuencia asociada a dicha probabilidad. A mayor consecuencia y mayor probabilidad de ocurrencia, se espera un mayor riesgo (Trolborg, M., 2010).

En su connotación ambiental, el riesgo es una expresión de las pérdidas potenciales que una actividad antrópica consciente puede ocasionarle a un recurso, por ejemplo una reserva forestal o una fuente de agua superficial o subterránea (Cárdenas, J., 2005).

Para el presente estudio, se define el riesgo como la amenaza a la salud humana por la contaminación de una fuente específica de suministro de agua subterránea, o amenaza a un ecosistema por la contaminación de una descarga natural específica de un acuífero. Es el resultado “del peligro adaptado a la escala del impacto” (Foster et al., 2002).

Se define *peligro* como la probabilidad de que de que el agua subterránea se contamine a concentraciones superiores a las marcadas en los lineamientos de para agua potable cuando

una carga contaminante sub-superficial específica se genere en la superficie del terreno; es decir, es la probabilidad de que un acuífero experimente impactos negativos a partir de una actividad antrópica dada hasta un nivel tal que su agua subterránea se torne inaceptable para el consumo humano, de acuerdo con los valores guía de la OMS para calidad de agua potable (Foster et al., 2002); no obstante, la expresión “riesgo de contaminación del agua subterránea” en Foster e Hirata (1988 y 1991) tiene el mismo significado que “peligro de contaminación del agua subterránea”. La diferencia es que el término “peligro” implica probabilidad de ocurrencia, en tanto que “riesgo” evoca el impacto del peligro; esta aclaración en la terminología se menciona para tener en cuenta que actualmente el impacto es considerado en otras áreas de evaluación del riesgo, como la salud humana o animal y los ecosistemas, donde el riesgo es ahora definido como el resultado “del peligro adaptado a la escala del impacto” (Foster et al., 2002). El que este peligro resulte en una amenaza para una determinada fuente de abastecimiento dada, depende fundamentalmente de su ubicación con respecto al área de captación de la fuente de agua subterránea y secundariamente de la movilidad y dispersión del o los contaminantes involucrados en el régimen local de flujo de agua subterránea (Foster et al., 2002).

Sin embargo, en este trabajo se aborda solamente el ámbito del posible impacto de la contaminación por plomo al agua subterránea a partir de la distribución del plomo encontrado en suelo y subsuelo; por lo tanto, la evaluación del riesgo de contaminación del acuífero subyacente a la zona de estudio, se determina considerando la interacción entre los siguientes factores:

- la carga contaminante aplicada al subsuelo
- la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación
- el impacto potencial de contaminación al agua subterránea

2.2 CONCEPTO DE EVALUACIÓN DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Originalmente, la evaluación del riesgo de contaminación del agua subterránea se ha considerado como la evaluación de 2 criterios y el posterior examen de su interacción

(Foster, 1986); tales criterios son: la *vulnerabilidad* del acuífero a la contaminación (propiedad natural) y la *carga contaminante* (origen antrópico) sobre el medio subterráneo.

Posteriormente, se ha definido en términos de probabilidad de impactos en seres humanos, animales o plantas, resultantes del contacto con y/o ingestión de terrenos contaminados y/o agua subterránea. Este tipo de evaluación de riesgo es normalmente usado para guiar la decisión sobre priorización de medidas de remediación o limpieza (Foster et al, 2002).

Según el enfoque europeo de la vulnerabilidad, en COST Action 620 (Zwahlen, 2003), el riesgo y la cartografía del riesgo se basan en un modelo de *origen-trayectoria-destino*, que se aplica tanto para los recursos de agua subterránea como a la protección de las fuentes.

El *origen* es el término utilizado para describir la ubicación de una posible emisión de contaminantes. El *destino* es el agua, iniciando desde la superficie freática, que tiene que ser protegida. La *trayectoria* incluye todo lo que se encuentra entre el origen y el destino.

Es oportuno mencionar que este enfoque es consistente con los tres factores establecidos al final del apartado 2.1: el origen equivale a la *carga contaminante al subsuelo*, la trayectoria está relacionada al paso del contaminante por el subsuelo hasta el agua subterránea, es decir, a la *vulnerabilidad* y el destino corresponde al *agua subterránea*.

Siguiendo el modelo de origen-trayectoria-destino (Zwahlen, 2003), el riesgo depende de tres elementos:

- los *peligros* y su probabilidad de que un evento peligroso se produzca;
- la *vulnerabilidad* de la secuencia geológica; y,
- las *consecuencias* para el agua subterránea.

En la figura 2.1 se ilustra el contexto de los criterios mencionados.

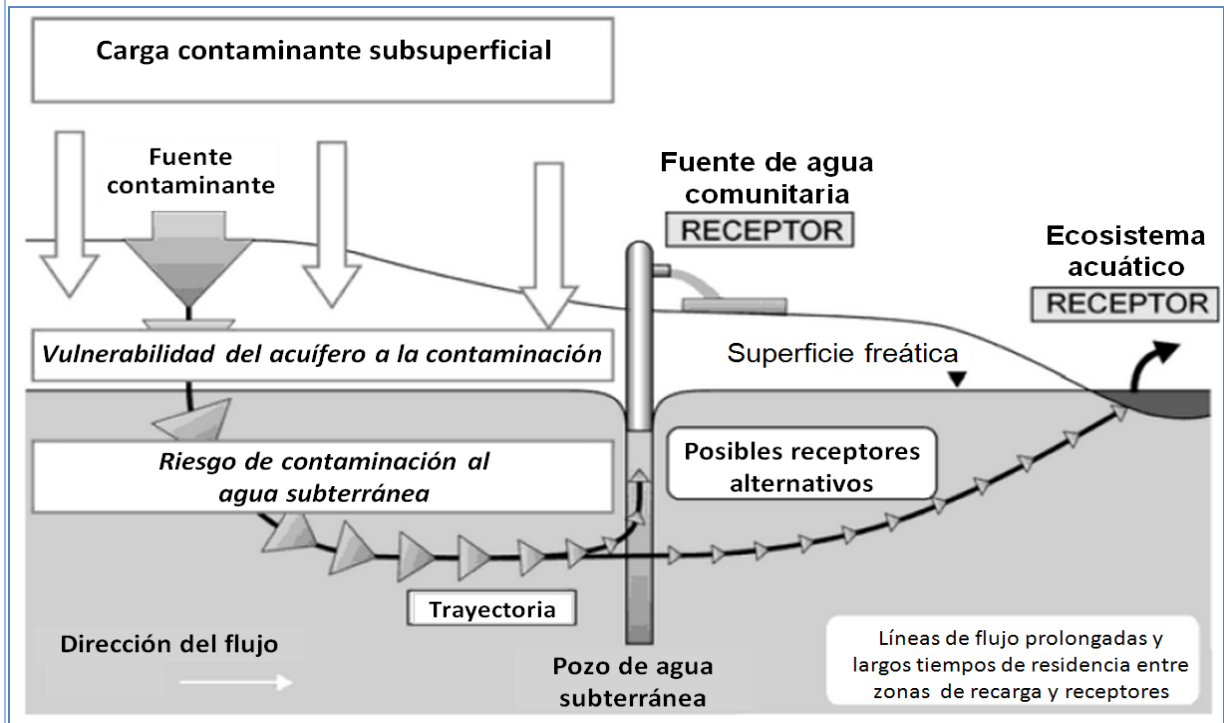


Fig. 2.1 Esquema conceptual del riesgo de contaminación al acuífero mostrando las fuentes de agua potable y los ecosistemas acuáticos como posibles receptores (Adaptado de Foster, 2007).

En resumen, la evaluación del riesgo identifica los peligros, potenciales o existentes, y las rutas de exposición a la contaminación, con la finalidad de proveer la base necesaria para la toma acciones que aseguren la protección del agua subterránea (Zwahlen, 2003). Así planteado, la evaluación del riesgo tiene en cuenta los siguientes aspectos:

- la posibilidad de un impacto
- la intensidad del impacto potencial que afecta al agua subterránea
- la sensibilidad del agua subterránea con respecto al impacto

Combinando dichos aspectos, el análisis de riesgo puede ser realizado en dos etapas:

- evaluación de la intensidad del riesgo
- evaluación de la sensibilidad al riesgo

2.2.1 Análisis de la intensidad del riesgo

La intensidad del riesgo se refiere a la intensidad del impacto potencial al agua subterránea. Considera los posibles daños o deterioros relacionados con el peligro de contaminación a lo largo de la trayectoria hasta el receptor (véase la Figura 2.1). El análisis de este aspecto conlleva una clasificación cualitativa del riesgo, como se observa en la Figura 2.2.

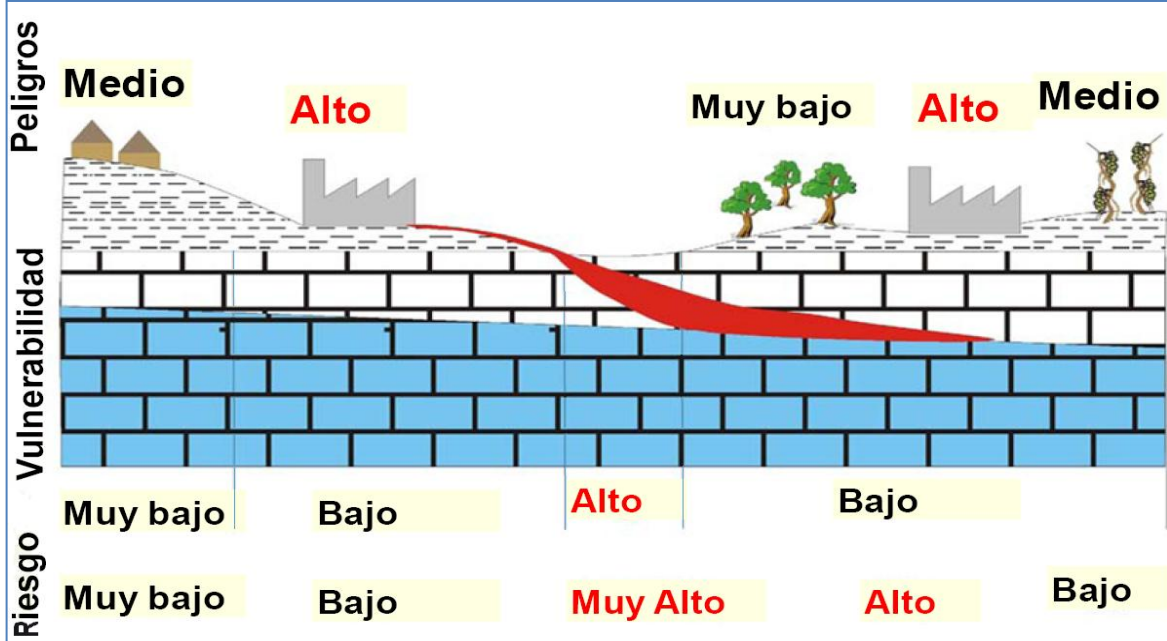


Fig.2.2 Evaluación de la intensidad del riesgo de contaminación del agua subterránea considerando los efectos de los peligros y la vulnerabilidad (Adaptado de Zwahlen, 2003).

2.2.2 Análisis de la sensibilidad al riesgo

En caso de peligros puntuales de contaminación, como en el presente estudio, la posible contaminación solo afectará una parte del acuífero; la contaminación del agua subterránea comenzará donde alcance la zona saturada, y será distribuida siguiendo la dirección del flujo.

El daño consecuente, que por definición tiene que ser incluido en la evaluación del riesgo, depende de la extensión de la pluma contaminante. Si existe una fuerte atenuación en el acuífero (o en el subsuelo), será posible el monitoreo de la pluma hasta una distancia limitada, que puede ser dinámica.

Por estas consideraciones, el receptor en riesgo puede ser solo una parte del acuífero; y dentro de los límites de la pluma contaminante, la evaluación del riesgo varía con los niveles de concentración.

2.2.3 Gestión del riesgo

Se basa en el análisis de los usos del suelo y la carga contaminante subsuperficial; tiene en cuenta además, la vulnerabilidad del acuífero y continúa con la respuesta al riesgo. La

respuesta incluye la evaluación y selección de opciones para realizar las medidas de prevención o minimizar la posibilidad de un evento contaminante y sus consecuencias.

La evaluación del riesgo total, cuyos componentes esenciales son la evaluación de la intensidad y la sensibilidad del riesgo, es la base para el manejo sostenible del riesgo.

2.2.4 Cartografía del riesgo

De acuerdo con la COST Action 620 (Zwahlen, 2003), el mapeo del riesgo es el resultado de la evaluación total del riesgo con respecto a su distribución espacial. Dado que el proceso de evaluación implica múltiples componentes, este tipo de mapas especializados podrían exponer solo una parte de los resultados del proceso completo:

- Mapa de intensidad del riesgo: muestra el resultado evaluar la intensidad del riesgo. Involucra la combinación de los mapas de impacto del peligro y de vulnerabilidad.
- Mapa de sensibilidad al riesgo: da el resultado del análisis de sensibilidad al riesgo. Presenta la sensibilidad del agua subterránea contra cierto impacto, considerando el valor económico y ecológico del recurso.
- Mapa de riesgo o mapa de riesgo total o mapa de riesgo ecológico: representa todos los aspectos del proceso de evaluación.

Los conceptos y procesos anteriormente explicados constituyen los fundamentos teóricos para elaborar la cartografía del riesgo de contaminación por plomo al agua subterránea subyacente al sitio de estudio de la presente investigación.

2.3 CONCEPTO DE VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Diversos autores han expuesto conceptos de vulnerabilidad desde que el francés Jean Margat introdujera el término “vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación” en el año de 1968 (Auge, M. 2004). En términos generales, la vulnerabilidad hace referencia a las

propiedades del subsuelo para atenuar sustancias que pueden alterar la calidad del agua subterránea y su evaluación permite el mapeo de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación en distintas escalas cartográficas dependiendo del uso que se dará a los mapas.

2.3.1 Vulnerabilidad intrínseca

Para los propósitos de este trabajo, se define la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación como el *conjunto de características intrínsecas que determinan su susceptibilidad a ser adversamente afectado por una carga contaminante* (FOSTER, 1987 y FOSTER, HIRATA, 1988). Se observa que en esta definición no se alude a contaminantes específicos.

Para Barrocu, G. y Biallo, G. 1993, la vulnerabilidad intrínseca es controlada por la topografía, cobertura del suelo, climatología, tipo de suelo, hidrología, zona insaturada, zona saturada, usos del agua subterránea y usos del suelo. Es oportuno mencionar que no todas las metodologías para evaluar la vulnerabilidad involucran todos estos parámetros.

2.3.2 Vulnerabilidad específica

La vulnerabilidad intrínseca caracteriza inadecuadamente el destino y transporte de contaminantes, ya que se presenta sólo para el marco geológico e hidrogeológico inherente de un área, pero no tiene en cuenta la naturaleza de los contaminantes en cuestión.

Según la definición de la COST Action 620, la vulnerabilidad específica de las aguas subterráneas a un contaminante o grupo de contaminantes en particular, tiene en cuenta las propiedades de los contaminantes además de la vulnerabilidad intrínseca de un área (Zwhalen, 2003).

El concepto general de vulnerabilidad específica se refiere al hecho de que diferentes sustancias se comportan de una manera distinta en el mismo ambiente geológico e hidrogeológico, debido a sus propiedades físicas y químicas. Estas propiedades determinan el efecto de uno o varios procesos de atenuación del contaminante.

Sin embargo, no es necesario realizar la evaluación de la vulnerabilidad específica en cada cuenca donde se pide la cartografía de la vulnerabilidad (Foster et al., 2002; Zwahlen, 2003).

Sólo debe llevarse a cabo cuando una necesidad particular puede justificar los costos de la obtención de los datos adicionales. Esto podría ser debido a la presencia de un contaminante dominante o grupo de contaminantes con un comportamiento similar.

Otra justificación puede ser la compilación de diferentes mapas de vulnerabilidad específica de una cuenca, que representa los diversos contaminantes cuyo impacto tiene que ser considerado. Estos mapas deben estar vinculados a los diferentes peligros existentes o potenciales en una cuenca y en consecuencia, sirven para mejorar la evaluación de riesgos y para el ordenamiento territorial.

2.3.3 Vulnerabilidad integrada

La vulnerabilidad integrada implica la interacción entre la vulnerabilidad intrínseca de un sistema hidrogeológico y los potenciales centros de contaminación (Barrocu y Biallo, 1993). Dependiendo de su tipo y su tamaño, las *fuentes de contaminación*, se clasifican como:

a) *difusas*: considera sitios como las zonas residenciales urbanas sin servicio de cloacas, uso agrícola del suelo y lluvia ácida; reconoce áreas con diferentes niveles de peligro de contaminación, dependiendo de los tipos y cantidades de contaminantes que podrían afectar el acuífero (Barrocu y Biallo, 1993; Foster et al, 2002).

b) *puntuales*: se refiere a instalaciones confinadas a un lugar y que pueden descargar vertidos de sustancias peligrosas; incluye los sitios industriales, lagunas de efluentes, botaderos de residuos urbanos y/o industriales, reservorios subterráneos de gasolineras, promontorios de residuos mineros, entre otros. El peligro es generalmente definido para grupos de contaminantes específicos (Barrocu y Biallo, 1993; Foster et al, 2002).

2.3.4 Aplicación del concepto de Vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero

Aunque se reconoce la utilidad de contar con Índices de Vulnerabilidad Específica para cada contaminante o grupo de contaminantes, la complejidad y variabilidad de los factores que gobiernan el transporte de contaminantes hace complicada la aplicación de dichos índices (Foster et al, 2002). Foster e Hirata (1998) proponen la elaboración de mapas de vulnerabilidad integrados, donde la terminología utilizada y las limitaciones se expresen con

claridad; adicionalmente, se debe tener en cuenta que todo acuífero tiene algún grado de vulnerabilidad a la contaminación y que cualquier evaluación de vulnerabilidad conlleva incertidumbres.

Por otra parte, la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos debería ser concebida interactivamente con la carga contaminante que es (será o podría ser) aplicada en el ambiente subsuperficial como resultado de una actividad humana, consecuentemente causando un peligro de contaminación al agua subterránea (Foster et al, 2002).

En el presente trabajo se emplea entonces, un índice de vulnerabilidad integrado como referencia para estimar los peligros de contaminación del acuífero en la zona de estudio y el mapeo de la vulnerabilidad se aplica como base cartográfica para la evaluación del riesgo de contaminación por plomo al acuífero.

Diversos autores han desarrollado distintos métodos para estimar la vulnerabilidad; Garfias, J., et al. (2002) consideran que los métodos van desde modelos numéricos sofisticados que simulan los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en el subsuelo, hasta técnicas que usan un puntaje y un ponderador o peso para cada parámetro. Muchos métodos clásicos de vulnerabilidad están basados en puntajes: el método GOD (Foster, 1987), IRISH (Daly y Drew, 1999), AVI (Van Stempuort et al., 1993), DRASTIC (Aller et al., 1987), SINTACS (Civita, 1994) y EPIK (Doerfliger y Zwahlen, 1997). Cada método tiene diferente criterio de ponderación de los parámetros involucrados; como ejemplo, el método GOD asigna igual peso para cada característica hidrogeológica, y considera un rango más amplio de variación para la profundidad al nivel freático; otro ejemplo es el método AVI que solamente considera importante a la zona no saturada, sin considerar la porosidad que tiene dicha zona.

En el presente estudio, se emplea el método GOD para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero en la zona de estudio. Este método se detalla en el Capítulo III.

2.4 EL PLOMO COMO CONTAMINANTE

En suelos no contaminados, el plomo puede estar presente como mineral poco soluble, ya sea como anglesita (PbSO_4) o como cerusita (PbCO_3), o bien, adsorbido en partículas arcillosas o minerales de manganeso o hierro y también en la materia orgánica coloidal.

La solubilidad de los compuestos del plomo se favorece con la disminución del pH; este cambio en el pH puede ser consecuencia de incrementos en la concentración de ácidos orgánicos, lo que a su vez favorece la movilidad del plomo en suelos.

El suelo puede contaminarse por emisiones y/o descargas de materiales conteniendo plomo procedente de distintas fuentes, debido a sus propiedades, usos y aplicaciones, detalladas en el Anexo II-1. Las partículas de materiales conteniendo plomo se depositan en el suelo provenientes de incineradores y fuentes similares dado que el método actual de reciclaje más común para baterías de plomo emplea un proceso pirometalúrgico (Vargas et al, 2006); la eliminación de productos conteniendo plomo contribuye a la diseminación del plomo en los vertederos municipales (ATSDR, 2007). Además de su toxicidad, el plomo y sus compuestos están clasificados como sustancias químicas Persistentes, Bioacumulativo y Tóxico (PBT); siendo también, persistentes en el ambiente por largo tiempo y no son fácilmente eliminados (EPA, 2001a).

Los efectos tóxicos debidos a la ingestión e inhalación de plomo están ampliamente documentados (MINSAL, 2007; Astete, J., et al, 2008): el plomo se absorbe desde distintos tipos de matrices: agua de la zona ingerida por los habitantes, suelos con vocación agrícola utilizados para sembrar vegetales comestibles como papas, yuca, etc. y por el aire; luego es transportado por la sangre fijándose en los glóbulos rojos. También se puede alojar en los huesos al desplazar de su lugar al calcio. Los síntomas de una intoxicación severa incluyen anemia hemolítica, insuficiencia renal y convulsiones, entre otros.

En intoxicaciones medias y leves no siempre hay síntomas, pero sí daño. Cuando los niños se exponen a una contaminación crónica, corren el riesgo de terminar con afecciones en el sistema neurológico, disminución del coeficiente intelectual, hiperactividad, estancamiento del crecimiento y audición limitada.

Niños en edad preescolar y fetos son por lo general los sectores más vulnerables de la población de la exposición al plomo (ATSDR, 2007). Esto da como resultado una mayor propensión debido a una combinación de factores, entre ellos: 1) el desarrollo del sistema nervioso del feto o del recién nacido aumenta la susceptibilidad a los efectos neurotóxicos del plomo; 2) los niños pequeños son más propensos a jugar en la tierra y colocar las manos y otros objetos en sus bocas, lo que aumenta la posibilidad de ingestión de tierra contaminada con plomo; 3) la eficiencia de la absorción de plomo en el tracto gastrointestinal es mayor en niños que en adultos; y, 4) las deficiencias nutricionales de hierro o de calcio, que son frecuentes en niños, puede facilitar la absorción de plomo y exacerbar los efectos tóxicos.

En El Salvador, el Ministerio de Salud ha establecido límites para definir casos de intoxicación crónica (MINSAL, 2007): más de 10 microgramos de plomo por decilitro de sangre para los menores de 16 años, de 25 microgramos para los adultos y de 40 microgramos para las personas que trabajan con este metal. Los valores superiores a estos niveles se consideran envenenamiento.

En relación al agua potable, dicho Ministerio ha fijado un límite de no más de 0.01 mg/l de concentración de plomo, habiéndolo expresado en la NSO 13.07.01:08, AGUA. AGUA POTABLE (Segunda actualización), que define “potable” como el agua que es apta para el consumo humano y que cumple con los parámetros físicos, químicos y microbiológicos establecidos en dicha norma (MINSAL, 2009).

Para suelo, existen diferentes marcos regulatorios para considerar si un suelo está contaminado con plomo; distintos países consideran diversas concentraciones, como se muestra en la siguiente Tabla 2.1.

	Normas de plomo en suelo en mg/kg para distintos países			
Tipo de suelo	Brasil	México	Canadá	Alemania
Rural	200	n.d.	375	n.d.
Residencial	350	500	500	400
Industrial	1200	n.d.	1000	1000

n.d. = datos no disponibles

Tabla 2.1 Normas para plomo en suelo en algunos países. (Adaptado de Bustinza, 2008)

En el presente estudio se toman de referencia los valores reconocidos por la EPA 40 CFR Part 745, 2001, por ser los que utiliza el MARN para suelo; dichos valores consideran 400 mg/kg de plomo en suelos donde juegan niños y 1200 mg/kg de plomo en otros sitios.

2.4.1 Procesos de transporte del plomo desde el suelo.

Las especies químicas asociadas a la fase acuosa del suelo están sujetas al movimiento del agua del suelo, y se pueden transportar desde la zona vadosa hacia el agua subterránea.

Para estimar la movilidad del plomo disuelto en agua hacia la matriz del suelo, deben considerarse distintos factores tanto físicos como químicos que intervienen en la transferencia de solutos al sustrato mineral; estos son procesos complejos en los que interactúan las condiciones del flujo superficial y vertical del agua y las características estructurales y fisicoquímicas del suelo.

El transporte vertical del plomo y otros metales pesados a través del perfil del suelo ocurre mediante *disolución* en el agua de la zona vadosa; la disolución depende tanto de las características físicas y químicas del suelo como de las especies químicas del plomo presente. El grado de avance vertical se relaciona con la química de la solución acuosa y con la composición de la matriz del suelo (McLean, 1992).

La movilización de metales en la matriz del suelo puede ser afectada por mecanismos de adsorción y de precipitación; esto previene el movimiento de los metales hacia el agua subterránea; sin embargo, los cambios en las condiciones ambientales del suelo, tal como la degradación de la matriz orgánica, cambios de pH y potencial redox, o los cambios en la composición de la solución acuosa del suelo (zona vadosa), pueden inducir la movilidad de de las distintas especies minerales (McLean, 1992).

2.4.2 El agua en el suelo

El agua subterránea existe en dos zonas diferentes, una se encuentra inmediatamente debajo de la superficie del suelo, junto con espacios llenos de aire, constituyendo la zona insaturada o zona vadosa; la otra zona subyace a la primera y por tener todos los espacios llenos de agua, se conoce como zona saturada. La recarga de la zona saturada ocurre por infiltración de agua desde la superficie, a través de la zona insaturada.

Desde el punto de vista químico, el agua en la zona vadosa disuelve los minerales nativos de la matriz del suelo, y otros minerales que pudieran estar presentes, para formar *iones*. Un ion es un átomo o grupo de átomos que ha perdido o ganado electrones, con esto adquiere carga eléctrica; si la carga es positiva se denominan cationes y si es negativa, aniones. Los metales existen en la disolución del suelo como iones libres (cadmio, Cd^{2+} ; plomo, Pb^{2+}) o formando iones complejos (CdHCO_3^+ , Cr(OH)^{-4}) (Fuentes Yagüe, 1994).

Las principales propiedades del sustrato suelo-agua que determinan los distintos tipos de especies iónicas, tanto del plomo como de otros metales, son: el potencial de acidez (pH), los procesos redox (ORP) y el contenido de materia orgánica; estas propiedades definen la mayor o menor solubilidad en agua y la interacción de las especies iónicas con las distintas fracciones del suelo. Debido a esto, es necesario determinar variables como el pH y el potencial redox (p_e) en la matriz del suelo, para estimar la interacción química entre el sustrato y el contaminante, es decir, entre el suelo y el plomo depositado.

Esta interacción se puede visualizar mediante *diagramas redox* que muestran las diferentes especies químicas del plomo, que pueden estar presentes en el agua del suelo, según distintos valores de pH y ORP, como se muestra en la Figura 2.3; cada una de estas especies químicas tiene sus características de solubilidad y movilidad en el medio acuoso. A valores de pH menor a 7, medio ácido, y valores de p_e (potencial redox) de 0 a 20, predomina el plomo en forma iónica, es decir, como ion Pb^{+2} el cual es completamente soluble en agua; sin embargo, la movilidad del plomo no solo depende de su solubilidad, ya que la interacción iónica con los componentes del suelo tiene un papel determinante.

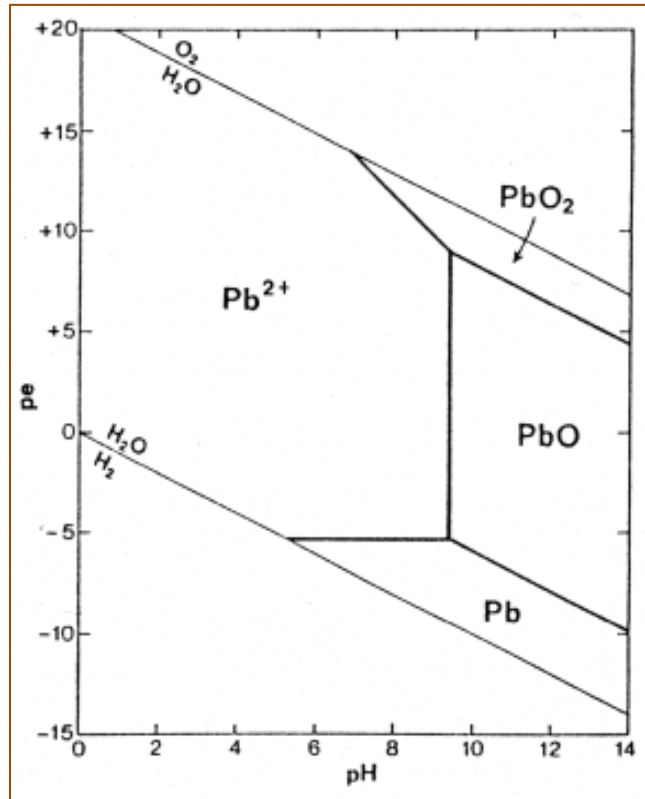


Fig. 2.3 Especies químicas del plomo a distintos valores de pH y p_e en disolución acuosa (Appello & Postma, 1994).

2.4.2.1 Influencia del pH.

El potencial de acidez (pH) es un número logarítmico que representa la concentración de iones de hidrogeno en solución acuosa; en este caso, se refiere al agua en el suelo.

Desde el punto de vista de los iones metálicos asociados a la fase acuosa del suelo, el pH del sistema suelo-agua es un parámetro muy importante, influenciando directamente la adsorción/desorción, la disolución/precipitación, la formación de complejos y las reacciones de oxidación/reducción.

El pH afecta varios mecanismos de la retención de los distintos iones metálicos por la matriz del suelo. La dependencia del pH de las reacciones de la adsorción de metales catiónicos se debe, en parte, a la adsorción preferencial de la especie hidrolizada del metal con respecto al ion libre del mismo metal.

2.4.2.2 Influencia del ORP

El potencial redox en una muestra de suelo, es la medida del potencial o de la disponibilidad electroquímica de electrones dentro de la matriz del suelo. Una reacción química en la cual una transferencia de electrones ocurre se llama *proceso de oxidación-reducción*.

Los iones metálicos que ganan electrones están experimentando la reducción; en caso contrario, se están oxidando. Una medida del potencial redox (disponibilidad de electrones) indica si los metales están en estado de oxidación o de reducción en la disolución del suelo (zona vadosa).

En los suelos, las condiciones reductoras son causadas por la ausencia del oxígeno, es decir, ambiente anaerobio, debido a que el oxígeno es utilizado o consumido en una mayor tasa de la que puede ser transportado en la matriz del suelo.

Las reacciones redox pueden afectar el transporte de contaminantes. En general, la *oxidación* condiciona la retención de metales en suelos, mientras que la *reducción* contribuye a la migración acelerada. La movilidad de los iones metálicos en suelo es influenciada por el tipo y composición de un suelo dado, por la concentración del metal de interés, por la concentración y tipo de otros iones presentes (orgánicos e inorgánicos), el pH y el estado redox.

2.4.3 Propiedades fisicoquímicas del suelo.

El suelo se forma a partir de la desintegración y descomposición de las rocas, por acción de agentes físicos, químicos y biológicos, para formar distintos minerales.

El agua interviene en los mecanismos de disolución, hidratación e hidrólisis de los minerales; y provee un medio que favorece distintas reacciones químicas como la descomposición de la materia orgánica y la actividad biológica; también intervienen el oxígeno (oxidación) y el dióxido de carbono (carbonatación).

Una de las fracciones más importantes de los suelos son las arcillas y diversos minerales como óxidos e hidróxidos; debido a sus propiedades fisicoquímicas, estos minerales también forman el *complejo coloidal*, responsable de la mayor parte de la actividad fisicoquímica del suelo y está constituido, sobre todo, por *arcilla* y *humus* (Fuentes Yagüe, 1994).

Las arcillas son silicatos de aluminio cuya estructura contiene oxígeno, silicio y aluminio; el silicio y el aluminio pueden ser sustituidos por otros cationes de menor valencia originando un déficit de carga positiva; con esto, la partícula de arcilla adquiere carga negativa.

El humus es una materia orgánica que contiene ácidos húmicos y fúlvicos, y sus partículas tienen carga negativa por lo que se comporta como ácido débil.

El plomo agregado al suelo reacciona con arcillas, fosfatos, sulfatos, carbonatos, hidróxidos y materia orgánica, de tal forma que la solubilidad del plomo es notablemente reducida. A valores de pH mayores que 6, el plomo es adsorbido por arcillas o forma carbonatos (McLean, 1992).

2.4.3.1 Adsorción de cationes en el suelo

Algunos compuestos al disolverse en agua se disocian en iones y al mezclarse con el agua del suelo interactúan con las partículas coloidales que tienen carga negativa, por lo que atraen y retienen a los iones de carga positiva; este fenómeno se conoce como *adsorción* y se refiere a la retención de cationes por atracción electrostática; este tipo de interacción se ilustra en la Figura 2.4; este mecanismo aplicaría a los cationes de los distintos estados de oxidación del ion plomo, Pb^{+2} , el cual se considera parte del grupo conocido como *metales pesados*, que incluye al cadmio y al mercurio; estos pueden sustituir a algunos de los cationes normalmente encontrados en suelo, por ejemplo al calcio y al magnesio.

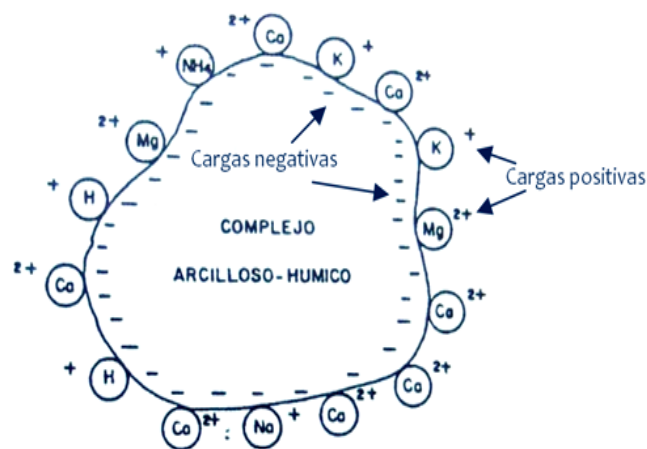


Fig. 2.4 Adsorción de cationes en el complejo arcilloso-húmico del suelo (Modificado de Fuentes Yagüe, 1994).

Como grupo, los metales pesados presentan un comportamiento fisicoquímico similar en la matriz del suelo (McLean, 1992), y son considerados en conjunto como carga contaminante al subsuelo cuando son generados por descargas de vertidos y lixiviados industriales que no son controlados adecuadamente (Foster et al., 2002).

Tessier, et al (1979), mediante extracción secuencial en muestras de suelo, han encontrado y separado metales pesados en las siguientes fracciones, susceptibles de ser afectadas por distintas condiciones ambientales:

- i) fracción intercambiable; constituida por arcillas, óxidos hidratados de hierro y manganeso y ácidos húmicos; cambios en la composición iónica del agua pueden afectar los procesos de sorción-desorción
- ii) fracción unida a carbonatos; esta fracción es susceptible a cambios de pH
- iii) ligado a óxidos de hierro y manganeso e hidróxidos; este tipo de unión es termodinámicamente inestable en condiciones anóxicas, es decir, valores bajos de p_e
- iv) enlazado a materia orgánica formando complejos organometálicos; en medio acuoso y en condiciones oxidantes, la materia orgánica puede degradarse liberando iones metálicos
- v) fracción unida a silicatos.

La determinación de la movilidad de los metales pesados se basa en la cantidad relativa de iones metálicos en la fracción intercambiable (i) que retiene las formas iónicas móviles y en la fracción (ii) por la cantidad de iones asociados a la fracción unida a carbonatos (Vanêk, et al, 2005).

2.5 CARACTERIZACIÓN DEL PLOMO COMO CARGA CONTAMINANTE

Los contaminantes pueden ser afectados en el transporte y la transformación por muchos procesos de atenuación, que no son directamente comparables uno a otro. Sin embargo, a pesar de los efectos sobre el comportamiento del contaminante, se expresan en un sentido más amplio, ya sea en la *retardación* o en la *degradación* de la carga contaminante.

La retardación influye en la disminución de la movilidad debido a que la velocidad de transporte disminuye en relación al flujo de agua, siendo este un factor que se toma en cuenta en la vulnerabilidad intrínseca. Sin embargo, la retardación no puede reducir la carga

contaminante, sino que proporciona un tiempo de reacción adicional para los procesos de degradación.

La degradación es la pérdida permanente de la carga contaminante hacia un sistema de flujo de agua subterránea. Se manifiesta en bajos valores de concentración del contaminante, el cual puede ser no solo desintegrado, sino también transformado irreversiblemente (McLean, 1992).

Para estimar el peligro de que la contaminación superficial de origen antrópico alcance al agua subterránea, es necesario identificar y clasificar las fuentes potenciales de contaminación. Con este propósito, se aplica la metodología POSH desarrollada por Foster, et al, en 2002. Este método toma en cuenta dos características fundamentales:

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

De acuerdo con la metodología POSH, el impacto potencial de los metales pesados puede variar de acuerdo a posibles cambios en las condiciones fisicoquímicas del suelo (Eh y pH), que pueden generar plumas de contaminación en el ambiente subterráneo; en la Figura 2.4 se muestra cómo estos parámetros influyen en el impacto de la carga contaminante al subsuelo, en relación a los distintos grados de *atenuación*, expresada como *degradación* y *retardación*, de algunos tipos de contaminantes, incluyendo metales pesados.

Para los objetivos del presente trabajo, el método POSH se detalla en el Capítulo III.

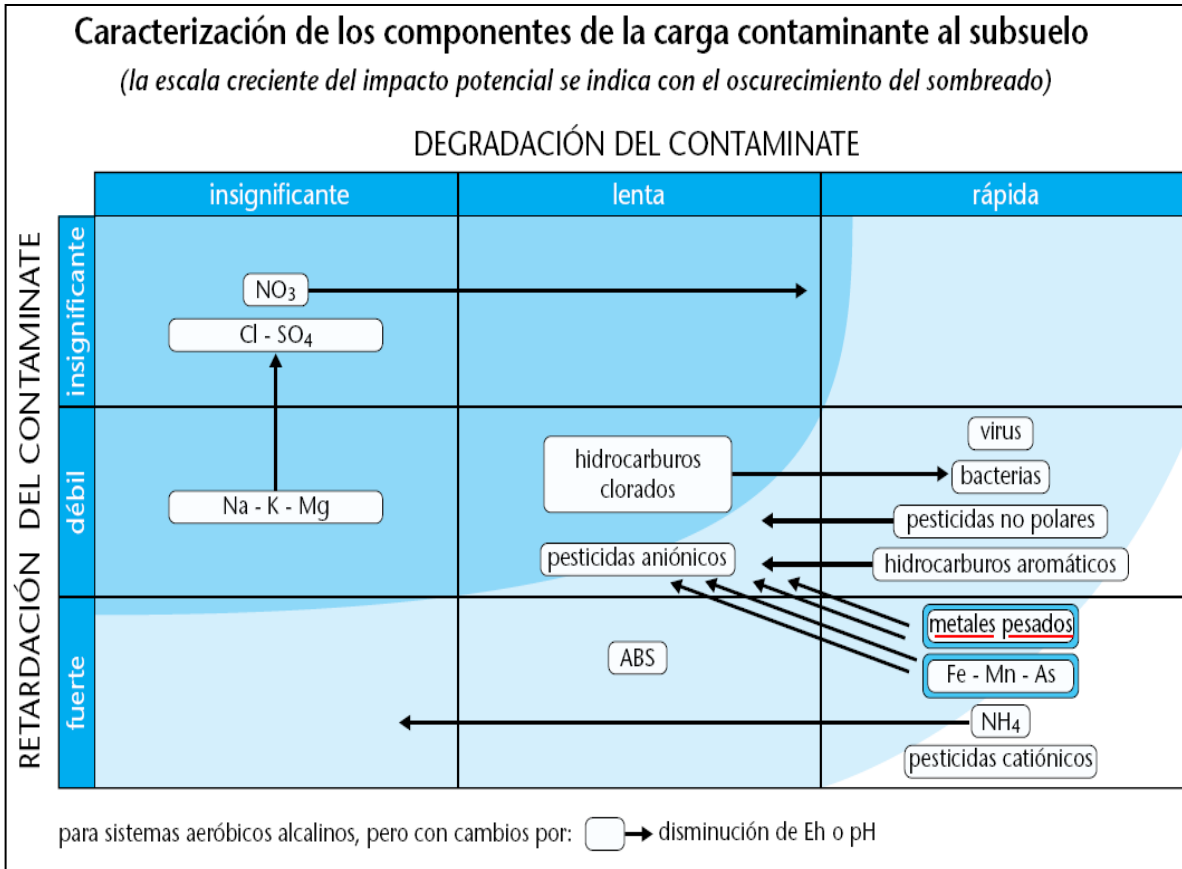


Fig.2.5. Caracterización de la carga contaminante al subsuelo, considerando la influencia del pH y del potencial de óxido reducción (Adaptado de Foster et al., 2002).

CAPITULO III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Con el propósito de definir y sustentar el enfoque metodológico y el diseño experimental de la presente investigación, las actividades se realizaron en tres ámbitos complementarios:

- Redacción
- Actividades de campo
- Tratamiento y análisis de muestras en laboratorio

La etapa de redacción del presente documento, inició con la recopilación de información sobre geología e hidrogeología y revisión de investigaciones previas realizadas en la zona de estudio. Se consultó literatura para documentar las consecuencias ambientales de la contaminación por plomo en suelo en relación al agua subterránea, así como para identificar y explicar los procesos químicos y físicos que afectan la movilidad de las distintas especies químicas del plomo.

Se consideró la aplicación de la metodología POSH que caracteriza las fuentes potenciales de contaminación a partir de un inventario de empresas industriales, siguiendo como guía la propuesta metodológica “Protección de la Calidad del Agua Subterránea: guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales” de Foster et al. (2002).

Para los objetivos de la presente investigación, la guía metodología POSH no aborda el ámbito del riesgo de contaminación al agua subterránea, solamente comprende la evaluación del peligro de contaminación. Citado textualmente: “Debe señalarse aquí, sin embargo, que no está dentro del alcance de la presente Guía la evaluación del riesgo que tal peligro representa para los usuarios del agua, en términos de la exposición a contaminantes” (Foster et al., 2002, p.7).

Para evaluar el riesgo de contaminación del agua subterránea en el área de estudio, se tomó como guía base el documento “COST Action 620 Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers”, editado por F. Zwahlen en 2003. En este documento se expone un método específico para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos kársticos; sin embargo, el concepto de riesgo y su adaptación al análisis de

consecuencias adversas específicas por amenaza de contaminación al agua subterránea, que se propone en dicho documento, es aplicable a otro tipo de acuíferos toda vez que se haya evaluado previamente su vulnerabilidad a la contaminación.

Como antecedente en la región centroamericana puede mencionarse el trabajo de Canto et al. (2009), desarrollado en la península de Yucatán, que utilizaron los métodos GOG, DRASTIC y AVI para evaluar la vulnerabilidad y los conceptos para evaluación del riesgo de contaminación al agua subterránea explicados en la COST Action 620 (Zwahlen, 2003).

Partiendo de la delimitación de la zona de estudio, el desarrollo de las actividades de campo incluyó la selección de puntos para medición de conductividad hidráulica vertical y medición de niveles estáticos en pozos excavados; al mismo tiempo, se colectaron muestras de agua de pozos y muestras de suelo para su tratamiento y análisis en laboratorio, con el fin de determinar la presencia de plomo; también se realizó un inventario de fuentes potenciales de contaminación.

Con esta información, se prepararon bases de datos integradas a una plataforma de Sistema de Información Geográfica (SIG) para elaborar mapas temáticos que representan antecedentes cartográficos de la zona de estudio y la información necesaria para elaborar los mapas de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero y de los peligros potenciales de contaminación; luego, se procesaron los resultados de concentraciones de plomo para evaluar el riesgo de contaminación por plomo en el agua subterránea que subyace al sitio de estudio; paralelamente, se avanzaba en la asesoría y en la elaboración del documento escrito, más la preparación de la presentación y defensa del trabajo.

3.1 DISEÑO METODOLÓGICO.

El diseño metodológico comprende las siguientes actividades:

- Definición de sitios de muestreo, teniendo en cuenta su localización y usos del suelo.
- Elaboración del plan de muestreo, considerando representatividad y manejo de las muestras de suelo y agua de pozos excavados.
- Elaboración de un inventario de pozos excavados.
- Recolección de muestras de agua de pozos y de suelo.

- Análisis de muestras de agua y de suelo en laboratorio para medición de concentraciones de plomo y de parámetros fisicoquímicos como el potencial de acidez (pH) y el potencial de óxido reducción (ORP).
- Comparación de resultados en relación a concentraciones de plomo de referencia.
- Revisión de información litológica y medición de niveles estáticos en pozos excavados.
- Realización de pruebas para obtener coeficientes de permeabilidad, utilizando un permeámetro Guelph en distintos tipos de suelo de la zona de estudio.
- Realizar un inventario de fuentes potenciales de contaminación.
- Cartografía de la vulnerabilidad, de los peligros de contaminación y del riesgo de contaminación por plomo.

3.1.1 Criterios para la recolección de muestras de suelo y de agua de pozos.

Los criterios se establecieron al delimitar la zona de estudio, considerando el tipo y usos de los pozos en viviendas rurales, además de las distintas características de la geología local, usos del suelo (agrícola, habitacional, camino vecinal) y los permisos para ingresar a los sitios de muestreo.

3.1.1.1 Muestreo de agua de pozos.

El propósito de esta actividad fue obtener muestras de agua subterránea de pozos excavados, tal como es extraída por sus propietarios; siendo el criterio de selección, que los pozos estuvieran en uso para consumo humano y demás tareas domésticas.

Se elaboró un inventario de pozos excavados, el cual se detalla en el Anexo III-1. Todos los pozos excavados del inventario se consideraron para medición de los niveles estáticos, que servirían para elaborar el mapeo de la profundidad del agua subterránea.

Del inventario, se seleccionaron 5 pozos para medición in situ del pH y del ORP como parámetros fisicoquímicos y para obtener 5 muestras de agua, una por cada pozo seleccionado, que serían evaluadas para determinar concentraciones de plomo.

Las muestras de agua se filtraron con filtro de 0.45 μm y se acidificaron con ácido nítrico al 37%, in situ, previo a su análisis de plomo, como se detalla en el Anexo III- 3.

3.1.1.2 Muestreo de suelos.

Se definieron 30 sitios de muestreo, dentro de la zona de estudio, de donde se colectó igual número de muestras de la superficie del suelo, durante 6 campañas de muestreo realizadas durante los meses de noviembre 2009 hasta septiembre 2010.

Para obtener concentraciones preliminares de plomo en suelo, se analizaron las muestras colectadas después de cada campaña y antes de la siguiente; de esta manera, se definió un sitio de muestreo en el que se encontró la máxima concentración de plomo; de este lugar, se colectaron 4 muestras adicionales para obtener un perfil vertical desde 0 cm a 45 cm., considerando que el suelo puede presentar textura y composición diferente con la profundidad.

Frecuentemente, la distribución de algunos elementos traza, incluyendo metales pesados, se da en perfil vertical; cuando se sospecha contaminación en un suelo, el análisis de las concentraciones en un perfil de profundidad, hasta 50 cm por ejemplo, es de interés para estudios de movilidad de dichos elementos. La excavación manual es adecuada para casi todos los tipos de suelo. Al realizar la excavación, todo el suelo removido debe ser apilado en un lado, en el orden en que ha sido extraído, de modo que el perfil vertical de la pared del agujero se mantenga para fines de muestreo. Se retira y descarta todo tipo de vegetación y escombros (IAEA, 1997).

En el presente estudio, las muestras se recogieron en bolsas de plástico con cierre hermético para preservar las condiciones de humedad en que fueron obtenidas y se rotularon, siguiendo protocolos detallados en Anexo III-4, los sitios de muestreo se indican en la Figura 3.1.

3.2 ENSAYOS DE INFILTRACIÓN.

Para los objetivos del presente trabajo, la importancia de estimar la infiltración básica en distintos puntos de la zona de estudio, radica en que la infiltración es uno de los factores que contribuye a los procesos de transporte de contaminantes desde la zona insaturada hacia el agua subterránea.

Las pruebas de infiltración son un componente de la estimación de la recarga de un acuífero, para evaluar su potencial de extracción de agua subterránea; también son útiles, entre otros parámetros, en la determinación de los aportes de solutos al agua subterránea.

La permeabilidad del suelo es un factor que puede estimarse mediante ensayos de infiltración; estos ensayos se realizaron con un permeámetro Guelph, para obtener mediciones de la *conductividad hidráulica saturada de campo* K_{fs} (ms^{-1}), en la zona insaturada. La tasa de infiltración de agua en un suelo con determinada textura, es la que se obtiene con el permeámetro Guelph; es decir, se obtiene la infiltración básica del suelo, f_s , y con ello es posible calcular la K_{fs} . Este método mide el flujo de recarga necesario para mantener una profundidad constante de agua en un pozo cilíndrico realizado por encima del nivel freático. Utilizando el principio de Mariotte para establecer y mantener el nivel de agua y medir la recarga correspondiente (Dafonte, et al. 1999).

Los sitios donde se realizaron los ensayos de infiltración se muestran en la Figura 3.1.

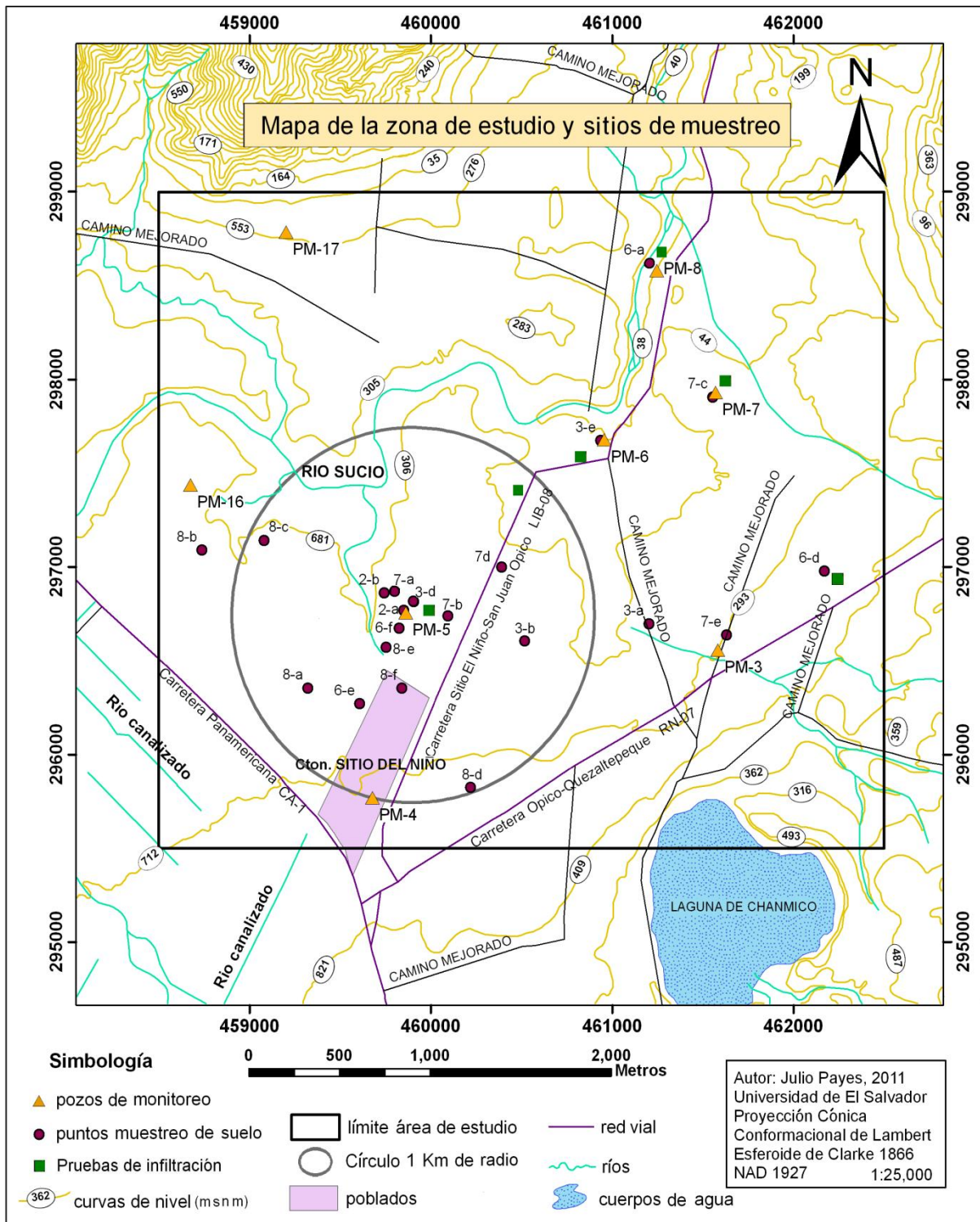


Figura 3.1 Mapa de ubicación de los sitios de muestreo de suelos, pozos excavados y ensayos de infiltración.

3.3 METODOLOGÍA ANALÍTICA

Se realizaron análisis tanto físicos como químicos a las muestras de agua de pozos y a las muestras de suelo; unos análisis se realizaron en campo y otros en laboratorio.

Agua subterránea: se midió en campo la temperatura, el potencial de acidez (pH) y el potencial de óxido reducción (ORP), en los pozos seleccionados. Las concentraciones de plomo en agua fueron determinadas en un laboratorio privado, empleando la absorción atómica con HGA como técnica de análisis.

Suelo: las muestras fueron analizadas por el autor en el laboratorio de preparación de muestras del Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares de la Universidad de El Salvador, se realizaron mediciones de pH y ORP y análisis de concentraciones de plomo total.

3.3.1 Medición de pH y ORP.

Para las mediciones de pH y ORP realizadas en las distintas matrices señaladas en el apartado anterior, se utilizó una sonda multiparámetros portátil marca YSI modelo 556 MPS y sus respectivas soluciones de calibración; el protocolo de medición de estos parámetros en suelo se detalla en el Anexo III-5.

3.3.2 Análisis de plomo en suelo aplicando fluorescencia de rayos X

Luego de la recolección de muestras y previo a su medición analítica, se procedió a realizar la preparación del suelo en diferentes etapas, las cuales consistieron en procesos de cuarteo, pulverización y tamizado del material; el procedimiento se describe en el Anexo III-6.

Para determinar concentraciones de plomo en suelo, se empleó una técnica analítica nuclear denominada espectrometría de fluorescencia de rayos X. Esta técnica consiste en el análisis del espectro de emisiones fluorescentes, generado por una muestra de suelo que recibe radiación ionizante desde una fuente de excitación radiactiva.

Un programa computacional procesa dichas emisiones como *señales analíticas*, cuya intensidad es *proporcional* a la concentración; en otras palabras, entre más alta las concentraciones de los elementos químicos en una muestra, mayor será la tasa de conteos de las señales analíticas provenientes de la muestra al ser expuesta a una fuente radiactiva. Los conteos se registran como conteos/segundo (cps) o como conteos/minuto (cpm).

Los elementos químicos tienen su espectro de emisión característico, siendo esta propiedad la que permite *identificar* y *cuantificar* la concentración de cada elemento químico presente en una matriz dada. En el presente estudio se cuantificaron las concentraciones de plomo, como elemento químico, en la matriz suelo.

Como fuente radiactiva, se utilizó una fuente de excitación de Americio-241 de 140 mBq marca Isotope Products Laboratories, un detector de Silicio modelo XR-100CR marca AMPTEK y el programa de computadora QXAS versión 1.2 del IAEA.

3.3.2.1 Procedimiento analítico.

Se prepararon 6 patrones de referencia de suelo utilizando como base un Material de Referencia Certificado de suelo denominado IAEA/SOIL-7 (IAEA, 1984) y óxido de plomo (PbO) grado Reactivo Analítico. A cada una de 6 porciones de material base, se agregó PbO en cantidades previamente calculadas, para obtener un lote de suelos con concentraciones conocidas de plomo. Posteriormente, se midió la señal analítica de cada material así preparado. Con estos datos, se realizó un diagrama de dispersión, siendo las variables la “concentración de plomo en los materiales de referencia” y la “señal analítica”; la línea de tendencia del diagrama no mostró una relación lineal entre las variables, pero permitió evaluar el grado de correlación; la ecuación de la línea de tendencia se consideró como un modelo matemático que describe la relación “señal analítica (cps)” vs. “concentración de Pb” en la matriz suelo. Con dicha ecuación se calculó por interpolación, la concentración de plomo en cada muestra, a partir de su señal analítica correspondiente.

Estos resultados se presentan tabulados en el Capítulo IV.

3.4 METODOLOGÍA PARA EVALUACIÓN DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN.

La evaluación del riesgo de contaminación implica la estimación de 3 factores: la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, la valoración de la carga contaminante aplicada al subsuelo como resultado de las actividades antrópicas y la estimación del impacto a la salud humana o a los ecosistemas.

El primer factor se representa como un mapa que muestra la zonificación de la vulnerabilidad, y se considera como el primer paso para evaluar el peligro o riesgo de contaminación.

El segundo factor implica el uso de la metodología POSH (Foster, et al., 2002), que relaciona el origen del contaminante (Pollutant Origin) y su sobrecarga hidráulica (Surcharge Hydraulically). Este método inicia considerando las actividades potencialmente generadoras de contaminación, en la zona de estudio, que pueden originar emisiones de contaminantes. Estas emisiones producen cargas contaminantes al subsuelo que pueden alcanzar el ambiente subterráneo. En la práctica, se debe realizar un *inventario* de fuentes potencialmente contaminantes como etapa fundamental en la ejecución de un programa de protección de las aguas subterráneas, porque las cargas contaminantes determinan la existencia o no de contaminación (Hirata, 2002).

Para el tercer factor se propone utilizar el *índice de potencial de contaminación del agua subterránea*, considerado en Foster, et al., 2002, para asociarlo al *impacto* por la posible generación de una pluma contaminante a partir del análisis de riesgo de las concentraciones de plomo que se encuentren en el subsuelo en la zona de estudio.

La interacción entre los factores mencionados provee las bases metodológicas para la evaluación de los *peligros de contaminación* y establecer los niveles de acción prioritarios para el control de la carga contaminante que conlleva al *riesgo de contaminación* del agua subterránea.

Posteriormente, se presentan esquemas conceptuales de la evaluación del peligro y de los niveles de priorización para el control de la contaminación del agua subterránea.

3.4.1 Estimación de la vulnerabilidad: metodología GOD.

Como primera fase, la evaluación de la vulnerabilidad del agua subterránea en la zona de estudio, se realizó aplicando el sistema GOD propuesto por Hirata, Foster, et al en 2002 y recomendado por el CEPIS, este método supone que la vulnerabilidad del acuífero depende de la inaccesibilidad de la zona saturada a la penetración de contaminantes y a la capacidad de atenuación de los estratos que se encuentran por encima de la zona saturada como resultado de su retención física y la reacción química con los contaminantes (Foster e Hirata, 1991). No hace referencia a los procesos de transporte de contaminantes en la zona saturada.

El método considera dos componentes básicos incidentes en la vulnerabilidad de un acuífero:

- 1) el grado de inaccesibilidad hidráulica de la zona saturada, a ser alcanzada por sustancias contaminantes, y
- 2) capacidad de atenuación de contaminantes, de los estratos suprayacentes a la zona saturada

La evaluación de estos componentes depende de factores que no siempre están disponibles, pero que pueden ser estimados a partir de información fácilmente accesible, como se muestra en la Tabla 3.1.

COMPONENTE DE LA VULNERABILIDAD	INFORMACIÓN HIDROGEOLÓGICA	
	idealmente requerida	normalmente disponible
Inaccessibilidad Hidráulica	grado de confinamiento del acuífero profundidad al agua subterránea o al techo del acuífero contenido de humedad de la zona no saturada conductividad hidráulica vertical de los estratos de la zona no saturada o de las capas confinantes	tipo de acuífero profundidad al agua subterránea o al techo del acuífero confinado
Capacidad de Atenuación	distribución del tamaño de granos y fisuras en la zona no saturada o en las capas confinantes mineralogía de los estratos de la zona no saturada o capas confinantes	grado de consolidación/fisuración de estos estratos características litológicas de estos estratos

Tabla 3.1 Factores hidrogeológicos que controlan la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos (Tomado de Foster et al., 2002).

Por lo anteriormente expuesto, el método GOD estima la vulnerabilidad del acuífero en función de las siguientes variables, detalladas en la Figura 3.1, y que están asociadas a un puntaje de acuerdo a su capacidad de atenuación:

- **G**rado de confinamiento hidráulico del acuífero en consideración. Establece las categorías de no confinado, no confinado-cubierto, semiconfinado y surgente. A cada categoría se asigna un índice que va de 0 a 1.0.
- **O**currencia del sustrato suprayacente (zona no saturada o capas confinantes) que implica la caracterización litológica, grado de consolidación y fracturamiento de la zona suprayacente al acuífero. Esta variable establece un índice que fluctúa entre 0.4 a 1.0
- **D**istancia al agua determinada como: la profundidad al nivel del agua en acuíferos no confinados o la profundidad del estrato litológico confinante en acuíferos confinados. La estimación de este parámetro implica un índice que varía de 0.6 a 1.0.

En la práctica, la estimación de las variables mencionadas comprende las siguientes fases:

- primera, identificar el grado de confinamiento hidráulico del acuífero
- segunda, especificar las características del sustrato suprayacente a la zona saturada del acuífero en términos de: (a) grado de consolidación (teniendo en cuenta la probable presencia o ausencia de permeabilidad por fisuras) y (b) tipo de litología (considerando indirectamente porosidad efectiva, permeabilidad y contenido de humedad en la zona no saturada)
- tercera, estimar la distancia o profundidad al nivel del agua (en acuíferos no confinados) o profundidad al techo del primer acuífero confinado.

En consecuencia, el grado de confinamiento y la distancia al agua subterránea corresponden a la inaccesibilidad hidráulica, mientras que la ocurrencia del sustrato litológico concierne a la capacidad de atenuación de contaminantes en la zona insaturada.

El índice final integrado de vulnerabilidad de acuíferos GOD es el producto de los índices obtenidos para cada uno de estos parámetros en áreas específicas del sitio de trabajo. Se obtienen puntajes que varían de 0 a 1.0; el índice “0” indica vulnerabilidad despreciable y el índice “1” se asocia a una vulnerabilidad extrema a la contaminación del acuífero.

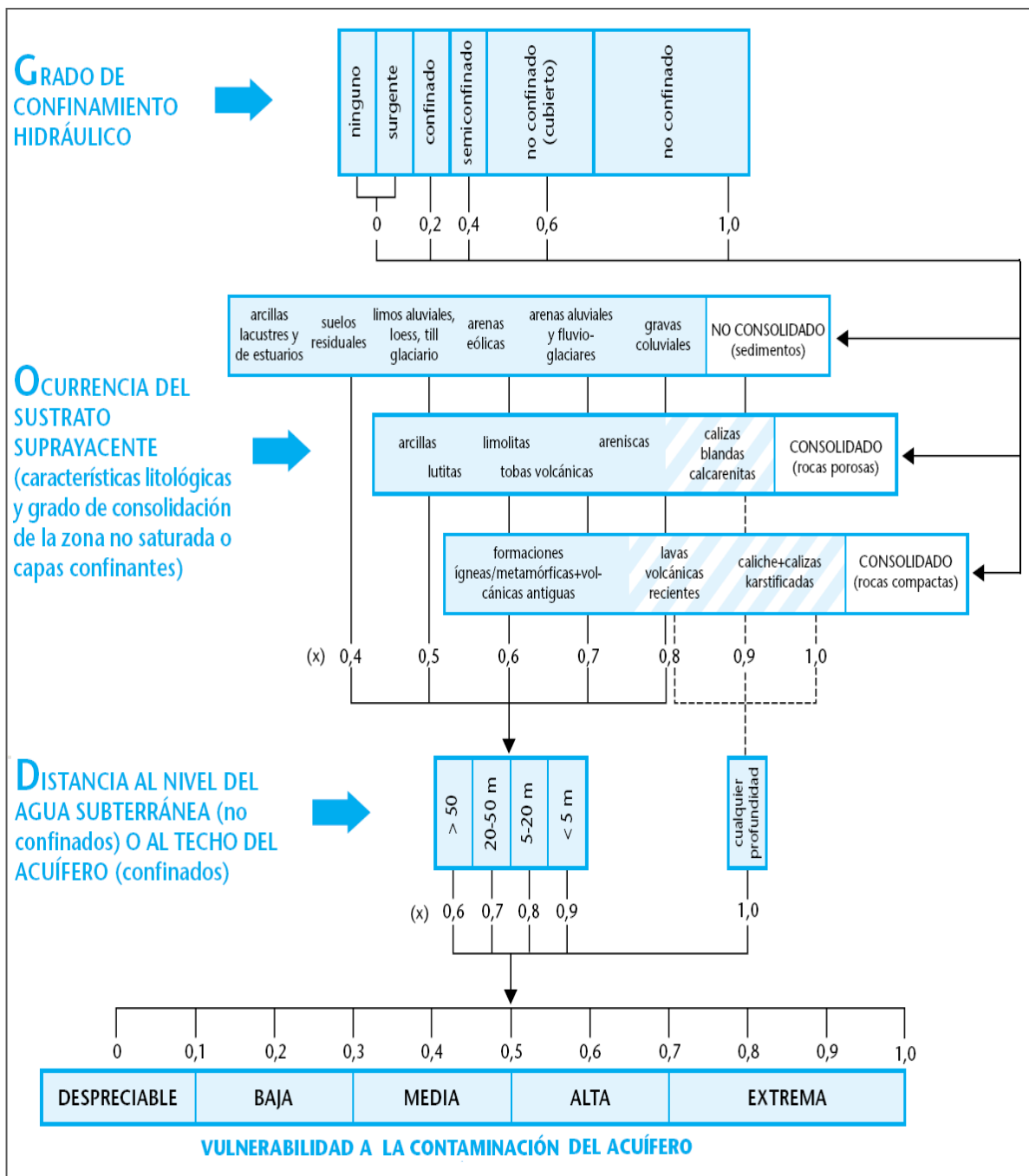


Figura 3.2 Método GOD para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos. (Foster et al., 2002)

La clasificación de las categorías de la vulnerabilidad GOD se muestra en la Tabla 3.2.

Definición práctica de clases de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos	
CLASE DE VULNERABILIDAD	DEFINICIÓN CORRESPONDIENTE
Extrema	vulnerable a la mayoría de los contaminantes con impacto rápido en muchos escenarios de contaminación
Alta	vulnerable a muchos contaminantes (excepto a los que son fuertemente absorbidos o fácilmente transformados) en muchos escenarios de contaminación
Moderada	vulnerable a algunos contaminantes sólo cuando son continuamente descargados o lixiviados
Baja	sólo vulnerable a contaminantes conservativos cuando son descargados o lixiviados en forma amplia y continua durante largos períodos de tiempo
Despreciable	presencia de capas confinantes en las que el flujo vertical (percolación) es insignificante.

Tabla 3.2 Clasificación de la vulnerabilidad y su definición (Foster et al., 2002).

3.4.1.1 Cartografía de la vulnerabilidad GOD.

La cartografía de distribución espacial de la vulnerabilidad GOD fue elaborada creando una base de datos con la información de campo y bibliográfica, en una plataforma de sistema de información geográfica, la cual fue procesada con el software *ArcGIS 9.3*, que ofrece la facilidad de generar e integrar todos los mapas necesarios para conformar el mapa local de vulnerabilidad.

Los mapas asociados a cada índice del método GOD, fueron reclasificados según los rangos que establece dicho método, luego fueron convertidos a formato Raster y finalmente, con las opciones de la extensión *Spatial Analyst*, se realizó el proceso de álgebra de mapas para obtener el mapa de vulnerabilidad GOD a la contaminación del agua subterránea en la zona de estudio. Un esquema conceptual se presenta en la Figura 3.2 y los resultados se detallan en el subsiguiente Capítulo IV.

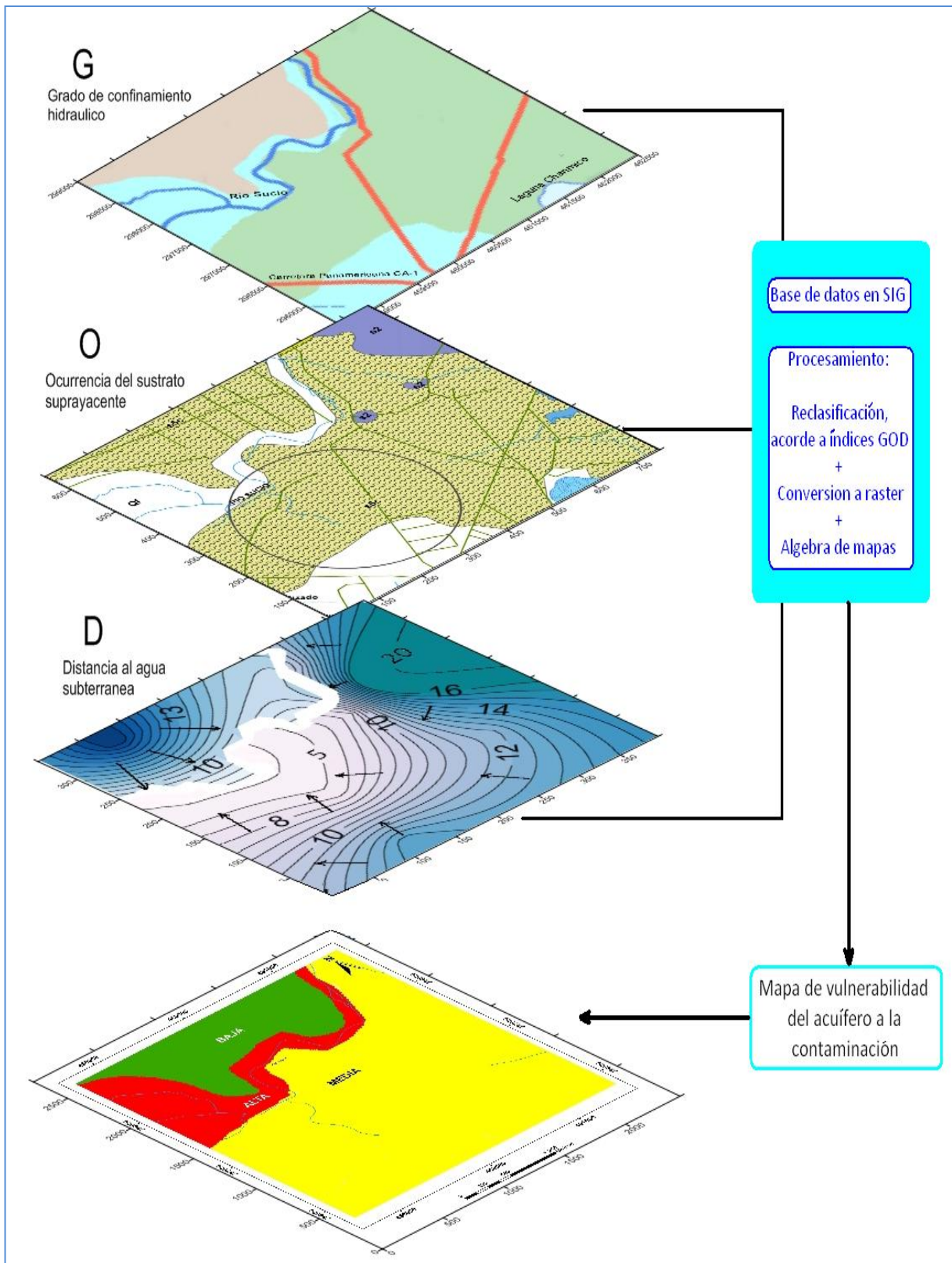


Figura 3.3. Esquema del proceso de cartografía de la vulnerabilidad GOD.

3.4.2 Metodología POSH.

La estimación de la carga contaminante al acuífero, es la otra etapa de evaluación del riesgo. Partiendo de un inventario de las fuentes potenciales de contaminación en la zona de estudio, el método POSH involucra la clasificación de las mismas, para estimar la carga contaminante al subsuelo. El diseño del inventario de fuentes potencialmente contaminantes comprende la identificación, localización espacial y la caracterización sistemática de todas las fuentes; esta información sirve de base para la evaluación de cuáles actividades tienen el mayor potencial de generación de cargas contaminantes peligrosas para el subsuelo.

3.4.2.1 Inventario de fuentes potenciales de contaminación.

Para los objetivos del presente estudio, el propósito del inventario fue identificar las fuentes potenciales de contaminación puntual, es decir, de los emprendimientos industriales en la zona. El alcance, se definió como la identificación del emprendimiento según su rótulo comercial y que estuviere ubicado en carreteras o caminos transitables; en cuanto a su localización espacial, el inventario se limitó al área de estudio y zonas aledañas, anotando sus coordenadas geográficas con ayuda de un equipo GPS marca Garmin, modelo GPS map 76CSx. Las tareas de reconocimiento en campo y trabajo de escritorio fueron realizados por el autor.

La actividad comercial de cada emprendimiento se obtuvo de anuncios comerciales en Internet y en la guía telefónica (Hirata, 2002).

La siguiente etapa consistió evaluar cada emprendimiento para clasificarlo siguiendo el método POSH y caracterizar la carga contaminante (Foster et al., 2002; Hirata, 2002).

Durante el inventario, es necesario tener en cuenta las diversas formas de clasificación de las fuentes potenciales de cargas contaminantes al subsuelo. Sin embargo, para el tipo de inventario simplificado propuesto por Foster et al., en 2002, es conveniente caracterizar las fuentes potenciales de cargas contaminantes al subsuelo sobre la base de dos características:

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

Esta información no está fácilmente disponible y es generalmente necesario realizar las siguientes hipótesis de simplificación:

- asociar la posibilidad de presencia de una sustancia contaminante del agua subterránea con el tipo de actividad antrópica
- estimar la sobrecarga hidráulica probable sobre la base del uso del agua en la actividad relacionada

Así, el procedimiento de evaluación de las actividades potencialmente contaminantes utilizada en la metodología POSH se basa en dos características fácilmente estimables: el origen del contaminante y su sobrecarga hidráulica.

El método POSH genera tres niveles cualitativos de “potencial de generación de una carga contaminante al subsuelo”: reducido, moderado y elevado; en cuanto a las actividades industriales, su categorización se realiza en función de su potencial de generar una carga contaminante al subsuelo, tomando en cuenta:

- el tipo de industria involucrado, ya que esto controla la probabilidad de que algunos contaminantes peligrosos sean usados
- la sobrecarga hidráulica probable asociada con la actividad industrial, estimada por el volumen de agua utilizado

Todas estas consideraciones se esquematizan en la siguiente Tabla 3.3.

Teniendo en cuenta lo anterior, el inventario de los emprendimientos industriales en la zona de estudio y su clasificación con el método POSH, se presenta en el Anexo I-1.

Este inventario y la estimación de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero, constituyen las bases para evaluar el *peligro de contaminación del agua subterránea* por la actividad industrial en la zona.

POTENCIAL POR GENERACIÓN DE CARGA CONTAMINANTE AL SUBSUELO	FUENTE DE CONTAMINACIÓN				
	disposición de residuos sólidos	sitios industriales*	lagunas de efluentes	urbanas varias	exploración minera y petrolera
Elevado	residuos de industrias tipo 3, residuos de origen desconocido	industrias tipo 3, cualquier actividad que maneje >100 kg/d de sustancias químicas	todas las industrias tipo 3, cualquier efluente (excepto aguas residuales residenciales) si el área >5 ha		operación de campos de petróleo, minas metalíferas
Moderado	precipitación >500 mm/a con residuos residenciales/ industriales tipo 1/ agroindustriales, todos los otros casos	industrias tipo 2	agua residual residencial si el área >5 ha, otros casos que no figuran arriba o abajo	gasolineras, rutas con tráfico regular de sustancias químicas peligrosas	algunas minas/ canteras de materiales inertes
Reducido	precipitación <500 mm/a con residuos residenciales/ industriales tipo 1/ agroindustriales	industrias tipo 1	efluente residencial, urbano mezclado, agroindustrial y minero no metalífero si el área <1 ha	cementerios	
<p>* los terrenos contaminados por industrias abandonadas deberían tener la misma categoría que las propias industrias</p> <p>Industrias tipo 1: carpinterías, fábricas de alimentos y bebidas, destilerías de alcohol y azúcar, procesamiento de materiales no metálicos</p> <p>Industrias tipo 2: fábricas de caucho, pulpa y papel, textiles, artículos eléctricos, fertilizantes, detergentes y jabones</p> <p>Industrias tipo 3: talleres mecánicos, refinerías de gas y petróleo, manufacturas de pesticidas, plásticos, productos farmacéuticos y químicos, curtidurías, fábricas de artículos electrónicos, <u>procesamiento de metal</u></p>					

Tabla 3.3 Clasificación y categorización de fuentes puntuales de contaminación, método POSH (Adaptado de Foster et al., 2002).

3.4.2.2 Fuentes de Contaminación Puntual. Actividad Industrial.

La metodología POSH considera tanto fuentes puntuales como dispersas; sin embargo, para los objetivos del presente trabajo, se detallan las primeras, específicamente las fuentes industriales.

Las actividades industriales son capaces de generar una seria contaminación del suelo y cargas contaminantes de consideración al subsuelo como resultado del volumen, concentraciones y tipo de productos químicos y residuos que manipulan.

Los compuestos normalmente detectados en plumas de contaminación de aguas subterráneas relacionadas con las actividades industriales, usualmente muestran una estrecha relación con las sustancias utilizadas en la actividad industrial, las que a su vez están directamente relacionadas con el tipo de industria, como se muestra en la Tabla 3.4.

En términos del tipo de industria, se necesita poner énfasis en la posibilidad de utilización de cantidades apreciables (más de 100 kg/día) de sustancias tóxicas o peligrosas (tales como: hidrocarburos, solventes orgánicos sintéticos, metales pesados, etc.) (Hirata et. al., 1991 y 1997). En todos estos casos el índice de potencial de contaminación al subsuelo debería ser elevado ya que factores como la manipulación de productos químicos y tratamientos de efluentes no se pueden considerar debido a la dificultad general de obtener datos confiables.

Por otra parte, se considera lógico tratar cada actividad contaminante en un ambiente hidrogeológico dado, atendiendo la singularidad de cada área de evaluación (Foster, 1987); sin embargo, la complejidad de factores que afectan el transporte de contaminantes implica elevados costos en investigaciones hidrogeológicas y recursos humanos limitados (Foster e Hirata, 1991). No obstante, en el caso particular de la presente investigación, los costos de los análisis de laboratorio y del trabajo de campo han sido cubiertos.

Foster et al., (2002), han propuesto una clasificación de las actividades industriales más comunes, en relación al Índice de Peligro de Mazurec y el Índice de Contaminación Potencial del Agua Subterránea; esta clasificación se asocia a la probabilidad de que existan concentraciones problemáticas en los líquidos y/o efluentes de los procesos industriales, detallado en la Tabla 3.4.

Resumen de las características químicas e índices de peligro para actividades industriales comunes										
TIPO DE INDUSTRIA	Índice de Peligro de Mazurek (1-9)	uso relativo del agua	carga salina	carga de nutrientes	carga orgánica	hidrocarburos	patógenos fecales	metales pesados	orgánicos sintéticos	Índice de Contaminación Potencial del Agua Subterránea (1-3)
Hierro y Acero	6	**	•	•	••	••	•	••	••	2
Procesamiento de Metales	8	*	•	•	•	•	•	•••	•••	3
Talleres Mecánicos	5-8	*	•	•	•	•••	•	•••	••	3
Metales No Ferrosos	7	*	•	•	•	•	•	•••	•	2
Minerales No Metálicos	3-4	**	•••	•	•	•	•	•	•	1
Refinerías de Petróleo y Gas	7-8	*	•	••	•••	•••	•	•	••	3
Productos Plásticos	6-8	**	•••	•	••	••	•	•	•••	3
Productos de Caucho	4-6	*	••	•	••	•	•	•	••	2
Sustancias Químicas Orgánicas	3-9	**	••	•	••	•••	••	••	•••	3
Sustancias Químicas Inorgánicas	6-9	**	••	•	•	•	•	•••	•	.
Farmacéuticos	6-9	***	•••	••	•••	•	••	•	•••	3
Carpintería	2-4	*	••	•	••	•	•	•	••	1
Pulpa y Papel	6	***	•	••	••	•	•	•	••	2
Jabón y Detergente	4-6	**	••	•	••	••	••	•	•	2
Fábricas Textiles	6	***	••	••	•••	•	•	•	••	2
Curtiduría	3-8	**	•••	••	••	•	•	••	•••	3
Alimentos y Bebidas	2-4	**	••	•••	•••	•	•••	•	•	1
Pesticidas	5-9	**	••	•	•	•	•	•	•••	3
Fertilizantes	7-8	*	•••	•••	•	••	•	•	••	2
Azúcar y Alcohol	2-4	**	•••	•••	•••	••	•	•	•	2
Termoeléctricas	-	***	•	•	•	•••	•	•••	••	2
Eléctricos y Electrónicos	5-8	*	•	•	•	•••	•	••	•••	3

baja

 moderada

 alta
 }
 probabilidad de concentraciones problemáticas en líquidos y/o efluentes de procesos

Fuente: Tomado de BNA, 1975; DAME, 1981; Hackman, 1978; Luin y Starkenburg, 1978, Nemerow, 1963 y 1971; Mazurek, 1979; US-EPA, 1977 y 1980 y WHO, 1982 y otros informes menores no publicados

Tabla 3.4 Compendio de las características químicas e índices de peligro para actividades industriales comunes. (Adaptado de Foster et al., 2002).

3.5. Evaluación del peligro y del riesgo de contaminación al agua subterránea.

La evaluación del peligro de contaminación se realiza determinando los criterios de vulnerabilidad del acuífero a la contaminación a partir del índice GOD y del inventario de cargas contaminantes al subsuelo en la zona de estudio, luego se coteja su interacción empleando la metodología de Foster, et al (2002), véase la Figura 3.4.

Posteriormente, para la evaluación del riesgo se examinan las concentraciones de plomo encontradas en suelo para valorar el impacto al agua subterránea y construir el mapa de riesgo. El esquema conceptual de la evaluación del riesgo considera los análisis de *sensibilidad* y de *intensidad* del riesgo (COST Action 620; Zwhalen, 2002), explicados en el Capítulo II. Los resultados de la aplicación del esquema conceptual del riesgo a la contaminación del acuífero por plomo, se exponen en el siguiente Capítulo IV.

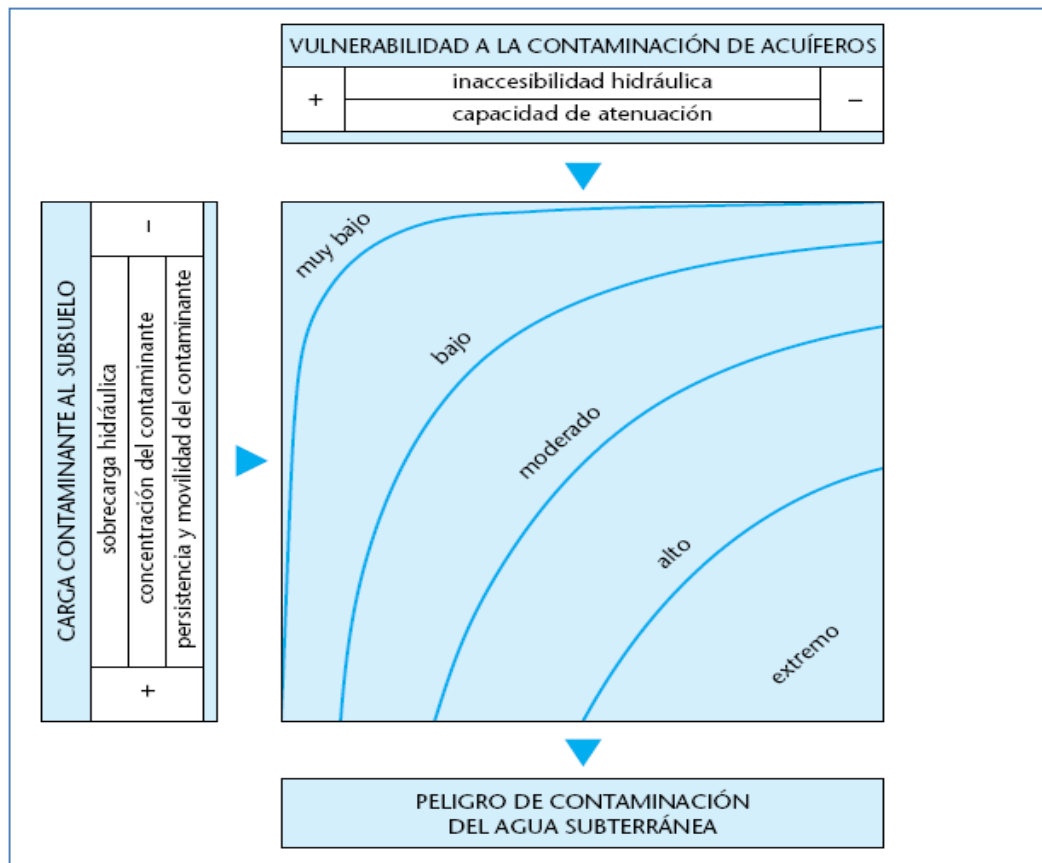


Figura 3.4 Esquema conceptual para evaluación del peligro de contaminación de los recursos hídricos subterráneos. (Foster et al., 2002)

Una vez evaluado el peligro de contaminación, es necesario iniciar acciones de mitigación y/o remediación. La metodología POSH prevé un esquema conceptual que ayuda a establecer las acciones prioritarias; en términos de control de las fuentes; el esquema se muestra en la Figura 3.5.

		ZONAS DE VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO*		
		baja	media	alta
CARGA POTENCIALMENTE CONTAMINANTE	reducida	3	3	2
	moderada	2	2	1
	elevada	2	1	1

NIVEL DE ACCIÓN
 1= alto 2= intermedio 3=bajo

* número reducido de zonas para simplificar

Figura 3.5 Niveles de acción prioritarios para el control de la contaminación del agua subterránea basados en la vulnerabilidad del acuífero y carga potencialmente contaminante (Adaptado de Foster et al., 2002).

La aplicación de la metodología POSH y de los criterios de evaluación del riesgo de contaminación de acuíferos propuesto en la COST Action 620, conllevan el desarrollo de distintas actividades y procedimientos que en conjunto contribuyen a cumplir con los objetivos propuestos y a las conclusiones generales del presente estudio. Tales actividades y procedimientos se detallan en el subsiguiente Capítulo IV.

CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSION

Se presentan resultados consistentes con los objetivos y las preguntas de investigación, conforme al alcance del estudio establecido en el Capítulo I. Los conceptos y terminología empleada se han explicado en el marco conceptual, Capítulo II. Las actividades y procedimientos se realizaron según el diseño experimental del esquema metodológico detallado en el Capítulo III.

El orden en que se presentan los resultados de la investigación se ha organizado en las siguientes partes:

- Medición de parámetros fisicoquímicos en suelo y agua de pozos y ensayos de infiltración
- Análisis y cartografía de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea
- Inventario, caracterización y mapeo de los peligros potenciales de contaminación
- Evaluación y cartografía del riesgo de contaminación por plomo al agua subterránea

Finalmente, los resultados se comentan en una discusión integral del estudio teniendo en cuenta el cumplimiento del objetivo general, expresado finalmente en la cartografía del riesgo y la aplicación de la metodología POSH representada en el mapeo de los peligros potenciales de contaminación al agua subterránea.

4.1 ANÁLISIS DE MUESTRAS AMBIENTALES Y PRUEBAS DE INFILTRACIÓN.

4.1.1 Determinación de plomo en suelos.

Las concentraciones de plomo en las distintas muestras de suelo se calcularon, según procedimiento, a partir de una ecuación de correlación obtenida de la línea de tendencia de una gráfica de dispersión realizada con materiales de referencia preparados por el autor y utilizando la fluorescencia de rayos X (XRF) como técnica analítica para las mediciones.

Los materiales de referencia son suelos certificados a los que se agregó óxido de plomo grado reactivo analítico, en cantidades previamente calculadas, para obtener concentraciones de plomo conocidas; seguidamente, se realizaron las mediciones y los cálculos necesarios.

La Tabla 4.1 muestra los datos para elaborar la curva de dispersión, con su línea de tendencia y ecuación correspondiente. En el Anexo IV-1 se incluye copia de la documentación de respaldo de los suelos certificados IAEA soil-7 y soil BCR 143.

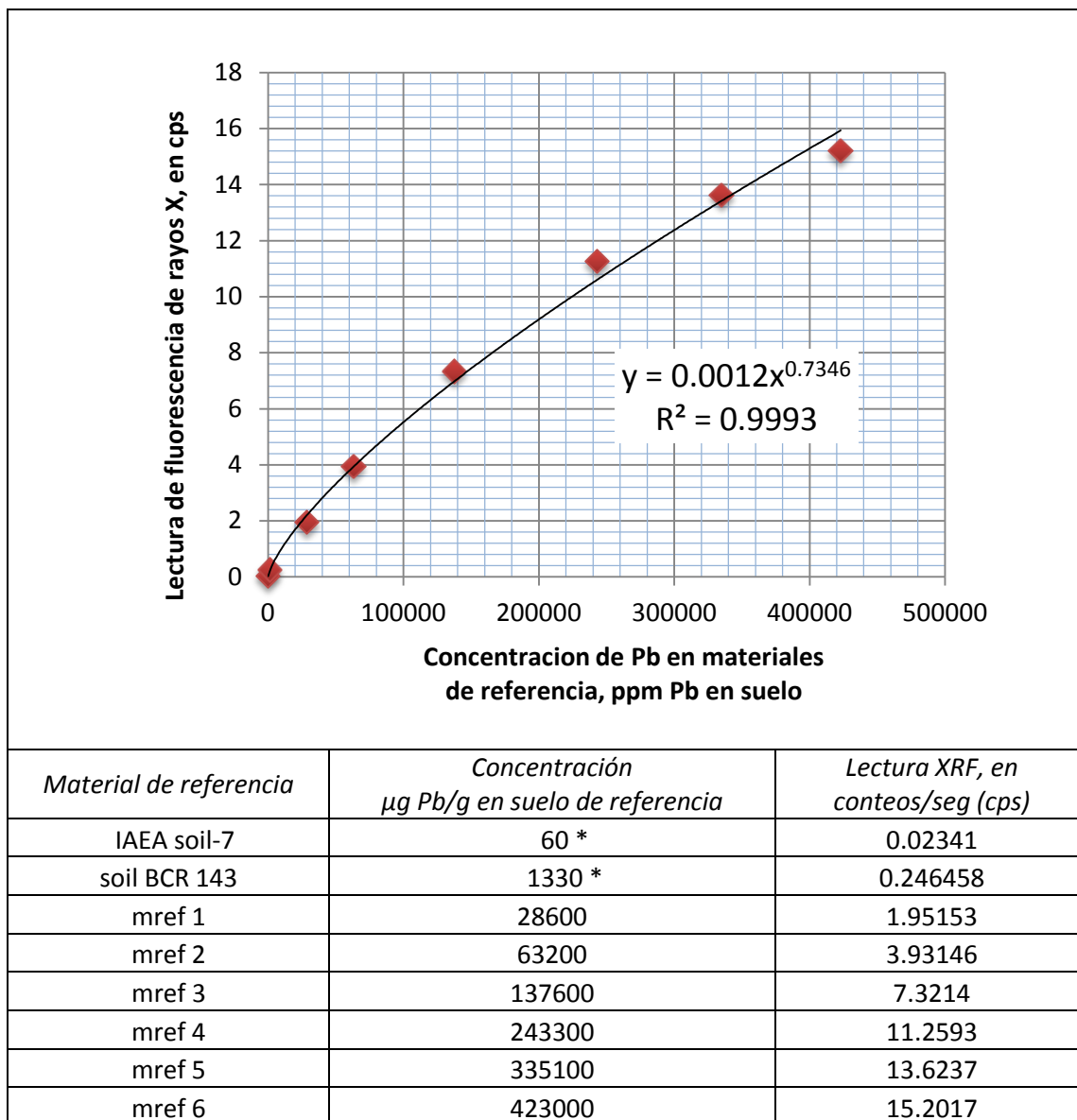


Tabla 4.1 Datos y gráfica de dispersión de lecturas de XRF en función de las concentraciones de plomo en suelos de referencia. * Concentración de plomo en suelos certificados.

Con la ecuación de la línea de tendencia, se calcularon las concentraciones de plomo en las muestras de suelo; los resultados se detallan en orden ascendente en la siguiente Tabla 4.2 y la ubicación geográfica se presenta en la Figura 3.1, del Capítulo III, exceptuando el punto 6-c, que fue recolectado en la UES, para efectos de comparación.

#	Identificación	Coordenadas Lambert		$\mu\text{g Pb/g suelo}$ (ppm)
		Longitud X	Latitud Y	
1	6-c	478337.59	288710.41	72
2	3-b	460520.88	296604.33	108
3	7-c	461556.04	297905.72	210
4	8-f	459841.68	296353.38	226
5	8-d	460222.33	295824.24	226
6	9-b	462928.21	297627.16	235
7	3-a	461205.83	296695.48	244
8	8-g	464584.10	293934.20	259
9	6-d	462173.40	296976.77	264
10	6-b	462061.67	300682.96	274
11	8-a	459325.06	296354.18	303
12	6-f	459827.16	296672.99	309
13	7-e	461632.26	296636.46	311
14	3-e	460939.98	297673.09	313
15	6-a	461208.70	298619.17	316
16	4-b	459803.43	296869.70	339
17	8-b	458740.52	297089.55	340
18	8-c	459083.01	297141.25	343
19	5-b	465217.12	293331.04	356
20	8-e	459754.91	296571.70	368
21	6-e	459610.27	296270.77	431
22	9-a	462928.00	297627.16	435
23	2-b	459746.35	296860.57	464
24	5-a	465211.10	293321.83	490
25	2-a	459852.23	296768.53	506
26	7d	460392.32	296997.86	566
27	9-c	462928.21	297627.16	698
28	7-b	460097.55	296718.67	4079
29	7-a	459905.47	296817.30	317221
30	3-d	459908.47	296814.53	339481
1	1-a	459908.47	296814.53	8457
2	1-b	459908.47	296814.53	3662
3	1-c	459908.47	296814.53	1526
4	1-d	459908.47	296814.53	1095

Tabla. 4.2 Concentraciones de plomo encontradas en las muestras de suelo y su ubicación geográfica, las últimas cuatro muestras corresponden al subsuelo de un perfil vertical.

En la Figura 4.1 a continuación, se presenta la distribución espacial de las concentraciones de plomo encontradas en la zona de estudio, específicamente en el área circular de 1 km de radio, previamente definida, con centro en el sitio de muestreo 3-d, donde se encontró la máxima concentración de plomo.

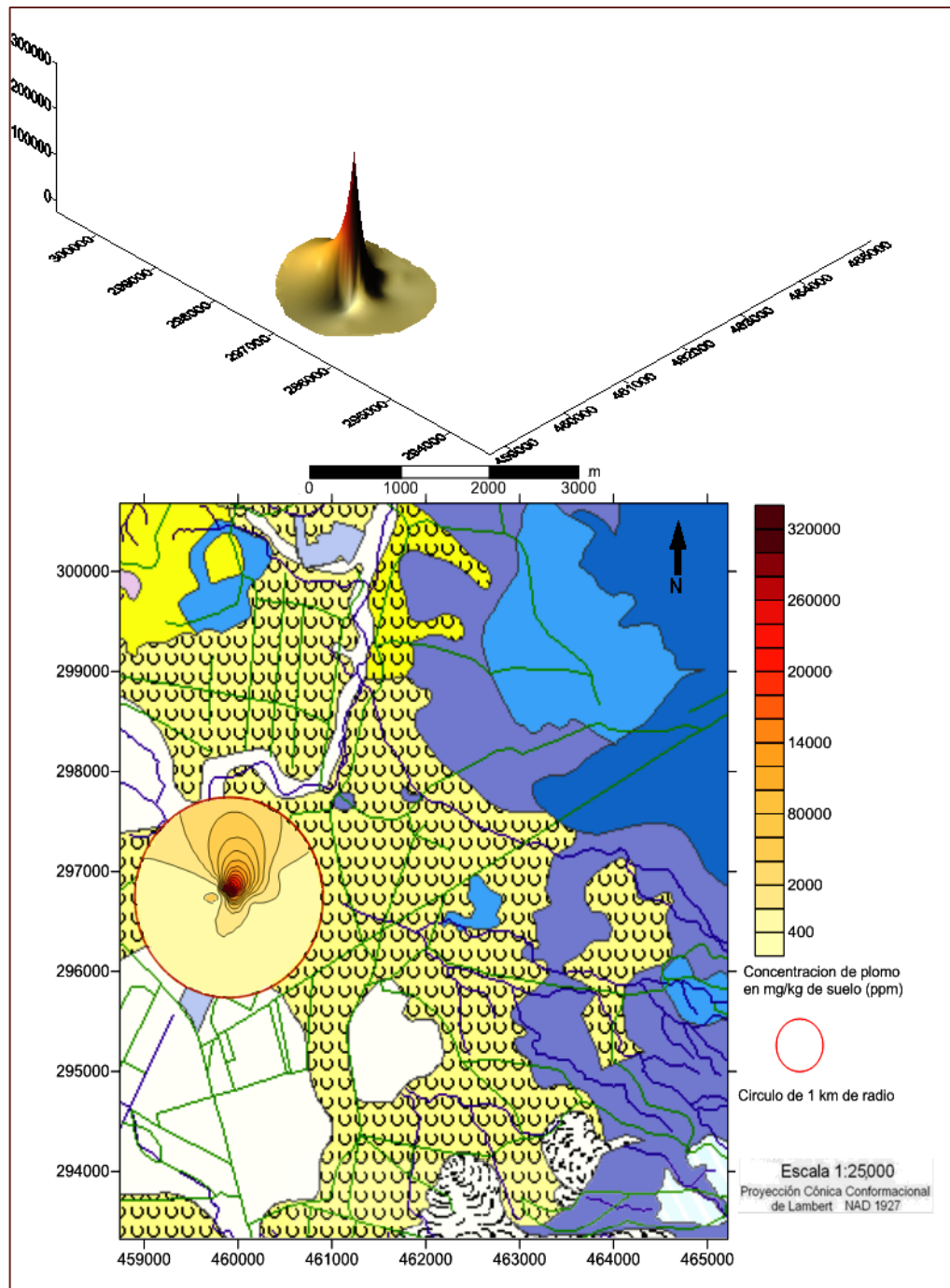


Figura 4.1. Distribucion superficial de plomo en suelo en el área circular, expresado en partes por millon (ppm).

En el sitio 3-d, de más alta concentración de plomo, se colectaron muestras en un perfil de profundidad para observar el comportamiento de la movilidad del plomo hacia el subsuelo.

La gráfica de dispersión de la profundidad del perfil vertical en función de las concentraciones de plomo, permitió obtener una línea de tendencia y su ecuación correspondiente. Se utilizó la ecuación de dicha gráfica para hacer 3 extrapolaciones con las cuales se estimó la profundidad a la que se alcanzaría el límite de concentración de plomo ambientalmente permisible, es decir, 400 ppm de acuerdo con la normativa de referencia (EPA 40 CFR Part 745, 2001); según este modelo de avance vertical, la capacidad de atenuación del subsuelo *se supone* efectiva hasta los 90 cm, para este sitio de muestreo.

Es imperativo aclarar que esta aproximación es orientativa y es válida para las condiciones de pH y potencial de redox al momento de efectuar el muestreo de suelos.

Los resultados se presentan en la Tabla 4.3 y en la Figura 4.2.

Código de la muestra	Concentración de Pb en partes por millón, ppm (mg Pb/kg suelo)	Profundidad (cm)
3-d	339481	1
1-a	8457	10
1-b	3662	25
1-c	1526	35
1-d	1095	45
Extrapolación 1	800	57
Extrapolación 2	600	69
Extrapolación 3	400	90

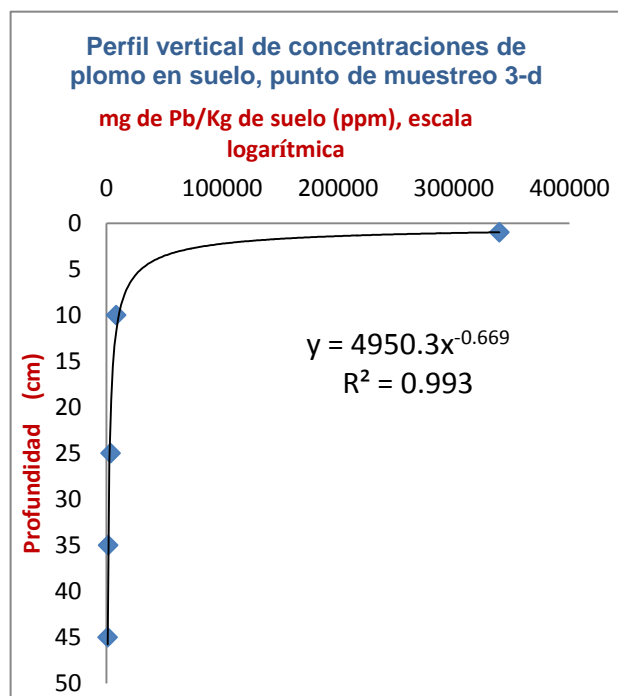


Tabla 4.3 Concentraciones de plomo en perfil de profundidad en punto de muestreo 3-d.

Figura 4.2 Gráfica del perfil de profundidad de las concentraciones de plomo en suelo.

Los parámetros de pH y potencial de óxido reducción (ORP, expresado como pe), fueron medidos en las muestras de suelo del perfil de profundidad; con los datos obtenidos, se realizaron dos tipos de análisis. Uno de los análisis consistió en observar, mediante una

gráfica, las variaciones del pH y del p_e con respecto a la profundidad, para detectar tendencias; el segundo análisis consistió en evaluar ambos parámetros en un diagrama de estabilidad (p_e -pH) de los estados de oxidación del plomo, para estimar el posible estado químico del plomo hallado en el perfil vertical; los resultados se muestran en la Tabla 4.4.

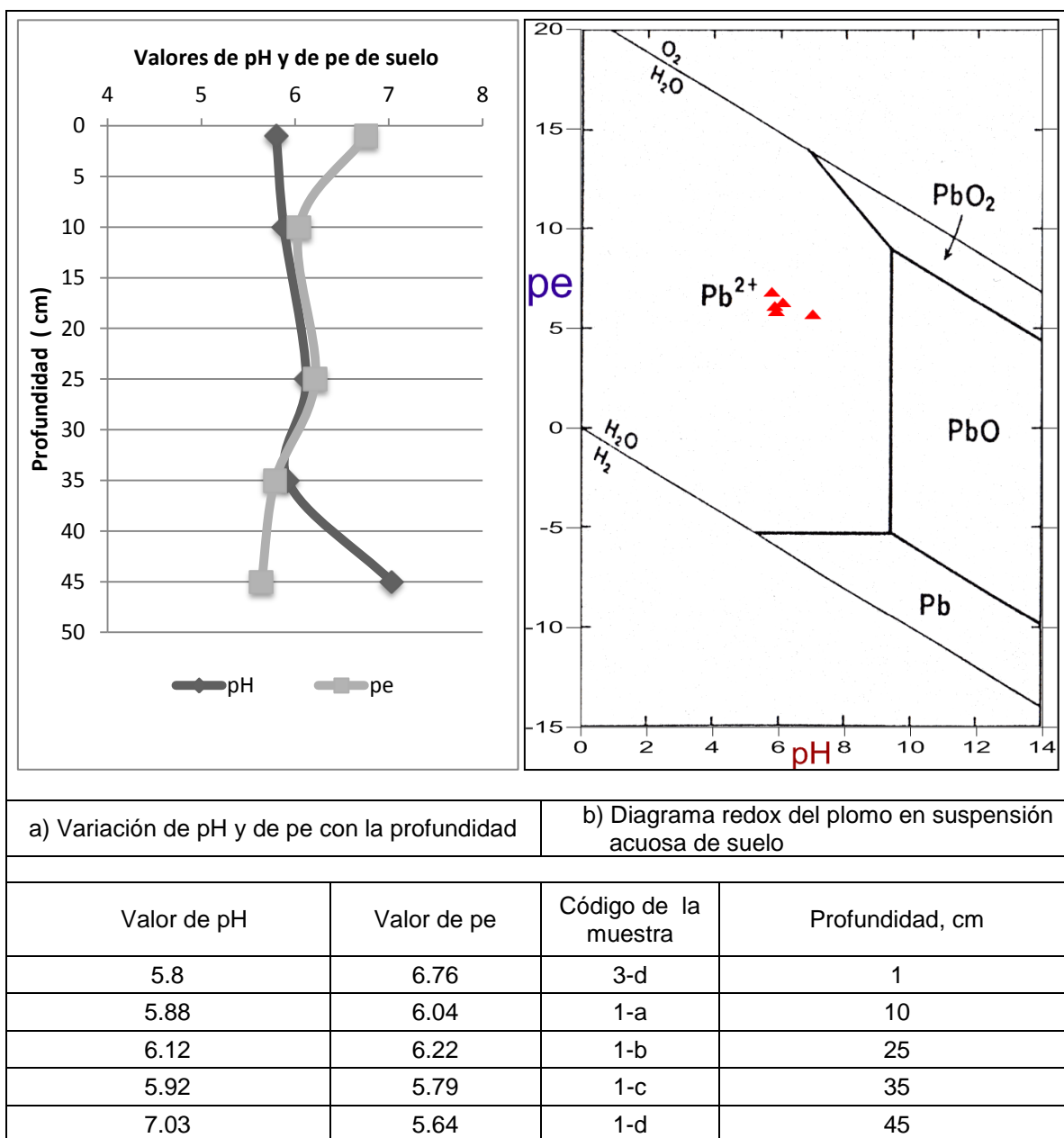


Tabla 4.4. Análisis de variaciones del pH y del ORP en suelo: a) variación con la profundidad, b) diagrama p_e - pH de las especies químicas del plomo en el perfil de profundidad.

La tendencia del pH es hacia valores cercanos a la neutralidad a medida que se avanza en profundidad en el subsuelo, esto favorece la formación de especies químicas estables del plomo; los valores del ORP no muestran variaciones significativas.

En cuanto al análisis de diagrama $pe - pH$, los resultados muestran condiciones favorables para la ocurrencia del plomo en forma iónica, es decir, como Pb^{2+} ; en este estado, el plomo puede reaccionar con materiales del suelo compitiendo con otros cationes para formar compuestos complejos, o puede ser arrastrado en forma disuelta en el agua de infiltración, si hay cambios en el pH y/o en el potencial redox; véase la Figura 2.4 del Capítulo II.

4.1.2 Determinación de plomo en agua de pozos excavados.

Las muestras de agua de 5 pozos seleccionados en la zona de estudio, fueron enviadas a un laboratorio privado; véase el Anexo IV-2. Los reportes no indican concentraciones de plomo superiores a los 0.005 mg de Pb/l de agua, siendo el límite 0.01 mg/l de concentración de plomo establecido en la Norma Salvadoreña Obligatoria 13.07.01:08, AGUA. AGUA POTABLE. Durante los muestreos se midieron el pH y el potencial de óxido - reducción, como parámetros fisicoquímicos que determinan la forma iónica del plomo que pudiera estar presente, en caso de encontrarse plomo en otra campaña de muestreo. Véase la Tabla 4.5 y la Figura 4.3.

Código	pH	pe
PM-1	6.47	1.11
PM-2	6.74	0.98
PM-3	6.48	0.97
PM-4	6.7	0.54
PM-5	6.31	1.25

Tabla 4.5 Mediciones de pH-pe en agua de pozos excavados

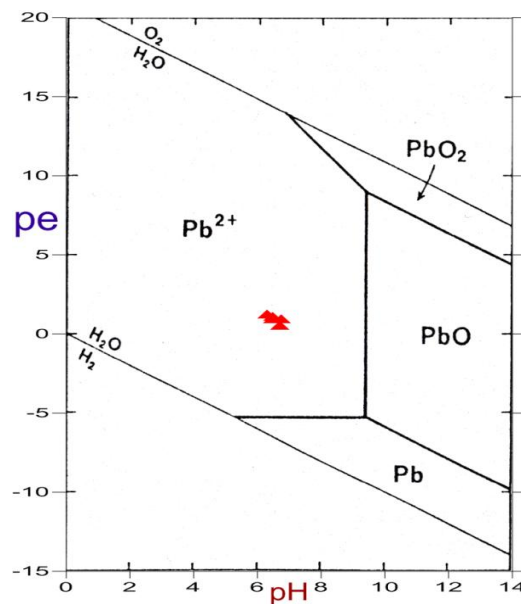


Figura 4.3 Diagrama redox del plomo en agua de pozos excavados (concentraciones menores al límite permisible)

El análisis de las condiciones redox del agua subterránea, mediante el muestreo en pozos excavados de la zona de estudio, permite inferir que de encontrarse plomo en el agua subterránea, la forma química será de tipo iónico o formando complejos con la materia mineral que pudiese estar disuelta.

4.1.3 Pruebas de infiltración.

La infiltración es uno de los factores que influye en los procesos de transporte de contaminantes.

Los ensayos de infiltración permiten estimar la permeabilidad del suelo; para realizar este ensayo se utilizó un permeámetro Guelph. Se realizaron 6 ensayos de infiltración en la zona de estudio; los sitios donde se realizaron los ensayos se muestran en la Figura 3.1.

A partir de los resultados del ensayo, se obtuvo la infiltración básica del suelo, f_s ; con este dato y con información complementaria, se procedió a calcular la constante K_{fs} y se elaboró la tabla 4.6, donde se muestran los resultados.

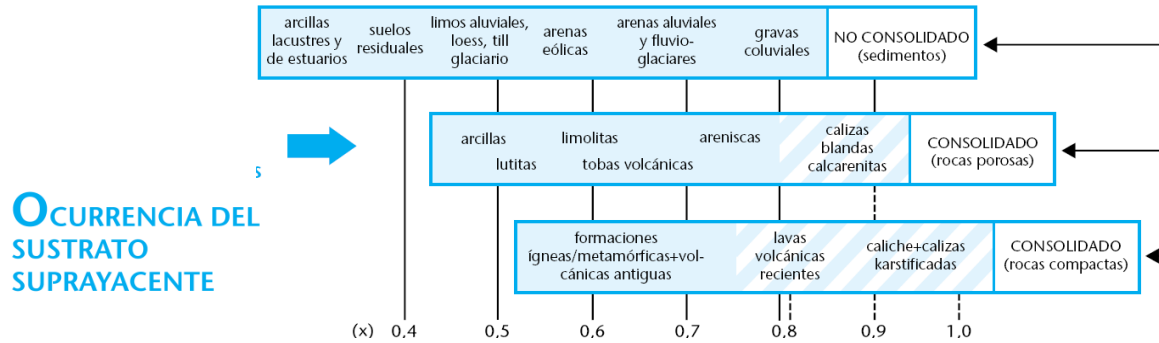
Nº	Coordenadas Lambert		Z (m)	Kfs (m/d)	Kfs (cm/s)	Ubicación	Tipo de suelo	Textura del suelo	Pendiente
	X	Y							
1	461577.10	297933.34	466	6.13	7.10E-03	Adyacente a campo de fútbol	Arenoso	Arenoso	1 - 2 %
2	459899.46	296814.24	473	3.20	3.70E-03	Detrás de ex fábrica de baterías	Aluvial	Arena media	1 - 2 %
3	460423.00	297418.81	466	0.50	5.86E-04	800 m al norte de ex fábrica de baterías Record	Aluvial	Limo-arenoso	1 - 2 %
4	460819.77	297624.10	464	0.68	7.89E-04	Lado derecho carretera a San Juan Opico	Arcilloso	Limo arcilloso	3 - 5 %
5	462173.39	296976.77	480	0.45	5.27E-04	Km. 32 Carretera a Quezaltepeque	Arenoso	Limo-Arenoso	1 - 2 %
6	461208.70	298619.17	451	0.26	3.03E-04	Contiguo cerro Ecológico	Arcilloso	Arcillo arenoso	5 - 7 %

Tabla 4.6 Resultados de los ensayos de infiltración.

El sitio No. 2 en la Tabla 4.6, corresponde al área donde se encontró las más altas concentraciones de plomo en suelo y presenta una capacidad de infiltración intermedia con respecto a los otros sitios de muestreo de suelo y la poca pendiente del terreno tendería a favorecer la infiltración más que la escorrentía..

2) Ocurrencia del sustrato suprayacente

La ponderación de las características litológicas está definida en el siguiente diagrama:



Las propiedades litológicas del área de estudio corresponden a tobas, cenizas volcánicas las cuales confieren al sustrato unas características que pueden agruparse en lavas volcánicas recientes y materiales aluviales; todos de la formación San Salvador y detallados en la Figura 1.3. Las ponderaciones asignadas se muestran en la Tabla 4.8 y en la Figura 4.7.

Miembros de la formación San Salvador	Índice O
Qf	0.90
s5b	0.75
s5c	0.75
s2	0.70

Tabla 4.8 Ocurrencia del sustrato litológico.

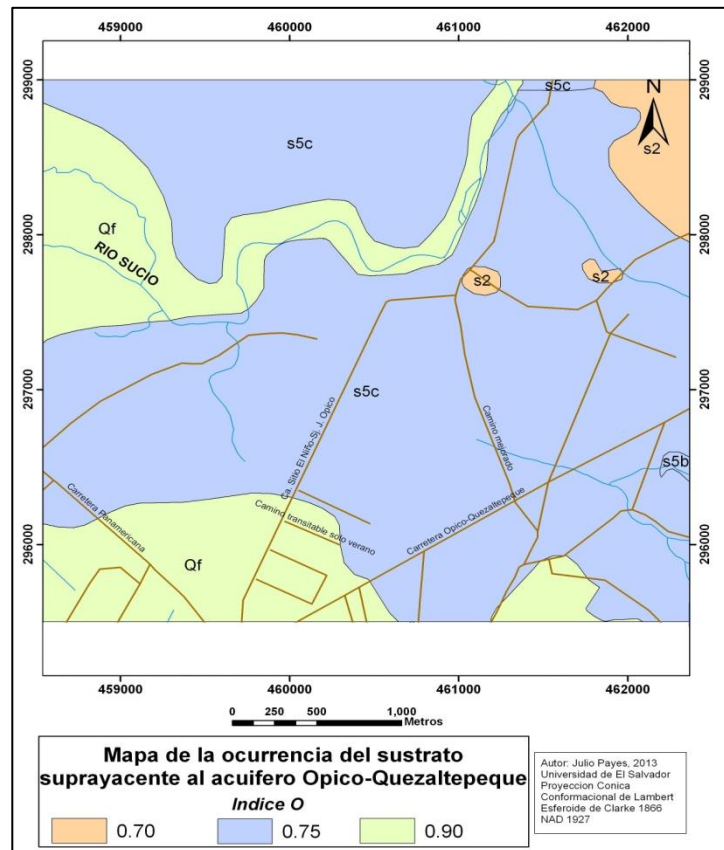
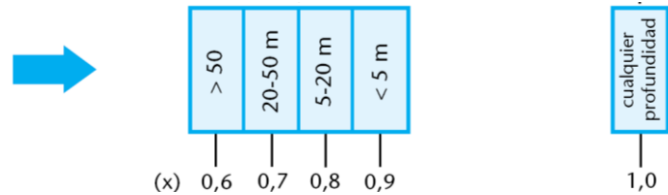


Figura 4.7 Mapa de distribución del Índice O.

3) Distancia al agua

Se toma en cuenta la profundidad del nivel del agua, a partir de mediciones de nivel en pozos excavados en la zona de estudio; este parámetro se pondera de la siguiente forma:

DISTANCIA AL NIVEL DEL AGUA SUBTERRÁNEA



Un inventario detallado de medición de niveles estáticos en pozos excavados, se encuentra en el Anexo III-1. De este inventario, se seleccionaron pozos para ilustrar la ponderación del índice D y su mapeo en la zona de estudio; véase la Tabla 4.9 y Figura 4.8.

X LAMBERT	Y LAMBERT	Distancia al agua (m)	Índice D
460417.4	293798.8	1.06	0.9
461041.7	303459.3	3.42	
458677.9	297436.8	4.9	
463617.1	302751.9	5.64	0.85
459866.3	296755.9	6.13	
460961.0	297679.2	7.22	
461250.6	298579.1	8.24	
459681.5	295769.7	11.56	0.8
460908.6	302786.6	11.8	
459707.5	302825.3	16.17	
459205.7	298785.1	16.55	
461574.0	297930.2	19.34	

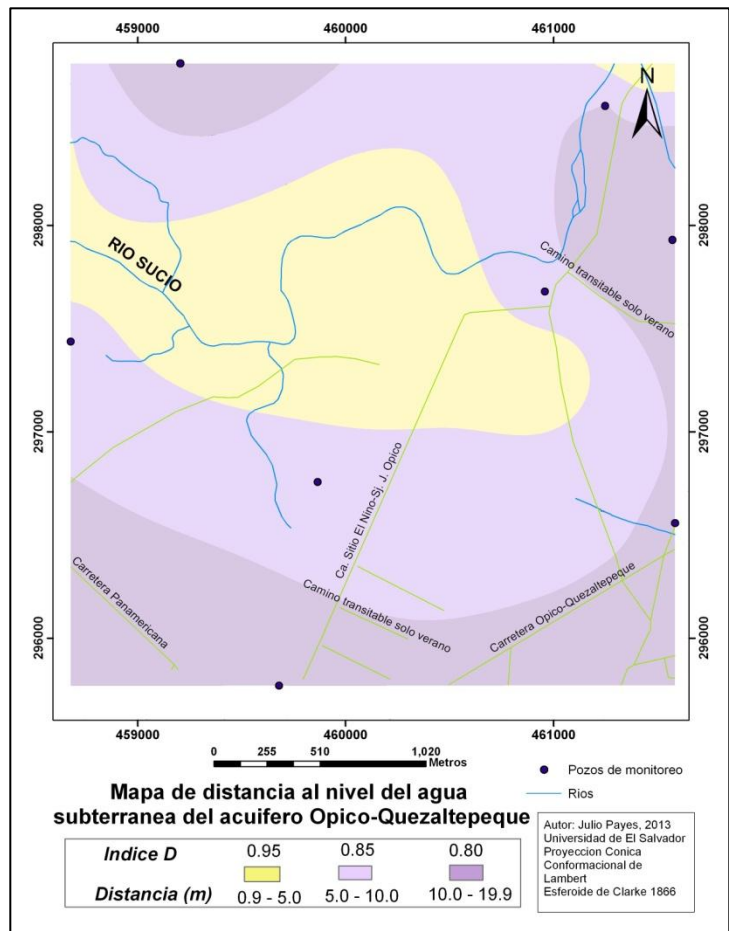


Tabla 4.9 Distancia al agua subterránea. Figura 4.8 Mapa de la distancia al agua, Índice D.

El índice de vulnerabilidad se calcula multiplicando los factores obtenidos anteriormente, tomando en cuenta la siguiente clasificación:



La superposición de los mapas del Índice G, del Índice O y del Índice D, se muestran en la Figura 4.9 correspondiendo al mapa de vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, en la cual se determinan 3 categorías: alta, media y baja, y su definición se explica en la Tabla 3.2.

La vulnerabilidad del agua subterránea es el grado de inaccesibilidad de un acuífero a los contaminantes; es función de la atenuación a la contaminación que posean sus estratos suprayacentes.

Cada formación acuífera, posee una vulnerabilidad única.

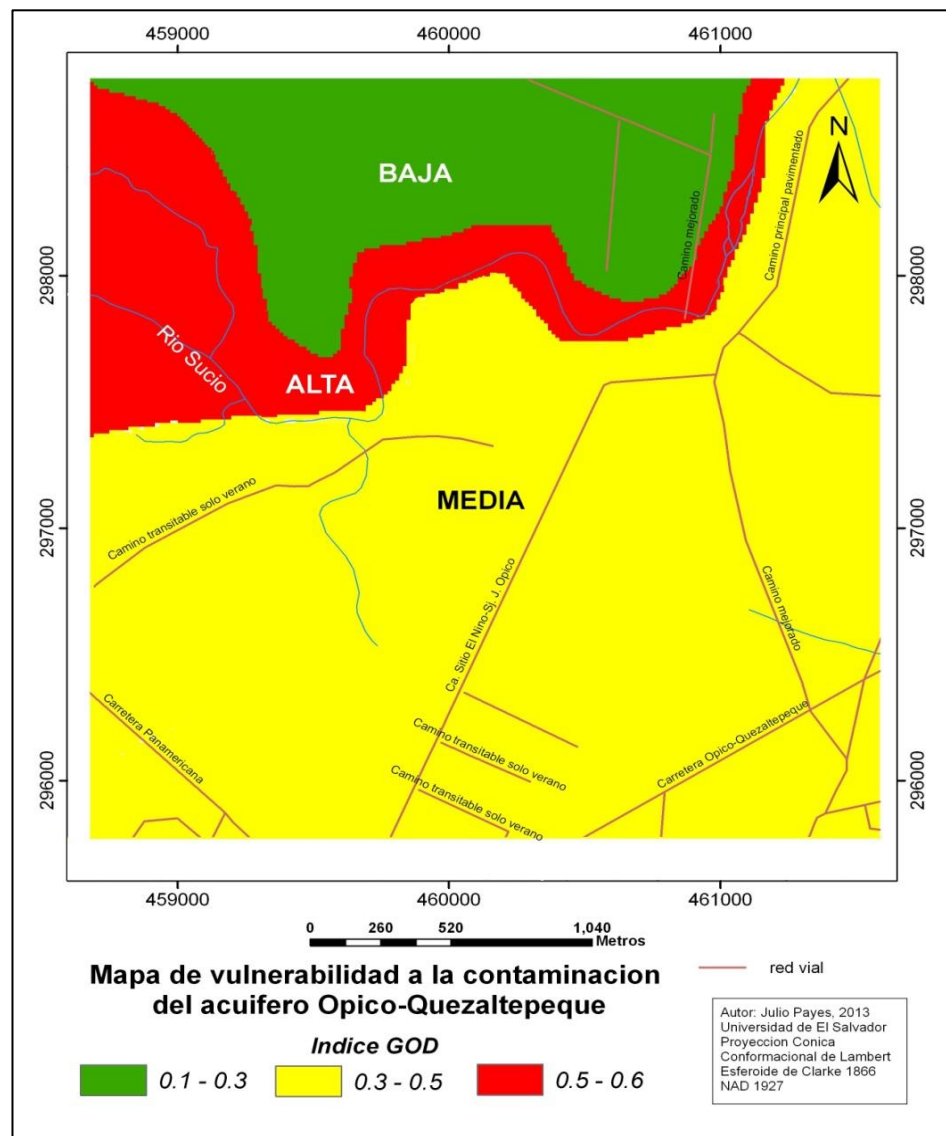


Figura 4.9 Mapeo de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea

4.3 EVALUACIÓN DE LOS PELIGROS DE CONTAMINACIÓN.

La evaluación de los peligros de contaminación es un proceso importante porque permite describir en una base cartográfica, la localización de las zonas más vulnerables a la contaminación de los acuíferos y la ubicación de las posibles fuentes contaminantes.

Como se ha explicado en el Capítulo III, las fuentes contaminantes pueden ser puntuales y/o difusas. En esta investigación se han considerado únicamente las fuentes puntuales, las cuales han sido caracterizadas como peligros potenciales de contaminación, aplicando la metodología POSH (Foster, et al, 2002).

Los productos obtenidos empleando dicha metodología se presentan en un mapa de peligros potenciales. Para que este mapa pueda ser útil a efectos de justificar medidas de protección del agua subterránea, es necesario elaborar el *análisis* de los peligros potenciales con base en: 1) el esquema conceptual para la evaluación del peligro potencial y 2) en los niveles de acción prioritarios para el control de la contaminación, estos criterios se exponen en la guía técnica de Foster, et al, 2002. Este análisis puede ser útil tanto para entidades públicas encargadas de administrar el recurso hídrico, como para empresas privadas cuya actividad económica se relaciona con la extracción del agua.

Para los objetivos del presente estudio, el proceso de evaluación de los peligros potenciales a la contaminación de las aguas subterráneas se realizó a partir del análisis de vulnerabilidad del acuífero y del inventario de fuentes potenciales de contaminación por actividad industrial puntual; el inventario y el mapa de ubicación de los emprendimientos industriales se detallan en los Anexos I-1 y I-2.

El mapeo de los peligros potenciales de contaminación del agua subterránea por actividad industrial se presenta en la Figura 4.10 y el análisis de peligrosidad potencial de contaminación del agua subterránea se define en la Figura 4.11. El enfoque aquí presentado, permite establecer las acciones prioritarias propuestas en la guía técnica de Foster et al. (2002). Tales acciones pueden ser, por ejemplo, la priorización de programas de monitoreo de la calidad del agua subterránea y la inspección ambiental de instalaciones industriales (Foster et al., 2002).

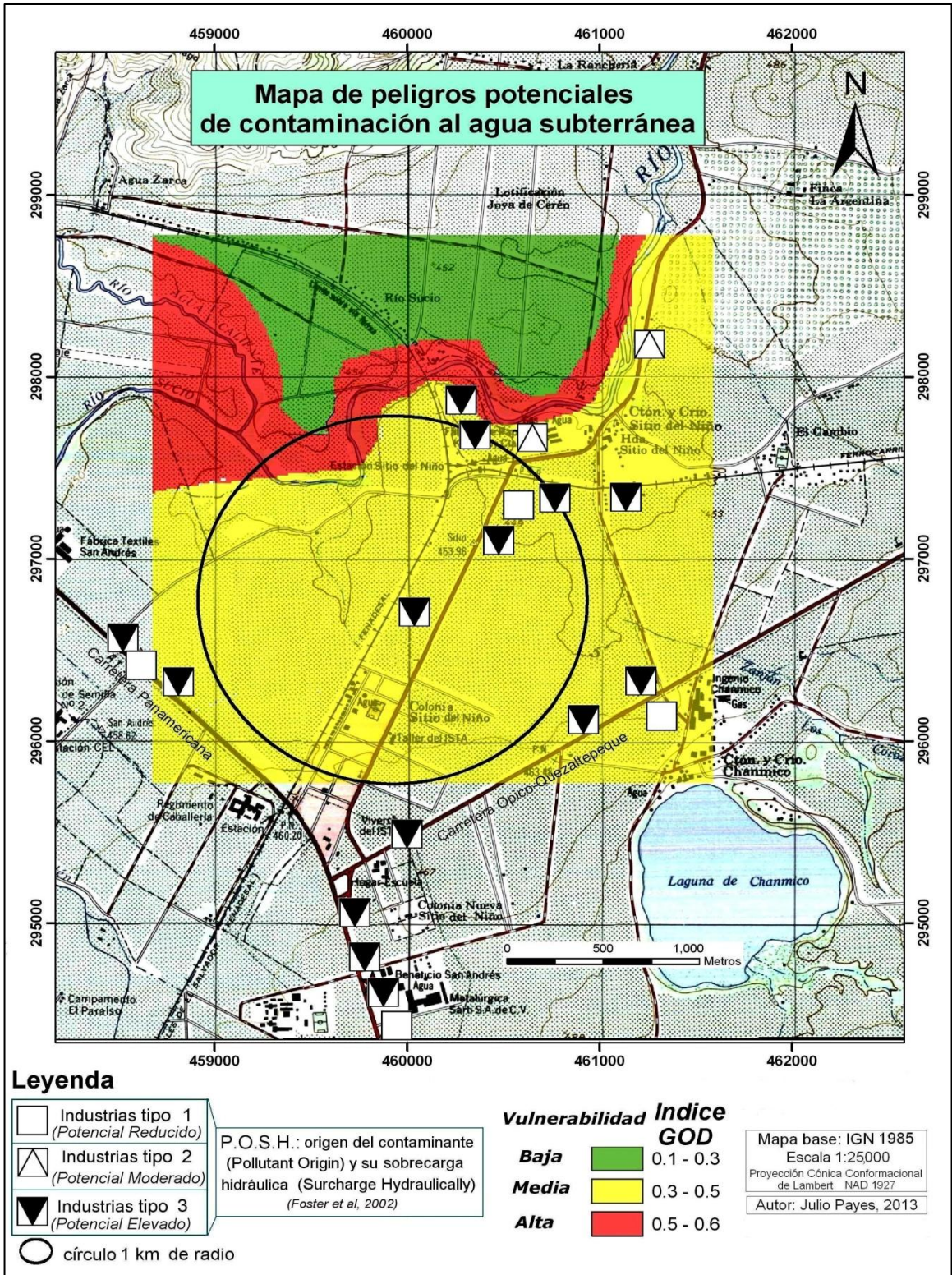


Figura 4.10 Mapa de peligros potenciales de contaminación al agua subterránea, por actividad industrial puntual.

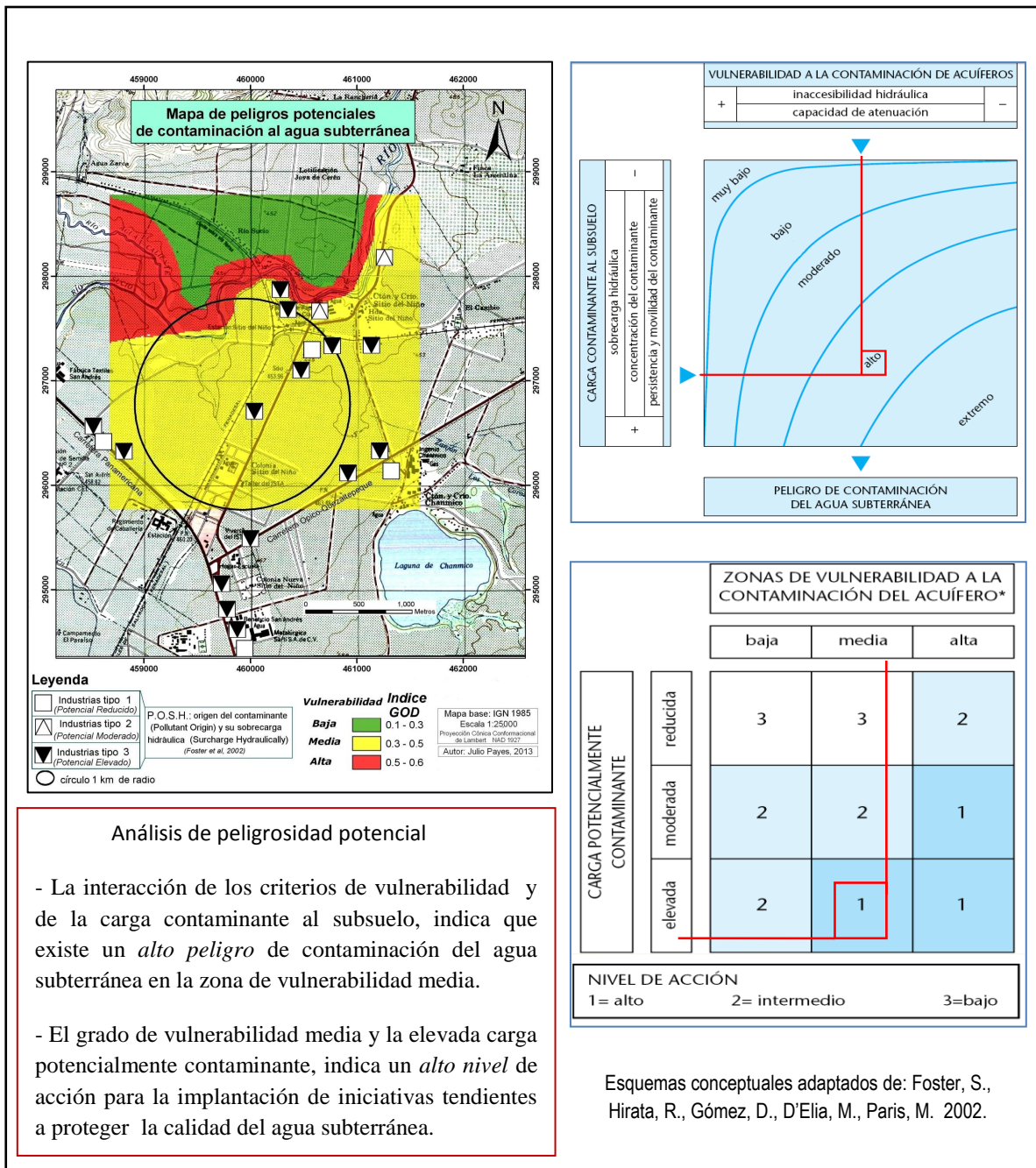


Figura 4.11 Aplicación práctica de los esquemas conceptuales de peligro de contaminación y del nivel de acción requerido para la protección del agua subterránea en la zona de estudio.

4.4 EVALUACIÓN Y GESTIÓN DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN.

La evaluación del riesgo de que una carga contaminante superficial en suelo sea transportada hasta un receptor como el agua subterránea (evento peligroso), conlleva varias etapas. Primeramente se debe estimar la intensidad del evento peligroso sobre un cuerpo receptor

específico (intensidad del impacto) para considerar todos los posibles factores relacionados con el peligro de contaminación a través de su trayectoria hasta el agua subterránea, esta etapa constituye la evaluación de la *intensidad* del riesgo y se relaciona con la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación (Zwahlen, 2003).

El siguiente paso implica considerar las consecuencias del impacto sobre el cuerpo receptor con respecto a su sensibilidad a los cambios debidos al contaminante (sensibilidad del agua subterránea), en relación a su valor ecológico y económico; este aspecto establece la evaluación de la *sensibilidad* del riesgo.

Finalmente, ambas etapas se combinan de acuerdo a un procedimiento calculado para completar la evaluación del riesgo; en esta fase, el estudio puede denominarse *evaluación total del riesgo* o *evaluación ecológica del riesgo*.

El esquema conceptual de este análisis se muestra en la Figura 4.12.

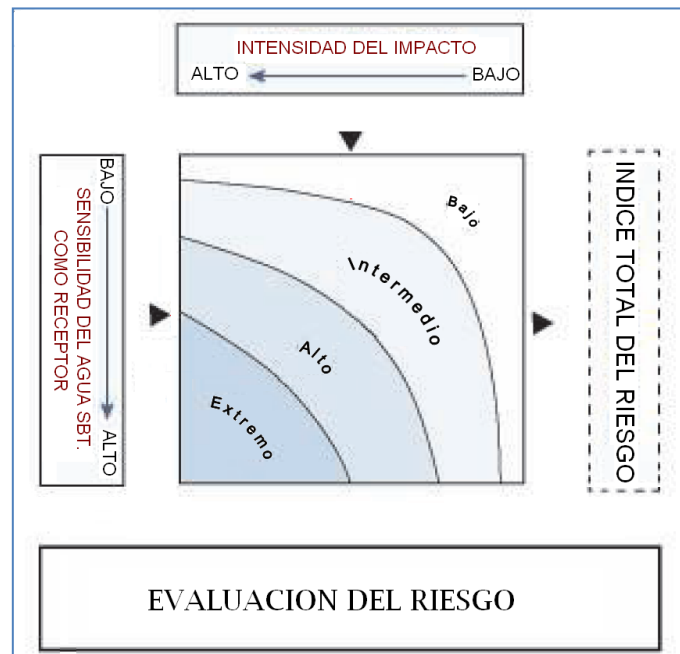


Figura 4.12 Esquema de la evaluación del riesgo, a partir del análisis de sensibilidad e intensidad del riesgo. (Traducido y adaptado de la COST ACTION 620; Zwahlen, 2003)

Por otra parte, para la evaluación del riesgo, un análisis eficiente de costos operativos de los daños esperados complementa la evaluación del riesgo convencional, que se basa sólo en la concentración de sustancias nocivas en el receptor, como el agua subterránea (Scholles 1997, Colombo 1992, Leeson et al. 2002; citados por Zwahlen, 2003, p.108).

Como resultados, el mapa de riesgo de contaminación por plomo al agua subterránea en la zona de estudio se presenta en la Figura 4.13 y la aplicación del esquema de evaluación total del riesgo, se expone en la Figura 4.14.

Este análisis conduce a la Gestión del Riesgo (Zwahlen, 2003) la cual se basa en estudios del uso de la tierra y de carga contaminante al subsuelo, así como en la vulnerabilidad de los acuíferos y es seguida por una respuesta al riesgo. Esta respuesta incluye la evaluación y selección de las opciones y la aplicación de medidas para prevenir o minimizar la probabilidad de un evento de contaminación y sus consecuencias, en caso de producirse.

Esto incluye, por ejemplo, las prácticas de uso del suelo que podrían dirigir su actividad hacia las zonas de menor riesgo; así mismo, el uso de códigos de construcción adecuados que tengan en cuenta la vulnerabilidad y el valor de las aguas subterráneas, la instalación de redes de monitoreo y prácticas operacionales especiales (Zwahlen, 2003).

La adsorción de sustancias iónicas en el suelo, depende de equilibrios fisicoquímicos. Este hecho indica que si los equilibrios se alteran, se favorece la movilidad iónica en sentido vertical por infiltración y en sentido horizontal por escorrentía. Debido a sus propiedades fisicoquímicas, la precipitación pluvial es uno de los factores que influye en la disolución de sustancias en el suelo; por tanto, las mediciones del potencial de acidez (pH) y del potencial de óxido-reducción (Eh) en agua de lluvia, son parámetros que deben ser considerados para estimar su posible influencia en la disolución y movilidad del plomo encontrado en el sitio de estudio.

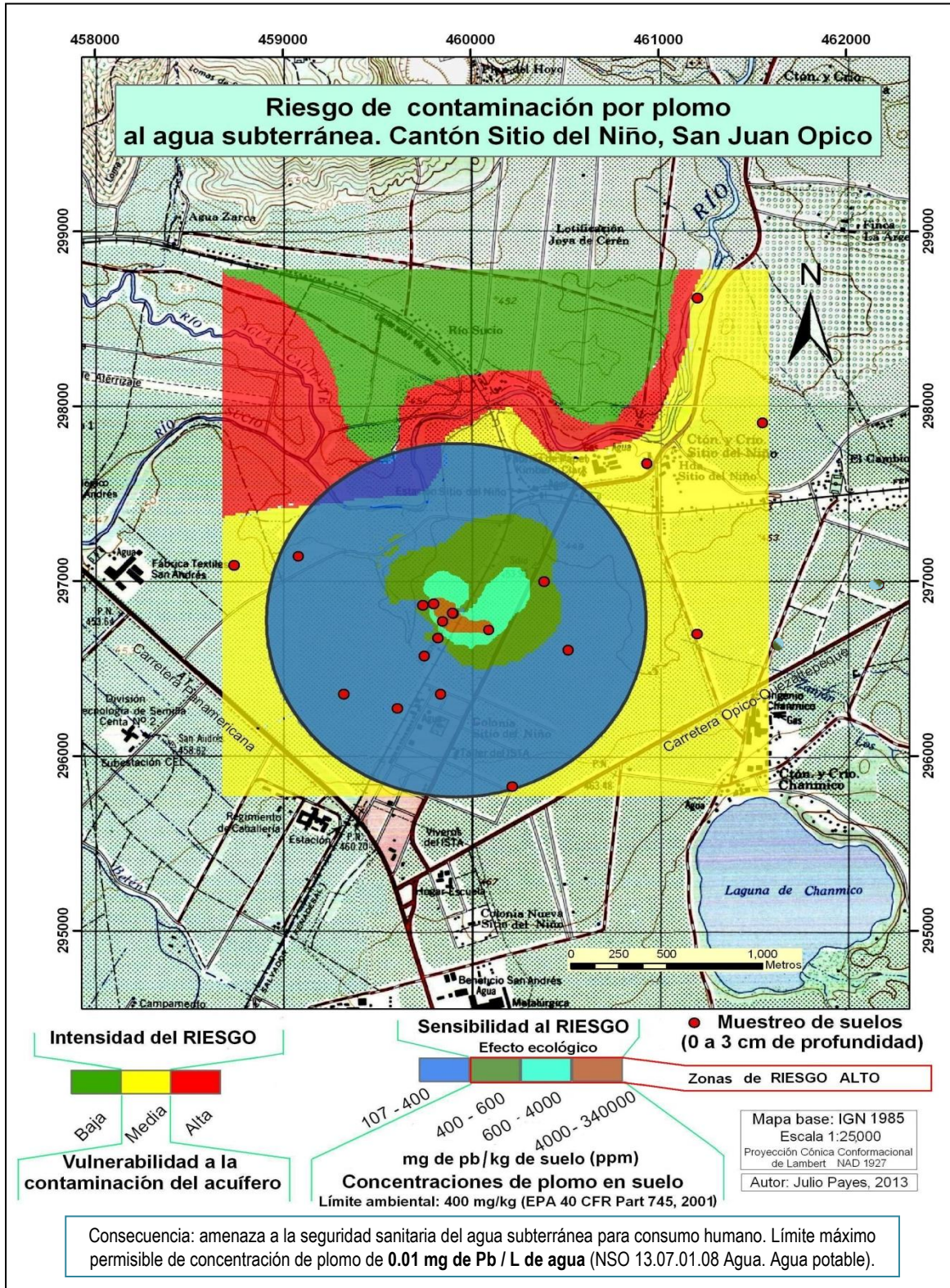


Figura 4.13 Mapa de riesgo de contaminación por plomo al agua subterránea.

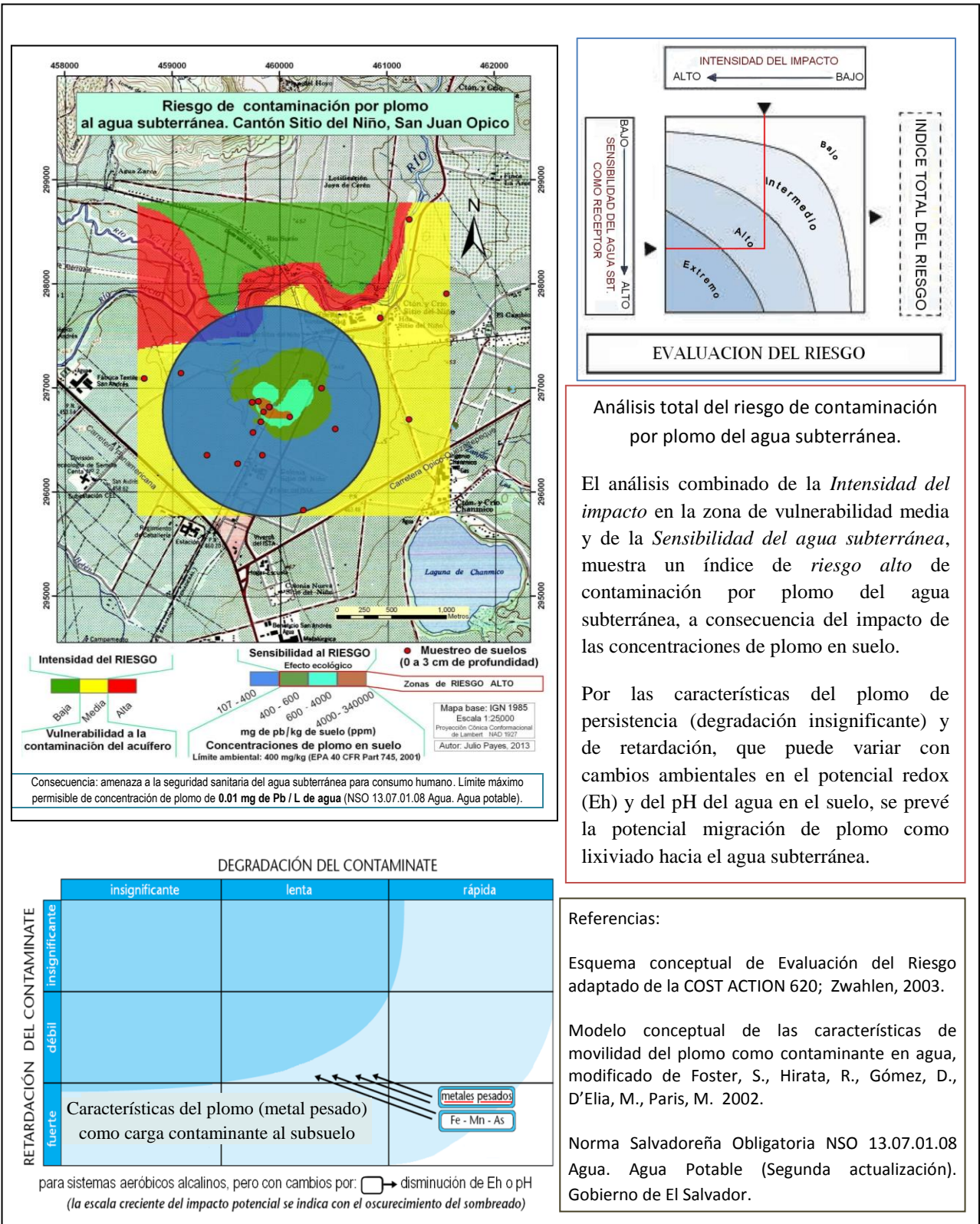


Figura 4.14 Proceso de evaluación del riesgo de contaminación por plomo en el agua subterránea en la zona de estudio.

CAPITULO V. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.

CONCLUSIONES

- Se ha generado un impacto a la calidad ambiental del suelo por la presencia de plomo, ya que los análisis de las muestras de suelo colectadas en distintos puntos revelaron concentraciones de plomo de 108 a 339481 mg Pb/kg de suelo; estos valores superan, en varios órdenes de magnitud, a los niveles máximos ambientalmente permisibles de 400 mg Pb/kg de suelo, adoptados como referencia por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

- Se determinaron las zonas de alto riesgo de contaminación por plomo al sistema de flujo de agua subterránea subyacente al área de estudio. Se han realizado los análisis de intensidad del impacto potencial que las concentraciones representan y de la sensibilidad del agua subterránea a dicho impacto. Estos resultados permiten concluir que se ha comprobado la hipótesis de trabajo en la presente investigación, establecida como: *Existe presencia de plomo en suelo en concentraciones tales que pueden contaminar el sistema de flujo de agua subterránea que subyace al Cantón Sitio del Niño, Municipio de San Juan Opico.*

- Los resultados de los análisis en agua de pozos excavados no indican concentraciones de plomo superiores a los 0.005 mg de Pb/l de agua y, por tanto, no sobrepasan el valor de referencia de concentración de plomo de 0.01 mg Pb/l de agua, especificada en la Norma Salvadoreña Obligatoria vigente al momento del estudio (NSO 13.07.01:08, AGUA. AGUA POTABLE, Segunda actualización.); sin embargo, mientras exista el riesgo de contaminación por plomo al agua subterránea, no puede concluirse que se mantendrán las características de calidad del agua en los pozos.

- Mediante la metodología POSH se identifica la producción industrial puntual en el Cantón Sitio del Niño, como actividad potencialmente generadora de carga contaminante al subsuelo en distintos puntos dentro del área de estudio constituyéndose en peligros potenciales asociados a los diferentes tipos de emprendimientos industriales ubicados en dicha zona.

- El perfil en profundidad de concentraciones de plomo en suelo muestra atenuación de la carga contaminante y evolución de una pluma de contaminación en el subsuelo. El modelo de correlación para el perfil de profundidad, de 1 a 45 cm desde la superficie del suelo, ha permitido calcular el avance vertical del plomo, encontrando concentraciones de 339481 a 1095 mg Pb/kg de suelo, en las condiciones de pH y óxido-reducción analizadas en el suelo al momento del muestreo. Este modelo permite estimar el avance vertical del plomo en la matriz del suelo, en el sitio de muestreo con máxima concentración de plomo encontrada y puede ser útil como referente para orientar futuros estudios de perfiles de suelo aledaños a dicho sitio de muestreo.

- Las condiciones de óxido/reducción (p_e) y de pH, medidas en las muestras de suelo, revelaron valores de p_e que fluctuaron de 5.64 a 6.76 y de pH que variaron de 5.8 a 7.0; la correlación de estos datos en un diagrama de p_e vs. pH, específico para plomo, mostró que la forma iónica del plomo encontrado en dichas muestras (Pb^{+2}), tiene posibilidades de movilidad por lixiviación. Aplicando por extrapolación el modelo de correlación para el perfil de profundidad mencionado en el párrafo anterior, se calculó la tendencia del avance vertical del plomo a partir de los resultados encontrados; este análisis permite suponer que los procesos de adsorción en la matriz del suelo han funcionado como atenuantes de la movilidad del plomo hasta una profundidad aproximada de 90 cm que, teóricamente, es hasta donde se alcanzaría la concentración ambientalmente permisible de 400 mg Pb/kg de suelo, únicamente en las condiciones de pH y de óxido-reducción encontradas al momento del muestreo.

- Los ensayos de infiltración muestran que la conductividad hidráulica vertical (K) en la zona de estudio, varía de 0.26 a 6.13 m/d y la pendiente del terreno se encuentra entre 1 y 7 %. En el área donde se encontró las concentraciones más altas de plomo, el valor de K es de 3.2 m/d; siendo un suelo de tipo aluvial y de textura arenosa, se concluye que el flujo de infiltración es alto, debido a la textura y conductividad hidráulica del suelo y, además, la pendiente de 1 a 2% indica poca posibilidad de escorrentía; esta situación tiende a favorecer el transporte vertical del contaminante.

- Los índices encontrados para los distintos parámetros que exige el método GOD, varían en el rango de 0.1 a 0.6 y determinaron grados de baja, media y alta vulnerabilidad a la contaminación del acuífero subyacente a la zona de estudio. La zona de alta vulnerabilidad corresponde a las márgenes del río Sucio, el área de vulnerabilidad media se ubica en el cantón Sitio del Niño y la región de vulnerabilidad baja se encuentra hacia el norte del cantón Sitio del Niño. En la región donde se encontró la máxima concentración de plomo en suelo, el acuífero posee una vulnerabilidad media.

- El mapeo de los peligros de contaminación muestra que 14 de 24 emprendimientos industriales, registrados en el inventario de fuentes potenciales de contaminación, clasifican como industrias tipo 3, con potencial elevado de generar carga contaminante al subsuelo; 9 de los cuales se localizan en la zona de vulnerabilidad media. Esto significa un incremento en el riesgo de contaminación al acuífero, en comparación con otros emprendimientos de menor peligro en la misma zona.

RECOMENDACIONES

1) Con base en los resultados obtenidos de las concentraciones de plomo y como acción remediadora para la restitución del suelo, se recomienda que los suelos en la zona de estudio, en sitios que sobrepasan límites máximos permisibles, deben ser retirados y sometidos a procesos de remoción del plomo para su adecuado tratamiento de descontaminación, para que no representen peligro de dispersión de la contaminación hacia la población y los ecosistemas a futuro.

Para facilitar el tratamiento, se recomienda identificar las distintas especies químicas de los compuestos de plomo que están presentes en el sustrato del suelo para separarlas según su afinidad química y, de esa forma, decidir el procedimiento más adecuado para remover el plomo encontrado; para tales efectos, la difracción de rayos X es una técnica analítica recomendable, para la discriminación iónica-cristalina de los compuestos de plomo; complementada por la fluorescencia de rayos X para evaluar las concentraciones residuales de plomo.

2) Con el fin de estimar el movimiento vertical del plomo en diferentes puntos de muestreo de suelo, se recomienda hacer muestreos en perfiles de profundidad de hasta 1 m, considerando el modelo de avance vertical del plomo, presentado en este estudio, y estableciendo una cuadrícula de muestreo de (50 x 50) m en un área de 1000 m² alrededor del punto de máxima concentración de plomo en suelo encontrada en el presente estudio.

3) Dado que en la subcuenca del río Sucio se realizan otras actividades potencialmente generadoras de carga contaminante, las cuales pueden constituirse en generadoras de contaminación del agua subterránea, se recomienda ampliar la aplicación de la metodología POSH a toda la subcuenca.

Para ello se sugiere evaluar la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero empleando al menos una metodología alterna al método GOD, con el fin de obtener más parámetros que conlleven a una mejor aproximación de la caracterización del área. El método DRASTIC puede ser una metodología adicional recomendable.

4) Empleando los criterios de evaluación de la metodología POSH, se recomienda que en la zona de vulnerabilidad media se aplique un nivel de acción prioritario para el control de la contaminación del agua subterránea, con base en la vulnerabilidad del acuífero y la carga potencialmente contaminante, independientemente del rubro industrial al que se dedique la empresa.

5) El Índice de Contaminación Potencial del Agua Subterránea asigna un valor de 3 (categoría más alta) a la actividad industrial dedicada al procesamiento de metales, por la alta probabilidad de producir concentraciones problemáticas en líquidos y/o efluentes de procesos. La aplicación de este índice a los resultados del mapeo de peligros potenciales de contaminación al acuífero en la zona de estudio y los criterios de la metodología POSH, permite recomendar a las autoridades competentes, que se tenga en cuenta una alta priorización de los programas de monitoreo de la calidad del agua subterránea y la inspección ambiental de instalaciones industriales.

6) Los proyectos urbanísticos tienen efectos importantes en los mecanismos y tasas de recarga subterránea causando reducciones en la disponibilidad del recurso hídrico y alterando

los patrones de flujo del agua subterránea. Por tanto se recomienda realizar programas de monitoreo de niveles de agua subterránea para establecer tendencias y fluctuaciones; así mismo, el monitoreo de parámetros fisicoquímicos y demás indicadores de la calidad del agua subterránea.

Para ello es importante contar con una red de pozos de monitoreo y promover trabajos de investigación con instituciones competentes y universidades, para generar bases de datos y mapas temáticos que ayuden a delimitar sitios de interés prioritario, por ejemplo, zonas de recarga.

TRABAJO FUTURO

Dado que en la etapa de revisión bibliográfica no se encontró información sobre mediciones sistemáticas de plomo nativo en suelo en el territorio salvadoreño, se deben realizar investigaciones, tanto en la zona de estudio de la presente investigación, como en otras áreas del país; ya que esto contribuiría a establecer datos de base para definir un promedio nacional de concentraciones ambientales de plomo nativo en suelo, que podría servir para establecer límites de referencia estatales. Lo mismo puede decirse de otros metales de interés ambiental.

Con el presente estudio se ha realizado la primera etapa de la metodología para la protección del agua subterránea, la segunda etapa consistiría en la gestión del riesgo de contaminación por plomo al acuífero y las gestiones para el control de las fuentes potenciales de contaminación.

Teniendo en cuenta las necesidades de desarrollo del país y en vista de los impactos negativos que las actividades antrópicas pueden generar, se sugiere a las instituciones que deciden sobre la asignación de los usos del suelo, que se incluya la evaluación de los peligros de contaminación al recurso hídrico subterráneo en los estudios de impacto ambiental, ya sea que las tierras se destinen a proyectos industriales, urbanísticos o agrícolas; esto proporcionaría una base para evaluar los impactos potenciales a los sistemas de flujo de agua subterránea subyacentes a los terrenos a utilizar y constituiría una base cartográfica para un ordenamiento territorial en el cual se delimiten perímetros de protección a las fuentes de agua para consumo humano y a los recursos hídricos.

Para facilitar estas tareas es aconsejable realizar mapeos de vulnerabilidad intrínseca y de peligros de contaminación a escala de cuenca, en todo el territorio nacional; estos mapas deberán ser dinámicos, es decir, sujetos a revisiones periódicas, tanto para incorporar posibles cambios futuros atribuibles a los usos del suelo, como para mejorar la precisión geoespacial y actualización de inventarios de fuentes potenciales de contaminación.

El desarrollo de la metodología GOD para estimar la vulnerabilidad del acuífero en el área de estudio, no considera la dinámica de flujo del acuífero; no obstante, el uso de la metodología POSH ha permitido generar el mapeo de los peligros de contaminación al acuífero.

Para complementar la presente investigación, es interesante poder asociar la potencial contaminación del acuífero con el sistema de flujo local, es decir, adecuar el mapa de peligros potenciales a un modelo de flujo con trazado de partículas.

Un modelo numérico de flujo del acuífero El Playón, comprendido entre el Cantón Sitio del Niño y el campo de pozos de San Juan Opico, ha sido presentado por el MSc. Mario Guevara en septiembre de 2011. Como trabajo futuro, la integración del presente estudio con el modelo numérico, permitirá ajustar ambos trabajos a las condiciones actuales de aprovechamiento del acuífero, por medio de un modelo numérico de flujo y transporte de contaminantes.

BIBLIOGRAFÍA

Ahuja, L.R. (1990). Modeling soluble chemical transfer to runoff with rainfall impact as a diffusion process. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:312- 321.

ANDA (Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados) (2008). Mapa Hidrogeológico de El Salvador, escala 1:100,000.

Auge, M. (2004). Vulnerabilidad de acuíferos, conceptos y métodos. Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ASTDR) (2007). Toxicological Profile for Lead. U.S. Department of Health and Human Services. <http://www.atsdr.cdc.gov>

Appelo, C.A.J., & Postma, D. (1994). *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. 1st edition. Published by A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, Netherlands.

Arévalo, D., (2005). Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero Opico-Quezaltepeque, a través de datos geofísicos, pozos y análisis hidrogeoquímicos, El Salvador, Centro América. Tesis de Maestría. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Astete, J., Cáceres, W., Gastañaga, M., Lucero, M., Sabastizaga, I., Oblitas, T., Pari, J., Rodríguez, F., (2009). Intoxicación por plomo y otros problemas de salud en niños de poblaciones aledañas a relaves mineros. *Rev Peru Med Exp Salud Pública*. 26(1): 15-19

Barrocu, G., Biallo, G., (1993). Application of GIS for aquifer vulnerability evaluation. Proceedings of the Vienna Conference HydroGIS 93. Application of GIS in Hydrology and Water Resources, April 1993, IAHS, publ. No. 211.

Baxter, S. (1984). *Léxico estratigráfico de El Salvador*. Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del río Lempa (CEL), El Salvador.

Bustinza, R., Auger, P., Gosselin, P. (2008). Evaluación del proceso realizado por las autoridades gubernamentales de El Salvador frente al riesgo de contaminación por plomo originada en la fábrica de baterías Record. Informe final. WHO-PAHO Collaborating Center on Environmental and Occupational Health Impact Assessment and Surveillance (INSPQ-CHUQ-DSP Quebec).

Canto Martín, J. C; Herrera González, R; Osorio Rodríguez, H; García Sosa J; Sánchez y Pinto, I. y Mandujano Sánchez, P. (2009). Evaluación del Riesgo a la Contaminación de las Aguas Subterráneas de Chetumal, Quintana Roo. Tesis de Maestría. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Autónoma de México.

Comité Municipal de Prevención Social – San Juan Opico, (2011). Plan Estratégico Municipal de Prevención Social de San Juan Opico. Publicación del Equipo RTI/CECI, Iniciativa Social para la Democracia (ISD), USAID.

COST Action 620. Final report, (2003). Vulnerability and risk mapping -for the protection of carbonate (karst) aquifers. European Commission, Directorate-General for Research. Edited by François Zwahlen (Chairman, Editor-in-Chief) ISBN 92-894-6416-X.

Dafonte, J., Valcárcel, M., Neira, X., González, A. (1999). Análisis de los métodos de cálculo de la conductividad hidráulica saturada de campo medida con permeámetro Guelph. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo. Eds. R. Muñoz-Carpena, A. Ritter, C. Tascón. ICIA: Tenerife.

Dueñas, H. (2001). Estrategias de Protección Contra la Contaminación para el Campo Occidental de Pozos de Opico de ANDA, en el Acuífero Opico-Playon-Quezaltepeque, durante enero a junio de 2000. Tesis de Maestría. Universidad de El Salvador.

Federal Register January 5, (2001). Part III Environmental Protection Agency 40 CFR Part 745: Lead; Identification of Dangerous Levels of Lead; Final Rule.

Foster, S., Hirata, R., Ventura, M., (1987). Contaminación de aguas subterráneas: Un enfoque de la situación en América Latina y el Caribe en relación al suministro de agua potable.OMS/OPS-HPE/CEPIS. <http://www.bvsde.paho.org/bvsaca/e/fulltext/enfoque/enfoque.pdf>

Foster, S., Hirata, R., Gómez, D., D'Elia, M., Paris, M. (2002). Protección de la Calidad del Agua Subterránea, guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. 2da. Edición. Banco Mundial. Washington, D.C., USA

Foster, S. (2007). Aquifer pollution vulnerability concept and tools. Published in "Groundwater Vulnerability Assessment and Mapping". Editor: Taylor & Francis, London, England.

Fuentes Yagüe, J.L., (1994). El Suelo y los fertilizantes. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario. 4º Edición, Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.

García-Melián, M.; Hernández-Peñalver. (2003). Estudio de los niveles de plomo en aguas de consumo humano en Cuba. Salud pública de México / vol.45, suplemento 2.

Gárfias, J.; Franco, R.; Llanos, H. (2002). Análisis de la vulnerabilidad intrínseca y su adecuación mediante un modelo de flujo con trazado de partículas para evaluar la vulnerabilidad del acuífero del curso alto del Río Lerma, Estado de México. Revista Latino-Americana de Hidrogeología, n.2.

Gómez Soto, Karen Elizabeth; Martínez Rodas, Leslie Irene; (2004). Plan Piloto para el Manejo de la Microcuenca de la Laguna de Chanmico. Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas".

Howson CP, Hernández-Avila M, Rall DP, (1996). El plomo en América. Estrategia para la prevención. Cuernavaca, Morelos, México. Instituto Nacional de Salud Pública,

IAEA-TEC DOC- 950. (1997). Sampling, storage and sample preparation procedures for X ray fluorescence analysis of environmental materials. International Atomic Energy Agency.

Joon Ki Yoon, Xinde Cao and Lena Q. Ma. (2006). Heavy Metals in the Environment. Application Methods Affect Phosphorus-Induced Lead Immobilization from a Contaminated Soil. Soil and Water Science Dep., University of Florida, Gainesville, FL 32611-0290.

Lang, F.; Kaupenjohann, M. (2003). Effect of dissolved organic matter on the precipitation and mobility of the lead compound chloropyromorphite in solution. *European Journal of Soil Sciences*.

Losilla, M., Rodriguez, H., Schosinsky, G., Stimson, J., Bethune, D., (2001). Los acuíferos volcánicos y el desarrollo sostenible en América Central. Editorial de la Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria “Rodrigo Facio”. Primera Edición.

Misión Geológica Alemana (1978). Mapa Geológico de la República de El Salvador. Escala 1: 100,000.

McLean E.J. & Bledsoe B.E. (1992). Behavior of metals in soils. Ground water issue. EPA/540/S-92/018.

Merkel, B., Planer-Friedrich, B. (2008). *Groundwater geochemistry: a practical guide to modeling of natural and contaminated aquatic systems*. Ed. Springer-Verlag, Second Edition.

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, (2008). Diagnóstico de la calidad de aguas subterráneas, modelo de flujo y evaluación del riesgo a la contaminación, en tres zonas prioritarias: a) Zapotitan – Opico, b) subcuenca río Apanchacal (Santa Ana) y c) subcuenca río Grande de San Miguel (acuífero San Miguel). Programa de descontaminación de áreas críticas. Gobierno de El Salvador.

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, (2010). Decreto Ejecutivo N° 12. Órgano Ejecutivo, Ramo de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Gobierno de El Salvador.

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, (2010a). Situación de contaminación por plomo en Cantón Sitio del Niño (presentación ppt). Gobierno de El Salvador.

Ministerio de Salud Pública de El Salvador, Gerencia de Atención Integral en Salud Ambiental, (2009). Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 13.07.01.08 Agua. Agua Potable. (Segunda actualización). Gobierno de El Salvador.

Ministerio de Salud Pública de El Salvador, (2007). Guía de atención clínica para pacientes con intoxicación con plomo. Gobierno de El Salvador.

Ministerio de Salud Pública de El Salvador (2010). Boletines de prensa 19082010 y 20082010. Unidad de Comunicaciones del MINSAL.

Plan Nacional de Ordenamiento y Desarrollo Territorial, Sub-Región Centro-Occidente 3. (2010). Ministerio de Obras Públicas. Gobierno de El Salvador

Procuraduría para la Defensa de los Derechos Humanos, (2007). Expediente. LL-0050-05. Gobierno de El Salvador.

Stilwell, D.E., Rathier, T.M., Musante, C.L., Ranciato, J.F. (August 2008). Lead and other heavy metals in Community Garden Soils in Connecticut. The Connecticut Agricultural Experiment station, New Haven, Bulletin 1019.

Tessier, A., Campbell, P., Bisson, M. (1979). Sequential extraction procedure for speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, Vol. 51, No. 7

Troldborg, M. (July 2010). Risk assessment models and uncertainty estimation of groundwater contamination from point sources. PhD Thesis. DTU Environment, Department of Environmental Engineering, Technical University of Denmark.

United States Environmental Protection Agency, (1996). Office of Solid Waste and Emergency Response Washington, DC 20460 EPA/540/R95/128.

United States Environmental Protection Agency. (2001). Characterization and Eh/pH leaching Test Mercury Containing Mining Wastes. EPA/600/R-02/032.

United States Environmental Protection Agency. (December 2001a). Guidance for Reporting Releases and Other Waste Management Quantities of Toxic Chemicals: Lead and Lead Compounds. EPA 260 – B – 01 – 027.

Vaněk, A., Borůvka, L., Drábek, O., Mihaljevič, M., Komárek, M. (2005). Mobility of lead, zinc and cadmium in alluvial soils heavily polluted by smelting industry. *Plant Soil Environ.*

Vargas-Galarza, Wai Lin, Shui; Zully; Félix-Navarro, Rosa María. (2006). "Optimizing the Conditions for Leaching Lead from Solid Waste Produced by Pyrometallurgical Process of Recycling Automobile Used Batteries". *Journal of the Mexican Chemical Society*, num. 2 pp. 64-70.

Yoon, J. (2005). Phosphate-Induced Lead Immobilization in Contaminated Soil. University Of Florida.

Sitios WEB consultados

Alcaldía de San Juan Opico. <http://www.alcaldiasanjuanopico.gob.sv/economia.php> Consultado en junio 2011.

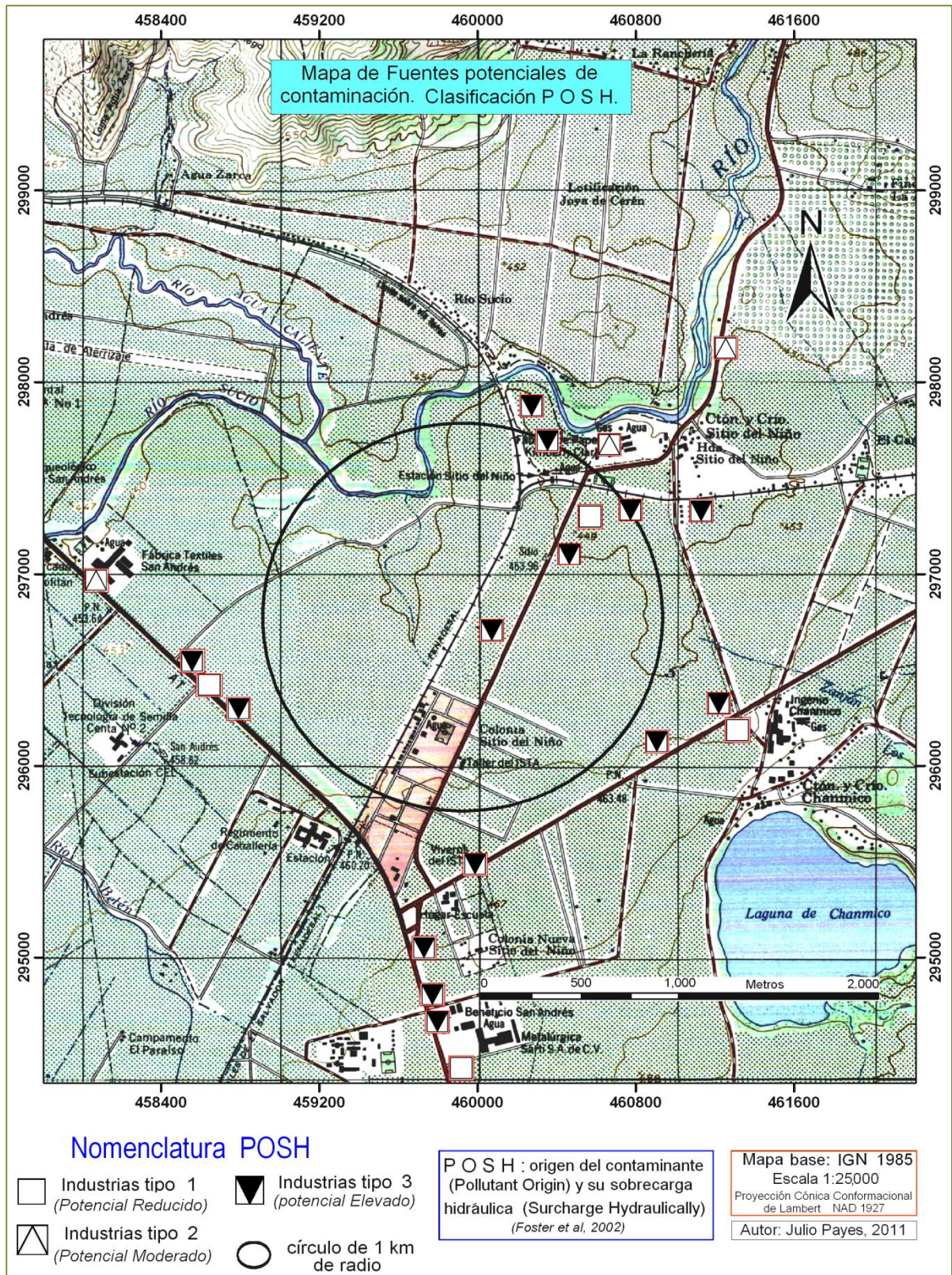
Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. www.marn.gob.sv, consultado en junio de 2011.

ANEXOS

Coordenadas Lambert		CÓDIGO	NOMBRE	ACTIVIDAD	CLASIFICACION POSH	POTENCIAL DE GENERAR CARGA CONTAMINANTE AL SUBSUELO	UBICACIÓN
X	Y						
459822.232	294677.037	FPCZ-1	Talleres SARTI	metalurgia	Tipo 3	Elevado	Km 28 carretera Panamericana
461245.129	296316.637	FPCZ-2	GASOLINERA	Combustibles	Tipo 3	Elevado	Carretera Opico Quezaltepeque
460649.857	297681.76	FPCZ-3	Kimberly Clark	productos de papel	Tipo 2	Moderado	Km 32 carretera a San Juan Opico
458069.133	296983.508	FPCZ-4	Textiles San Andrés	Producción textiles	Tipo 2	Moderado	Km 32 Carretera Panamericana
423528.908	296720.603	FPCZ-5	GUMARSAL	alimentos	Tipo 1	Reducido	Km 30.5 carretera Panamericana
460564.992	297308.958	FPCZ-6	GRANJAS AVICOLAS	alimentos	Tipo 1	Reducido	Km 31 carretera a San Juan Opico
459920.329	294421.336	FPCZ-7	PARQ INDUSTRIAL EL RINCONCITO	Industrias varias	Tipo 1	Reducido	Km 28.5 carretera Panamericana
461295.914	296217.249	FPCZ-8	BENEFICIO EL JABALI	café orgánico	Tipo 1	Reducido	500 m entrada Laguna Chanmico
459715.668	295190.845	FPCZ-9	Huevos de La Granjita	alimentos	Tipo 2	Reducido	Desvío carretera a Quezaltepeque
459726.392	295065.535	FPCZ-10	Productos Tecnológicos	aspersores plásticos	Tipo 3	Elevado	Km 29.5 carretera Panamericana
458527.148	296524.289	FPCZ-11	YKK	metalurgia	Tipo 3	Elevado	Km 31.5 carretera Panamericana
460354.324	297683.198	FPCZ-12	IMFICA	metalurgia	Tipo 3	Elevado	Km 33.5 carretera

							Panamericana
Coordenadas Lambert		CÓDIGO	NOMBRE	ACTIVIDAD	CLASIFICACION POSH	POTENCIAL DE GENERAR CARGA CONTAMINANTE AL SUBSUELO	UBICACIÓN
X	Y						
460774.298	297344.532	FPCZ-13	Plásticos Panda	productos plásticos	Tipo 3	Elevado	Km 31.5 carretera Panamericana
458764.56	296280.493	FPCZ-14	MANUPLAST	productos plásticos	Tipo 3	Elevado	Km 30.5 carretera Panamericana
460276.449	297881.195	FPCZ-15	GALVANIZA	metalurgia	Tipo 3	Elevado	Km 33 a S. Juan Opico
461125.711	297342.298	FPCZ-16	MONELCA	metalurgia	Tipo 3	Elevado	Km 32.5 carretera a San Juan Opico
460035.794	296713.686	FPCZ-17	EX FABRICA RECORD	metalurgia	Tipo 3	Elevado	Km 25 carretera a San Juan Opico
460469.215	297119.829	FPCZ-18	TROPIGAS	Combustibles	Tipo 3	Elevado	Km 31.5 carretera a San Juan Opico
460911.728	296119.627	FPCZ-19	Z GAS	Combustibles	Tipo 3	Elevado	Carretera Opico Quezaltepeque
459763.792	294814.951	FPCZ-20	GASOLINERA	Combustibles	Tipo 3	Elevado	Km 30 carretera Panamericana
459977.605	295505.957	FPCZ-21	Taller automotriz	mecánica automotriz	Tipo 3	Elevado	Carretera Opico Quezaltepeque
459716.668	295256.991	FPCZ-22	Taller automotriz	mecánica automotriz	Tipo 3	Elevado	Desvío a Quezaltepeque
458617.534	296452.595	FPCZ-23	LIDO - Sam Li	Textiles y maquila	Tipo 2	Moderado	Km 30 carretera Panamericana
461254.716	298188.156	FPCZ-24	DURAFLEX-HANES B	Producción textiles	Tipo 2	Moderado	Km. 33 carretera a San Juan Opico

Anexo I-2 Mapa de fuentes potenciales de contaminación.



Anexo II-1

El plomo no es un elemento particularmente abundante, pero sus yacimientos son fácilmente accesibles y ampliamente distribuidos en todo el mundo. Sus propiedades, como resistencia a la corrosión, alta densidad y bajo punto de fusión, lo convierten en un metal aplicado en tuberías, soldaduras, pesos, y baterías de acumuladores.

El plomo existe en tres estados de oxidación: Pb (0), plomo metálico; Pb (II) y Pb (IV). En el ambiente, existe principalmente como Pb (II). El Pb (IV) sólo se forma bajo condiciones extremadamente oxidantes, compuestos inorgánicos de Pb (IV) no se encuentran bajo condiciones ambientales normales. Se conocen compuestos orgánicos de plomo (II), pero su química está dominada por el estado de oxidación tetravalente (+4). El plomo metálico, Pb (0), existe en la naturaleza, pero su ocurrencia es escasa.

El plomo es anfótero, formando sales plumbosas y plúmbicas en ácido y plumbitos y plumbatos en álcali. El plomo se coloca ligeramente por encima de hidrógeno en la serie electromotriz y por lo tanto teóricamente debe reemplazar el hidrógeno en los ácidos.

El amplio uso de plomo es en gran parte debido a su bajo punto de fusión y una excelente resistencia a la corrosión en el medio ambiente. Cuando se expone al aire y al agua, se forman películas de sulfato de plomo, óxidos de plomo, y carbonatos de plomo; estas películas actúan como una barrera protectora que retarda o detiene la corrosión del metal subyacente.

El plomo puede ser utilizado en forma de metal, ya sea puro o aleado con otros metales, o como compuestos químicos. La importancia comercial de plomo se basa en su facilidad de moldeo, alta densidad, punto de fusión bajo, baja resistencia al corte, facilidad de fabricación, resistencia al ácido, su reacción electroquímica con ácido sulfúrico, y su estabilidad química en el aire, agua y suelo.

El plomo se utiliza en la fabricación de baterías de acumuladores; las aleaciones de plomo se usan en cojinetes con latón y bronce, y algunas soldaduras; hojas y tubos como blindaje para energía nuclear y protección de rayos X; cubierta para cables, materiales de control de ruido, revestimientos resistentes a productos químicos, municiones; pigmentos y compuestos de plomo utilizados en la fabricación de vidrio, esmaltes cerámicos, estabilizadores de plástico y masillas. El consumo de plomo en las baterías de plomo-ácido, incluyendo baterías SLI (Start, Ligth, Ignición) para automóviles, camiones y otros vehículos y baterías de plomo ácido de tipo industrial, constituyen los principales usos del plomo actualmente.

En 2003, el consumo del plomo en los EE.UU fue: 84,2%, para baterías de acumuladores; un 3,5%, municiones; el 2,6%, los óxidos de otros productos (pintura, vidrio y cerámica, pigmentos y otros productos químicos); 2,3%, en fundición de metales (maquinaria y equipos eléctricos, vehículos de motor y otros equipos de transporte, y blindaje contra radiaciones nucleares), y el 1,7%, láminas de plomo (construcción de edificios, tanques de almacenamiento, recipientes de proceso, etc, y área médica en protección contra radiaciones) (USGS 2003).

Ciertos usos dispersos del plomo dieron lugar a una amplia diseminación, tales como el tetraetilo de plomo en la gasolina, tuberías de agua, material de soldadura en las latas de alimentos, los perdigones de plomo y en las pinturas para casas, han sido o están siendo retirados debido a las preocupaciones ambientales y de salud.

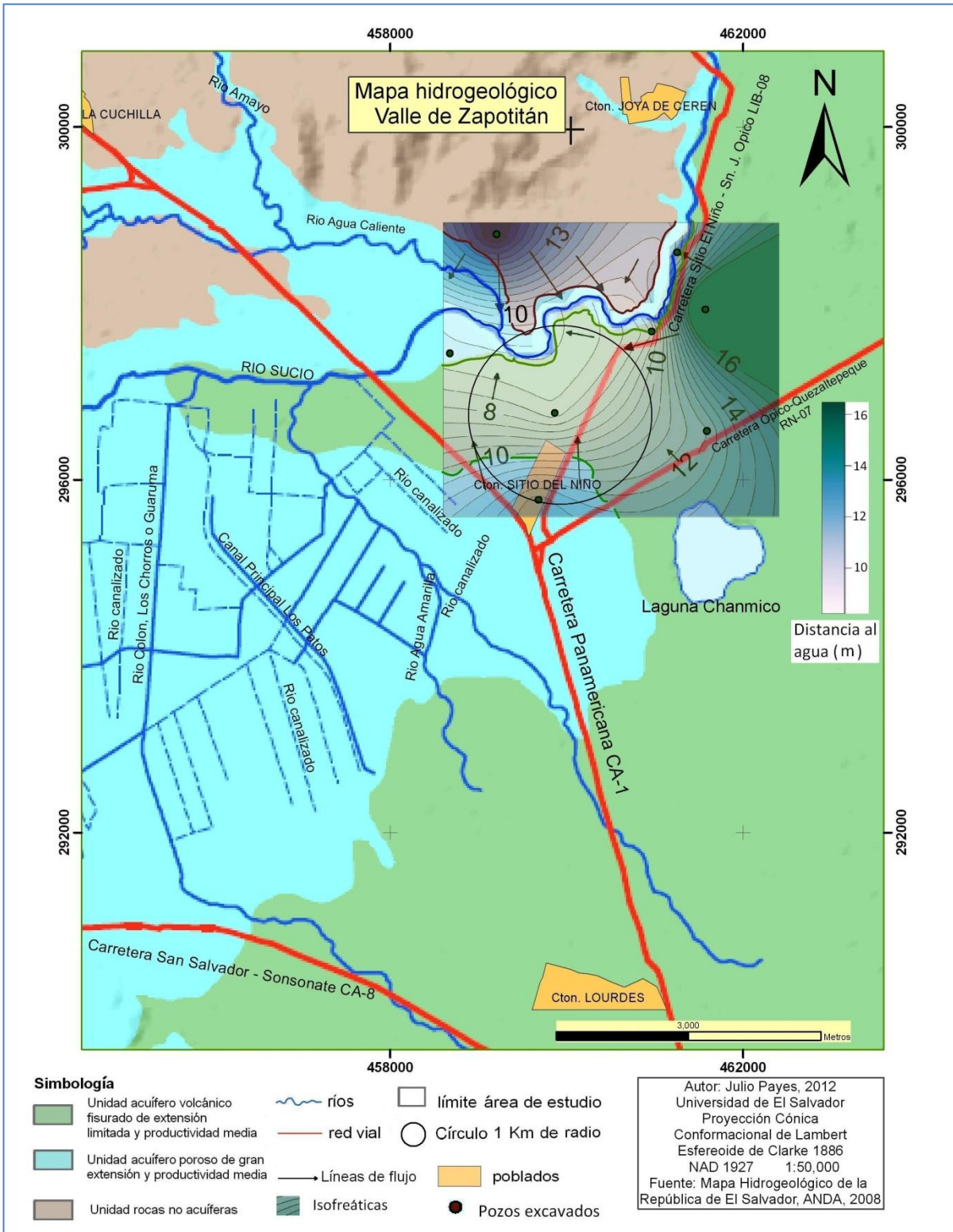
Fuente: ATSDR, 2007.

Anexo III-1 Inventario de pozos excavados

Nº	Lugar	LATITUD	LONGITUD	X LAMBERT	Y LAMBERT	elevación (m)	Fecha	Distancia al agua (m)	profundidad (m)	diámetro (m)	brocal (m)	Nivel F msnm
1	Hacienda Corral Blanco	13.7505	-89.3646944	460559.265	292206.831	537	31/07/2010	20.65	25.25	0.75	0.55	516.90
2	Crío. La Arenera	13.76488889	-89.3660278	460417.491	293798.8492	503	31/07/2010	1.06	4.21		0.20	502.14
3	Cantón Chanmico	13.78983333	-89.35525	461587.083	296556.634	474	31/07/2010	11.18	13.10	0.89	0.59	463.41
4	Colonia Sitio del Niño	13.78269444	-89.3728611	459681.584	295769.7614	463	31/07/2010	11.56	14.30	1.01	0.80	452.24
5	Cantón Sitio del Niño	13.79161111	-89.3711667	459866.331	296755.904	472	31/07/2010	6.13	8.49	0.90	0.60	466.47
6	Hacienda Sitio del Niño	13.79997222	-89.3610556	460961.018	297679.2068	466	31/07/2010	7.22	9.46		0.75	459.53
7	Colonia Nuevo Sitio del Niño	13.80225	-89.3553889	461574.095	297930.2787	477	31/07/2010	19.34	20.79	0.94	0.40	458.06
8	Caserío Los Cítricos	13.80811111	-89.3583889	461250.691	298579.1595	446	31/07/2010	8.24	10.98	1.00	0.10	437.86
9	Caserío La Isla, Cantón Agua Escondida	13.84586111	-89.3365556	463617.173	302751.942	440	31/07/2010	5.64	9.20	0.95	0.60	434.96
10	Cantón Joya de Cerén	13.82841667	-89.3555	461566.361	300825.0494	460	31/07/2010	27.8	28.44	0.91	0.51	432.71
11	Cantón Joya de Cerén	13.82311111	-89.3579444	461301.215	300238.5005	455	31/07/2010	11	12.16	0.72	0.67	444.67
12	Cerca unión ríos Sucio y Palio	13.85222222	-89.3603889	461041.763	303459.3916	439	31/07/2010	3.42	5.96		0.30	435.88
13	Col. Las Victorias, San Juan Opico	13.86194444	-89.3566944	461442.729	304534.3457	464	31/07/2010	0.99	6.46	0.70	0.40	463.41
14	Cantón San Nicolás	13.84613889	-89.3616111	460908.628	302786.6037	435	31/07/2010	11.8	13.71	0.96	0.72	423.92
15	Crío. San Nicolás Los Encuentros	13.84647222	-89.3727222	459707.538	302825.3136	454	31/07/2010	16.17	18.31	0.90	0.54	438.37
16	Colonia Tecpán	13.79775	-89.3821667	458677.999	297436.8955	478	31/07/2010	4.9	8.60	0.87	0.46	473.56
17	Caserío Agua Zarca	13.80994444	-89.3773056	459205.725	298785.1049	472	31/07/2010	16.55	17.84	0.84	0.56	456.01
18	Cantón San Andrés	13.8185	-89.4069444	456002.773	299736.8095	461	31/07/2010	8.96	11.54	0.98	0.46	452.50
19	Cantón Las Lomas, Ciudad Arce	13.83241667	-89.3929444	457518.912	301273.8594	541	31/07/2010	2.66	9.60	1.45	0.33	538.67
20	Zapotitán	13.78894167	-89.3912694	457692.171	296464.0365	458	31/07/2010	1.43	3.76	1.10	0.30	456.87

■ Pozos seleccionados para análisis de plomo en agua

Anexo III-2 Modelo del flujo de agua subterránea en el cantón Sitio del Niño en época lluviosa



Anexo III-3 Procedimiento para muestreo de agua

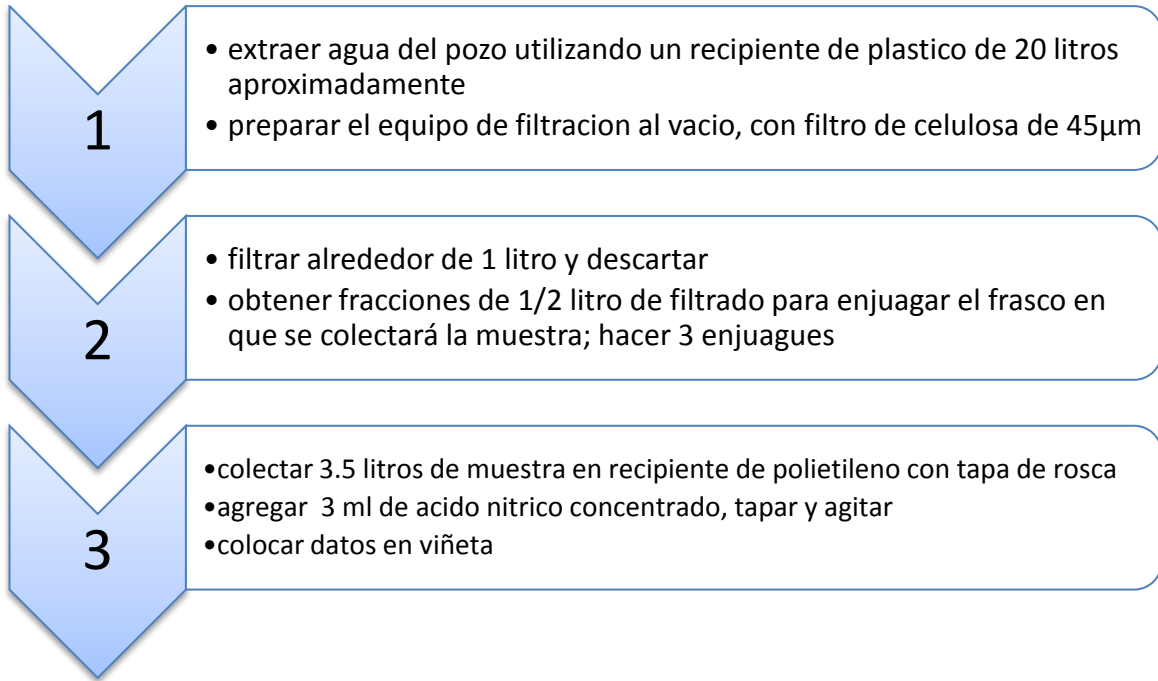


Fig. A3-1 equipo de filtración al vacío.

Anexo III-4

Identificación de muestras

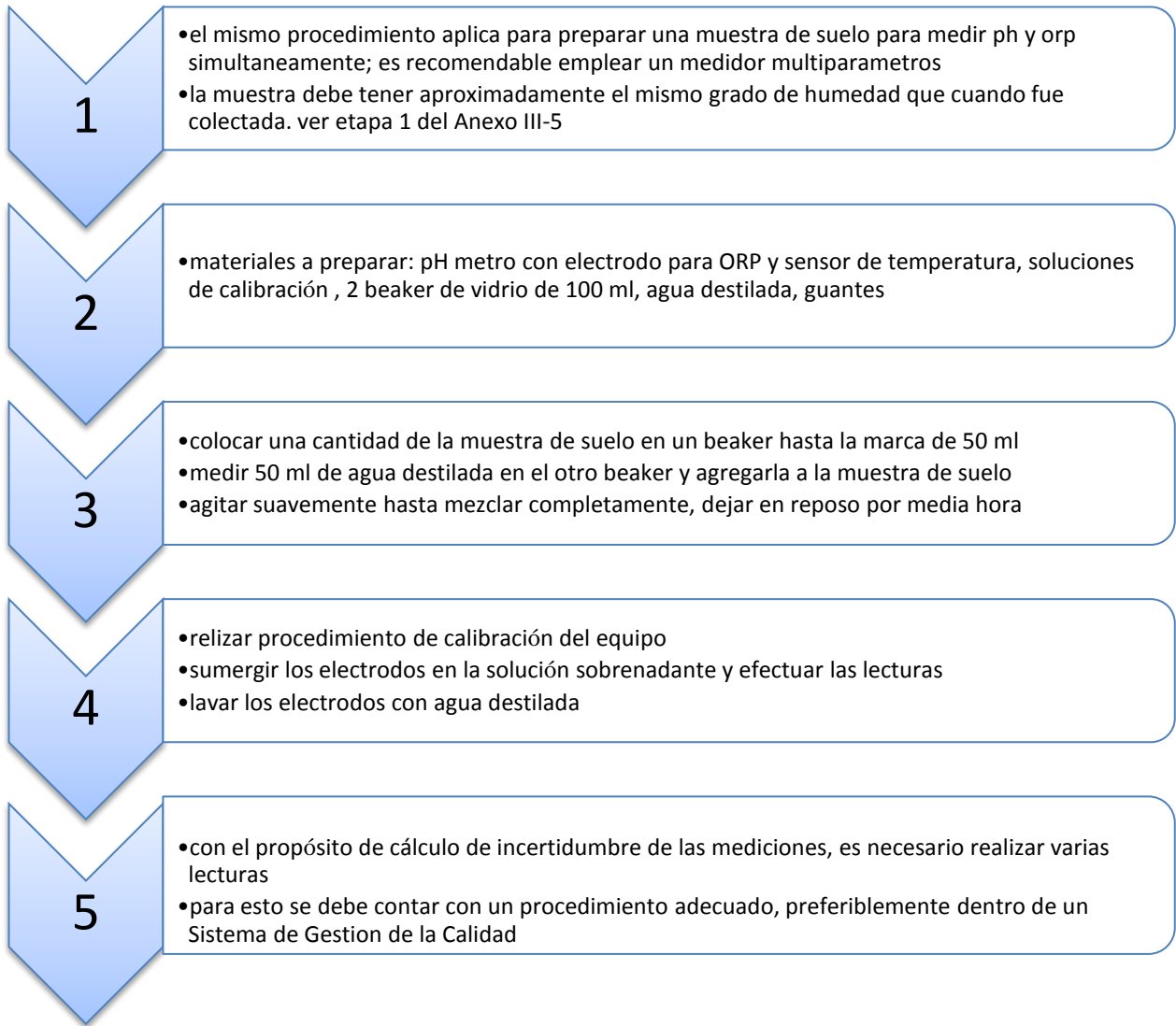
El formato de identificación de las muestras debe decidirse antes de las actividades de muestreo; es recomendable diseñar un sistema de codificación que incluya a todas las muestras, sobre todo para facilitar el manejo de datos en hojas electrónicas y para asegurar una correcta cadena de custodia.

Para el presente estudio, la información que contiene la etiqueta de identificación es:

- Nombre o número de muestra (código)
- Fecha y hora
- Nombre de quien colecta la muestra
- Coordenadas geográficas, elevación y precisión del equipo GPS
- Descripción del sitio de recolección

Finalmente, documentar las actividades de muestreo en un cuaderno de bitácora y un registro fotográfico indexado pueden ser recursos útiles para futuras referencias.

Anexo III-5 Procedimiento de medición de pH y ORP en suelo



Anexo III-6 Protocolo de recolección y preparación de muestras de suelo para análisis por fluorescencia de rayos X (XRF)

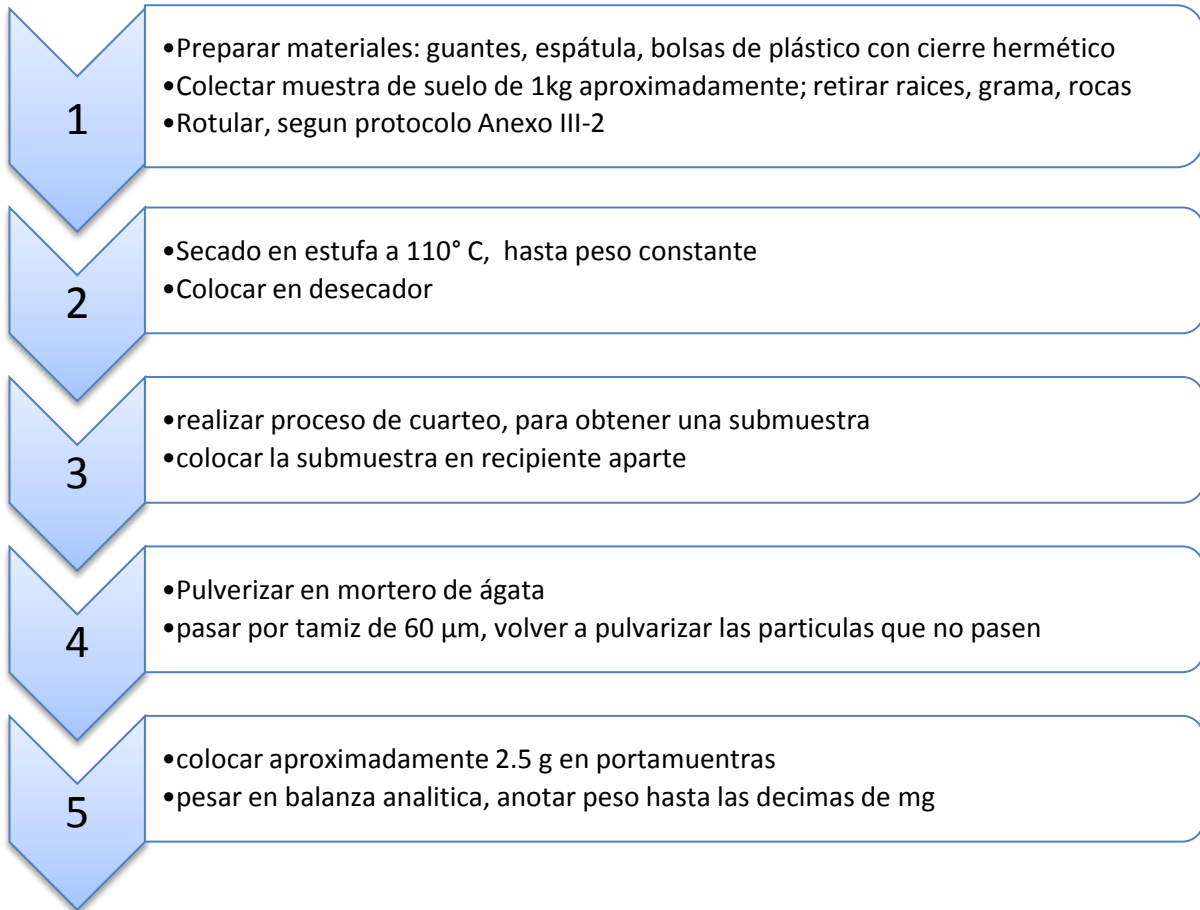


Figura A4-1 recolección de muestras de suelo para análisis por XRF

Figura A4-2 proceso de preparación de muestras de suelo previo análisis por XRF




A4-1



A4-2

Anexo IV-1

Certificados de materiales de referencia de suelos



INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
 AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE ATOMIQUE
 МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ
 ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

WAGRAMERSTRASSE 5, P.O. BOX 100, A-1400 VIENNA, AUSTRIA, TELEX: 1-12645, CABLE: INATOM VIENNA, TELEPHONE: 2360/EXT.

IN REPLY PLEASE REFER TO:
 PRIERE DE RAPELLER LA REFERENCE:

LAB/243 May 1984

CERTIFIED REFERENCE MATERIAL
 IAEA/SOIL-7

Certified concentration values of trace elements:

No.	Element	Concentration* µg/g	Confidence interval (significance level 0.05) µg/g
1	Antimony	1.7	1.4 ± 1.8
2	Arsenic	13.4	12.5 ± 14.2
3	Cerium	61	50 ± 63
4	Cesium	5.4	4.9 ± 6.4
5	Chromium	60	49 ± 74
6	Cobalt	8.9	8.4 ± 10.1
7	Copper	11	9 ± 13
8	Dysprosium	3.9	3.2 ± 5.3
9	Europium	1.0	0.9 ± 1.3
10	Hafnium	5.1	4.8 ± 5.5
11	Holmium**	1.1	(0.8; 1.5)
12	Lanthanum	28	27 ± 29
13	Lead	60	55 ± 71
14	Manganese	631	604 ± 650
15	Neodymium	30	22 ± 34
16	Rubidium	51	47 ± 56
17	Samarium	5.1	4.8 ± 5.5
18	Scandium	8.3	6.9 ± 9.0
19	Strontium	108	103 ± 114
20	Tantalum	0.8	0.6 ± 1.0
21	Terbium	0.6	0.5 ± 0.9
22	Thorium	8.2	6.5 ± 8.7
23	Uranium	2.6	2.2 ± 3.3
24	Vanadium	66	59 ± 73
25	Ytterbium	2.4	1.9 ± 2.6
26	Yttrium	21	15 ± 27
27	Zinc	104	101 ± 113
28	Zirconium	185	180 ± 201

* expressed on a dry-weight basis (constant weight at 105°C)
 ** only two laboratories provided results. These results are shown in brackets in the place of confidence limits.

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES

COMMUNITY BUREAU OF REFERENCE - BCR Nº. 537

CERTIFIED REFERENCE MATERIAL

CERTIFICATE OF ANALYSIS

BCR No 143

Trace Elements in a Sewage Sludge Amended Soil

Element	Mass fraction (based on dry mass)		Number of accepted sets of results p
	Certified value ⁽¹⁾ expressed as µg.g ⁻¹	95% confidence interval ⁽²⁾ expressed as µg.g ⁻¹	
Cd	31,1	± 1,2	15
Cu	236,5	± 8,2	15
Hg	3,92	± 0,23	13
Ni	99,5	± 5,5	13
Pb	1333	± 39	13
Zn	1272	± 30	14

⁽¹⁾ This value is the unweighted mean of p accepted sets of results.
⁽²⁾ The 95% confidence interval is a measure of the uncertainty and is applicable when the reference material is used for calibration purposes.
 When the reference material is used to assess the performance of a method, the user should refer to the recommendations laid down in the last chapter (instructions for use) of the certification report.


DESCRIPTION OF THE SAMPLE

The material consists of a homogeneous powder (particles have passed a sieve with apertures smaller than 90 µm). The material contains the following major and minor elements (not certified) expressed as their oxides (cg.g⁻¹):
 Loss at 900 °C: 24.34
 SiO₂: 42.72 MgO: 4.90 TiO₂: 0.67 P₂O₅: 0.91 Na₂O: 0.41
 CaO: 9.35 Al₂O₃: 10.13 Fe₂O₃: 3.75 K₂O: 1.82
 Additional information is presented on the attached sheet.
 The RM is available in units of 50 g.
 The matrix stability has been checked over a period of approximately 3 years. A change in matrix composition could not be detected over that period.

INSTRUCTIONS FOR USE

The moisture content can be determined by drying an aliquot of the sample for 24 h over phosphorus pentoxide. The sample for analysis should be taken as it is.
 The bottle should be stored preferably in a dark and cool place.
 Once the bottle has been opened, the material is susceptible to contamination (e.g. laboratory dust or vapours) or losses.
~~The recommended minimum sample intake is 100 mg.~~
 As the material may segregate partly upon storage, remixing of the bottle contents prior to taking a sample is necessary. A poly tetrafluoro ethene ball is added for that purpose. Shaking during 2 - 4 minutes is usually sufficient.

Anexo IV-2 Resultados de análisis de plomo representativos de 2 de 5 muestras de agua de pozos.



Laboratorios Especializados en Control de Calidad
 ESEBESA, S.A. DE C.V.
 Inscripción en C.S.S.P. No. 357.
 Calle San Antonio Abad No. 1965, San Salvador, El Salvador, C.A.
 Telefax: (503)2226-5223 * 2226-7042 * 2235-4836 * www.lecc.com.sv * e-mail: info@lecc.com.sv

Informe No.: A -10,523 Página 1 de 1

INFORME DE ANALISIS

Nombre/Punto de Toma de Muestra: Agua. Punto 1	Procedencia: Julio Payes	Fecha de Ingreso: 06/11/09	Fecha de Análisis: 6-23/11/09
		Fecha de Emisión: 24/11/09	

Control: A-10,523 Referencia: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21th Ed.

DATOS DE CAMPO


Fecha: 6/11/09 Hora: 10:15 a.m.
 T° Agua: N/D T° Ambiente: N/D


Descripción: Líquido transparente e incoloro


MUESTRA TOMADA POR:
 Cliente Personal de LECC

DETERMINACION	METODO	RESULTADO	LIMITES NSO
			13.07.01:04 MÁXIMO PERMISIBLE
PLOMO	Absorción Atómica con HGA	Menor de 0.005 mg/L	0.01 mg/L

N/D: No Definida por cliente.
 EL INFORME CORRESPONDE A LA MUESTRA REMITIDA Y ENSAYADA.
 NSO (NORMA SALVADOREÑA OBLIGATORIA). NSO 13.07.01:04 AGUA. AGUA POTABLE.


 Lic. Ana Luz Arévalo Posada
 Química Farmacéutica





Laboratorio Acreditado por CONACYT bajo la Norma NSR ISO/IEC 17025 en pruebas específicas para Aguas, Alimentos, Superficies y Medicamentos.



Laboratorios Especializados en Control de Calidad
 ESEBESA, S.A. DE C.V.
 Inscripción en C.S.S.P. No. 357.
 Calle San Antonio Abad No. 1965, San Salvador, El Salvador, C.A.
 Telefax: (503)2226-5223 * 2226-7042 * 2235-4836 * www.lecc.com.sv * e-mail: info@lecc.com.sv

Informe No.: A -10,524 Página 1 de 1

INFORME DE ANALISIS

Nombre/Punto de Toma de Muestra: Agua. Punto 2	Procedencia: Julio Payes	Fecha de Ingreso: 06/11/09	Fecha de Análisis: 6-23/11/09
		Fecha de Emisión: 24/11/09	

Control: A-10,524 Referencia: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21th Ed.

DATOS DE CAMPO

Fecha: 6/11/09 Hora: 10:45 a.m.
 T° Agua: N/D T° Ambiente: N/D

Descripción: Líquido transparente e incoloro

MUESTRA TOMADA POR:
 Cliente Personal de LECC

DETERMINACION	METODO	RESULTADO	LIMITES NSO
			13.07.01:04 MÁXIMO PERMISIBLE
PLOMO	Absorción Atómica con HGA	Menor de 0.005 mg/L	0.01 mg/L

N/D: No Definida por cliente.
 EL INFORME CORRESPONDE A LA MUESTRA REMITIDA Y ENSAYADA.
 NSO (NORMA SALVADOREÑA OBLIGATORIA). NSO 13.07.01:04 AGUA. AGUA POTABLE.


 Lic. Ana Luz Arévalo Posada
 Química Farmacéutica





Laboratorio Acreditado por CONACYT bajo la Norma NSR ISO/IEC 17025 en pruebas específicas para Aguas, Alimentos, Superficies y Medicamentos.

Anexo IV-3 Boletín de prensa del MINSAL



BOLETÍN DE PRENSA **Realizan reunión informativa sobre el Estado de Emergencia Ambiental en Sitio del Niño**

San Juan Opico, La Libertad, 20 de agosto de 2010. Debido a la declaratoria de Estado de Emergencia Ambiental por contaminación de plomo, en un área de 1,500 metros alrededor de las instalaciones donde funcionó la fábrica Record de El Salvador, autoridades de gobierno y locales presidieron la primera asamblea informativa para los pobladores del cantón Sitio del Niño.

La declaratoria tendrá una vigencia de seis meses, y permitirá al Estado realizar acciones inmediatas de ayuda, asistencia, movilización de recursos humanos y financieros, para apoyar a las poblaciones afectadas por el plomo.

En tal sentido, se realizó una reunión informativa con los pobladores afectados sobre las acciones iniciales que se contemplan dentro del decreto. Dicha reunión fue presidida por el Ministro de Medio Ambiente, Ing. Herman Rosa Chávez; Ministra en funciones, Dra. Violeta Menjívar; Viceministra de Medio Ambiente, Licda. Lina Dolores Pohl; Subsecretario de Transparencia y anticorrupción, Lic. Marcos Rodríguez; Presidente de ANDA, Ing. Marco Antonio Fortín; Gobernador Departamental José Joaquín Aguilar; Alcalde Municipal, Ing. José Romeo Barillas.

Según la Dra. Menjívar, son más de 121 mil niños/as afectados/as y por ello son quienes requieren mayor seguimiento de atención médica, ***“los niños son los que absorben con más facilidad el plomo, pueden presentar enfermedades hepáticas, de aprendizaje, crecimiento y hasta desnutrición, por ello se les ha dado complemento alimentario, multivitaminas, desparasitantes, atención odontológica y pediátrica, ahora se les dará atención especializada ya que los efectos del plomo se presentan a lo largo del tiempo y se les tratará las secuelas, son 24 especialistas a cargo de este trabajo”***, dijo la funcionaria.

“En esta nueva etapa de diagnóstico se realizarán pruebas hepáticas, neurológicas, test psicológicos y de fertilidad, durante estos dos próximos meses serán de diagnóstico y en noviembre serán de tratamiento especializado” mencionó.

Además dijo que es la primera vez en la historia del país que se hace una declaratoria de Emergencia Ambiental, por lo que públicamente pidió disculpas en nombre del Estado a los pobladores del Sitio del Niño, por hacer esta declaración tardía, aclarando que no ha sido durante este nuevo Gobierno, sino que la anterior administración que no actuó en el momento que iniciaba la contaminación.

Las colonias que están dentro del área contaminada son: colonias Sitio del Niño; Nueva Candelaria, Tecpan, Brisas de Asan Andrés; residenciales Santa Fe, Prados I y II y Ciudad Versalles; y el caserío Estación Bandera.

Anexo V

Reporte de concentraciones de plomo en suelo publicadas por el MARN

