

## Artículo científico

## Evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas del municipio de San Pedro La Laguna, Sololá

Homero Aparicio Escobar López

Ingeniero Civil, M. Sc. Ingeniería Sanitaria, ERIS-USAC, Guatemala

Dirección para recibir correspondencia: homeroes@gmail.com

Recibido 05.10.2018 Aceptado 26.10.2018

### Resumen

Este artículo presenta una evaluación de vulnerabilidad y riesgo del acuífero subyacente en el municipio de San Pedro La Laguna, Sololá. La evaluación se realizó aplicando el método GOD (*Groundwater occurrence-overall aquifer class-Depth*) (Foster, 1987) para determinar la vulnerabilidad, y para determinar el riesgo y prioridad de protección, se combinaron los resultados de vulnerabilidad con el método de evaluación de carga contaminante POSH (*Pollutant Origin Surcharge Hydraulically*) (Foster e Hirata, 1988). Con la aplicación de la metodología en una pequeña región, se establecieron zonas de riesgo que fueron cotejadas con las concentraciones de nitratos detectados en las campañas analíticas que registraron concentraciones de nitratos en un rango de 7.92 a 118.80 mg/L en época lluviosa y 13.00 a 506.00 mg/L en época seca. Para una simple utilidad también se desarrollaron mapas de vulnerabilidad, riesgo y protección que pueden ser herramientas útiles para la planificación del ordenamiento territorial de la zona, el manejo y el control de los recursos hídricos.

Palabras clave: Acuífero, aguas residuales, nitratos, análisis de vulnerabilidad, infiltración.

### Abstract

This article presents an assessment of vulnerability and risk of the underlying aquifer in the municipality of San Pedro La Laguna, Sololá. The evaluation was carried out applying the GOD method (*Groundwater occurrence-overall aquifer class-Depth*) (Foster, 1987), to determine the vulnerability, and to determine the risk and protection priority, the vulnerability results were combined with the pollutant load evaluation method. POSH (*Pollutant Origin Surcharge Hydraulically*) (Foster and Hirata, 1988). With the application of the methodology in a small region, risk zones were established that were compared with the concentrations of nitrates detected in the analytical campaigns carried out in which concentrations of nitrates in a range of 7.92 to 118.80 mg/L in rainy season and 13.00 to 506.0 mg/L in dry season. For a simple utility, vulnerability, risk and protection maps were developed that can be useful tools for the planning of the territorial ordering of the area, the management and control of water resources.

**Keywords:** Aquifer, wastewater, nitrates, vulnerability analysis, infiltration.

### Introducción

En el municipio de San Pedro La Laguna se determinó que existe una alta contaminación de aguas subterráneas, registrando concentraciones de nitratos en un rango de 7.92 a 118.8 mg/L en época lluviosa y 13.0 a 506.0 mg/L en época seca. Son varias las causas potenciales de la contaminación de las aguas subterráneas, siendo las más importantes las relacionadas con actividades antrópicas.

En este artículo se analizan las condiciones propias del acuífero subyacente en la cabecera municipal de San Pedro La Laguna y se determinan los niveles de vulnerabilidad y riesgo, derivados de la imposición de

cargas hidráulicas impuestas por la infiltración de aguas residuales.

### Antecedentes

El manejo y protección de las aguas subterráneas es un tema desatendido en Guatemala y debería ser incuestionable considerando la demanda actual de suministro que existen zonas específicas del país, como es el caso del municipio de San Pedro La Laguna en el departamento de Sololá; en el que el aprovechamiento para suministro de agua cubre la demanda de la población en un 70%.

Las causas principales que se asocian a la contaminación de las aguas subterráneas son de

carácter antrópico y en el caso de San Pedro La Laguna la principal tiene relación con la producción de aguas residuales y la infiltración de estas al subsuelo.

La infiltración de aguas residuales al subsuelo se ve favorecida por las características geológicas que se componen de rocas volcánicas cuaternarias y una geología superficial que incluye depósitos de flujos piro clásticos, coladas de lava, depósitos pomáceos y tobas volcánicas. Todos los elementos con un alto grado de fracturación que genera altos niveles de permeabilidad.

Considerando las condiciones de uso de suelo, características geológicas, hidrogeológicas y actividades antrópicas se procedió a determinar la vulnerabilidad y el riesgo potencial de la contaminación del acuífero y se contrasta con las campañas analíticas realizadas en las que se encontraron altas concentraciones de nitratos que son un indicador de la contaminación derivada de las aguas residuales infiltradas.

### Descripción del área de estudio

La investigación se desarrolló en el municipio de San Pedro La Laguna, departamento de Sololá, Guatemala. Este municipio se eligió al considerar la carga demográfica puntual de 17,085 habitantes (Escobar & Rodríguez, 2017) concentrados en la cabecera municipal y luego de realizar un análisis sobre la disposición de las aguas residuales en los núcleos poblados (cabeceras municipales) en la cuenca del lago de Atitlán, que evidenció que se dispone de las aguas residuales al subsuelo. El municipio se ubica en el suroeste de la cuenca del lago de Atitlán (Figura 1).

Figura 1. Esquema de localización del área de estudio



### Metodología

El método de análisis de la vulnerabilidad y riesgo parte fundamentalmente de la investigación de las características geológicas, hidrogeológicas y de uso de suelo de la zona de estudio.

### Condiciones geológicas

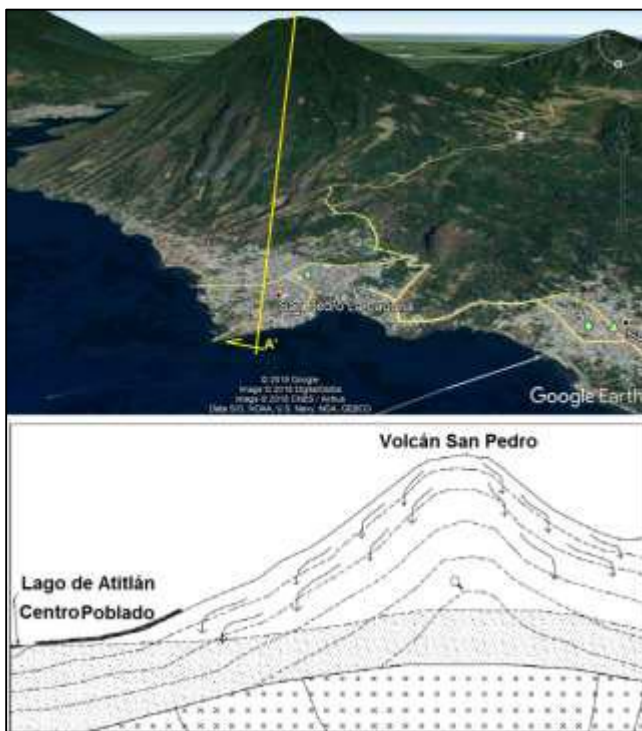
San Pedro La Laguna se ubica geomorfológicamente sobre la cadena volcánica de Guatemala, siendo su origen volcánico el que ha determinado su topografía. La geología propia de la zona de estudio está compuesta por rocas volcánicas cuaternarias y una geología superficial que incluye depósitos de flujos piro clásticos, coladas de lava, depósitos pomáceos y tobas volcánicas. Los flujos piro clásticos y los depósitos pomáceos poseen una gran capacidad de porosidad y permeabilidad.

### Condiciones hidrogeológicas

Las condiciones hidrogeológicas de la zona son definidas por la capacidad de los materiales de permitir la circulación del agua, siendo la tipología específica de la zona, de permeabilidad por fisuración: complejos estrato volcánicos terciarios y cuaternarios. Las características hidrogeológicas del estratovolcán San Pedro están controladas principalmente por el nivel de fracturación que presentan las lavas que lo

conforman y la alta permeabilidad asociada a los depósitos laháricos y piro clásticos (Figura 2), lo cual facilita la infiltración de las aguas de precipitación y la circulación de las aguas subterráneas, por lo que no se originan nacimientos. El agua subterránea circula rápidamente en la dirección vertical a favor de las fracturas en las lavas y en las capas más permeables, recarga así el acuífero profundo del lago de Atitlán. (Geólogos del mundo, 2013).

**Figura 2. Esquema de características hidrogeológicas del estratovolcán San Pedro.**



**Uso del suelo**

En cuanto a los usos del suelo en la zona de estudio, en la figura 3 se puede evidenciar que el principal uso corresponde al domiciliario con una alta carga poblacional, que en el desarrollo de sus actividades genera principalmente dos tipos de residuos: sólidos y líquidos. El único asentamiento de población del municipio corresponde al núcleo de la cabecera municipal.

**Figura 3. Uso del suelo en área de estudio**



La contaminación de los acuíferos derivada de la disposición de los residuos sólidos se debe principalmente a la generación de lixiviados, que pueden presentar una composición variable. En cuanto a los residuos líquidos, las causas de contaminación se deben principalmente a la disposición de las aguas residuales sin un tratamiento previo. La composición de las aguas está asociada al nivel de tratamiento que estas posean antes de su vertido, lo cual condiciona drásticamente la carga contaminante de las mismas. La tabla 1 presenta las características de los residuos líquidos de tipo doméstico, y en la tabla 2 la composición tipo de las aguas residuales según varios autores.

Con respecto a los sistemas de disposición de aguas residuales en el municipio el 87% de viviendas lo realiza a través de letrinas lavables.

De las aguas residuales generadas por las letrinas lavables, en un 59 % la disposición de las aguas se realiza a través de pozos de absorción sin un tratamiento, mientras que un 33 % cuenta con fosas sépticas de las que la mayor parte se encuentran en mal estado, sin cumplir con ninguna actividad de

depuración; el 1 % realiza las descargas directas al lago de Atitlán y del 7 % no se cuenta con datos.

**Tabla 1. Residuos líquidos domésticos**

Residuos líquidos domésticos			
Fuente	Características potenciales de efluente mg/L		Tasa de producción efluentes
Aguas residuales (Hece y orina humana)	Sólidos en suspensión	~ 6 x 10 <sup>4</sup>	0,4-0,6 m <sup>3</sup> /persona/año
	DBO <sub>5</sub>	~ 5 x 10 <sup>4</sup>	0,3-0,5 Kg/persona/año
	N (Total)	~ 1 x 10 <sup>4</sup>	
	Coliformes fecales	~ 1 x 10 <sup>7</sup>	
	Estreptococos fecales	~ 1 x 10 <sup>6</sup>	
Fosas sépticas	Sólidos en suspensión	100-300	
	DBO <sub>5</sub>	50-400	
	COT	100-300	
	Total de sólidos	300-600	40-60 m <sup>3</sup> /persona/año
	Amoniaco	20-40	
	Cloruros	100-200	

**Fuente:** elaboración propia, con base en: Foster, S. S. D.; Young, C. P. *Groundwater contamination due to agricultural land-use practices in the United Kingdom. UNESCO-IHP Studies and reports in hydrology series, 1980.*

Para conocer los impactos de la infiltración de las aguas residuales se realizaron dos campañas analíticas de toma de muestras y análisis en 16 puntos que incluyen pozos, sistema de suministro de agua y el lago de Atitlán. Una campaña se realizó en el mes de septiembre de 2015 (época de lluvia) y otra en febrero de 2016 (época seca).

**Tabla 2. Composición de las aguas residuales domésticas.**

Composición aproximada de las aguas residuales domésticas Mg/L						
Autor		Imhoff	Hammer	Babbitt	Metcliff-Eddy	W.P.C.F.
Consumo de agua L/h/d		150	400	378	378	378
Sólidos totales		1260	800	500	700	700
	Volátiles	730	440	350	350	350
Sólidos en susp. Totales	Fijos	530	360	150	350	350
		600	240	300	200	200
Sólidos en susp. decant.	Volátiles	400	180	250	150	150
	Fijos	200	60	50	50	50
Sólidos en susp. no decan.		400	120	-	100	-
	Volátiles	270	80	-	75	-
	Fijos	130	40	-	25	-
Sólidos disueltos total		200	120	-	100	-
	Volátiles	130	100	-	75	-
D.B.O. <sub>5</sub>	Fijos	70	20	-	25	-
		660	560	200	500	450
Nitrógeno Total	Volátiles	330	260	100	200	160
	Fijos	330	300	100	300	290
Fósforo Total		-	200	200	200	100-300
		-	35	50	40	20-85
		-	4	4	4	-

**Fuente:** IGME. *Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España. Madrid, 1985.*

### Vulnerabilidad y riesgo

El riesgo a la contaminación de un acuífero depende de la interrelación de dos factores que son la vulnerabilidad y la amenaza.

$$\text{Riesgo} = \text{Vulnerabilidad} \times \text{amenaza}$$

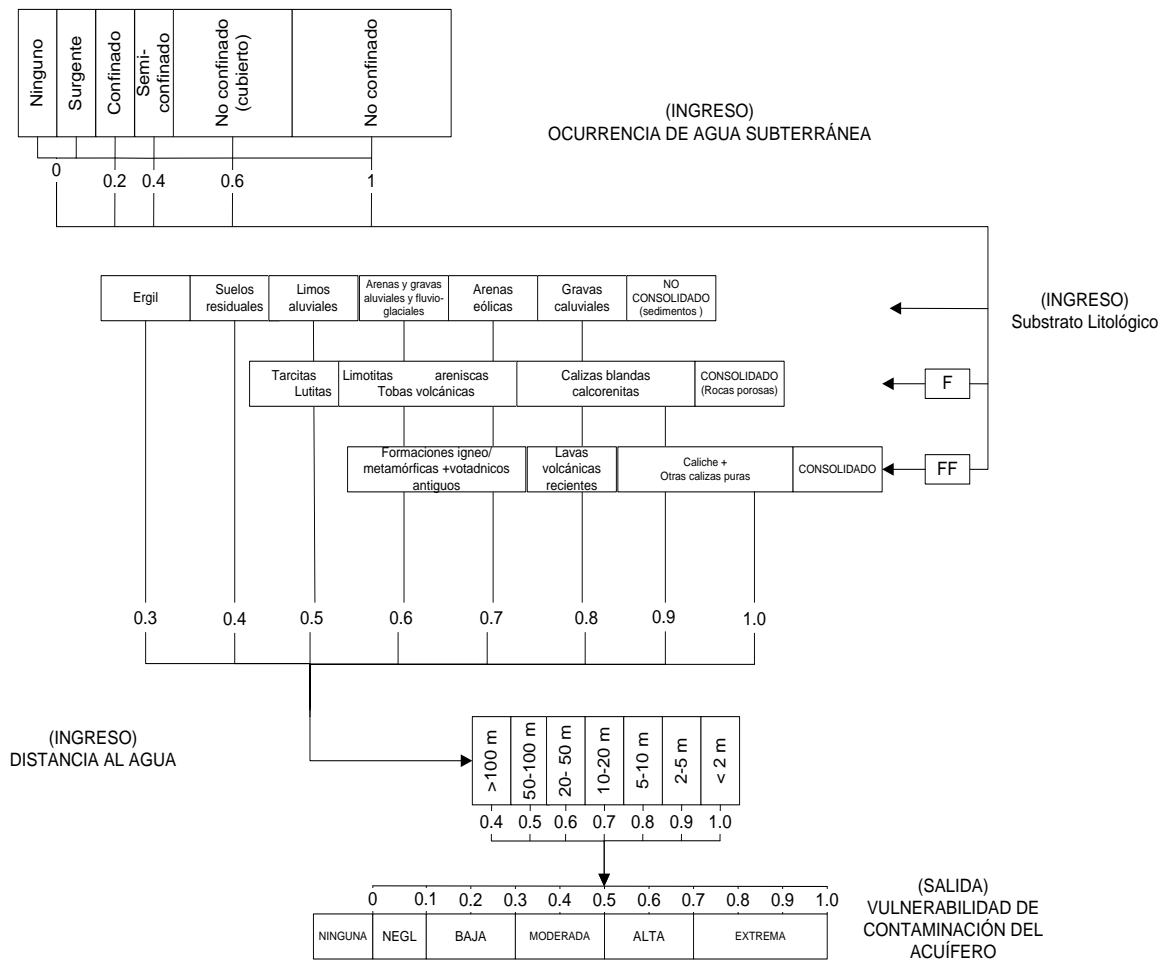
La vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero se basa en las características intrínsecas de este, que determinan la susceptibilidad a ser afectado por una carga contaminante. Mientras que la amenaza es generada por las distintas actividades antrópicas

### Determinación de la vulnerabilidad a través del método GOD

El método GOD (*Groundwater occurrence-overall aquifer class-Depth*), desarrollado por Stephen Foster en 1987, es un método empírico que establece la vulnerabilidad del acuífero en función de la inaccesibilidad de contaminantes a la zona saturada, considerando la capacidad de atenuación de los estratos superiores al acuífero. La vulnerabilidad del acuífero se determina por el producto de los siguientes factores:

$$\text{Índice de vulnerabilidad} = G \times O \times D$$

Figura 4. Caracterización de la vulnerabilidad GOD



**G:** índice por condición de confinamiento del acuífero.

**O:** índice del substrato litológico en términos de grado de consolidación y características litológicas.

**D:** índice por profundidad del nivel del agua o techo del acuífero confinado.

Cada índice posee un valor entre cero y uno. A mayor valor, las condiciones son desfavorables. El método asigna un peso indirecto en función de las variables y sus valores, como se indica en la figura 4.

Fuente: Foster, S. S. D.; Hirata, R. Groundwater pollution risk assessment.1988.

### Análisis de riesgo de contaminación del acuífero según el método POSH

El método POSH (*Pollutant Origin Surcharge Hydraulically*) fue desarrollado por Foster e Hiraita en 1988, y revisado por Foster y otros autores en 2001. Se utiliza para clasificar las cargas contaminantes del subsuelo, estimar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas y establecer los criterios para la protección de los acuíferos. El método se basa en dos características: el origen del contaminante y la hidráulica.

El primer paso para determinar los riesgos de contaminación es la identificación de las actividades potencialmente generadoras de carga contaminante que afecten la zona de estudio.

El siguiente paso que define el método POSH corresponde a la clasificación de la carga contaminante como fuente de contaminación dispersa/multipuntual o puntual y, en función del tipo, se procede a determinar el potencial de carga contaminante.

Una vez determinado el riesgo de contaminación y teniendo en cuenta la vulnerabilidad del acuífero, se determina la prioridad de protección del acuífero a través de un sistema sencillo que fue desarrollado por Foster en 1987 y Foster e Hirata en 1988. En este se vinculan la intensidad de la carga contaminante y la vulnerabilidad del acuífero, resultando el índice de prioridades, al designar un número que puede ser 3, 2, ó 1, según el nivel de prioridad, partiendo del más bajo al más elevado. En la figura 5 se presenta el método para la determinación de prioridades de acción.

**Figura 5. Método para la determinación de prioridades de acción.**

		Vulnerabilidad		
		Baja	Moderada	Elevada
Carga contaminante	Reducida	3	3	2
	Intermedia	2	2	1
	Elevada	2	1	1

**Fuente: HIRATA, R. Revista Latino-Americana de Hidrogeología 2. Fecha de consulta: 2016**

Derivado de la determinación del nivel de riesgo pueden establecerse perímetros de protección para pozos de suministro, según se indica en la figura 6.

**Figura 6. Determinación de perímetros de protección para pozos con base en los niveles de prioridad definidos en el acuífero**

		Vulnerabilidad			Perímetro de protección de pozo			
		Baja	Moderada	Elevada	IV	III	II	I
Carga contaminante	Reducida	3	3	2	3	3	1	1
	Intermedia	2	2	1	3	2	1	1
	Elevada	2	1	1	2	1	1	1

Priorización	Priorización
--------------	--------------

**Fuente: Hirata, R. Revista Latino-Americana de Hidrogeología n.2, 2002**

El método anterior establece según las áreas de priorización la clasificación de la intervención con base en los perímetros de tipo I, II, III y IV, que se definen de la siguiente forma:

- I: perímetro de protección inmediato al pozo
- II: protección bacteriológica
- III: protección de productos químicos
- IV: protección de recarga del acuífero

### Resultados

#### Infiltración de aguas residuales

La figura 7 presenta el esquema de disposición de las aguas residuales en el subsuelo.

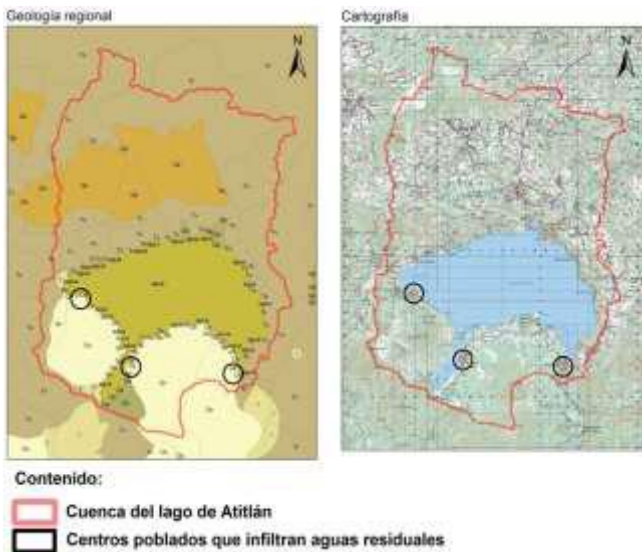
La disposición de las aguas residuales en el subsuelo se realiza en la zona sur de la cuenca del lago de Atitlán y se vincula directamente con las condiciones geológicas como se evidencia en los mapas de contraste de la figura 8.

**Figura 7. Sistema típico de disposición de aguas residuales**



En la tabla 3 se presenta el resumen de los cálculos de la estimación de las aguas residuales que se producen en el municipio, considerando el último censo municipal (2011).

**Figura 8. Comparación de mapa de geología regional y centros poblados de disposición de aguas residuales por infiltración**



**Tabla 3. Estimación de producción de aguas residuales en el municipio de San Pedro La Laguna**

Población 2011	15,478	habitantes
Tasa de crecimiento	2.5	%
Población 2017	17,085	habitantes

Dotación	120	L/hab/día
Factor de retorno	0.8	
Caudal de aguas residuales	18.98	l/s
Caudal de aguas residuales día	1,640.14	m3/día

En la tabla 4 se presentan los resultados de concentración de nitratos, coliformes fecales y totales, en los puntos de muestreo.

Los resultados de las analíticas reflejaron altas concentraciones de nitratos por lo que se puede comprobar que el acuífero ya presenta contaminación derivada de los procesos de infiltración de aguas residuales al subsuelo. En la figura 9, se representan las curvas de concentración de nitratos detectadas en contraste con las zonas de prioridad de protección en la época de lluvia.

**Vulnerabilidad método GOD:**

**Índice G:** la zona de estudio (Figura 11) corresponde a una zona de acuífero libre, y el índice correspondiente según la figura 4 es **1,0**.

**Índice O:** las condiciones litológicas corresponden a rocas volcánicas cuaternarias y una geología superficial que incluye depósitos de flujos piroclásticos, coladas de lava, depósitos pomáceos y tobas volcánicas. En la figura 10 se presenta el perfil litológico de la zona sur de estudio producto de un sondeo eléctrico vertical SEV.

**Tabla 4. Niveles de concentración de nitrato, Coliformes fecales y Totales.**

Punto de toma	Tipo	Nitrato (NO3-) (mg/L)		Coliformes fecales (NMP/100 mL)		Coliformes totales (NMP/100 mL)	
		1 sep. 2015	2 feb. 2016	1 sep. 2015	2 feb. 2016	1 sep. 2015	2 feb. 2016
SP01	Nacimiento brote definido	7.48	No levandada	<3.00	---	210.00	---
SP02	Pozo excavado	23.76	112.50	1100.00	<1.00	>2400.00	179.30

Punto de toma	Tipo	Nitrato (NO3-) (mg/L)		Coliformes fecales (NMP/100 mL)		Coliformes totales (NMP/100 mL)	
		1 sep. 2015	2 feb. 2016	1 sep. 2015	2 feb. 2016	1 sep. 2015	2 feb. 2016
SP03	Pozo excavado	45.32	72.90	75.00	42.00	210.00	>2419.60
SP04	Pozo excavado	118.80	47.70	20.00	1.00	1100.00	248.10
SP05	Lago	0.44	2.90	93.00	<1.80	1100.00	11.00
SP07	Lago	13.20	3.80	28.00	<1.80	>2400.00	4.50
SP08	Pozo perforado	38.00	No levandada	4.00	---	13.00	---
SP09	Pozo perforado	11.88	No levandada	<3.00	---	<3.00	---
SP10	Pozo excavado	30.80	96.40	28.00	24.10	210.00	648.80
SP11	Pozo excavado	41.36	69.80	<3.00	<1.0	>2400.00	155.30
SP12	Pozo excavado	33.00	65.00	150.00	98.00	460.00	>2419.60
SP13	Pozo excavado	44.00	506.00	<3.00	<1.0	14.00	>2419.60
SP14	Pozo excavado	7.92	22.40	25.00	58.30	460.00	307.60
SP15	Pozo excavado	12.76	13.80	<3.00	4.10	>2400	235.90
SP16	Lago	6.16	3.20	75.00	<1.80	1100.00	4.20
SP17	Grifo	33.44	136.8	<3.00	<1.00	93.00	238.20

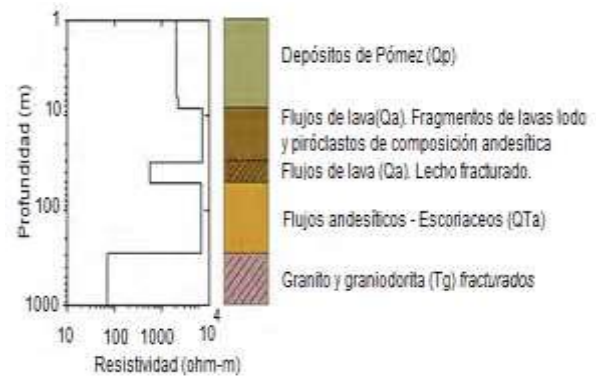
Figura 9. Contraste de concentración de nitratos con zonas de prioridad de protección.



Considerando las condiciones litológicas mencionadas, el índice correspondiente según la figura 4 es **0,8**.

**Índice D:** Variable, según nivel freático. En la tabla 5 se presentan los resultados del cálculo de la vulnerabilidad, considerando las distintas elevaciones del terreno y distancias hacia el nivel piezométrico y en la figura 11 indica la representación de la zonificación de vulnerabilidad según su clasificación.

Figura 10. Columna litológica inferida, resultante de la inversión de datos SEV



Fuente: Geólogos del mundo, 2016.



**Tabla 5. Clasificación de la vulnerabilidad en San Pedro La Laguna**

Profundidad del nivel freático	G	O	D	Vulnerabilidad	Clasificación
100-50	1	0.8	0.5	0.4	Moderada
50-20	1	0.8	0.6	0.48	Moderada
20-10	1	0.8	0.7	0.56	Alta
10-05	1	0.8	0.8	0.64	Alta
05-02	1	0.8	0.9	0.72	Extrema
<2	1	0.8	1	0.8	Extrema

**Figura 11. Mapa de vulnerabilidad del acuífero**



**Riesgo de contaminación del acuífero método POSH:**

Analizados los riesgos de contaminación de la zona de estudio en función de la delimitación de actividades que se indican en la tabla 6, se determinó que la principal fuente de contaminación para el área de estudio se debe al saneamiento sin alcantarillado, con un estimado de 3,310 puntos de contaminación (multipuntual).

**Tabla 6. Resumen de actividades potencialmente generadoras de una carga contaminante al subsuelo**

Actividades generadoras de contaminación de subterránea				
Actividad	Características de la carga contaminante			
	Categoría de distribución	Tipos de contaminantes	Sobrecarga hidráulica	Debajo de la capa de suelo
Desarrollo urbano				
Saneamiento sin alcantarillado	u/r P-D	n f o t	+	+
Fugas de desagües	u P-L	o f n t	+	
Lagunas de oxidación de desagües	u/r P	o f n t	++	+
Descarga de aguas residuales en el suelo	u/r P-D	n s o f t	+	
Aguas residuales en ríos influentes	u/r P-L	n o f t	++	++
Lixiviación de rellenos	u/r P	o s h t		+
Tanques de almacenamiento de combustible	u/r P-D	t		
Sumideros de drenaje de las carreteras	u/r P-D	s t	+	++
Producción industrial				
Tanques o tuberías con fugas	u P-D	t h		
Derrames accidentales	u P-D	t h	+	
Lagunas de efluentes	u P	t o h s	++	+
Descarga de efluentes en el suelo	u P-D	t o h s	+	
Descarga de efluentes en los ríos	u P-L	t o h s	++	++
Lixiviación de volcaderos	u/r P	o h s t		
Drenaje por sumideros	u/r P	t h	++	++
Precipitaciones aéreas	u/r D	s t		
Producción agrícola - Cultivo del suelo				
Con agroquímicos	r D	n t		
Con agroquímicos e irrigación	r D	n t s	+	
Con lodos	r D	n t s o		
Irrigación de aguas residuales	r D	n t o s f	+	
Producción agrícola - Cría de ganado/Procesos de cosecha				
Lagunas de efluentes	r P	f o n t	++	+
Descarga de efluentes en el suelo	r P-D	n s o f t		
Descarga de efluentes al río	r P-L	o n f t	++	++
Extracción Mínera				
Alteración del régimen hidráulico	r/u P-D	s h		
Descarga de aguas de drenaje	r/u P-D	h s	++	++
Aguas de procesos	r/u P	h s	+	+
Lixiviación de volcaderos	r/u P	s h		

Actividades generadoras de contaminación de subterránea				
Actividad	Características de la carga contaminante			
	Categoría de distribución	Tipos de contaminantes	Sobrecarga hidráulica	Debajo de la capa de suelo
Leyenda: a) u/r: urbana/rural; b) P-L-D: puntual-lineal-difusa; c) n: compuestos de nutrientes; d) f: patógenos fecales; e) o: carga orgánica general; f) s: salinidad; g) h: metales pesados; h) t: microorganismos tóxicos				

**Fuente: FOSTER e HIRATA. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Fecha de consulta: 2016.**

Estudiados los criterios para la definición del potencial de carga contaminante del saneamiento *in situ* indicados en la tabla 7. La figura 12 presenta la delimitación del potencial de carga contaminante.

**Tabla 7. Clasificación de cargas contaminantes de fuentes dispersas**

Clasificación de cargas contaminantes de fuentes dispersas/Multipuntales		
Potencial de carga contaminante	Fuente de contaminación	
	Saneamiento in situ	Prácticas agrícolas
Elevado	Cobertura de la red de alcantarillado < 25 %	Cultivos comerciales intensivos y la mayoría de los monocultivos en suelos bien drenados en climas húmedos o con baja eficiencia en el riego, pastoreo intensivo sobre praderas altamente fertilizadas.
	Densidad poblacional > 100 hab/Ha	
Moderado	Intermedio	Los demás casos
Reducido	Cobertura de la red de alcantarillado > 75 %	Rotación de cultivos tradicionales, pastoreo extensivo, sistemas de granjas ecológicas, cultivos bajo riego de alta eficiencia en tierras áridas (< 250 mm/año)
	Densidad poblacional < 50 hab/Ha	

**Fuente: FOSTER e HIRATA. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Fecha de consulta: 2016.**

**Figura 12. Identificación del riesgo conteniente determinado con el método POSH**



Con los resultados de la superposición de cargas contaminantes y el nivel de vulnerabilidad de acuífero en la zona se determina la representación del mapa de prioridades de protección, el cual se indica en la figura 13.

**Prioridades de protección**

Con base en las consideraciones del método que se indica en la figura 6 se determina que para para zona de estudio según en nivel de prioridad, las acciones de protección del acuífero se deben enfocar en la recarga hídrica, protección bacteriológica y de derrame de productos químicos.

**Figura 13. Zonas de priorización de acciones de protección**



### Análisis de resultados

La infiltración de las aguas residuales se ve favorecida por las condiciones geológicas de la zona, en la que los niveles de permeabilidad son altos. La figura 7 presenta el esquema de disposición de las aguas residuales en el subsuelo que utiliza el 92 % de la población (un 33 % incluye entre la producción y descarga a una fosa séptica).

En un análisis general sobre la disposición de las aguas residuales en los núcleos poblados (cabeceras municipales) en la cuenca del lago de Atitlán, se evidencia que en los municipios de la zona sur de la cuenca se realiza la disposición a través de la infiltración en el subsuelo, aspecto que se asocia a la geología de la zona. En la figura 8 se presenta la relación entre el tipo de disposición en la cuenca y la geología local del terreno.

La alta permeabilidad de la zona ha incidido en que las unidades de infiltración no se colmaten ni se llenen con lo que se anulan las operaciones de mantenimiento, situación que genera en los usuarios un grado de satisfacción. Esta condición es también favorecida por

la falta de información y datos sobre la contaminación debida a la infiltración directa de aguas residuales.

Un indicador importante de la contaminación de las aguas subterráneas por la infiltración de las aguas residuales es la concentración de Nitratos. Los valores de contaminación determinados en la tabla 4 con concentraciones en un rango de 7.92 a 118.8 mg/L en época lluviosa y 13.0 a 506.0 mg/L en época seca, evidencian el alto impacto de la infiltración de aguas residuales.

Con respecto a la alta vulnerabilidad y el nivel de riesgo elevado, estos se relacionan principalmente por las características demográficas, geológicas y tipología de sistemas de disposición de aguas residuales.

Un programa de protección de aguas subterráneas puede desarrollarse a partir de los mapas de vulnerabilidad, riesgo y prioridades de protección, en base al método de determinación de perímetros de protección que explica la figura 6.

Con base en las consideraciones del método de perímetros de protección las acciones de protección del acuífero se deben enfocar en la recarga hídrica, protección bacteriológica y de derrame de productos químicos.

### Conclusiones

Con base en el análisis de vulnerabilidad del acuífero, se determinó que en la área de estudio existen zonas de vulnerabilidad moderada, alta y extrema, y según el orden de prioridades de protección, las acciones se deben enfocar en la recarga hídrica, protección bacteriológica y de derrame de productos químicos.

El impacto de la contaminación del acuífero por la infiltración de aguas residuales se constató con los resultados obtenidos de concentración de nitratos en las campañas analíticas realizadas, obteniendo concentraciones en un rango de 7.92 a 118.8 mg/L en época lluviosa y 13.0 a 506.0 mg/L en época seca.

No existe, en el municipio de San Pedro La Laguna, ni en la cuenca del lago de Atitlán, alguna iniciativa para la protección de los acuíferos. Este aspecto debe ser de importancia para la investigación y principalmente en poblaciones en las que el suministro de agua para consumo humano es subterráneo, como es el caso de San Pedro La Laguna.

Se ha determinado que en la actualidad el acuífero está contaminado y se han señalado las causas principales del deterioro del mismo, y es evidente que ante la falta de acciones vinculadas a la protección y regeneración de su calidad, la problemática de contaminación y los efectos asociados a esta seguirán aumentando de una forma desmedida.

## Bibliografía

- Electro-watt. Atitlán project feasibility report. Guatemala: Ingenieros Consultores S.A., 1971.74 p.
- Escobar, Homero. Rodríguez, Eduardo. Calidad de las aguas subterráneas en el municipio de San Pedro La Laguna y sus efectos sobre el cuerpo de agua del lago de Atitlán Trabajo de graduación maestría en Ing. Sanitaria. Universidad de San Carlos, Facultad de Ingeniería, ERIS, 2017. 165 p.
- Foster, S. S. D.; Young, C. P. Groundwater contamination due to agricultural land-use practices in the United Kingdom. UNESCO–IHP Studies and reports in hydrology series, 1980, vol. 30, p. 268-282.
- Foster, S. S. D. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants. 1987, vol. 38, p. 69-86.
- Foster, S. S. D.; Hirata, R. Groundwater pollution risk assessment. A methodology using available data. Pan Ame. Cent. for Sanit. Engin. and Envir. Scien.(CEPIS). Lima, 1988. 81p.
- Geólogos del mundo. Estudio hidrogeológico y de recarga de la cuenca del lago de Atitlán. Con el apoyo financiero de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID). Guatemala: 2013. 88 p.
- Hirata, R. Revista latino-americana de hidrogeología No. 2. 2002. p. 81-90.
- Instituto Geológico Y Minero De España. Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España. Madrid, España: IGME 1985. 281 p.

desarrollo y cooperación en el sector agua y saneamiento.

M.Sc. en Ingeniería Sanitaria de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, ERIS de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

## Información del autor

Homero Aparicio Escobar López, graduado de ingeniero civil en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC) en el año 2009. Con experiencia en el diseño de proyectos de agua y saneamiento y en la gestión de proyectos de