



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos

**CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL MUNICIPIO DE SAN PEDRO LA
LAGUNA Y SUS EFECTOS SOBRE EL CUERPO DE AGUA DEL LAGO DE ATILÁN**

Ing. Civil Homero Aparicio Escobar López

Ing. Químico Eduardo Antonio Rodríguez Juárez

Asesorado por el MSc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos

Guatemala, febrero de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

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

ESTUDIO ESPECIAL

PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y
RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS)

POR

ING. CIVIL HOMERO APARICIO ESCOBAR LÓPEZ

ING. QUÍMICO EDUARDO ANTONIO RODRÍGUEZ JUÁREZ

ASESORADO POR EL MSC. ING. ADÁN ERNESTO POCASANGRE

COLLAZOS

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE
**MAESTRO (MAGISTER SCIENTIFICAE) EN CIENCIAS
DE INGENIERÍA SANITARIA**

GUATEMALA, FEBRERO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE ESTUDIO ESPECIAL

EXAMINADOR	MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
EXAMINADOR	MSc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos
EXAMINADOR	MSc. Ing. Élfego Odvin Orozco Fuentes

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presentamos a su consideración nuestro trabajo de graduación titulado:

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


Tema que nos fuera asignado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, con fecha veintiocho de enero de 2016.



Eduardo Antonio Rodríguez Juárez

ari_45@hotmail.com

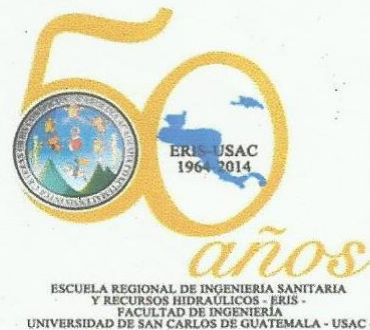
200819052



Homero Aparicio Escobar López

homeroes@gmail.com

200430588



Guatemala, 15 de febrero 2017

Señores Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS):

Respetuosamente les comunico que he revisado y aprobado, en mi calidad de asesor y coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, el informe final del Estudio Especial titulado:

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

Presentado por los estudiantes:

Ing. Eduardo Antonio Rodríguez Juárez
Ing. Homero Aparicio Escobar López

Les manifiesto que los estudiantes cumplieron en forma satisfactoria con todos los requisitos establecidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos -ERIS- y por la Universidad de San Carlos de Guatemala en la realización de su estudio.

Agradeciéndoles de antemano la atención a la presente, se suscribe de ustedes,
Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

MSc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos
Coordinador Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria

Msc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos
Coordinador Maestría Ingeniería Sanitaria
ERIS / USAC





Guatemala, 16 de febrero de 2017

El director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos -ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis, MSc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos y, MSc. Ing. Élfego Odvin Orozco Fuentes, así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria; MSc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos y la revisión lingüística realizada por la Licenciada Jéssica Edith Melgarejo Monterroso, Colegiado No. 27003, al trabajo de los estudiantes Ing. Homero Aparicio Escobar López e Ing. Eduardo Antonio Rodríguez Juárez, titulado 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

En representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala el décimo sexto día del mes de febrero de 2017.

Imprimase

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis



DIRECTOR

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por las tantas manifestaciones que han marcado el camino.

Mis padre

Eleodoro Avelino Escobar Calderón (QEPD), por su vida de lucha y trabajo, por su valor para trascender de lugar en lugar a pesar de las limitaciones y por darme la oportunidad de tener educación.

Mi madre

Jovita Faustina López Santizo, por su apoyo constante y su ejemplo de lucha y trabajo.

Mis hermanos

Por estar y ser siempre un gran apoyo.

La Universidad de San Carlos de Guatemala

Por las oportunidades de formación profesional que brinda al país.

Guatemala

Por las montañas, ríos y lagos.

HOMERO APARICIO ESCOBAR LÓPEZ

AGRADECIMIENTOS A:

**El MSc. Ing. Adán Ernesto
Pocasangre Collazos**

Por la asesoría en el presente trabajo.

**El personal de la Maestría en
Ingeniería Sanitaria: Ing. MSc.
Pedro Saravia Celis, Ing. MSc.
Zenón Múch, Ing. MSc. Joram Gil,
Ing. M.Sc. Julián Duarte, MSc. Ing.
Félix Aguilar, Dra. Malvina de
León, MSc. Ing. Adán Pocasangre
y Dora María Cardoza.**

Por compartir experiencias y conocimientos.

**A los compañeros y amigos de la
50 promoción de la maestría en
Ingeniería Sanitaria de la Escuela
Regional de Ingeniería Sanitaria
de la Universidad de San Carlos
de Guatemala**

Por la amistad.

**A la municipalidad y vecinos de
San Pedro La Laguna**

Por permitirnos conocer la situación del municipio de San Pedro La Laguna y por el acompañamiento brindado para este estudio.

A nuestras familias y seres queridos

Porque aportaron en nuestra formación personal y profesional, a ustedes dedicamos el éxito de esta meta alcanzada.

HOMERO APARICIO ESCOBAR LÓPEZ

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por la vida que me ha dado y el camino que me tiene preparado.
Mi madre	Ahixsa Magali Juárez Mérida. Por enseñarme lo valioso de la vida.
Mis hermanos	Ricardo y Carlos Rodríguez, por su apoyo y amistad, que son un tesoro para mi vida.
Mis abuelos	Abraham Juárez y Teresa Mérida, por sus enseñanzas, consejos y por ser mis segundos padres.
Mis tíos	Jenner Soto y Lisely Juárez, por ser un apoyo fundamental en mi carrera, y por su amistad y cariño.
Mi padrino	Eduardo Vivian Rosales Zuniga (Q.E.P.D.), por sus enseñanzas, amor y los consejos que me brindó en el tiempo que estuvo al lado de la familia.
Mis amigos y compañeros de estudio de ERIS	Por su amistad.

EDUARDO ANTONIO RODRÍGUEZ JUÁREZ

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por darme inteligencia, y capacidad de análisis y comprensión en los años de estudio de mi carrera.
Mi madre	Por apoyarme incondicionalmente en todas las decisiones de mi vida.
Ing. Zenón Much	Por su amistad y valiosa ayuda en la realización del presente trabajo, muchas gracias.
Fito	Por su ayuda y colaboración en la realización del presente trabajo.
Ing. Pocasangre	Por su apoyo y asesoría.
Catedráticos ERIS	Por su empeño en la enseñanza que sirvió para mi preparación académica.
Ing. Homero Escobar	Por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto, muchas gracias.

Universidad de San Carlos de Guatemala

Por darme la oportunidad de estudiar dentro de sus puertas.

Personas San Pedro la Laguna

Por su colaboración en la realización de la presente investigación.

EDUARDO ANTONIO RODRÍGUEZ JUÁREZ

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XVII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIX
JUSTIFICACIÓN.....	XXIII
OBJETIVOS.....	XXVII
HIPÓTESIS.....	XXIX
ANTECEDENTES.....	XXXI
ALCANCES Y LIMITACIONES.....	XXXIII
INTRODUCCIÓN.....	XXXV
1. ÁREA DE ESTUDIO.....	1
1.1. Marco geológico	4
1.2. Hidrogeología	7
1.2.1. Características hidrogeológicas de los materiales.....	7
1.2.2. Características del acuífero.....	10
2. METODOLOGÍA DE MUESTREO Y ANÁLISIS DE MUESTRAS	13
2.1. Norma COGUANOR NTG 29001	13
2.2. Inventario de puntos de agua	14
2.3. Material y equipo	18
2.4. Toma de muestra en pozos.....	18
2.5. Toma de muestra en grifo y en nacimiento.....	19

2.6.	Nivel freático	19
2.7.	Cronología de actividades	23
3.	RESULTADOS.....	25
4.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS FISICOQUÍMICOS	31
4.1.	Temperatura del agua	31
4.2.	pH.....	32
4.3.	Sólidos disueltos totales.....	34
4.4.	Turbiedad	35
4.5.	Conductividad eléctrica	37
4.6.	Cloruros.....	38
4.7.	Dureza total.....	40
4.8.	Calcio	41
4.9.	Magnesio.....	43
4.10.	Sulfatos	44
4.11.	Manganeso	45
4.12.	Hierro	46
4.13.	Nitratos.....	47
4.14.	Nitritos	48
4.15.	Fosfatos	49
4.16.	Amoníaco	50
4.17.	Fluoruros	52
4.18.	Aluminio	53
4.19.	Alcalinidad.....	54
	4.19.1. Carbonatos.....	54
	4.19.2. Bicarbonatos	55
	4.19.3. Hidróxidos	56
4.20.	Olor	56

4.21.	Bacteriológico	56
5.	CLASIFICACIÓN DE AGUA.....	57
5.1.	Diagramas de PIPER.....	57
5.1.1.	Zonificación de composición de aguas según el análisis de PIPER.....	65
5.2.	Por dureza	69
5.3.	Diagramas de Stiff	73
5.4.	Diagramas de balance iónico de Stabler	78
5.5.	Diagrama de Schoeller	84
6.	CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	91
6.1.	Mecanismos de introducción y propagación de la contaminación en el acuífero.....	97
6.1.1.	Sistema de disposición de aguas residuales del municipio de San Pedro La Laguna.....	98
6.1.2.	Producción de aguas residuales en el municipio de San Pedro La Laguna.....	101
6.2.	Procesos de transporte y atenuación de los contaminantes..	103
6.2.1.	Transporte de contaminantes bacteriológicos	106
6.2.2.	Transporte de nitratos.....	110
7.	VULNERABILIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL MUNICIPIO DE SAN PEDRO LA LAGUNA	117
7.1.	Determinación de la vulnerabilidad a través del método GOG (<i>Groundwater occurrence-overall aquifer class-Depth</i>)	117
7.2.	Análisis de riesgo de contaminación del acuífero según el método POSH	123

8.	EFFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	131
8.1.	Efectos sobre el cuerpo de agua del Lago de Atitlán	131
8.2.	Efectos sobre la salud humana	133
9.	PROPUESTA DE ACCIONES	139
9.1.	Programa de protección de aguas subterráneas	139
	CONCLUSIONES.....	147
	RECOMENDACIONES	151
	BIBLIOGRAFÍA.....	153
	APÉNDICES.....	159

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Contaminación por cianobacterias	XX
2.	Mapa geológico regional del Lago de Atitlán.....	XXIV
3.	Modelo Digital del Terreno (MDT). Territorio de Guatemala.....	1
4.	Modelo Digital del Terreno (MDT). Departamento de Sololá.....	2
5.	Modelo Digital del Terreno (MDT). Cuenca del Lago de Atitlán y localización del municipio de San Pedro La Laguna	3
6.	Ubicación de calderas	5
7.	Estructura geológica del municipio de San Pedro La Laguna	6
8.	Esquema de características hidrogeológicas en un estratovolcán.	9
9.	Conjunto de puntos de muestreo.	16
10.	Esquema simplificado SEV	20
11.	Mapa de ubicación, modelo geoelectrico y columna litológica inferida, resultante de la inversión de datos SEV.....	21
12.	Puntos de muestreo de zona poblada de San Pedro la Laguna	26
13.	Temperatura.....	32
14.	pH	33
15.	Sólidos disueltos totales (mg/L).....	35
16.	Turbiedad (NTU)	36
17.	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$).....	38
18.	Cloruros (mg/L)	39
19.	Dureza total (mg/L CaCO_3)	41
20.	Calcio (mg/L Ca)	42
21.	Magnesio (mg/L Mg)	43

22.	Sulfatos SO_4 (mg/L)	44
23.	Manganeso (mg/L Mn)	45
24.	Hierro (mg/L Fe).....	46
25.	Nitratos (mg/L NO_3).....	48
26.	Nitritos (mg/L NO_2).....	49
27.	Fosfatos (mg/L PO_4)	50
28.	Amoníaco (mg/L NH_3)	51
29.	Fluoruros (mg/L)	52
30.	Aluminio (mg/L).....	53
31.	Carbonatos (mg/L CaCO_3).....	54
32.	Bicarbonatos (mg/L CaCO_3)	55
33.	Diagrama de Piper sin nitratos. Muestreo en época de lluvia	58
34.	Diagrama de Piper con nitratos. Muestreo en época de lluvia	59
35.	Diagramas de Piper sin nitratos y con nitratos. Época seca	60
36.	Diagramas de Piper sin nitratos y con nitratos	62
37.	Diagramas de Piper con nitratos. Muestreo en época de lluvia y muestreo en época seca.....	64
38.	Análisis de PIPER. Muestreo en época de lluvia	66
39.	Análisis de PIPER. Muestreo en época seca.....	68
40.	Dureza del agua. Muestreo en época de lluvia	70
41.	Dureza del agua. Muestreo en época seca.....	72
42.	Diagramas de Stiff	74
43.	Diagramas de Stiff. Muestreo en época de lluvia y muestreo en época seca	75
44.	Diagramas de Stiff	76
45.	Análisis Stiff	77
46.	Diagrama de balance iónico.....	78
47.	Diagrama de balance iónico.....	79

48.	Diagrama ternario de cationes. Muestreo en época de lluvia y muestreo en época seca	81
49.	Diagrama ternario de aniones. Muestreo en época de lluvia y muestreo en época seca	83
50.	Diagrama de Schoeller. Muestreo en época de lluvia y muestreo en época seca	85
51.	Diagrama de Schoeller	86
52.	Diagrama de Schoeller	88
53.	Diagrama de Schoeller	89
54.	Diagrama de Schoeller	90
55.	Uso del suelo en área de estudio	94
56.	Sistema de disposición de aguas residuales	99
57.	Sistema de disposición de aguas residuales	100
58.	Sistema de disposición de aguas residuales	101
59.	Procesos de dispersión a escala microscópica	104
60.	Procesos que producen atenuación de contaminantes en los sistemas de aguas subterráneos	105
61.	Tiempo de residencia versus tasa de extinción de bacterias seleccionadas en muestras de agua de 11, conservadas a 10° C	109
62.	Análisis de contaminantes bacteriológicos en dos puntos con distinto nivel piezométrico	110
63.	Corte hidrogeológico que indica la acumulación de nitratos en el suelo alrededor de una fosa seca	112
64.	Distribución de nitratos (mg/L). Muestreo en época de lluvia	113
65.	Distribución de nitratos (mg/L). Muestreo época seca	114
66.	Distribución de nitratos (mg/L)	115
67.	Unidades contaminantes y carga poblacional	118
68.	Columna litológica inferida, resultante de la inversión de datos SEV ...	120
69.	Mapa de vulnerabilidad del acuífero	122

70.	Unidades contaminantes.....	125
71.	Identificación del riesgo conteniente determinado con el método POSH	127
72.	Método para la determinación de prioridades de acción.....	128
73.	Zonas de priorización de acciones de protección	129
74.	Clorofila en Lago de Atitlán	132
75.	Ubicación de pozos de suministro de agua y puntos de suministro en la red que fueron muestreados	135
76.	Puntos de suministro de agua e interconexión de tanques en sistema de agua municipal. San Pedro La Laguna	137
77.	Foco y aplicación de niveles de evaluación de peligro de contaminantes.....	140
78.	Foco y aplicación de niveles de evaluación de peligro de contaminantes.....	141
79.	Determinación de perímetros de protección para pozos con base en los niveles de prioridad definidos en el acuífero	143
80.	Ubicación de pozos de suministro de agua y delimitación de las zonas de priorización de acciones.....	144

TABLAS

I.	Tipo, uso, altura (msnm), profundidad medida con la sonda piezométrica y la cota piezométrica	17
II.	Piezometría y variaciones de nivel estático respecto al Lago de Atitlán	22
III.	Cronología de actividades.....	23
IV.	Resultados de análisis fisicoquímicos. Muestreo en época de lluvia	27
V.	Resultados de análisis fisicoquímicos. Muestreo en época de lluvia	28

VI.	Resultados de análisis fisicoquímicos. Muestreo en época de lluvia	28
VII.	Resultados de análisis fisicoquímicos. Muestreo en época seca	29
VIII.	Resultados de análisis fisicoquímicos. Muestreo en época seca	29
IX.	Resultados de análisis fisicoquímicos. Muestreo en época seca	30
X.	Clasificación por dureza. Muestreo en época de lluvia	69
XI.	Clasificación por dureza. Muestreo en época seca	71
XII.	Datos que exceden los parámetros de la norma	92
XIII.	Residuos líquidos domésticos	96
XIV.	Composición de aguas residuales domésticas.....	97
XV.	Estimación de producción de aguas residuales en el municipio de San Pedro La Laguna.....	102
XVI.	Factores que influyen en el transporte de bacterias y virus a través del suelo	107
XVII.	Factores que influyen en la supervivencia de las bacterias.....	108
XVIII.	Clasificación de la vulnerabilidad en San Pedro La Laguna.....	121
XIX.	Resumen de actividades potencialmente generadoras de una carga contaminante al subsuelo.....	124
XX.	Clasificación de cargas contaminantes de fuentes dispersas	126
XXI.	Registros de contaminación en pozos del sistema municipal de abastecimiento de agua	134
XXII.	Registros de morbilidad asociada a enfermedades de origen hídrico ..	138

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Al	Aluminio
AR	Aguas residuales
NH₃	Amoníaco
HCO₃⁻	Bicarbonatos
Ca⁺²	Calcio
CO₃⁻	Carbonatos
CaCO₃	Carbonato de calcio
cm	Centímetros
Cl⁻	Cloruros
F⁻	Fluoruros
PO₄⁻³	Fosfatos
Pt	Fósforo total
NaOH	Hidróxido de sodio
Fe	Hierro
L	Litro
Mg	Magnesio
Mn	Manganeso
µS	Micro siemens
mg	Miligramos
mL	Mililitros
M1	Muestreo en época de lluvia
M2	Muestreo en época seca
NO₃⁻	Nitratos

NO₂⁻	Nitritos
MNP	Número más probable
POSH	<i>Pollutant Origin Surchage Hydraulically</i>
pH	Potencial de hidrógeno
SP	Puntos de muestreo en San Pedro la Laguna
Na⁺	Sodio
SDT	Sólidos disueltos totales
SO₄⁻²	Sulfatos
T°	Temperatura
NTU	Unidades nefelometrías de turbiedad

GLOSARIO

Acuífero	Estrato o formación geológica que permite la circulación del agua por sus poros o grietas.
Aluminio	Elemento abundante en la naturaleza; a menudo se encuentra en el agua. Las sales de aluminio se utilizan para el tratamiento y remoción de color y turbiedad.
Anión	Ión con carga eléctrica negativa.
Catión	Ión con carga eléctrica positiva.
Cloruro	El cloruro está presente en aguas superficiales naturales, en concentraciones bajas. Los niveles en el agua no contaminada suelen estar por debajo de los 10 mg/L.
Coliformes fecales	Parámetro que indica la presencia de contaminación fecal en el agua y de bacterias patógenas provenientes de seres humanos y animales de sangre caliente.
Conductividad eléctrica	Medida de la capacidad de un material o sustancia para dejar pasar (o dejar circular) libremente la corriente eléctrica.

COGUANOR NTG 29001 Norma técnica guatemalteca para agua de consumo humano (agua potable).

Dureza del agua Mezcla variable de cationes y aniones, esta se debe principalmente a la presencia de calcio y magnesio, aunque también contribuyen a ella el estroncio, el bario, entre otros.

Fosfatos Sales o esteres del ácido fosfórico.

Fluoruros El fluoruro es un elemento bastante común. Los fluoruros se emplean en la industria en la producción de aluminio y por lo general están presentes en fertilizantes fosfatados, ladrillos y cerámicas.

GOD *Groundwater occurrence-overall aquifer class-Depth*

Hierro Por lo general se presenta en estado férrico en las aguas superficiales. La concentración de hierro en agua bien aireada rara vez es alta, pero bajo condiciones reductoras pueden encontrarse concentraciones altas de hierro.

Ión Partícula cargada eléctricamente constituida por un átomo o molécula que no es eléctricamente neutra.

LMP Límite máximo permisible

Manganeso	El agua dulce puede contener de uno a varios miles de microgramos de manganeso por litro. El agua subterránea anaeróbica suele contener niveles elevados de manganeso disuelto.
Nitrato y Nitrito	Se consideran de forma conjunta debido a la conversión de una forma a otra que se produce en el ambiente. Los nitratos son producto de la oxidación de nitrógeno orgánico por las bacterias presentes en el suelo. Los nitritos se forman por oxidación bacteriana incompleta en el nitrógeno orgánico.
Olor	El olor en el agua puede definirse como la sensación producida por la presencia de sustancias que tienen una apreciable presión de vapor y que estimulan los órganos sensoriales humanos.
Ph	Es el logaritmo común negativo de la actividad del ion hidrógeno.
SDT	Medida del contenido combinado de todas las sustancias inorgánicas y orgánicas contenidas en un líquido en forma molecular, ionizada o en forma de suspensión microgranular.
Sulfato	Compuesto soluble en el agua; con algunas excepciones, la concentración de sulfato en la mayoría de aguas dulces es muy baja. Las concentraciones elevadas de sulfato en el agua

pueden contribuir a la corrosión de los metales en el sistema de distribución.

Turbiedad

Presencia de materias en suspensión, tales como arcilla, sedimentos, partículas orgánicas coloidales, plancton y otros. Una turbiedad que exceda el valor guía de 5 UTN es generalmente objetable para los consumidores.

RESUMEN

El presente estudio se realizó en el municipio de San Pedro la Laguna del departamento de Sololá. Con este se determinó la calidad de las aguas subterráneas y el efecto de estas sobre el cuerpo de agua del Lago de Atitlán. Se realizaron dos campañas de muestreo, una en época de lluvia y una en época seca, tomando muestras en 10 pozos, 3 del Lago de Atitlán a orillas del municipio, 1 en el nacimiento que abastece agua para consumo del municipio de San Pedro la Laguna y 1 tomada en la red del sistema de agua potable del municipio.

Se realizaron los análisis fisicoquímicos y bacteriológicos, comparando los resultados obtenidos en los dos muestreos. Se hizo una clasificación del agua utilizando los métodos de diagramas de Piper, Stiff, Stabler y Schoeller, y el que de la dureza del agua. Posteriormente, se procedió a determinar la vulnerabilidad del acuífero a través del método GOD (*Groundwater occurrence-overall aquifer class-Depth*).

En el muestreo realizado en época de lluvia, la muestra SP04 con un valor de 118,8 mg/L de NO_3^- sobrepasa el límite máximo de concentración de nitratos permisible de la norma COGUANOR NTG 29001 de 50 mg/L NO_3^- . En el muestreo en época seca, las muestras SP02, SP03, SP10, SP11, SP12, SP13 y SP17, sobrepasan los 50 mg/L NO_3^- . Con base en los resultados se concluye que existe una contaminación significativa de nitratos y coliformes fecales en algunos puntos de muestreo, los cuales presentaron valores mayores en la época seca, determinándose así la influencia que existe del régimen de lluvias en la zona.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la cuenca del Lago de Atitlán, los usos agrícolas de la tierra y el desarrollo de actividades antrópicas son un factor importante asociado al incremento de las concentraciones de nutrientes en el lago, registrando en el año 2011 el contenido de nitratos diez veces mayor que en 1968, y el de fosfatos, cinco veces mayor que en 1983, con una densidad de fitoplancton por litro aumentada mil veces con respecto a los valores de 1968.¹

Con el incremento de los niveles de nutrientes en el Lago de Atitlán se han registrado grandes florecimientos de cianobacterias *Lyngbya hironymusii*, como consecuencia de los aportes de aguas residuales (superficiales y subterráneas) y escorrentías e infiltración de miles de hectáreas de áreas agrícolas. Las cianobacterias tienen efectos sobre las cadenas tróficas en el lago y, eventualmente, sobre la salud de las personas que están en contacto y/o consumen estas aguas, o consumen algunas especies de ese cuerpo de agua. El 22 de noviembre de 2009, el instrumento ASTER del satélite Terra de la NASA mostró que aproximadamente un 38 % de la superficie del lago se encontraba afectado por algas y cianobacterias.²

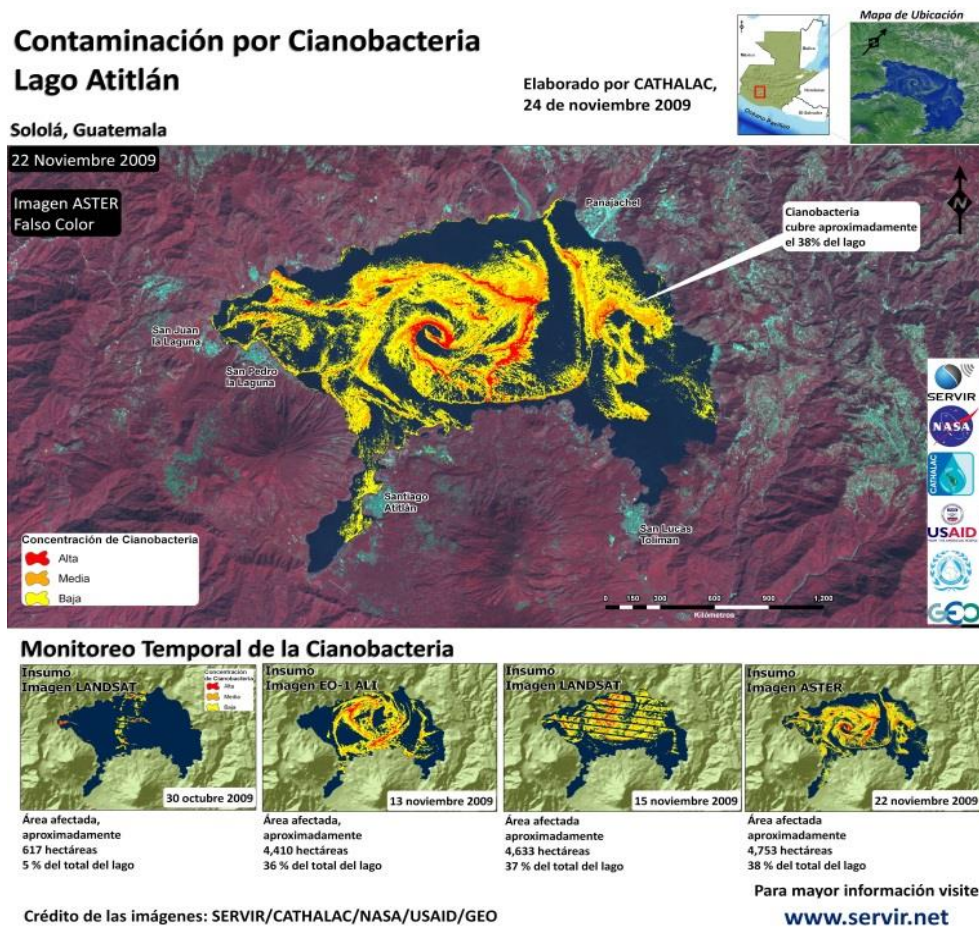
En lo concerniente a las aportaciones de contaminantes debidos a las aguas superficiales, se han realizado estudios que han determinado estimaciones sobre los volúmenes de aportación de nutrientes que se generan, mientras que, para el

¹SERVIR. Lago de Atitlán. SERVIGLOBAL, 2009. http://www.cathalac.int/lac_atlas/index.php?option=com_content&view=article&id=38:lago-atitlan-guatemala&catid=1:casos&Itemid=5. [Consulta: enero de 2016].

²Ibídem.

caso de las aportaciones de contaminantes por medios subterráneos, se carece de información y datos que puedan ser de soporte para la toma de decisiones. Actualmente, ¿existe un aporte significativo de contaminantes fisicoquímicos y bacteriológicos al lago de Atitlán a través de las aguas subterráneas?

Figura 1. Contaminación por cianobacterias



Fuente: SERVIR. Lago de Atitlán. SERVIGLOBAL, 2009.

http://www.cathalac.int/lac_atlas/index.php?option=com_content&view=article&id=38:lago-atitlan-guatemala&catid=1:casos&Itemid=5. [Consulta: enero de 2016].

La investigación tiene contemplado generar información sobre el estado actual de la calidad de las aguas subterráneas en el municipio de San Pedro La Laguna y, de esta forma, contribuir a mejorar la gestión de los recursos hídricos en el municipio y, de forma indirecta, en la cuenca del Lago de Atitlán.

JUSTIFICACIÓN

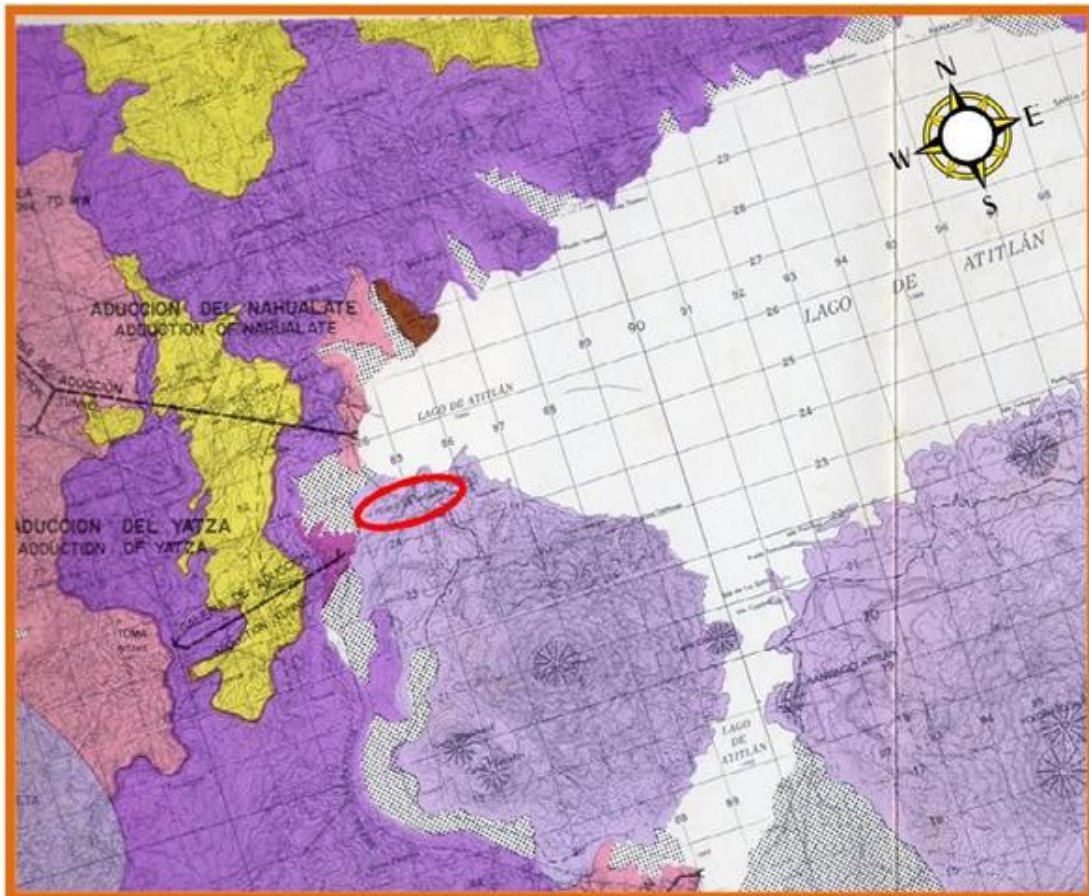
La calidad del agua en el Lago de Atitlán es un factor determinante en la calidad de vida de los pobladores de las comunidades aledañas al mismo, y en el caso específico del municipio de San Pedro La Laguna, el problema focal de la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas es un factor que afecta a la salud y economía de la población.

En la zona sur de la cuenca del lago de Atitlán, la geología corresponde a zonas de lavas y lahares con elevada fracturación y acuíferos con una permeabilidad alta que favorece el transporte de contaminantes. En la figura de la siguiente página se presenta el mapa geológico de la zona sur de la cuenca.

Las condiciones geológicas e hidrogeológicas han llevado a la población de las cabeceras municipales de los municipios de San Pedro La Laguna y Santiago Atitlán a la construcción de sistemas de saneamiento a base de inodoros lavables y pozos sumideros, los cuales en algunos casos superan 40 años de funcionamiento sin padecer de procesos de colmatación o llenado de los depósitos, lo que pone en evidencia el alto nivel de infiltración de contaminantes que está debiéndose a las características geológicas de la zona.

La condición que se genera con los sistemas de saneamiento por los usuarios es de satisfacción, lo cual se deriva de que, al no sufrir de colmatación o llenado de los depósitos, se anulan operaciones de mantenimiento por los usuarios. Esta condición también es favorecida por la falta de información y datos sobre la contaminación debida a la infiltración directa de aguas residuales, así como la infiltración de agroquímicos.

Figura 2. Mapa geológico regional del Lago de Atitlán



Fuente: ELECTRO-WATT, Ingenieros Consultores S.A. PROYECTO ATITLÁN, INFORME DE FACTIBILIDAD. Noviembre 1971. Escala 1:50000.

EXPLICACION EXPLANATION		
ALUVIONES, TERRAZAS, DEPOSITOS DE LADERA, CONOS ALUVIALES ALLUVIUM, TERRACES, TALUS DEPOSITS, ALLUVIAL FANS	DEPOSITOS DETRITICOS NO DIFERENCIADOS, PRINCIPALMENTE DE ORIGEN VOLCANICO (LAHARES) UNDIFFERENTIATED DETRITAL DEPOSITS, MAINLY OF VOLCANIC ORIGIN (LAHARS)	FALLA FAULT
CUBIERTA GRUESA DE CENIZAS POMEZ THICK COVER OF PUMICEOUS ASH	LAVAS Y LAHARES RECIENTES RELACIONADOS CON EDIFICIOS VOLCANICOS RECENT LAVAS AND LAHARS RELATED TO VOLCANIC CONES AND DOMES	MANANTIAL SPRING
DEPOSITOS PROCLASTICOS SOBRE ROCAS VOLCANICAS TERCARIAS PYROCLASTIC BEDS OVER TERTIARY VOLCANIC ROCKS	ROCAS VOLCANICAS TERCARIAS SIN DIFERENCIAR UNDIFFERENTIATED TERTIARY VOLCANIC ROCKS	MANANTIAL TERMAL THERMAL SPRING
DEPOSITOS DE TERRAZA PROMINENTES PROMINENT TERRACE DEPOSITS	GRANODIORITA Y GRANITO GRANODIORITE AND GRANITE	

Fuente: ELECTRO-WATT. *Atitlán Project Feasibility Report*. Guatemala: Ingenieros Consultores S.A., 1971. 74 p.

La salud de la población se ve en riesgo, considerando que el 70 % del suministro de agua para consumo se da a través de sistemas de impulsión de aguas subterráneas y de agua del Lago de Atitlán, fuentes de suministro respecto de las que se demuestra en este estudio que no cumplen con las condiciones de potabilidad establecidas en la norma COGUANOR NTG 29001.

El otro factor que se ve afecto por el detrimento de la calidad del agua en la zona es la economía, considerando que la principal fuente de ingresos económicos para la población es la prestación de servicios turísticos.

Con los florecimientos de cianobacterias, el flujo de turistas se ha visto afectado, reduciendo en al menos un 25 % los ingresos provenientes de turismo y provocando un desempleo del 25 % en la zona.³ Los florecimientos de cianobacterias son un elemento que afecta la imagen del cuerpo de agua y los usos recreativos que se han venido dando al lago. Otro factor sobre el que la contaminación puede influenciar es la falta de servicios adecuados de turismo, como instalaciones hoteleras y restaurantes que garanticen el suministro y dotación de agua apta para consumo humano. Considerando que la salud y la economía son primordiales para el desarrollo de las poblaciones, es necesario diagnosticar la calidad del agua subterránea en la zona, así como la influencia de esta sobre el lago de Atitlán, para así definir acciones que favorezcan a la preservación y desarrollo de la cuenca.

³Universidad del Valle de Guatemala. *El Lago de Atitlán, Guatemala: su estado ecológico: octubre 2009 - diciembre 2011*. Artículo de investigación, 2012. P. 36

OBJETIVOS

General

Determinar la 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.

Específicos

1. Generar información sobre las características de las aguas subterráneas y niveles de contaminación.
2. Determinar los principales focos de contaminación de las aguas subterráneas y los niveles de afectación de estos sobre el cuerpo de agua del Lago de Atitlán.
3. Estimar la vulnerabilidad del acuífero en el municipio de San Pedro La Laguna.
4. Proponer acciones para la mitigación de la contaminación de las aguas subterráneas en el municipio de San Pedro La Laguna.

HIPÓTESIS

Existe un aporte significativo de contaminantes fisicoquímicos y bacteriológicos al Lago de Atitlán a través de las aguas subterráneas que se disponen por filtración, debido a las características geológicas de la zona y a los sistemas de saneamiento utilizados, lo cual puede contribuir al deterioro mayor del Lago de Atitlán.

ANTECEDENTES

El Lago de Atitlán se encuentra en un proceso de eutrofización acelerada, debido principalmente a los incrementos de las concentración de nutrientes (N y P), los que contribuyen al aumento de fitoplancton.⁴Con la problemática de la contaminación del Lago de Atitlán, visible principalmente por los fuertes florecimientos de cianobacterias registrados a partir del año 2009, los esfuerzos de investigación se han centrado en estudiar los efectos de las aguas superficiales y la descarga de sólidos por escorrentías.

No se cuenta con información sobre la calidad de las aguas subterráneas y la interrelación que exista entre esta y el cuerpo de agua del Lago de Atitlán y los aportes contaminantes que puedan existir. La poca información que existe se refiere a algunos datos hidrogeológicos de la zona, que se basan en estudios realizados para la perforación de pozos para el suministro de agua, y recientemente el estudio de cartografía hidrogeológica que desarrolló la ONG Geólogos del Mundo en el año 2013.

Las particularidades de la geología de la cuenca han llevado a las poblaciones de los centros urbanos a adaptar sistemas de disposición de excretas y aguas grises que generan una carga contaminante directa o indirecta sobre el cuerpo de agua del Lago de Atitlán. Por una parte, la zona norte de la cuenca, que es donde las propiedades de permeabilidad de los suelos son mínimas y se dispone de sistemas de alcantarillado que en algunos casos se

⁴Universidad del Valle de Guatemala. *El Lago de Atitlán, Guatemala: su estado ecológico: octubre 2009 - diciembre 2011*. Artículo de investigación, 2012. p 36

vierten sin tratamiento alguno a los cuerpos de agua del río San Francisco, Quiscab o directo al Lago de Atitlán.

En la zona sur de la cuenca del lago, los sistemas de saneamiento se han desarrollado considerando para la disposición de las aguas residuales la infiltración a terreno, la que se ve potenciada por la alta capacidad de permeabilidad de los suelos, pero que se presume está generando un alto impacto contaminante en el acuífero que se explota para el suministro de agua para consumo humano y, de manera indirecta, favoreciendo a la contaminación y carga de nutrientes en el cuerpo de agua del Lago de Atitlán.

ALCANCES Y LIMITACIONES

Con el desarrollo del estudio se pretende incluir una nueva variable en la investigación y estudio de la contaminación en la cuenca del Lago de Atitlán, y aunque el alcance territorial se centra en el municipio de San Pedro La Laguna, en la cuenca sur del lago, se considera que con los resultados obtenidos se incide en el interés de otras instituciones para la inclusión del estudio de las aguas subterráneas y la influencia de estas sobre las poblaciones y el Lago de Atitlán.

Por otro lado, las principales limitaciones del estudio son:

- El plan de muestreo de calidad de agua se basó en dos campañas puntuales realizadas en los meses de septiembre de 2015 y febrero de 2016, con lo que se buscó tener una representatividad del período de estiaje y lluvias.
- El cambio de autoridades locales entre los años 2015 y 2016 incidió en el muestreo de 2016, para la no obtención de la totalidad de muestras captadas en el año 2015, dado que no se obtuvieron los permisos de acceso en tres puntos de suministro de la red municipal de agua potable (2 pozos y un nacimiento).

INTRODUCCIÓN

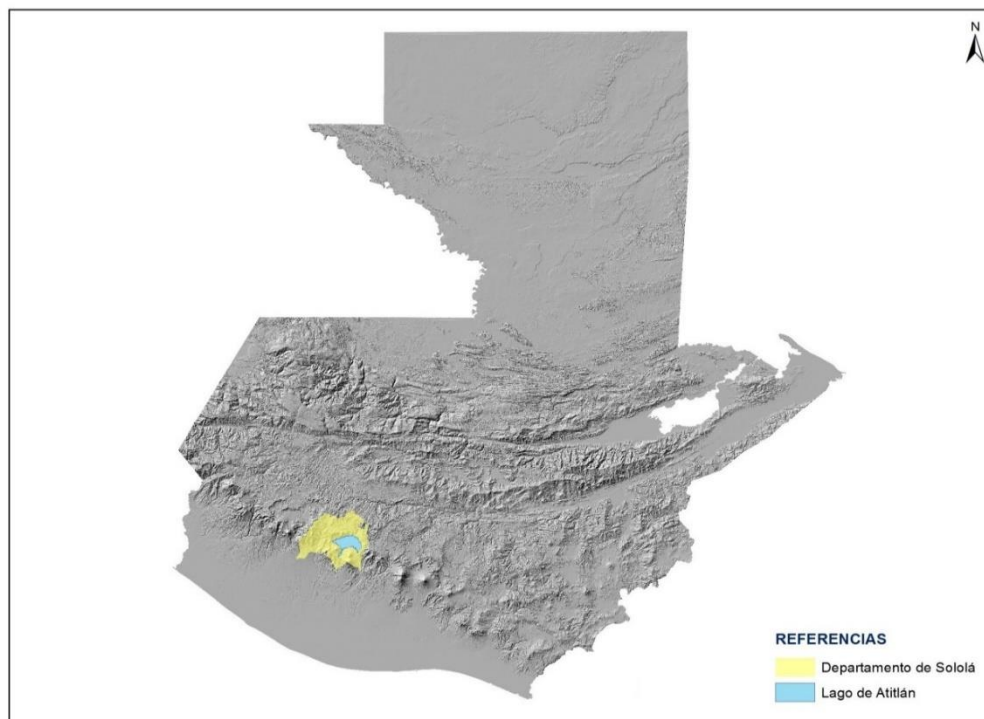
La disposición de las aguas residuales en el municipio de San Pedro La Laguna del departamento de Sololá, se realiza a través de sistemas de infiltración, en los que se aprovechan las condiciones geológicas de la zona, las cuales brindan una alta permeabilidad, lo cual permite la funcionabilidad hidráulica de sistemas de baño lavable con descarga y pozos ciegos. Con el pasar de los años, este sistema ha sido efectivo para la comunidad, ya que nunca se han llenado los pozos ciegos. Todas las aguas residuales, por ende, van al manto freático, pudiendo ocasionar contaminación de las aguas subterráneas.

El abastecimiento de agua de San Pedro La Laguna se realiza por medio de pozos excavados manualmente, pozos mecánicos y un nacimiento de agua, siendo el suministro de aguas subterráneas y del Lago de Atitlán el que cubre la demanda en un 70 %, por lo que esta es la principal preocupación que se asocia a la contaminación del acuífero, pero la carencia de datos y pruebas de la posible contaminación hacen que la población e instituciones no le den la atención necesaria al tema y, por ende, no existan iniciativas enfocadas en la protección de las aguas subterráneas. Por ello, la finalidad de esta investigación fue realizar una caracterización de las aguas subterráneas del área de estudio, y determinar las condiciones actuales de calidad del agua y, en función de los resultados obtenidos, realizar una caracterización del acuífero, verificar la vulnerabilidad del mismo y verificar si existe alguna relación entre la posible contaminación de las aguas y la salud de la población.

1. ÁREA DE ESTUDIO

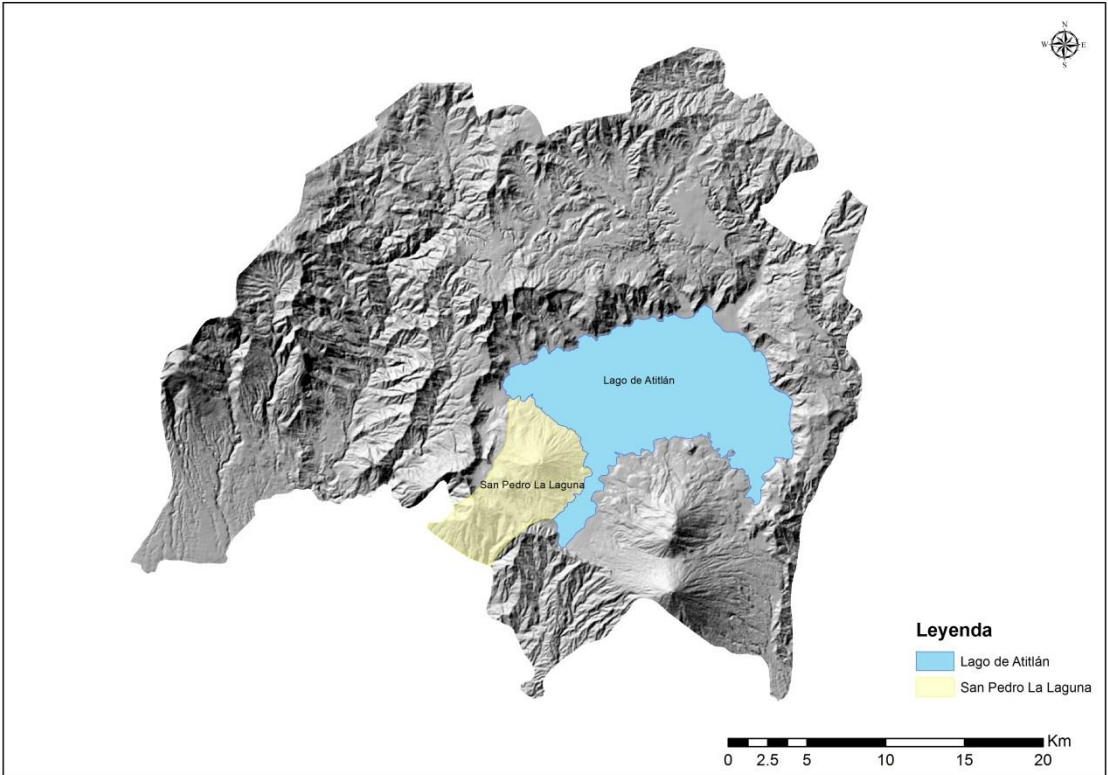
El municipio de San Pedro La Laguna pertenece al Departamento de Sololá y se ubica en el suroeste de la cuenca del Lago de Atitlán. Cuenta con un área aproximada de 24 km². Colinda al norte con el Lago de Atitlán, al este con Santiago Atitlán (Sololá) y el Lago de Atitlán, al sur con Chicacao (Suchitepéquez) y Santiago Atitlán (Sololá), y al oeste con San Juan La Laguna (Sololá) y Chicacao (Suchitepéquez).

Figura 3. **Modelo Digital del Terreno (MDT). Territorio de Guatemala**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

Figura 4. **Modelo Digital del Terreno (MDT). Departamento de Sololá**

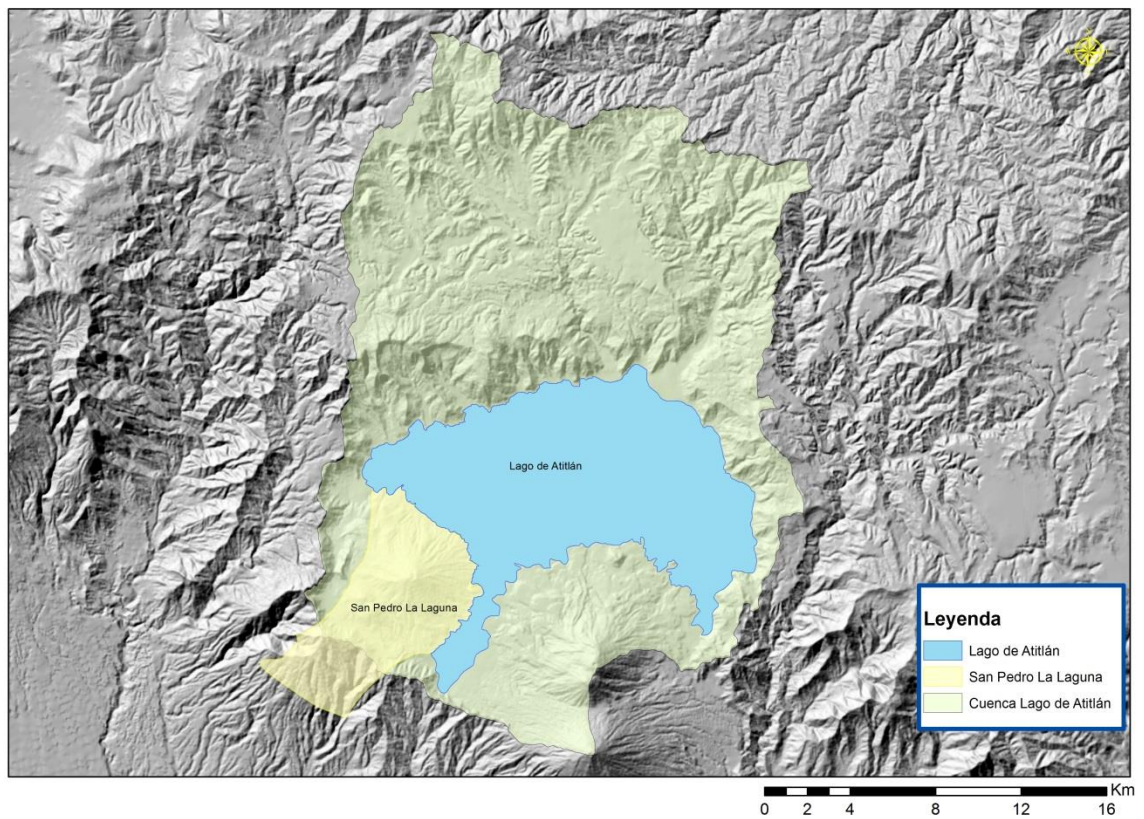


Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

La cuenca del Lago de Atitlán colinda al norte con la cuenca del Río Motagua, al este con la cuenca del Río Madre Vieja y al sur con la Cuenca del Río Nahualate. La cuenca tiene una extensión de 541 km², con un relieve montañoso. El lago es de tipo endorreico y ocupa una extensión de 130 km², con una profundidad media de 188 m y una profundidad máxima de 324 m. En el área sur de la cuenca se localizan tres volcanes (San Pedro, Atitlán y Tolimán). En relación a las características geográficas, la relación de altitud varía en la cuenca,

desde los 1564 msnm a la orilla del lago⁵, hasta 3535 msnm en la cima del volcán Atitlán.

Figura 5. **Modelo Digital del Terreno (MDT). Cuenca del Lago de Atitlán y localización del municipio de San Pedro La Laguna**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

⁵ Georreferenciación realizada en septiembre de 2015.

1.1. Marco geológico

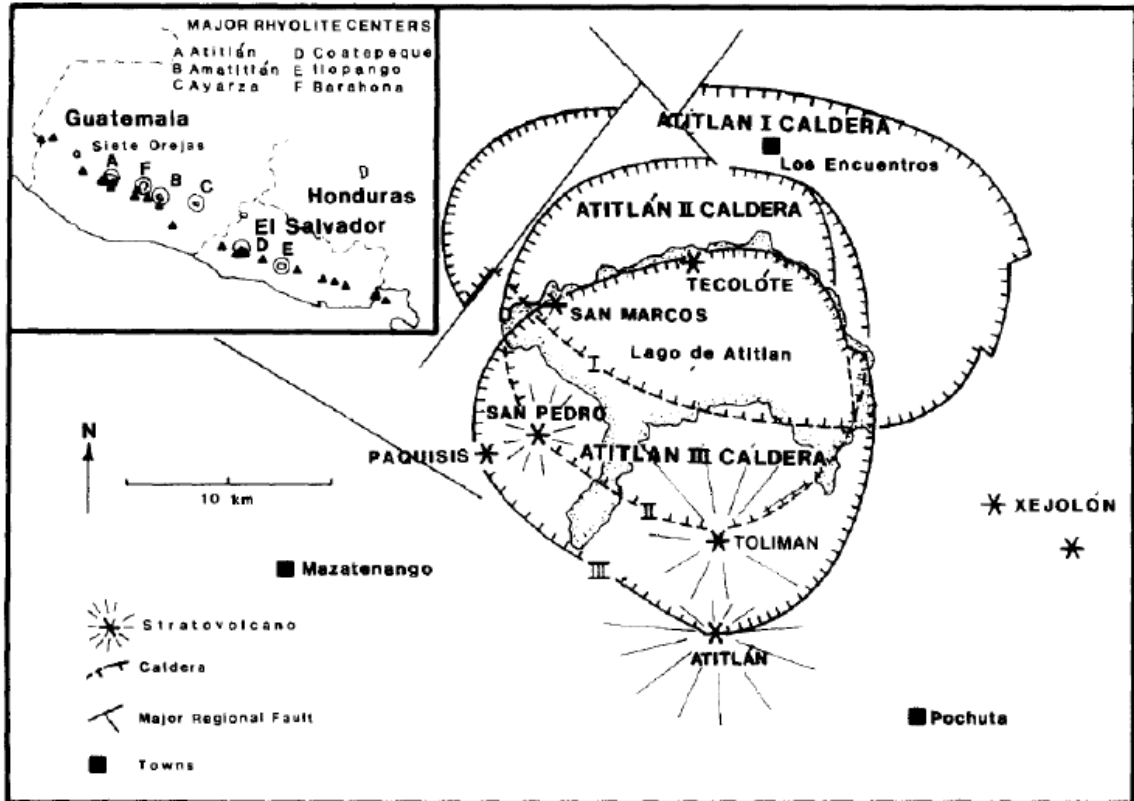
La zona de estudio se localiza geomorfológicamente sobre la cadena volcánica de Guatemala, siendo su origen volcánico el que determinó su topografía. El relieve y topografía de la cuenca se deben al colapso de 3 calderas volcánicas denominadas Atitlán I, II y III.⁶ Los episodios de colapso (ciclos), engloban la formación de estratovolcanes, la erupción de materiales silíceos y la formación y el posterior relleno de las calderas resultantes del colapso.⁷ Los ciclos de conformación de la cuenca son:

- Ciclo 1 (14-11 Ma): período en el que se dieron las erupciones de flujos y cenizas de la serie María Tecún y la formación de la caldera de colapso Atitlán I.
- Ciclo 2 (10-8 Ma): período en el que se produjeron las erupciones de flujos y ceniza de la serie de San Jorge y se formó la caldera de colapso Atitlán II.
- Ciclo 3 (1-0 Ma): período en el que se produjo la gran erupción de *Los Chocoyos* hace 85000 años, la formación de estratovolcanes cuaternarios, erupción de silíceos y la posterior formación de la caldera de colapso denominada Atitlán III. Luego del colapso se formaron los volcanes San Pedro, Toliman y Atitlán.

⁶NEWHALL C. G., ROSE W.I., BORNHORST T.J., SELF. *Quaternary silicic pyroclastic deposits of Atitlan caldera, Guatemala*. Journal of volcanology and Geothermal Research, 33. (1987) 57-80. Elsevier Science Publishers B.V.; Amsterdam: 1987

⁷Ibídem.

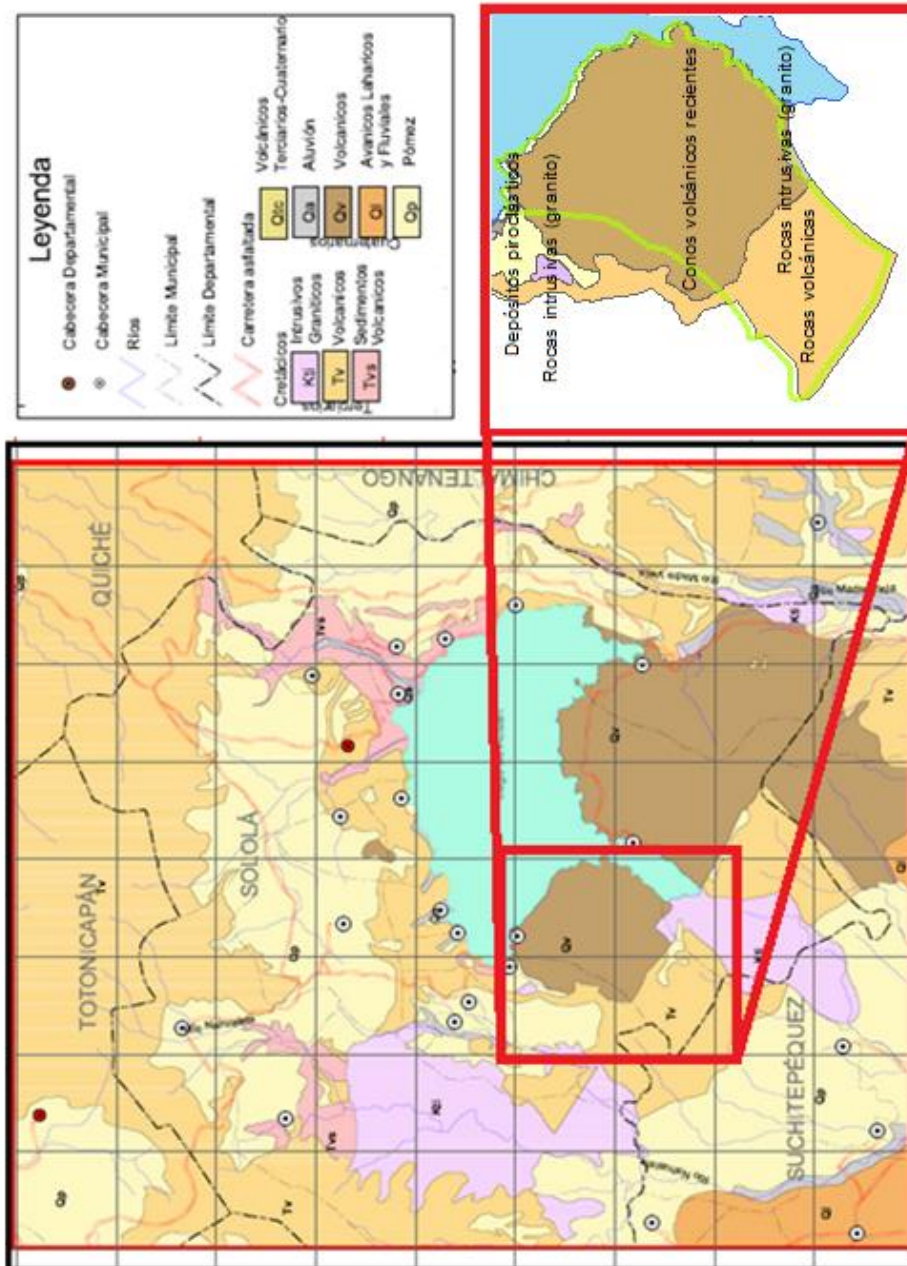
Figura 6. Ubicación de calderas



Fuente: NEWHALL C. G.; ROSE W.I.; BORNHORST T.J., SELF. *Quaternary silicic pyroclastic deposits of Atitlan caldera, Guatemala*. Journal of volcanology and Geothermal Research, 33. (1987)

La geología propia del municipio de San Pedro La Laguna está compuesta por rocas volcánicas cuaternarias (Qv) y una geología superficial que incluye depósitos de flujos piroclásticos, coladas de lava, depósitos pomacéos y tobas volcánicas. Alrededor de esta formación se encuentran rocas volcánicas sin dividir (Tv). Los flujos piroclásticos y los depósitos pomáceos poseen una gran capacidad de porosidad y permeabilidad.

Figura 7. Estructura geológica del municipio de San Pedro La Laguna



Fuente: Adaptación Diagnóstico Ecológico- Social en la Cuenca de Atitlán. Guatemala: publicado por Universidad del Valle de Guatemala/The Nature Conservancy, 2003. p 6.

1.2. Hidrogeología

A nivel nacional se identifican cuatro regiones hidrogeológicas:⁸

- Las llanuras aluviales de la costa del pacífico
- El Altiplano volcánico
- Las tierras altas cristalinas
- La región sedimentaria septentrional

La cuenca del Lago de Atitlán se encuentra ubicada en la región II, en el Altiplano volcánico. La litología del área se encuentra constituida por rocas volcánicas terciarias y cuaternarias, principalmente lavas, tobas y cenizas, las cuales descargan sobre un basamento levantado, formado por rocas carbonatadas e ígneas, en el que se originaron grandes depresiones tectónicas que fueron rellenados por depósitos piroclásticos⁹. El mayor potencial de desarrollo de las aguas subterráneas en el Altiplano guatemalteco se encuentra en los acuíferos inferiores del volcánico terciario y los acuíferos superiores del volcánico cuaternario.¹⁰

1.2.1. Características hidrogeológicas de los materiales

Las propiedades hidrogeológicas de los materiales son las que definen la capacidad que estos tienen para permitir la circulación de agua en su interior y el comportamiento de los flujos que se den dentro de este. La litología de la que se compone la cuenca del Lago de Atitlán esta agrupada hidrogeológicamente en

⁸MAGA. *Caracterización hidrogeológica de la zona saturada presente en el valle de Chimaltenango*. Guatemala: 1991. 85 p.

⁹Ibidem.

¹⁰JICA. *Estudio sobre el desarrollo de las aguas subterráneas en el altiplano central de la república de Guatemala*. Kokusai Koguo CO., LTD. Tokio: JICA, 1995. Vol 2. p 5

12 unidades, además, según su permeabilidad, se han diferenciado tres tipologías:¹¹

- Permeabilidad por fisuración: tobas terciarias dacíticas y riolíticas (Tmt y Tat) altamente consolidadas y fracturadas; flujos de lavas y lodos asociados a complejos estratovolcánicos terciarios y cuaternarios (Qa y Qta), y sedimentos de relleno de la primera caldera (Tcf1) formados por conglomerados y areniscas de consolidación media-alta ligeramente fracturados.
- Permeabilidad por porosidad granular: depósitos piroclásticos pomáceos cuaternarios (Qpa y Qpfs) y depósitos aluviales y coluviales cuaternarios (Qal y Qcol).
- Permeabilidad limitada o impermeables: sedimentos de relleno de caldera II (Tcf2) formados por areniscas y lutitas, muy consolidadas; tobas riolíticas terciarias (Trt) muy consolidadas, así como granitos y granodioritas (Tg).

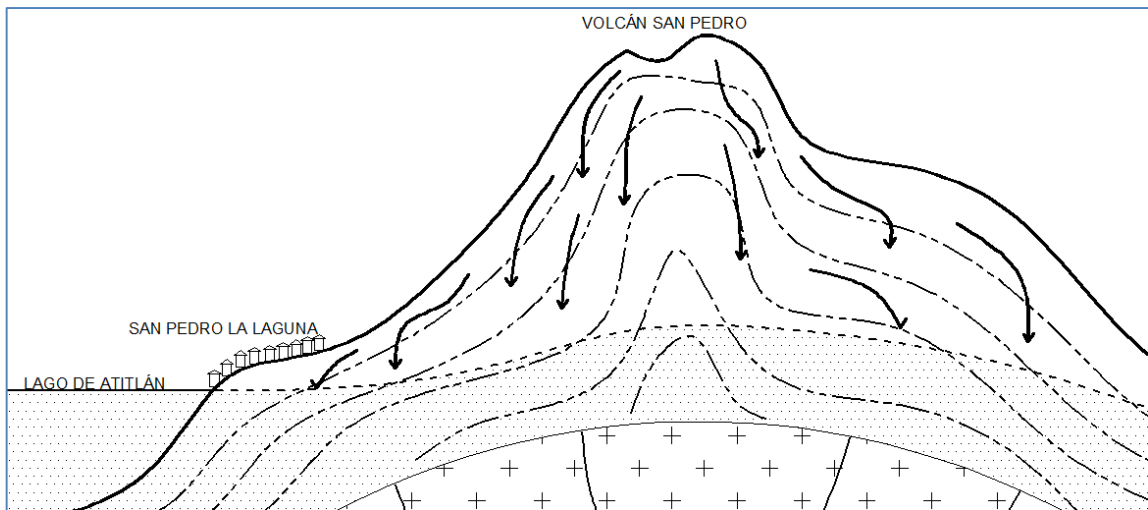
La tipología litológica específica de la zona de estudio corresponde a la de permeabilidad por fisuración: complejos estratovolcánicos terciarios y cuaternarios (cuaternario andesítico Qa). El cuaternario andesítico corresponde al cuarto ciclo (actual) que comienza con el crecimiento de estratovolcanes. Los volcanes San Pedro, Atitlán y Tolimán han crecido en el extremo sur de la caldera Atitlán III y se encuentran formados por flujos de lavas (predominantemente andesíticas), lodos y piroclastos.¹²

¹¹GEÓLOGOS 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.

¹²Ibidem.

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 piroclásticos (figura 8), lo cual facilita la infiltración de las aguas de precipitación y la circulación de las aguas subterráneas, por lo que no se originan brotes (nacimientos). El agua subterránea circula rápidamente en la dirección vertical a favor de las fracturas en las lavas y en las capas más permeables, recargando de este modo el acuífero profundo de lago de Atitlán.¹³

Figura 8. **Esquema de características hidrogeológicas en un estratovolcán.**



Fuente: elaboración propia, con base en información: 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). 2013

¹³Ibíd.

1.2.2. Características del acuífero

El área de San Pedro La Laguna se conforma, en la superficie, por depósitos piroclásticos de alta permeabilidad, denominados tefras, que van haciéndose más delgados hacia la orilla del lago, hasta desaparecer por erosión (Qpa4). Subyaciendo a estos se encuentran rocas volcánicas terciarias formadas por depósitos laháricos de alta permeabilidad, intercalados con coladas de lava fracturadas (QTa). Ambos depósitos permiten que las aguas de lluvia se infiltren con gran facilidad hacia la capa freática, favoreciendo la circulación y almacenamiento de las aguas subterráneas en profundidad. Se considera que debajo de los materiales laháricos se encuentran los materiales intrusivos constituidos por las granodioritas (Tg).¹⁴

En la zona de San Pedro La Laguna se pueden encontrar dos acuíferos principales:

- Acuífero superior colgado: se ubica en la parte superior de los flujos de lava y depósitos laháricos cuaternarios (Qa), procedentes del volcán San Pedro.
- Acuífero profundo: se ubica por debajo de los flujos andesíticos (Qa), en la unidad de granitos fracturados (Tg). Se encuentra conectado con el lago de Atitlán. De este modo, los depósitos laháricos (Qa), que presentan una alta permeabilidad, permiten que el agua percole hasta el contacto con las rocas intrusivas graníticas.

La dirección preferencial de los flujos de aguas subterráneas va desde la parte alta al del volcán San Pedro hacia el Lago de Atitlán, y constituye una recarga local de aguas provenientes de la zona. A pesar de no presentar la zona

¹⁴Ibídem.

de inmediaciones del lago un gradiente hidráulico alto, se estima que, por la dirección del flujo, no permite el ingreso del agua del lago en su totalidad, provocando una zona de mezcla entre las aguas subterráneas y el Lago de Atitlán¹⁵.

¹⁵HISDROCONSULT. *Estudio Hidrogeológico para la selección de sitios para la perforación de pozos mecánicos para mejora del abastecimiento de agua potable para la cabecera municipal de San Pedro la Laguna, Departamento de Sololá*. Financiado por la Mancomunidad La Laguna (Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento de la Cooperación Española). Guatemala: 2011.

2. METODOLOGÍA DE MUESTREO Y ANÁLISIS DE MUESTRAS

Debido a las condiciones del lugar, se decidió trabajar con un modelo estadístico no probabilístico en el que se tomaría la totalidad del universo (total de pozos) encontrado en la zona, realizando dos muestreos, uno representativo de la época de lluvia y otro de la época seca. Se contactó a una persona local para la localización de los pozos y obtención de los permisos respectivos con los propietarios, obteniendo los permisos para acceder a 10 pozos. Por los cambios de autoridades municipales no se tuvo acceso al mismo número de muestras en muestreo en época seca, y no se logró la toma de muestras en los puntos SP01 y SP09, que corresponden a puntos administrados por la municipalidad.

2.1. Norma COGUANOR NTG 29001

La presente norma trata sobre una serie de especificaciones de agua para consumo humano (agua potable), realizada por un Comité Técnico de normalización (CTP), garantizando de esta forma la participación de los sectores interesados. Esto se dio con el objetivo de definir las características de calidad de agua para consumo humano, destinada para alimentación y otros usos que provengan de fuentes de agua de pozos, ríos, lagos, entre otros.

En el presente estudio se trató de abarcar el análisis mínimo que propone la norma, el cual consiste en: a) Bacteriológico: coliformes fecales y *Escherichia coli*. b) Análisis fisicoquímico: color, turbiedad, potencial de hidrógeno, conductividad eléctrica, cloro residual libre, cloruros, dureza total, sulfatos, calcio,

magnesio, nitratos, nitritos, hierro total y manganeso total. De los parámetros mencionados no se realizó el análisis de color y cloro residual libre. Sin embargo, se analizaron otros parámetros que son de interés para los resultados del estudio: fosfatos, amoníaco, aluminio, sólidos disueltos totales, temperatura, olor y fluoruros.

2.2. Inventario de puntos de agua

Se realizó una zonificación dentro del área de estudio en la que se ubicaron los pozos existentes. Las muestras se tomaron directamente sobre los volúmenes de agua almacenados en los pozos o chorros de la fuente. Las campañas de monitoreo de calidad de las aguas se realizaron una en fecha 28 de septiembre del año 2015 (período lluvioso) y otra en fecha 29 de febrero de 2016 (época seca), con la finalidad de evaluar el comportamiento del acuífero, la calidad del agua y la influencia del régimen de lluvias.

Luego del muestreo, se procedió a realizar los análisis de laboratorio considerando como referencia de calidad la norma Técnica Guatemalteca COGUANOR NTG 29001, bajo los parámetros y requisitos establecidos para el programa de análisis mínimo, que abarca los análisis en esta etapa de control, que son: a) Análisis microbiológico: coliformes totales y *Escherichia coli*; b) Análisis fisicoquímico: color, turbiedad, potencial de hidrógeno (pH), conductividad, cloro residual libre, cloruros, dureza total, sulfatos, calcio, magnesio, nitratos, nitritos, hierro total y manganeso total.

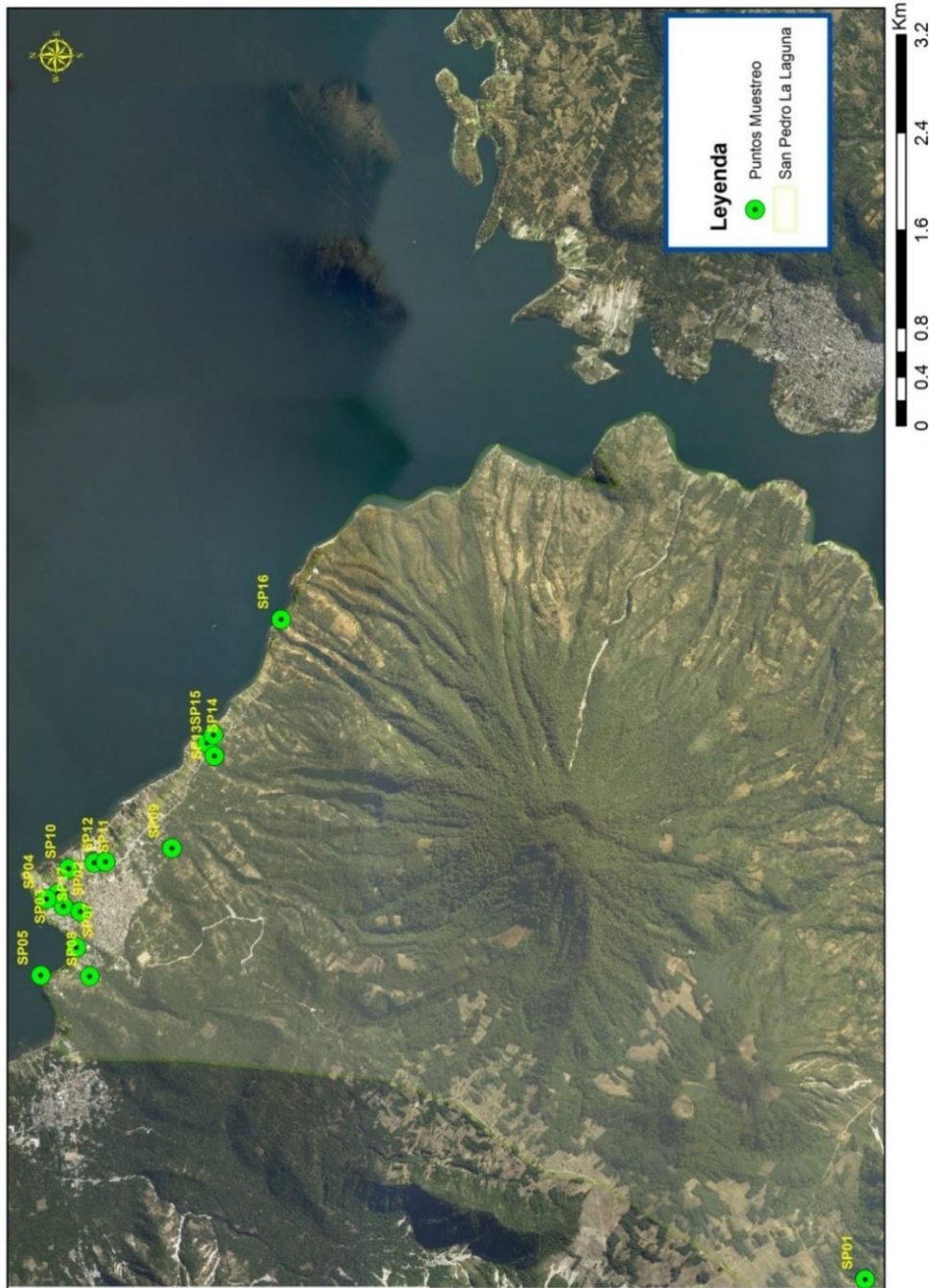
Se inventariaron 15 puntos de muestreo que se describen en la Tabla I y se identifican en la figura 9. De los puntos de muestreo 9 fueron pozos excavados manualmente, 2 pozos mecánicos, 1 nacimiento de brote definido y 3 tomas sobre el Lago de Atitlán. Durante el muestreo en época de lluvia se realizó una

caracterización de cada punto, utilizando una ficha para el levantado de la siguiente información: código, tipo de fuente, tipo de uso, coordenadas, parámetros fisicoquímicos *in situ* (pH, conductividad, sólidos disueltos, temperatura) y profundidad del pozo.

En el muestreo en época seca, debido a cambios políticos en la municipalidad, no se obtuvo el acceso al nacimiento (SP01) y al pozo mecánico de la municipalidad (SP09), pero se tomó la muestra en los demás puntos de agua, midiendo los parámetros *in situ* (pH, conductividad, sólidos disueltos, temperatura). Durante la toma de muestras se hizo entrega de los resultados del muestreo en época de lluvia a las personas propietarias de los pozos.

En el estudio se hace referencia a la muestra SP08, la cual corresponde a un pozo mecánico en el que no fue posible la extracción de la muestra, pero se obtuvo el registro de un análisis realizado en el año 2011 por el laboratorio de Infom Unepar y los datos se utilizan como referencia en este estudio.

Figura 9. Conjunto de puntos de muestreo.



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

Para la georreferenciación de cada punto de agua se utilizó un GPS Garmin *eTrex Vista* y la información se digitalizó, elaborando *shapes* para su manejo en Sistemas de Información Geográfica. En el caso de los parámetros medidos *in situ*: pH, conductividad, sólidos disueltos, temperatura, se utilizó un potenciómetro digital. Para determinar los niveles piezométricos se aprovecharon los accesos al acuífero, utilizando los pozos identificados en la zona de estudio y la medida del nivel piezómetro se realizó utilizando una sonda piezométrica. Para la toma de muestras de agua para los análisis fisicoquímicos y bacteriológicos de laboratorio se utilizó un toma-muestras de hierro galvanizado, que se hizo descender a cada pozo con una cuerda. Una vez se obtuvo la muestra, se procedió a realizar la lectura de los datos que se obtienen *in situ* (pH, temperatura, conductividad eléctrica y sólidos suspendidos totales).

Tabla I. **Tipo, uso, altura (msnm), profundidad medida con la sonda piezométrica y la cota piezométrica**

MUESTRA	TIPO	NOMBRE	USO	ALTURA (msnm)	PROFUNDIDAD NIVEL ESTÁTICO (m)	COTA PIEZOMETRICA (msnm)
SP01	Nacimiento brote definido	Chiquiacay	Consumo humano	2500	0	2500
SP02	Pozo Excavado	Fco. Bonifacio	Consumo humano	1574	11,87	1562,13
SP03	Pozo Excavado	Col Bethel	Consumo humano	1571	9,36	1561,64
SP04	Pozo Excavado	Hotel San Antonio	Consumo humano	1567	6,24	1560,76
SP05	Lago	Estación de bombeo	Recreativo	1561	3*	1561
SP07	Lago	Orilla poblada	Recreativo	1561	3*	1561
SP08	Pozo Mecánico	Pacucha	Consumo humano	1572	11	1561
SP09	Pozo Mecánico	Pamez	Consumo humano	1606	44	1562
SP10	Pozo	Hotel Amanecer	Consumo humano	1568	7,27	1560,73
SP11	Pozo Excavado	Hotel Villa Sol	Consumo humano	1565	3,76	1561,24
SP12	Pozo Excavado	Mariano Gonzalez	Riego	1566	5	1561
SP13	Pozo Excavado	Fedepma 1	Abandonado	1583	21,43	1561,57
SP14	Pozo Excavado	Fedepma 2	Procesos agroindustriales	1563	1,6	1561,4
SP15	Pozo Excavado	Puerto Bello	Recreativo	1563	2,28	1560,72
SP16	Lago	Orilla despoblada	Recreativo	1561	1*	1561
SP17	Grifo	Maria Ixmata	Consumo humano	N/A	N/A	N/A

* Muestras tomadas en el Lago a -3 m y -1 m del espejo de agua; Pozo Excavado: Pozo excavado manualmente.

Fuente: elaboración propia.

2.3. Material y equipo

Para la toma de muestras de los análisis bacteriológicos y fisicoquímicos se utilizó lo siguiente:

- Dos hieleras (una para la toma de muestras de análisis fisicoquímicos y la otra para los análisis bacteriológicos).
- Muestreador de profundidad.
- Cuerda de 50 metros.
- Frascos esterilizados para almacenamiento de agua a utilizar para análisis bacteriológicos.
- Envases de un litro de capacidad para almacenamiento de agua a utilizar para análisis fisicoquímicos.
- Guantes de *látex*.
- Hielo.
- Cerillos.
- GPS.
- Sonda para medición de nivel de agua.

2.4. Toma de muestra en pozos

Se utilizó el muestreador de profundidad, al cual se le adaptó una cuerda de 50 metros para poder llegar a los niveles de agua en los pozos y tomar la muestra de agua. Se siguieron los pasos listados a continuación:

- Se midió la profundidad del pozo con sonda.
- Se lavó el muestreador previamente a introducirlo al pozo y tomar la muestra de agua.

- Se sacó tres veces agua del pozo, siendo la última repetición la utilizada para llenar el frasco y el envase para los respectivos análisis.
- Una vez llenado los frascos se almacenaron en las hieleras respectivas.
- Se anotó la hora de extracción de la muestra y el lugar exacto de la toma de la misma.

2.5. Toma de muestra en grifo y en nacimiento

Para la toma de muestras en grifos se utilizaron directamente los recipientes, y como primer paso se flameó con cerillos el grifo en la parte de salida del agua. Posteriormente se siguió la metodología anterior. En el caso de la toma de muestra en el nacimiento de agua se muestreó directamente sobre la tubería de conducción, utilizando los recipientes de toma de muestra siguiendo la metodología anterior.

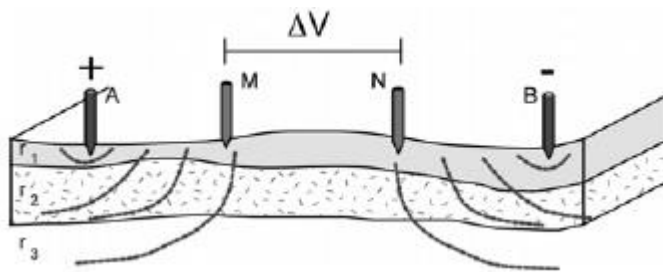
2.6. Nivel freático

Para determinar los niveles freáticos de la zona de estudio, se cuenta con la información de un Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), realizado por Geólogos del Mundo en diciembre del año 2012, así como con el censo de los niveles estáticos de los pozos en estudio.

El SEV es una técnica geofísica en la que se realizan una serie de medidas alrededor de un punto, en que se aplica corriente eléctrica a ciertas distancias para obtener lecturas de resistividad. Con los resultados se puede crear una curva que al interpretarse permite identificar o no la presencia de agua subterránea y la profundidad a que esta se encuentra.

La figura 12 presenta el esquema simplificado y disposición de un SEV, utilizando una fuente artificial. La emisión de corriente (A-B) induce un campo eléctrico, el cual se expresa en términos de la diferencia medida de voltaje (ΔV) por los electrodos (M-N).

Figura 10. **Esquema simplificado SEV**

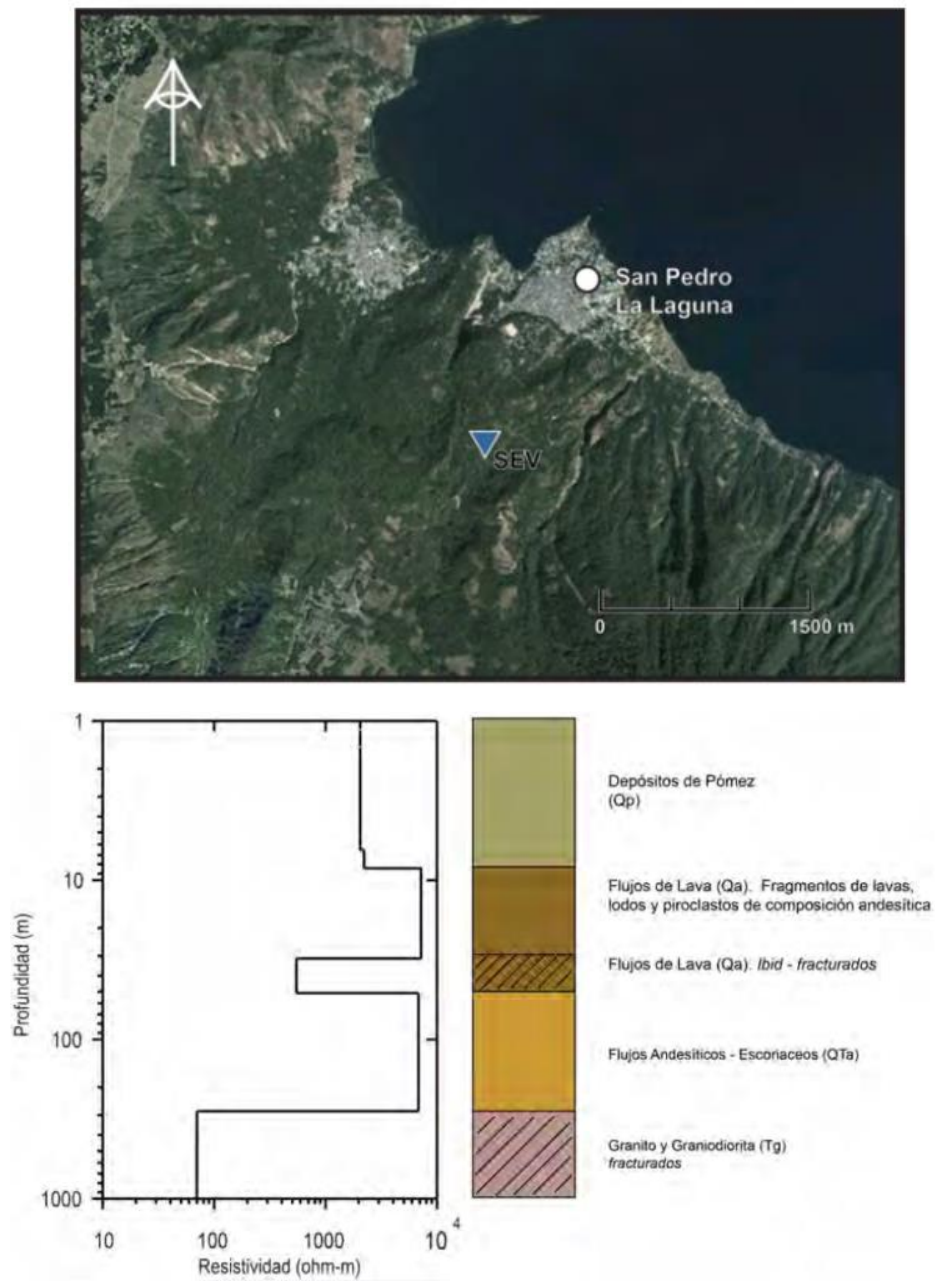


Fuente: GEO Ciencia Aplicada. *Estudio Geofísico – Sondeos Eléctricos Verticales, Santiago Atitlán y San Pedro La Laguna*. Guatemala: 2012. p 5.

La figura 11 presenta los resultados del SEV realizado en San Pedro La Laguna, en donde se presentan tres estratos de contraste resistivo y de los que se interpreta: que la base de depósitos es de Pómez, cuyos valores de resistividad son relativamente altos ($\sim 2000 \Omega\text{-m}$). Por ende, no albergan acuíferos, lo que adquiere sentido con la escasez de manantiales superficiales y la existencia de un estrato por debajo de la unidad de flujos andesíticos escoriáceos, donde se encuentran granitos fracturados. Esto se estima aproximadamente a una profundidad coincidente al nivel del Lago de Atitlán, lo cual es razonable y coincidiría con la hipótesis de acuíferos en cuerpos fracturados¹⁶.

¹⁶GEÓLOGOS 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. P. 19.

Figura 11. **Mapa de ubicación, modelo geoelectrico y columna litológica inferida, resultante de la inversión de datos SEV**



Fuente: GEO Ciencia Aplicada. *Estudio Geofísico – Sondeos Eléctricos Verticales, Santiago Atitlán y San Pedro La Laguna*. Guatemala: 2012. p 13.

En cuanto al censo de los niveles estáticos de los pozos, se utilizó una sonda vertical y la georreferenciación de los brocales de los pozos y, restando la profundidad determinada con la sonda a la altura registrada por el gps (*etrex vista*), se obtuvo el gradiente hidráulico (ver tabla II). La variación promedio obtenida con respecto al nivel del espejo de agua del Lago de Atitlán es de 0,20 m. y, considerando el tipo de equipo utilizado, esta variación puede deberse al error de precisión del instrumento, determinando así que el nivel estático registrado por los pozos corresponde al nivel de Lago de Atitlán.

Tabla II. **Piezometría y variaciones de nivel estático respecto al Lago de Atitlán**

MUESTRA	ALTURA	PROFUNDIDAD	COTA PIEZOMÉTRICA	VARIACIONES
	(msnm)	NIVEL ESTÁTICO (m)	(msnm)	NIVEL LAGO
SP01	2500	0	2500	N/A
SP02	1574	11,87	1562,13	1,13
SP03	1571	9,36	1561,64	0,64
SP04	1567	6,24	1560,76	-0,24
SP05	1561	3*	1561	0
SP07	1561	3*	1561	0
SP08	1572	11	1561	0
SP09	1606	44	1562	1
SP10	1568	7,27	1560,73	-0,27
SP11	1565	3,76	1561,24	0,24
SP12	1566	5	1561	0
SP13	1583	21,43	1561,57	0,57
SP14	1563	1,6	1561,4	0,4
SP15	1563	2,28	1560,72	-0,28
SP16	1561	1*	1561	0
SP17	N/A	N/A	N/A	N/A

Fuente: elaboración propia.

2.7. Cronología de actividades

Debido a que el laboratorio para los análisis se encuentra en la ciudad de Guatemala, los dos muestreos se realizaron día domingo, para trabajar los análisis respectivos a primera hora del día lunes, por lo que fue necesaria la preservación de las muestras, primero en hieleras y posteriormente en frigoríficos. La tabla III presenta la cronología de actividades asociadas a los muestreos y determinación de la calidad del agua.

Tabla III. Cronología de actividades

Fecha muestreo en época de lluvia	Fecha muestreo época seca	Actividad
28/09/2015	29/02/2016	Toma de muestras, medición in situ de pH, temperatura, Conductividad eléctrica y TSD.
28/09/2015	29/02/2016	Conservación de muestras fisicoquímicas y bacteriológicas
29/09/2015	01/03/2016	Análisis bacteriológico ¹⁷ (prueba presuntiva método de tubos de fermentación con 3 repeticiones). Determinación de Nitratos, Dureza, Alcalinidad y olor
30/09/2015	02/03/2016	Determinación de nitritos, fosfatos, hierro, turbiedad, cloruros y aluminio
1/10/2015	03/03/2016	Determinación de sulfatos, manganeso, fluoruros, amoníaco, conductividad eléctrica
1/10/2015	03/03/2016	Lectura tubos de fermentación prueba presuntiva
2/10/2015	03/03/2016	Siembra tubos de fermentación prueba confirmativa para EC
3/10/2015	04/03/2016	Lectura tubos de fermentación prueba confirmativa para EC
5/10/2015	03/03/2016	Siembra tubos de fermentación prueba confirmativa verde brillante
7/10/2015	05/03/2016	Lectura tubos de fermentación prueba confirmativa verde brillante

Fuente: elaboración propia.

¹⁷ En el caso del muestreo en época seca, se utilizó metodología de Colilert para el análisis bacteriológico de los pozos y tubos de fermentación para muestras del lago.

3. RESULTADOS

Por cada pozo se realizó el análisis de 20 parámetros fisicoquímicos y 2 bacteriológicos. En la figura siguiente se identifican los puntos de muestreo de la zona poblada del municipio y las tablas IV-IX presentan los resultados, indicando en rosado los parámetros que exceden los límites de la norma COGUANOR NTG 29001.

Figura 12. Puntos de muestreo de zona poblada de San Pedro la Laguna



Fuente: elaboración propia, empleando ArqMap

Tabla IV. **Resultados de análisis fisicoquímicos. Muestreo en época de lluvia**

	Día	Hora	Olor	Temperatura (°C)	Turbiedad (NTU)	Conductividad Eléctrica (µS/cm)	pH	Sólidos disueltos (mg/L)	Cloruros (mg/L)
SP01	28/09/2015	8:00	Inoloro	15,6	0,384	107,3	7,1	82	8
SP02	28/09/2015	9:00	Inoloro	24,1	76,9	373	7,1	259	13
SP03	28/09/2015	9:30	Inoloro	24,9	1,32	287	6,9	210	15
SP04	28/09/2015	9:50	Inoloro	23,6	1,11	496	6,9	363	21
SP05	28/09/2015	10:30	Inoloro	26,2	0,864	458	8,7	322	20
SP07	28/09/2015	11:00	Inoloro	25,7	0,747	458	8,7	321	20
SP08 ₁₈	25/05/2011	17:00	Inoloro	21,7	0,5	320	6,6		
SP09	28/09/2015	11:35	Inoloro	24,4	0,212	223	7,4	161	10
SP10	28/09/2015	12:20	Inoloro	24,7	0,588	322	7,2	219	13
SP11	28/09/2015	12:40	Inoloro	25,2	0,702	320	7,1	214	11
SP12	28/09/2015	13:15	Inoloro	23,5	11,1	309	7,1	213	10
SP13	28/09/2015	14:00	Materia orgánica en descomposición	26,7	62,1	3151	6,9	2142,68 ¹⁹	22
SP14	28/09/2015	14:25	Inoloro	24,1	0,308	450	7,5	307	18
SP15	28/09/2015	14:40	Inoloro	24,7	1,4	446	7,2	305	16
SP16	28/09/2015	15:00	Inoloro	25,5	2,34	456	8,7	316	19
SP17	28/09/2015	15:25	Inoloro	23,6	0,481	262	7,7	174	10

Fuente: elaboración propia.

¹⁸ El punto de muestreo SP08 fue obtenido de análisis previo, ya que no se pudo tomar la muestra en las campañas realizadas con este estudio.

¹⁹ Dato aproximado.

Tabla V. **Resultados de análisis fisicoquímicos. Muestreo en época de lluvia**

	Dureza total (mg/L CaCO ₃)	Calcio (mg/L Ca)	Magnesio (mg/L Mg)	Sulfatos SO ₄ (mg/L)	Aluminio (mg/L Al)	Manganeso (mg/L Mn)	Hierro (mg/L Fe)	Nitritos NO ₃ (mg/L)	Nitratos NO ₂ (mg/L)
SP01	36	12,02	1,45	0	0,004	0,2	0,03	0,0231	7,48
SP02	128	39,28	7,27	31	0	0	0,34	0,2409	23,76
SP03	96	28,86	5,82	26	0,005	0,6	0,02	0,0627	45,32
SP04	164	36,07	17,96	44	0	0,3	0,1	0,0429	118,8
SP05	144	24,85	19,91	53	0	0,4	0	0,033	0,44
SP07	146	24,85	20,40	51	0	0,4	0	0,0099	13,2
SP08	130	34,00	10,00	21		0,3	0,07	0,01	38
SP09	76	15,23	9,22	30	0	0,2	0,15	0,0528	11,88
SP10	110	24,85	11,65	33	0	0	0,05	0,0363	30,8
SP11	112	27,25	10,68	37	0,049	0,3	0,06	0,0396	41,36
SP12	106	24,05	11,16	32	0,02	0,3	0,06	0,0198	33
SP13	180	92,18	12,19	47	0	0	0,83	0,1056	44
SP14	174	28,06	25,25	52	0,018	0,2	0,03	0,033	7,92
SP15	170	27,25	24,77	53	0,036	0,2	0	0,0297	12,76
SP16	154	24,05	22,83	49	0,063	0,4	0,12	0,0231	6,16
SP17	92	20,04	10,19	25	0,004	0,2	0,18	0,0165	33,44

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Resultados de análisis fisicoquímicos. Muestreo en época de lluvia**

	Fosfatos PO ₄ (mg/L PO ₄)	Amoniaco NH ₃ (mg/L)	Fluoruros (mg /L F)	Carbonatos (mg/L CaCO ₃)	Bicarbonatos (mg/L CaCO ₃)	Coliformes Fecales (NMP/100 mL)	Coliformes totales (NMP/100 mL)
SP01	1,69	0	0	0	50	<3	210
SP02	2,68	0,62	0	0	156	1100	>2400
SP03	2,54	0	0	0	74	75	210
SP04	3,2	0,01	0,04	0	134	20	1100
SP05	0,34	0,07	0,08	24	168	93	1100
SP07	0,3	0,07	0,01	36	134	28	>2400
SP08						4	13
SP09	1,44	0	0,13	0	86	<3	<3
SP10	2,82	0	0,02	0	110	28	210
SP11	1,8	0	0	0	124	<3	>2400
SP12	1,44	0,06	0	0	108	150	460
SP13	292,5	377,5	0	0	768	<3	14
SP14	4,46	0,55	0,04	0	168	25	460
SP15	1,26	0,01	0,02	0	166	<3	>2400
SP16	0,38	0,13	0,06	52	114	75	1100
SP17	1,46	0,01	0,03	0	100	<3	93

Fuente: elaboración propia

Tabla VII. **Resultados de análisis fisicoquímicos. Muestreo en época seca**

	Día	Hora	lugar	Olor	Temperatura (°C)	Turbiedad (NTU)	Conductividad Eléctrica (µS/cm)	pH
SP02	29/02/2016	8:15	Fco. Bonifacio	Inodoro	21,2	73,2	407	9,9
SP03	29/02/2016	8:00	Col Bethel	Inodoro	21,5	2,44	413	7,3
SP04	29/02/2016	9:30	Hotel San Antonio	Inodoro	23,5	0,118	322	7,8
SP05	29/02/2016	13:10	Estación de bombeo	Inodoro	24,7	1,4	464	8,6
SP07	29/02/2016	13:25	Orilla poblada	Inodoro	23,9	4,76	465	8,4
SP10	29/02/2016	10:00	Hotel Amanecer	Inodoro	23,3	0,814	392	7,3
SP11	29/02/2016	12:30	Hotel Villa Sol	Inodoro	25	0,339	344	7,4
SP12	29/02/2016	10:15	Mariano Gonzalez	Inodoro	22,3	0,672	326	7,1
SP13	29/02/2016	10:45	Fedepma 1	Inodoro	26,5	1253	3660	7
SP14	29/02/2016	11:00	Fedepma 2	Inodoro	22,5	4,16	455	7,6
SP15	29/02/2016	11:19	Puerto Bello	Inodoro	24,5	3,37	446	7,5
SP16	29/02/2016	12:00	Orilla despoblada	Inodoro	24,2	0,814	461	8,5
SP17	29/02/2016	9:00	Maria Ixmata	Inodoro	22,3	10,1	495	7,2

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Resultados de análisis fisicoquímicos. Muestreo en época seca**

	Sólidos totales disueltos (mg/L)	Cloruros (mg/L)	Dureza total (mg/L CaCO ₃)	Calcio (mg/L Ca)	Magnesio (mg/L Mg)	Sulfatos SO ₄ (mg/L)	Aluminio (mg/L Al)	Manganeso (mg/L Mn)	Hierro (mg/L Fe)	Nitratos NO ₃ (mg/L)
SP02	289	28	114	37,68	4,84	63	0,031	0	0,23	112,5
SP03	306	20,5	138	38,48	10,19	34	0,000	0,1	0,1	72,9
SP04	241	21	108	24,05	11,65	29	0,000	0,95	0,04	47,7
SP05	320	30,5	146	24,85	20,40	41,5	0,010	0,05	0,01	2,9
SP07	320	29,5	148	24,05	21,37	43,5	0,003	0,4	0,06	3,8
SP10	290	25,5	132	27,25	15,54	35	0,014	0	0,035	96,4
SP11	238	18,5	132	24,85	16,99	31	0,015	0,1	0,18	69,8
SP12	234	18	124	24,85	15,05	31	0,003	0,35	0,05	65,0
SP13	2562	52,5	802	248,50	44,10	20	0,095	0	5,775	506,0
SP14	313	28,5	174	26,45	26,23	49,5	0,009	0,55	0,03	22,4
SP15	317	26	170	27,25	24,77	49,5	0,007	0,2	0,07	13,8
SP16	330	29,5	150	23,25	22,34	40,5	0,013	0	0	3,2
SP17	353	31,5	174	38,48	18,93	39,5	0,024	0,1	0,03	136,8

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Resultados de análisis fisicoquímicos. Muestreo en época seca**

	Nitritos NO2 (mg/L)	Fosfatos PO4 (mg/L PO4)	Amoniaco NH3 (mg/L)	Fluoruros (mg/L F)	Carbonatos (mg/L CaCO3)	Bicarbonatos (mg/L CaCO3)	Coliformes Fecales (NMP/100 mL)	Coliformes totales (NMP/100 mL)	Hidroxidos (mg/L CaCO3)
SP02	15,230	0,79	0,764	0,4	16	0	<1	179,3	40,00
SP03	0,058	2,535	0,096	0	0	132	42	>2419,6	0,00
SP04	0,028	1,32	0	0	0	120	1	248,1	0,00
SP05	0,007	0,25	0	0,36	32	152	<1,8	11	0,00
SP07	0,026	1,14	0	0	24	152	<1,8	4,5	0,00
SP10	0,036	2,64	0	0	0	136	24,1	648,8	0,00
SP11	0,069	1,285	0	0,07	0	120	<1	155,3	0,00
SP12	0,007	1,97	0	0	0	124	98	>2419,6	0,00
SP13	0,096	26,45	219,6	0	0	1940	<1	>2419,6	0,00
SP14	0,000	1,03	0	0	0	160	58,3	307,6	0,00
SP15	0,021	1,05	0	0	0	160	4,1	235,9	0,00
SP16	0,035	0,07	0	0,58	40	132	<1,8	4,2	0,00
SP17	0,210	4,34	0	0	0	140	<1	238,2	0,00

Fuente: elaboración propia.

4. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS FISICOQUÍMICOS

A continuación se detallará cada uno de los parámetros fisicoquímicos analizados en el presente estudio y cada uno de los hallazgos encontrados.

4.1. Temperatura del agua

Esta fue tomada *in situ*. En el muestreo en época de lluvia la temperatura mínima fue de 15,6 °C, obtenida en la muestra SP01, correspondiente al nacimiento de agua, y la máxima se obtuvo en el punto de muestreo SP13, correspondiente al beneficio de café (Fedepma 1), la cual fue de 26,7 °C, y se obtuvo una temperatura promedio de 24 °C.

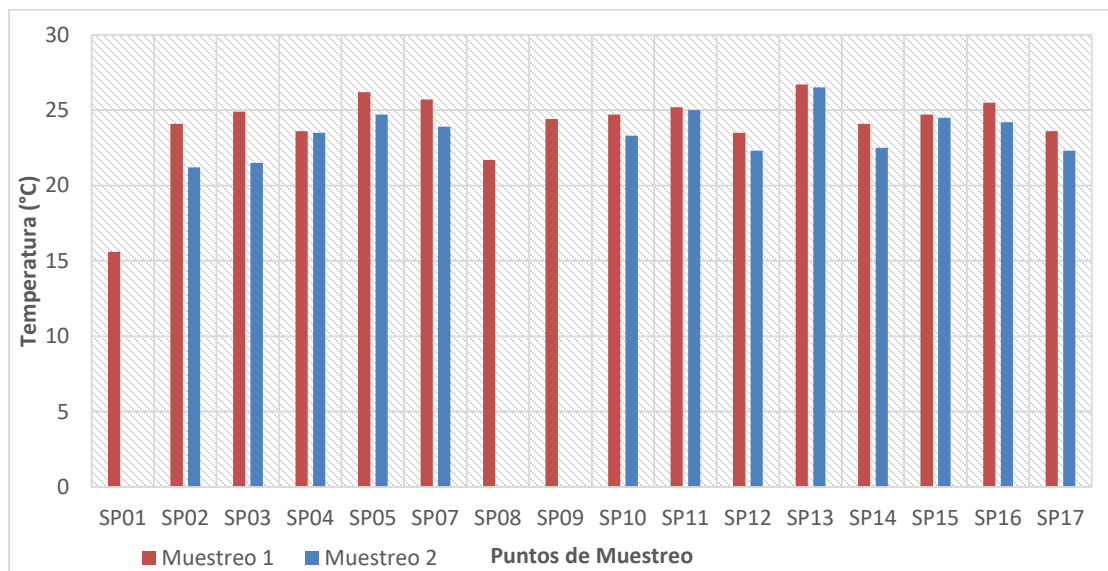
En el muestreo en época seca la temperatura máxima fue de 26,5 correspondiente a la muestra SP13 (Fedepma 1), en este caso no se tomó la muestra del nacimiento, por lo que la temperatura mínima de las muestras obtenidas es de 21,2°C, correspondiente a la SP02. La media de temperaturas para este muestreo fue de 23 °C.

Se realizó la comparación de los resultados obtenidos con la norma COGUANOR²⁰ NTG 29001:99 1ª, revisión donde se determinó que la temperatura de agua de los pozos evaluados se encuentra dentro del límite máximo permisible en los dos muestreos, ya que los rangos de temperaturas obtenidos varían de 15,6°C a 26,7 °C en el muestreo en época de lluvia, y de 21,2 °C a 26,5°C en el muestreo en época seca (no se realizó el muestreo al

²⁰ De ahora en adelante se referirá solamente como norma COGUANOR.

nacimiento de agua). Se puede observar en la figura siguiente que las temperaturas de las muestras de agua del muestreo en época seca son levemente más bajas que las obtenidas en el muestreo en época de lluvia.

Figura 13. **Temperatura**



Fuente: elaboración propia.

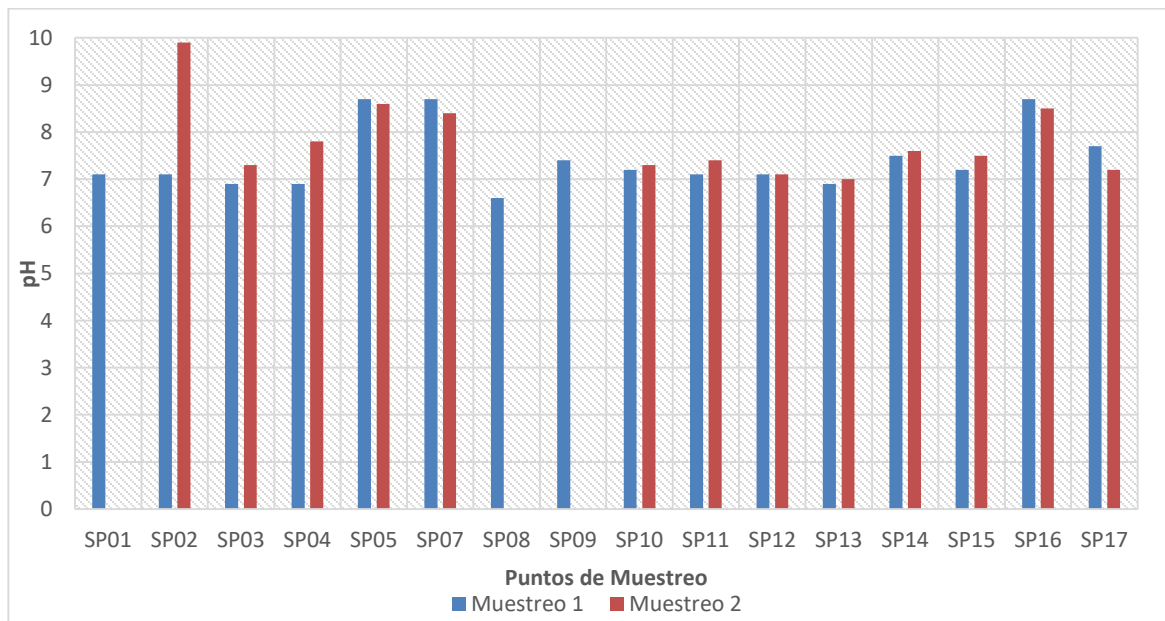
4.2. pH

En el muestreo en época de lluvia se observó que las muestras de agua que sobrepasan los valores de pH establecidos en la norma COGUANORNTG 29001 son SP05, SP07 y SP16, con un valor de 8,7 unidades de pH, las cuales corresponden a las muestras tomadas en el Lago de Atitlán. Los valores mínimos encontrados corresponden a las muestras SP03, SP04 y SP13, correspondientes a pozos con un valor de 6,9 unidades de pH.

En el caso del muestreo en época seca, las muestras de agua SP02 y SP05 son las que sobrepasan el límite de la norma COGUANOR NTG 29001, con valores de 9,9 y 8,6 respectivamente. En el caso de la muestra SP02 se cree que el resultado pudo ser influenciado por la condición actual del pozo, ya que en el muestreo en época de lluvia solo estaba abierto el pozo, y en el muestreo en época seca se habían realizado trabajos de construcción (construcción de pared en todo el pozo), aspecto que pudo afectar significativamente las características del mismo.

El resto de muestras en ambos muestreos están dentro de los rangos aceptables de 6,5 a 8,5 unidades de pH. En la representación gráfica de los resultados se observa que los valores de pH son muy parecidos y no hay cambios drásticos, a excepción del SP02.

Figura 14. pH



Fuente: elaboración propia.

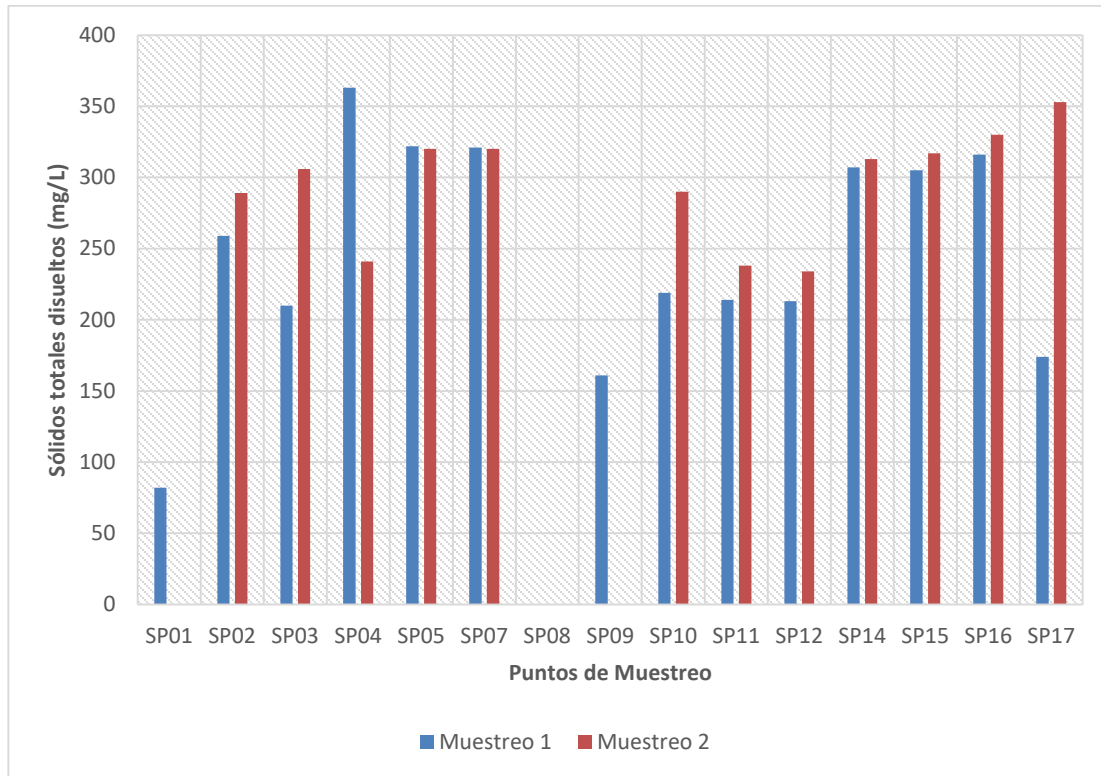
4.3. Sólidos disueltos totales

Según la norma COGUANOR NTG 29001, el límite máximo permisible para sólidos disueltos es de 1000 mg/L, y para los dos muestreos se determinó que la única muestra de agua analizada que no cumple con este límite es la SP13, la cual presentó un valor de 2142 mg/L en el muestreo en época de lluvia, y en el muestreo en época seca un valor de 2562 mg/L. Estos resultados no siguen el patrón característico de las demás muestras, las cuales están dentro del rango de 82 mg/L y 363 mg/L en el muestreo en época de lluvia, y entre 234 mg/L y 363 mg/L (sin tomar en cuenta la del nacimiento de agua que fue la que presentó menor conductividad eléctrica en el muestreo 1), para el muestreo en época seca.

Según los 22 parámetros fisicoquímicos realizados, se observa que la muestra SP13 tiene valores no acordes a las demás muestras, esto, se presume, es debido a que el pozo está abandonado y se encuentra en las cercanías de un patio de secado de café y la maquinaria donde se realiza el proceso del beneficio de café, a esto se adiciona que el pozo no está completamente sellado, por lo que puede recibir sustancias que alteren sus características.

En la figura siguiente se puede observar que los valores de SDT son levemente mayores en el muestreo en época seca que los de la época de lluvia.

Figura 15. **Sólidos disueltos totales (mg/L)**



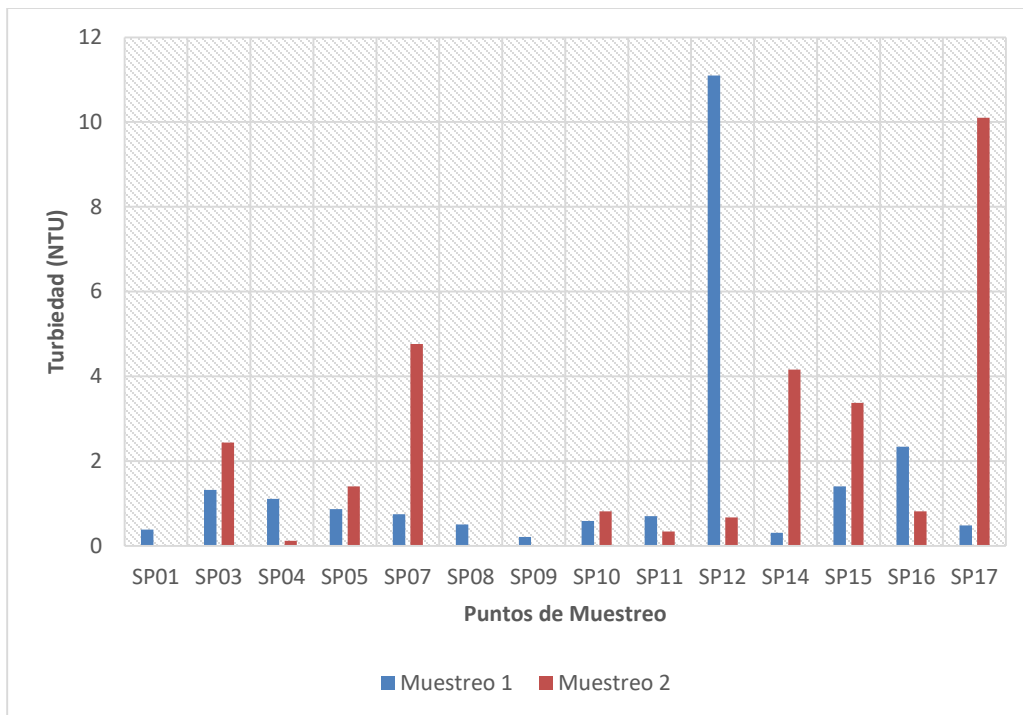
Fuente: elaboración propia.

4.4. Turbiedad

La turbiedad mayor en el muestreo en época de lluvia es de 76,9 NTU, correspondiente al punto SP02, mientras que la menor corresponde a la muestra SP09, con un valor de 0,212 NTU. Hay dos tendencias marcadas en los datos obtenidos de la turbiedad de las muestras de agua analizadas, donde los puntos de muestreo SP02, SP12 y SP13 presentaron turbiedades mayores a 10. Las demás muestras presentaron turbiedades menores a 2,4 NTU. En el muestreo en época seca la turbiedad mayor fue de 1253 NTU, correspondiente a la muestra SP13, y la mínima corresponde a 0,118, correspondiente a SP04.

El límite máximo permisible de la norma COGUANOR NTG 29001 (15 NTU) es sobrepasado por las muestras SP02 y SP13, con valores de 76,9 NTU y 62,1 NTU en el muestreo en época de lluvia, y el muestreo en época seca es sobrepasado por SP02 Y SP13, con valores de 73,2 NTU y 1253 NTU, respectivamente.

Figura 16. **Turbiedad (NTU)**



Fuente: elaboración propia.

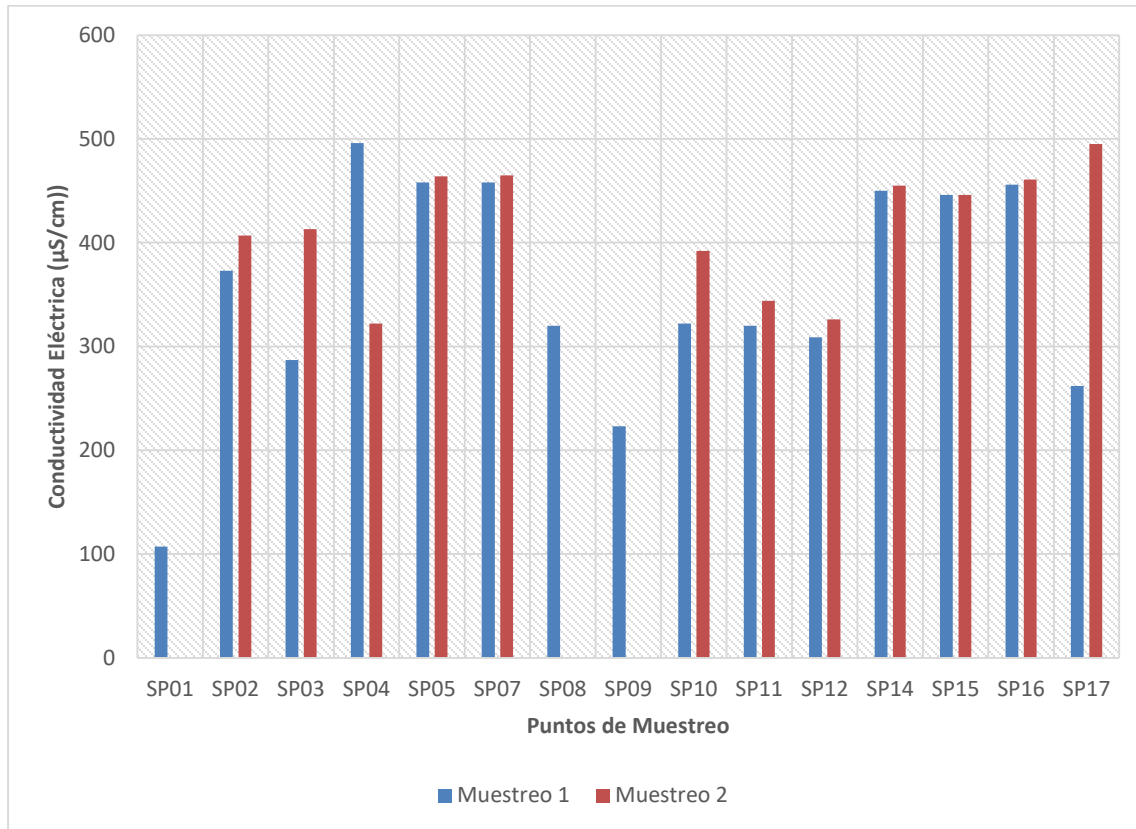
4.5. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica de la mayoría de las muestras se encuentra dentro del límite máximo permisible de la norma COGUANOR NTG 29001 (750 $\mu\text{S}/\text{cm}$). En los dos muestreos realizados, la única muestra de agua que sobrepasa este límite es la SP13, con valores de 3151 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para el muestreo en época de lluvia y 3660 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para el muestreo en época seca. Estos valores son atípicos dentro del conjunto de datos, ya que en el muestreo en época de lluvia la conductividad eléctrica está dentro del rango de 107 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 496 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En el caso del muestreo en época seca están dentro del rango de 322 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 495 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Como se mencionó anteriormente, la muestra SP13 corresponde a un pozo que está abandonado y pertenece a un beneficio de café, este no está completamente sellado, por lo que puede recibir sustancias externas que pueden modificar las características del agua, y se presume que ese es el caso particular por los valores tan elevados que presenta esta muestra de agua.

La conductividad eléctrica de los dos muestreos es similar, como se puede observar en la figura 17, siendo el valor de SP01, perteneciente al nacimiento de agua, el que presenta menor conductividad eléctrica de todas las muestras (no se realizó el muestreo del nacimiento en el muestreo en época seca), presentando este el menor número de sólidos totales disueltos.

Figura 17. Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)²¹



Fuente: elaboración propia.

4.6. Cloruros

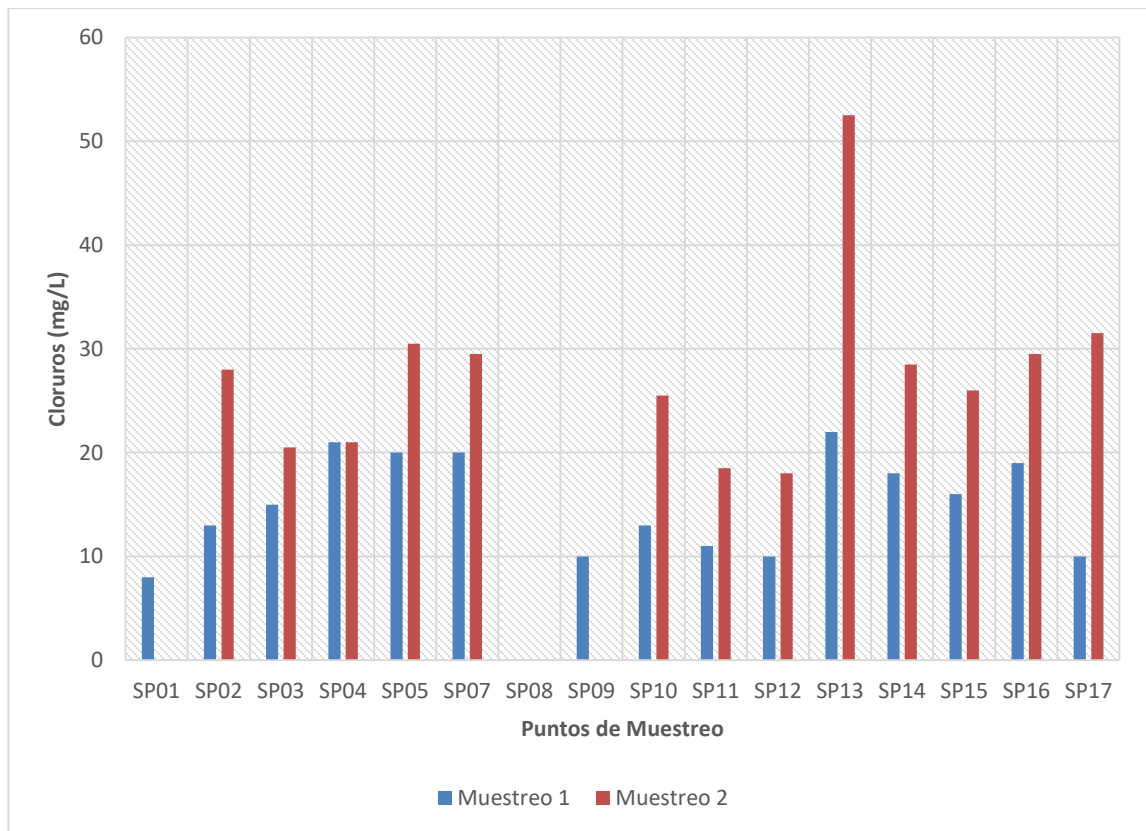
Las concentraciones de cloruros de los dos muestreos se encuentran dentro del límite máximo aceptable de la norma COGUANOR NTG 29001 (100 mg/L). En el muestreo en época de lluvia se encuentran entre el rango de 8 mg/L y 22 mg/L, correspondiente a las muestras SP01 y SP13, teniendo una media de 15 mg/L. En el muestreo en época seca se encuentran dentro de los rangos de 18

²¹ El valor de conductividad eléctrica correspondiente a la muestra SP13 no se colocó en la gráfica por cuestiones de escala, ya que presenta un valor de 3 151 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

mg/L y 52,5 mg/L, pertenecientes a las muestras SP12 y SP13 (no se realizó el muestreo a la SP01).

Como se puede observar en la figura 18, las concentraciones de cloruros del muestreo en época seca presentan valores más altos que las del muestreo en época de lluvia.

Figura 18. **Cloruros (mg/L)**



Fuente: elaboración propia.

4.7. Dureza total

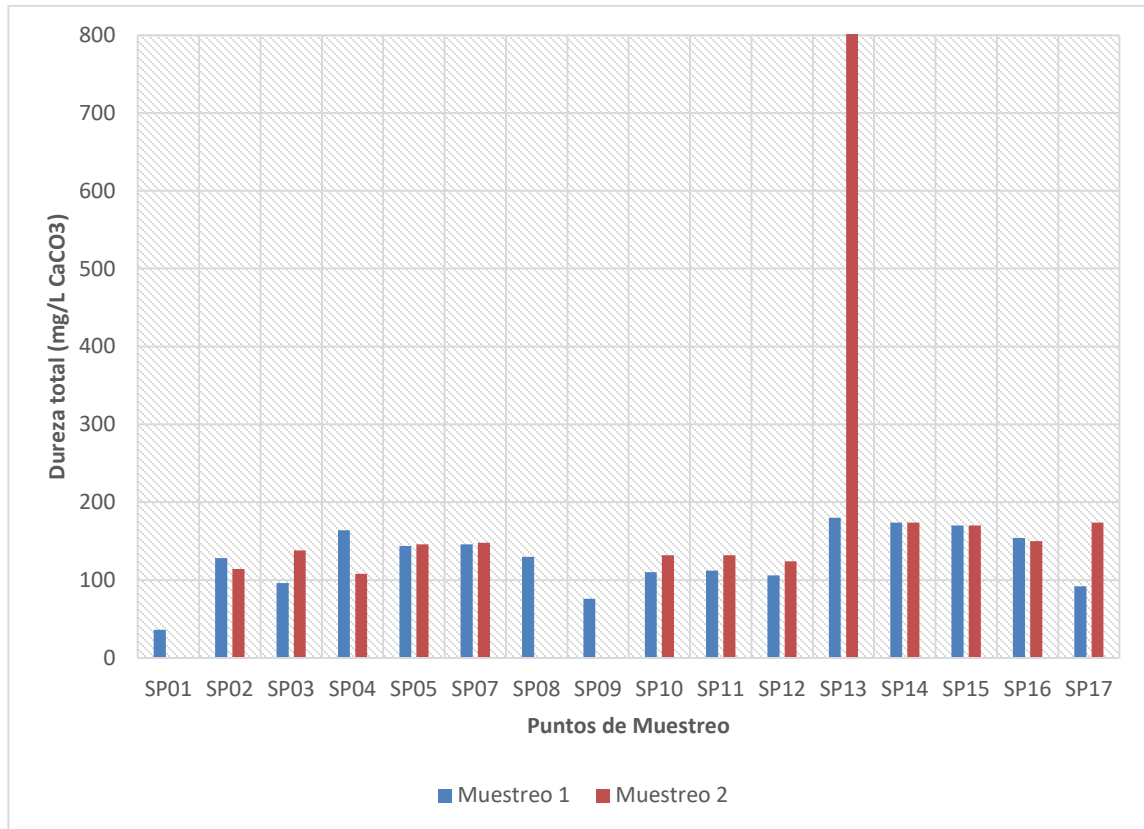
El límite máximo permisible de la norma COGUANOR NTG 29001 está establecido en 500 mg/L de CaCO_3 . En el muestreo en época de lluvia todas las muestras están dentro del límite máximo permisible; en el caso del muestreo en época seca, la muestra SP13 es la única que sobrepasa el límite máximo permisible, con un valor de 802 mg/L de CaCO_3 , que es catalogada como un agua muy dura.

En el muestreo en época de lluvia se determinó que la mayoría de las muestras tenían características de aguas moderadamente duras, con un 38 %, aguas duras con un 56%, y un 6% de aguas blandas. En el caso del muestreo en época seca, según los resultados obtenidos, se tiene un 76,9 % de aguas duras, un 7,7 % de aguas muy duras, y un 15,4 % de aguas moderadamente duras.

En el muestreo en época de lluvia el rango de valores de dureza está entre 36 mg/L CaCO_3 , correspondiente al nacimiento de agua SP01, y 180 mg/L CaCO_3 , que pertenece a la muestra SP13. En el muestreo en época seca el valor de la dureza va desde 108 mg/L CaCO_3 , que pertenece a la muestra SP04, y 802 mg/L CaCO_3 , correspondiente a la muestra SP13, que nuevamente se encuentra dentro de un valor atípico con respecto a todas las demás muestras analizadas.

Según estos resultados, en el muestreo en época seca hubo un aumento en el porcentaje de aguas duras respecto del muestreo en época de lluvia.

Figura 19. Dureza total (mg/L CaCO₃)



Fuente: elaboración propia.

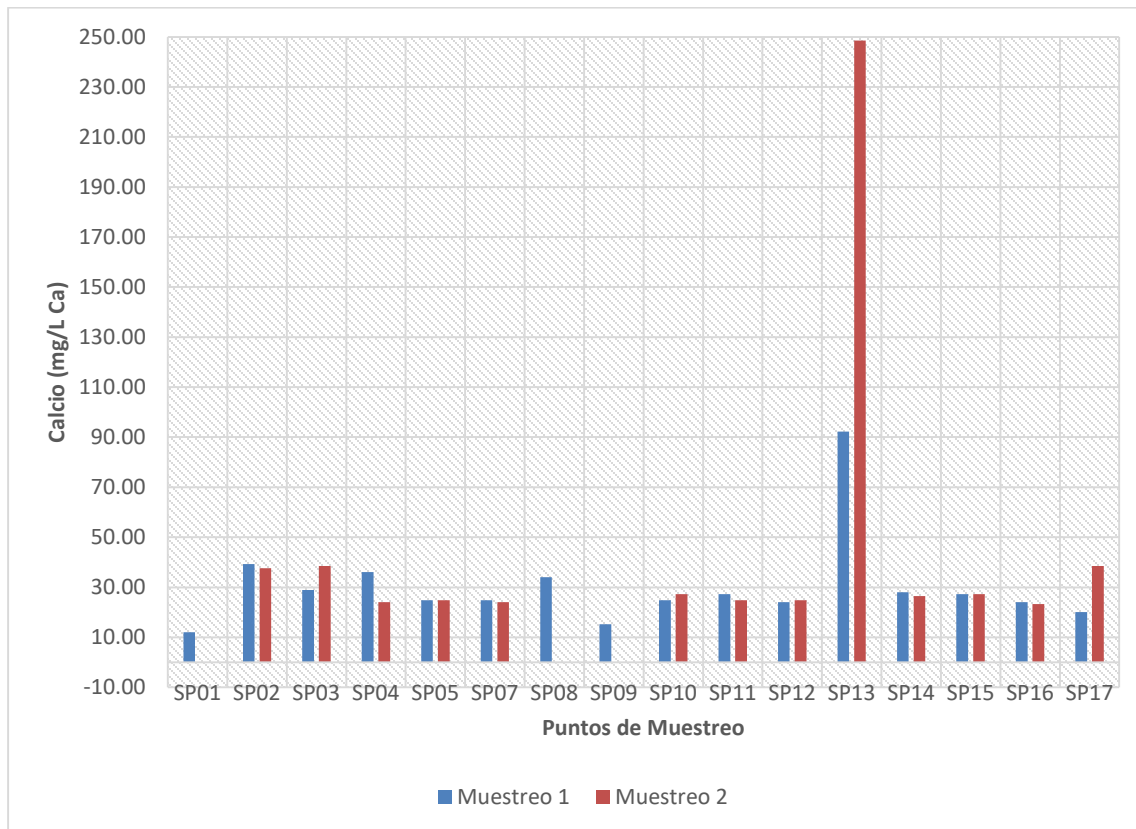
4.8. Calcio

La mayoría de las muestras analizadas en el muestreo en época seca están por debajo del límite máximo permisible que establece la norma COGUANOR NTG 29001 (150 mg/L Ca). La única que sobrepasa el LMP es la SP13, cuyo valor en el muestreo en época seca fue de 248,5 mg/L de Ca.

El rango de valores obtenidos en época lluviosa se encuentra entre 92,18 mg/L de Ca, perteneciente a la muestra SP13, y el valor mínimo de 12,0 mg/L

Ca, perteneciente a la muestra SP01. En el caso del muestreo en época seca se obtuvieron valores entre 23,24 mg/L, perteneciente a la muestra SP16, y 248,5 mg/L de Ca, perteneciente a la muestra SP13.

Figura 20. **Calcio (mg/L Ca)**

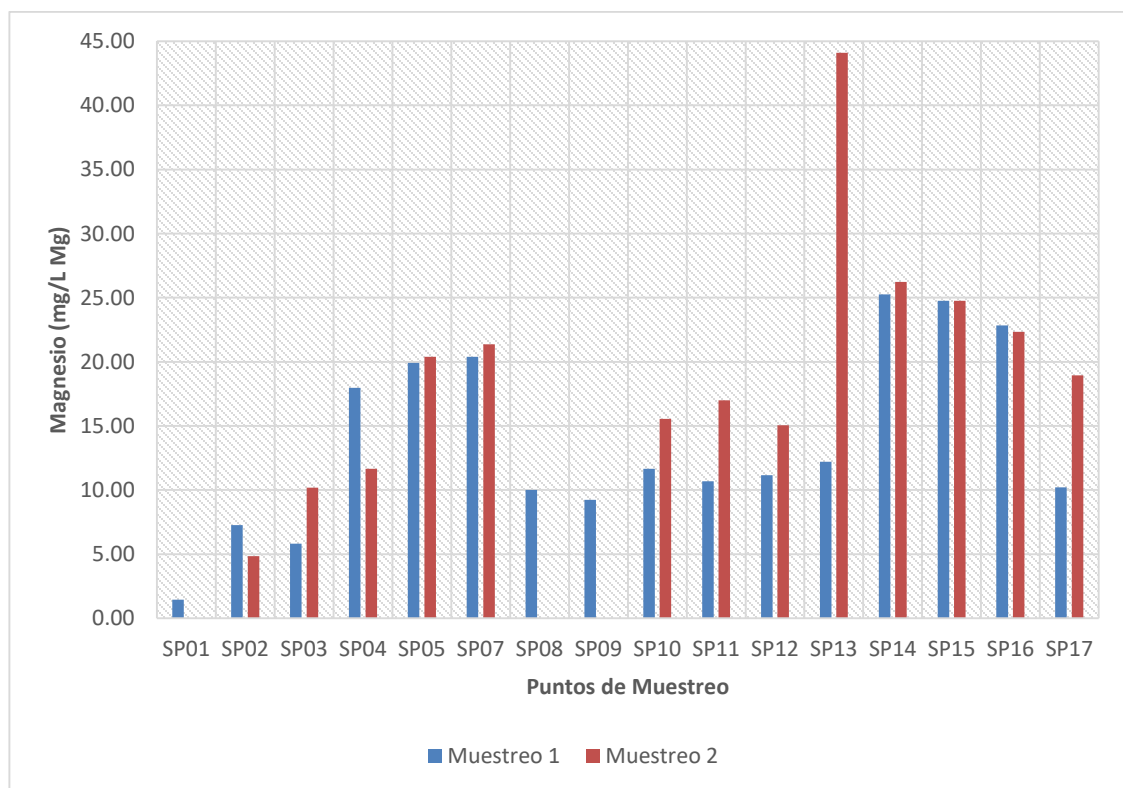


Fuente: elaboración propia.

4.9. Magnesio

Los valores de magnesio de las muestras en los dos muestreos están por debajo del límite máximo permisible de la norma COGUANOR NTG 29001 (100 mg/L Mg). El valor máximo obtenido en el muestreo en época de lluvia fue de 25,25 mg/L de Mg, correspondiente a la muestra SP14, y el valor mínimo corresponde a la muestra SP01, con un valor de 1,45 mg/L de Mg. En el muestreo en época seca los valores obtenidos de magnesio van desde 4,84 mg/L de Mg, correspondiente a la muestra SP02, y 44,09 mg/L, perteneciente a la muestra SP13.

Figura 21. Magnesio (mg/L Mg)



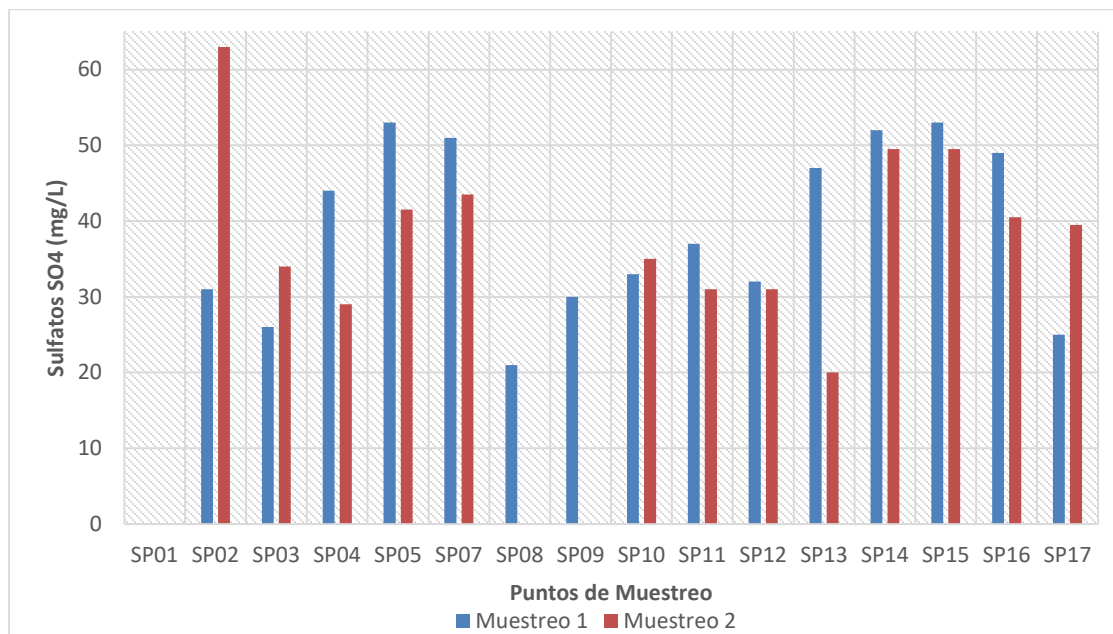
Fuente: elaboración propia.

4.10. Sulfatos

Los contenidos de sulfatos en las muestras analizadas de los dos muestreos están por debajo del límite máximo aceptable de la norma COGUANOR NTG 29001 (100 mg/L) y permisible (250 mg/L). En la figura siguiente se observa que los valores de sulfatos obtenidos en el muestreo en época de lluvia son levemente mayores que los obtenidos en el muestreo en época seca.

En el muestreo en época de lluvia se obtuvo un valor de 0 mg/L de SO_4 en el nacimiento de agua (SP01) y 53 mg/L de SO_4 , correspondiente a las muestras SP05 y SP15. En el muestreo en época seca se obtuvieron valores de 20 mg/L a 63 mg/L de SO_4 , correspondientes a las muestras SP13 y SP02.

Figura 22. Sulfatos SO_4 (mg/L)

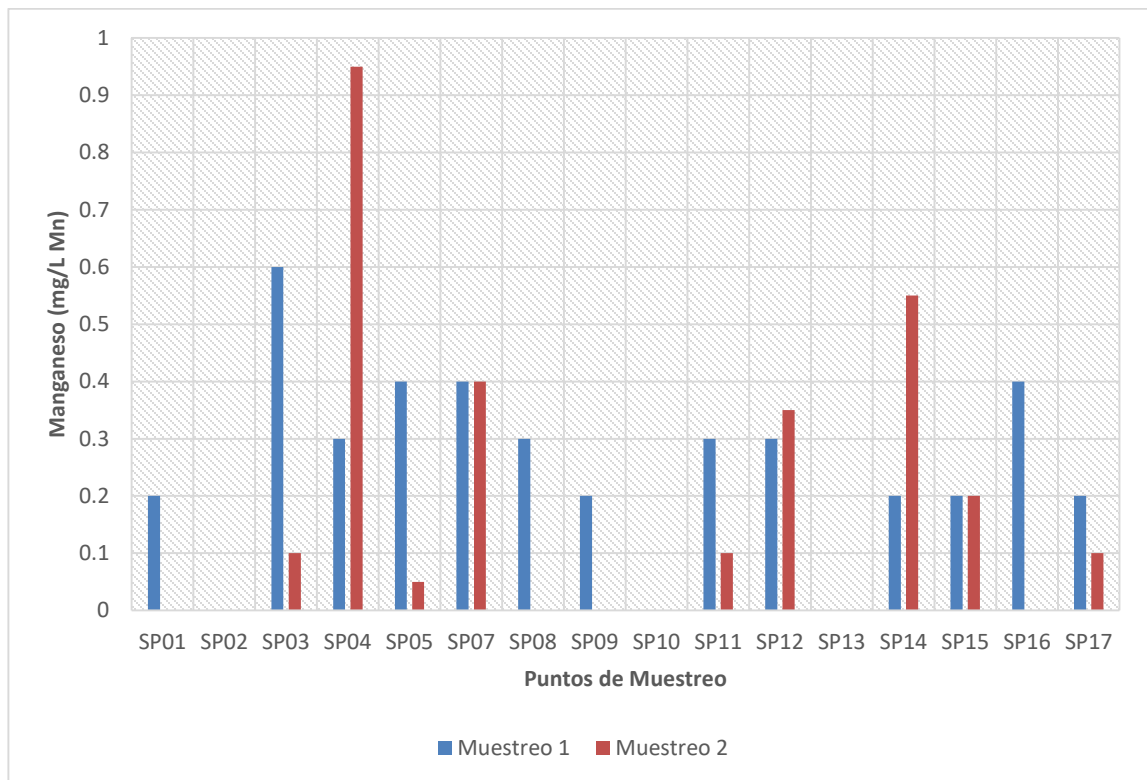


Fuente: elaboración propia.

4.11. Manganeso

En el muestreo en época de lluvia, la muestra SP03, con un valor de 0,6 mg/L de Mn, es la única que excede el límite máximo permisible de manganeso en agua potable, según la norma COGUANOR NTG 29001 (0,4 mg/L Mn). Las demás cumplen con la norma y oscilan entre valores de 0 mg/L de Mn, en las muestras SP02, SP10 y SP13, y de 0,4 mg/L de Mn en la muestra SP05, SP07 y SP16. En el caso del muestreo en época seca, las muestras SP04 y SP14 exceden el límite máximo permisible y las demás están dentro del LMP.

Figura 23. Manganeso (mg/L Mn)



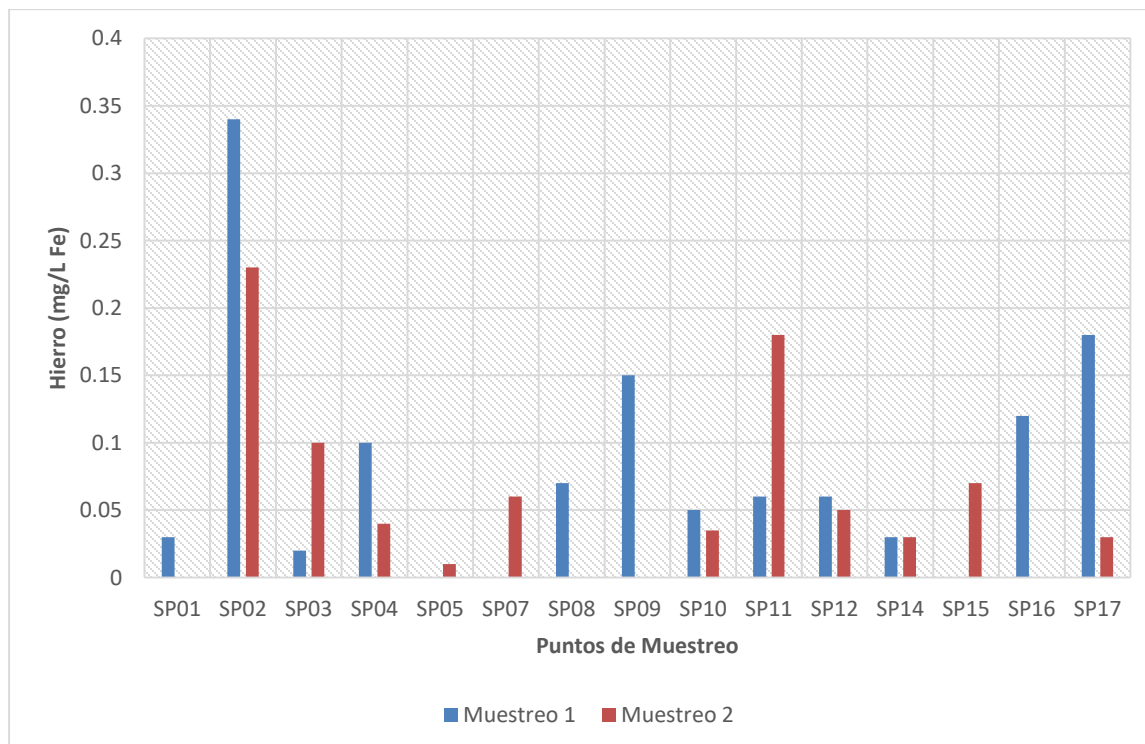
Fuente: elaboración propia.

4.12. Hierro

En el muestreo en época de lluvia, las concentraciones de hierro en las muestras no exceden el límite máximo aceptable de la norma COGUANOR NTG 29001 (0,3 mg/L de Fe). La concentración máxima encontrada corresponde a la muestra SP13 con 0,83 mg/L de Fe.

En el muestreo en época seca, la muestra SP13, con un valor de 5,775 mg/L de Fe, no cumple con el LMP. En este caso se especifica nuevamente que la muestra obtenida del pozo abandonado del beneficio de café muestra un valor atípico.

Figura 24. Hierro (mg/L Fe)



Fuente: elaboración propia.

4.13. Nitratos

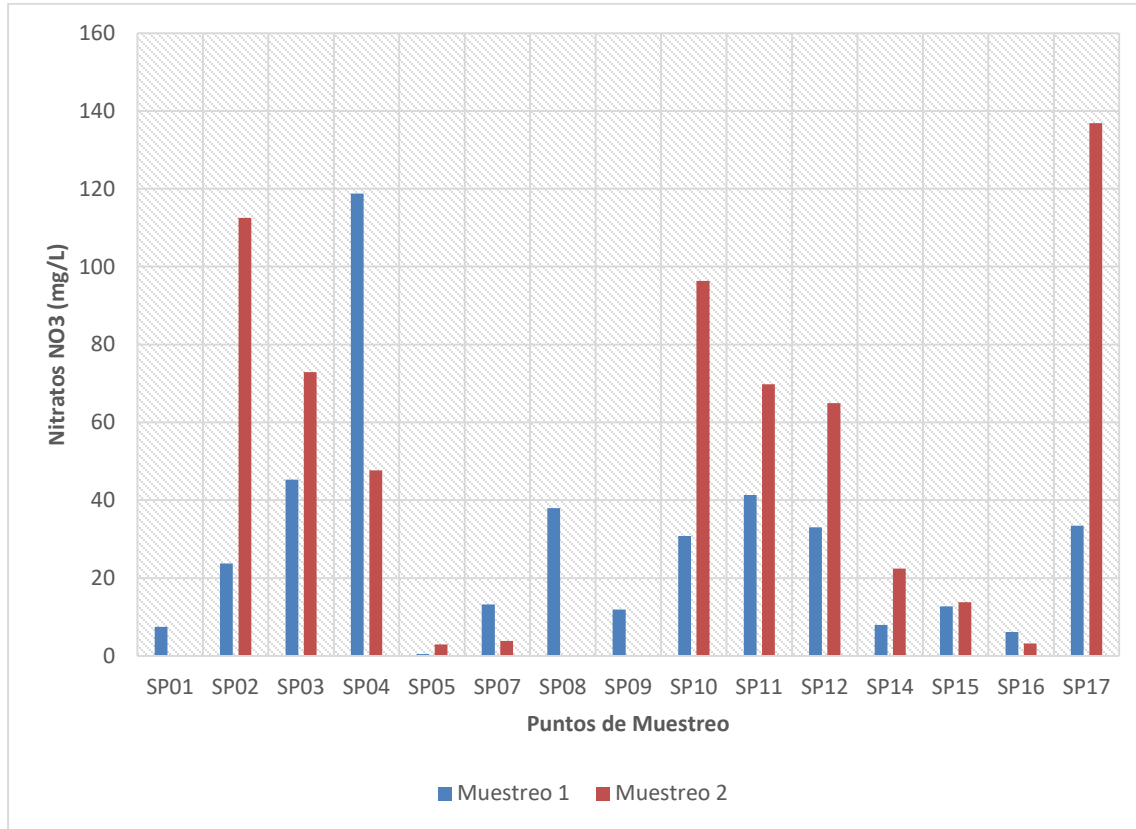
En el muestreo en época de lluvia, la única muestra que sobrepasa el límite máximo permisible de la norma COGUANOR NTG 29001 es la SP04, con un valor de 118,8 mg/L de NO_3^- . Las demás muestras están dentro del rango de 0,44 mg/L NO_3^- y 45,32 NO_3^- correspondiente a las muestras SP05 y SP03.

En el muestreo en época seca se observa un aumento significativo en la concentración de nitratos en la mayoría de las muestras, aumentando el número de puntos que tienen concentración de nitratos mayor al límite máximo permisible de la norma COGUANOR NTG 29001 (50 mg/L), los cuales son SP02, SP03, SP10, SP11, SP12, SP13, SP17. Los valores del muestreo en época seca oscilan entre 2,93 mg/L y 506 mg/L de NO_3^- correspondientes a las muestras SP05 y SP13. En este caso también se observa que la muestra SP13 tiene un valor atípico respecto a las demás muestras.

En la mayoría de las muestras se observa que la concentración de nitratos es mayor con respecto al muestreo en época de lluvia. Estos resultados pueden estar influenciados por la época en la cual se realizaron los muestreos. También es de destacar que, en el caso de las muestras tomadas en el lago, en el muestreo en época de lluvia hubo una variación mayor que en el muestreo en época seca, ya que los valores variaron en el de época de lluvia, de 0,44 mg/L a 6,16 mg/L NO_3^- , y en el muestreo en época seca de 2,9 mg/L a 3,8 mg/L de NO_3^- .

También es de importancia recalcar que la anterior norma COGUANOR NGO 29001 (previa a la NTG 29001), tenía un límite máximo permisible de 10 mg/L de NO_3 , el cual era mucho menor al de la norma actual, que es de 50 mg/L de NO_3 .

Figura 25. Nitratos (mg/L NO₃)



Fuente: elaboración propia.

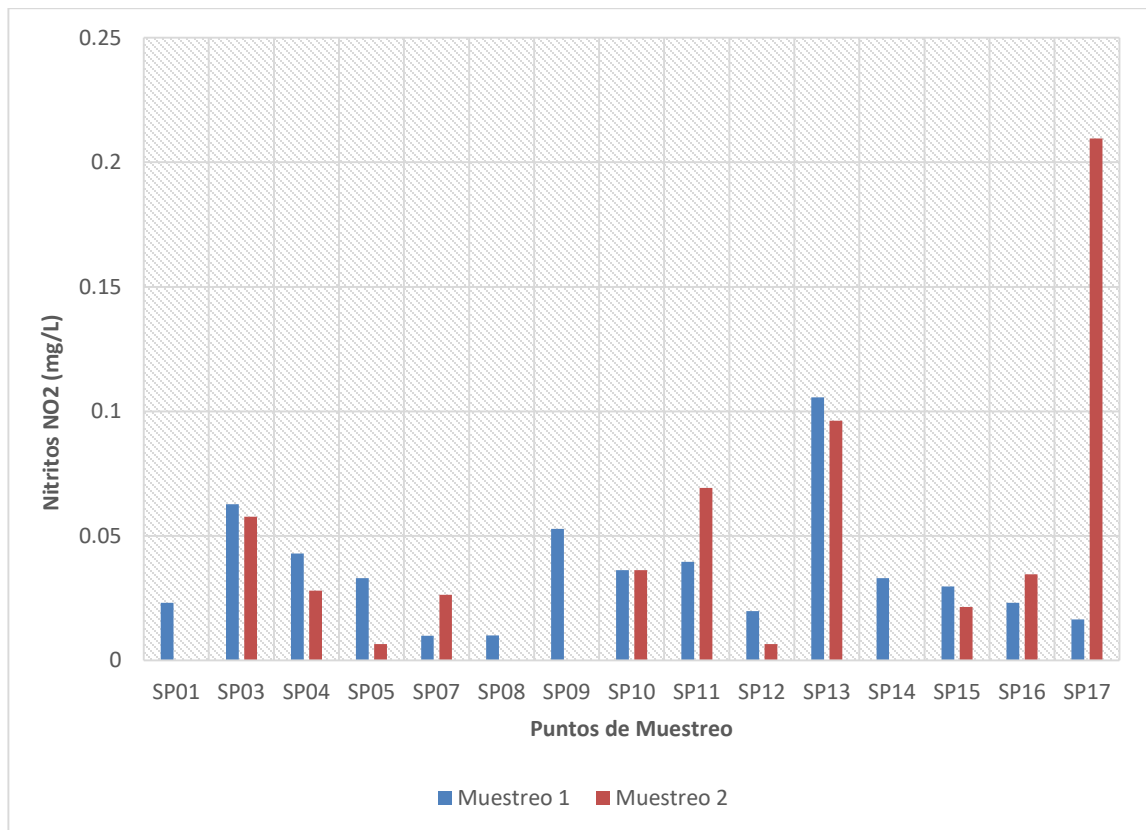
4.14. Nitritos

Las concentraciones de nitritos están por debajo del límite máximo permisible aceptado por la norma COGUANOR NTG 29001, que es de 1 mg/L de NO₂, encontrando la máxima concentración en la muestra SP02, con un valor de 0,2409 mg/L de NO₂.

En el caso del muestreo en época seca, la única muestra que sobrepasa el LMP es la SP02, con un valor de 15,23 mg/L de NO₂. Se presume que este valor

atípico se debió a los trabajos recientes de construcción del pozo que modificaron las características del agua cuando se realizó el muestreo en época seca.

Figura 26. Nitritos (mg/L NO₂)



Fuente: elaboración propia.

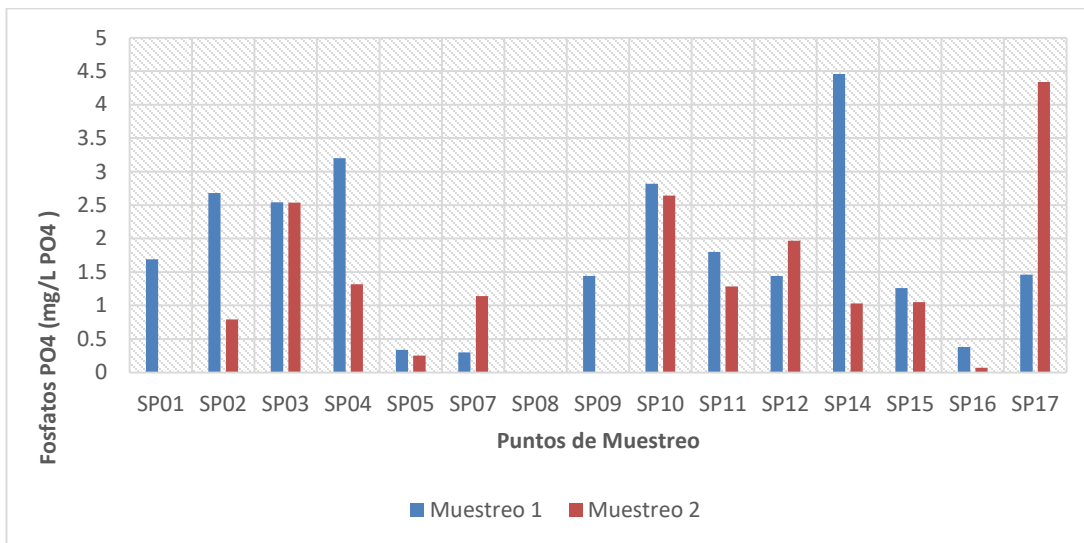
4.15. Fosfatos

No se menciona límite máximo permisible en la norma COGUANOR NTG 29001 referente a concentraciones de fosfatos. Las concentraciones de las muestras de agua del muestreo en época de lluvia oscilan entre 0,3 mg/L, correspondiente a la muestra SP07, y 2,82 mg/L de PO₄, correspondiente a la

muestra SP10, exceptuando la muestra SP13, la cual presentó un valor de 292,5 mg/L de PO₄ (93,6 mg/L de fósforo total (Pt)). Las aguas residuales tipo tienen una concentración de 10 mg/L de Pt, en este caso de la muestra SP13, que excede las características tipo de las aguas residuales.

En el muestreo en época seca se presentaron concentraciones entre 0,07 mg/L y 26,45 mg/L de PO₄, correspondientes a las muestras SP16 y SP13.

Figura 27. **Fosfatos (mg/L PO₄)²²**



Fuente: elaboración propia.

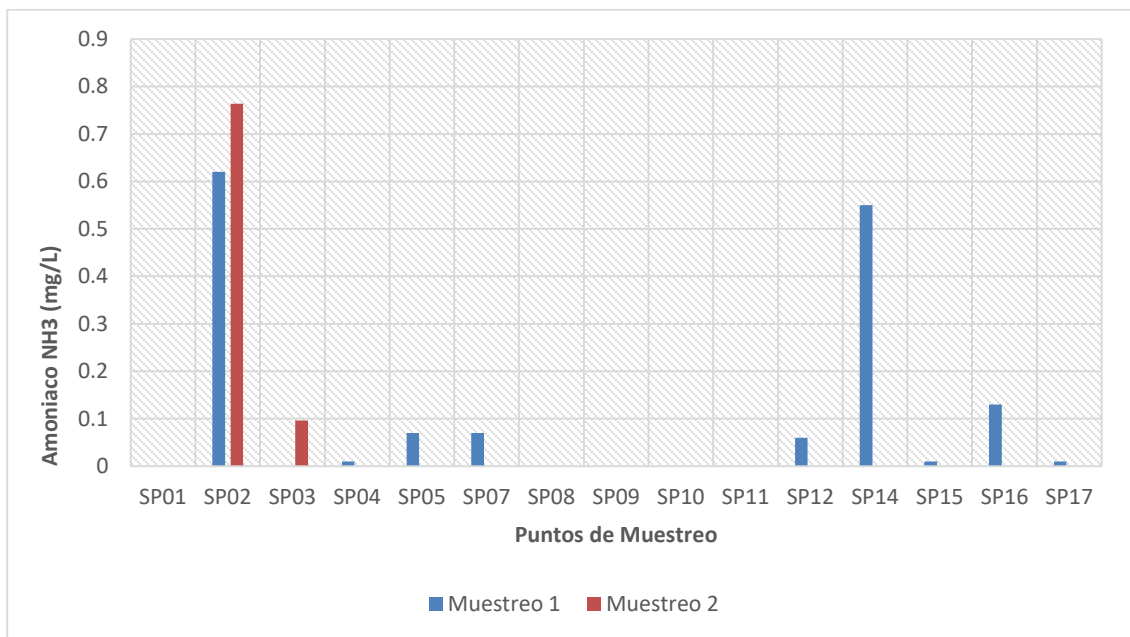
4.16. Amoníaco

No se menciona límite máximo permisible en la norma COGUANOR NTG 29001 referente a concentraciones de amoníaco. En el muestreo en época de lluvia la concentración máxima encontrada pertenece a la muestra SP13, con un

²² El valor de la muestra SP13 no se colocó en la gráfica por cuestiones de escala.

valor de 377,5 mg/L. Los demás valores oscilan entre 0 mg/L y 0,62 mg/L. En el caso del muestreo en época seca la concentración máxima de amoníaco se presentó en la muestra SP13, con valor de 219,6 mg/L, siendo nuevamente la muestra SP13 la que presenta valores atípicos respecto a los demás.

Figura 28. **Amoniaco (mg/L NH₃)²³**



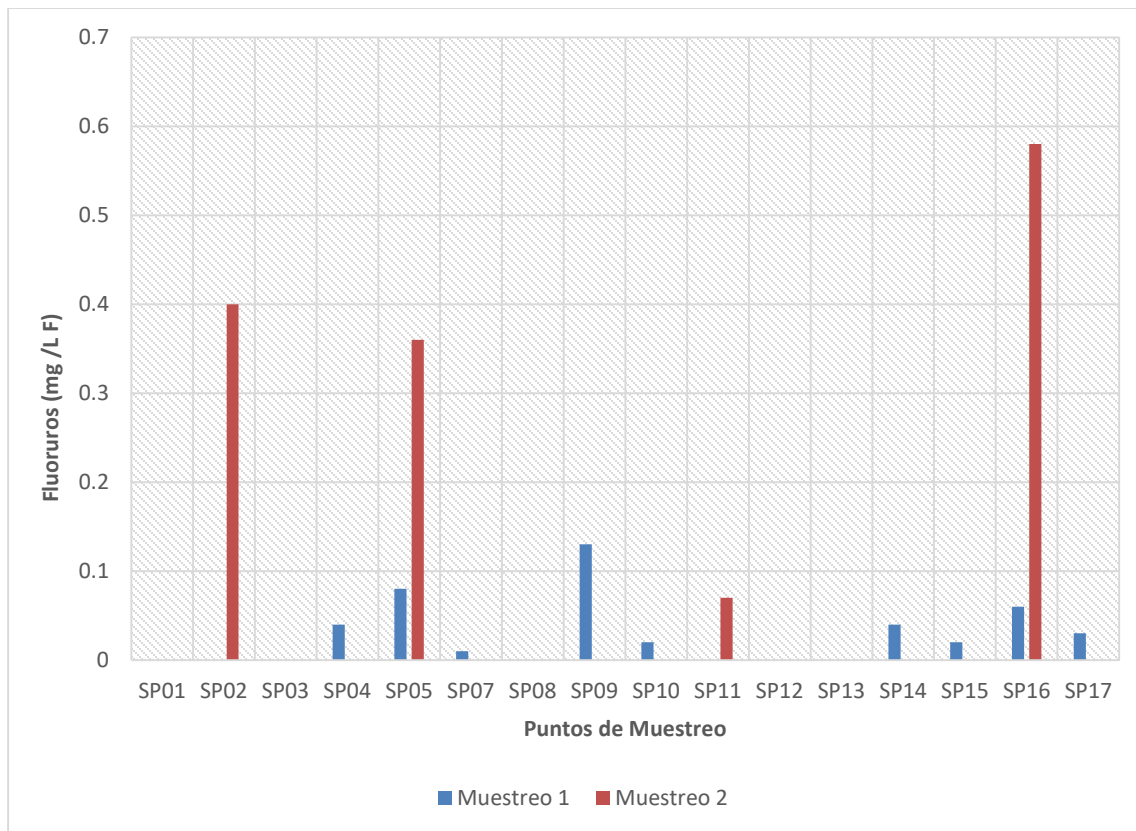
Fuente: elaboración propia.

²³ El valor de la concentración de amoníaco de la muestra SP13 no se colocó en la gráfica por cuestiones de escala.

4.17. Fluoruros

El límite máximo permisible en muestras de agua potable en la norma COGUANOR NTG 29001 es de 1,7 mg/L. Como se observa en la gráfica, todas las muestras están por debajo del límite máximo permisible.

Figura 29. Fluoruros (mg/L)

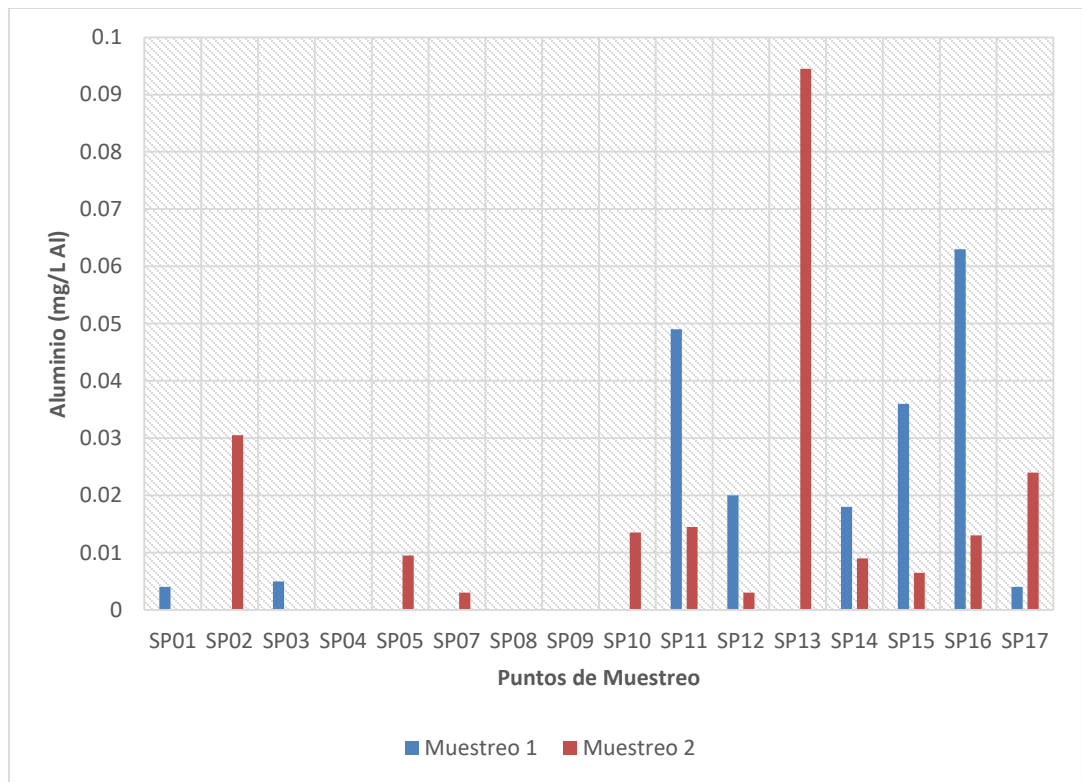


Fuente: elaboración propia.

4.18. Aluminio

El límite máximo permisible que establece la norma COGUANOR NTG 29001 para concentraciones de aluminio es de 0,1 mg/L y, como se observa en la gráfica 30, todas las muestras de agua están por debajo de este parámetro.

Figura 30. Aluminio (mg/L)



Fuente: elaboración propia.

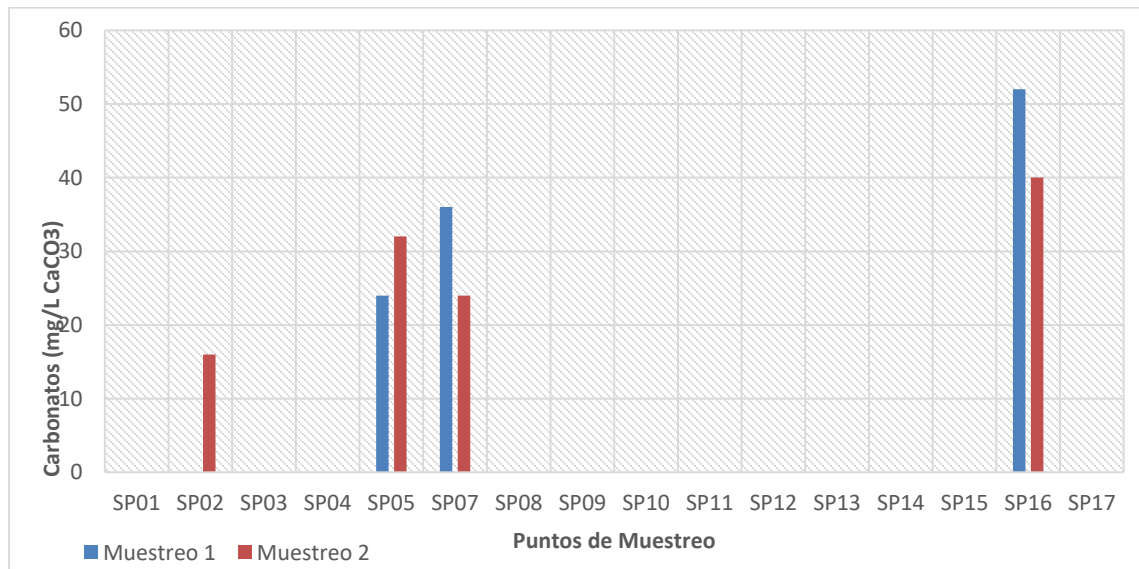
4.19. Alcalinidad

No se establece límite máximo permisible de este parámetro en la norma COGUANOR NTG 29001.

4.19.1. Carbonatos

En el muestreo en época de lluvia, las muestras que presentaron carbonatos fueron las tomadas en el Lago de Atitlán (SP05, SP07 y SP16), las demás muestras solamente presentaron valores de bicarbonatos. En el caso del muestreo en época seca, además de las muestras del lago, la muestra SP02 presentó carbonatos. Como se mencionó anteriormente, es un pozo que presentó trabajo de obra civil que pudo afectar su composición cuando se tomó el muestreo en época seca.

Figura 31. Carbonatos (mg/L CaCO₃)

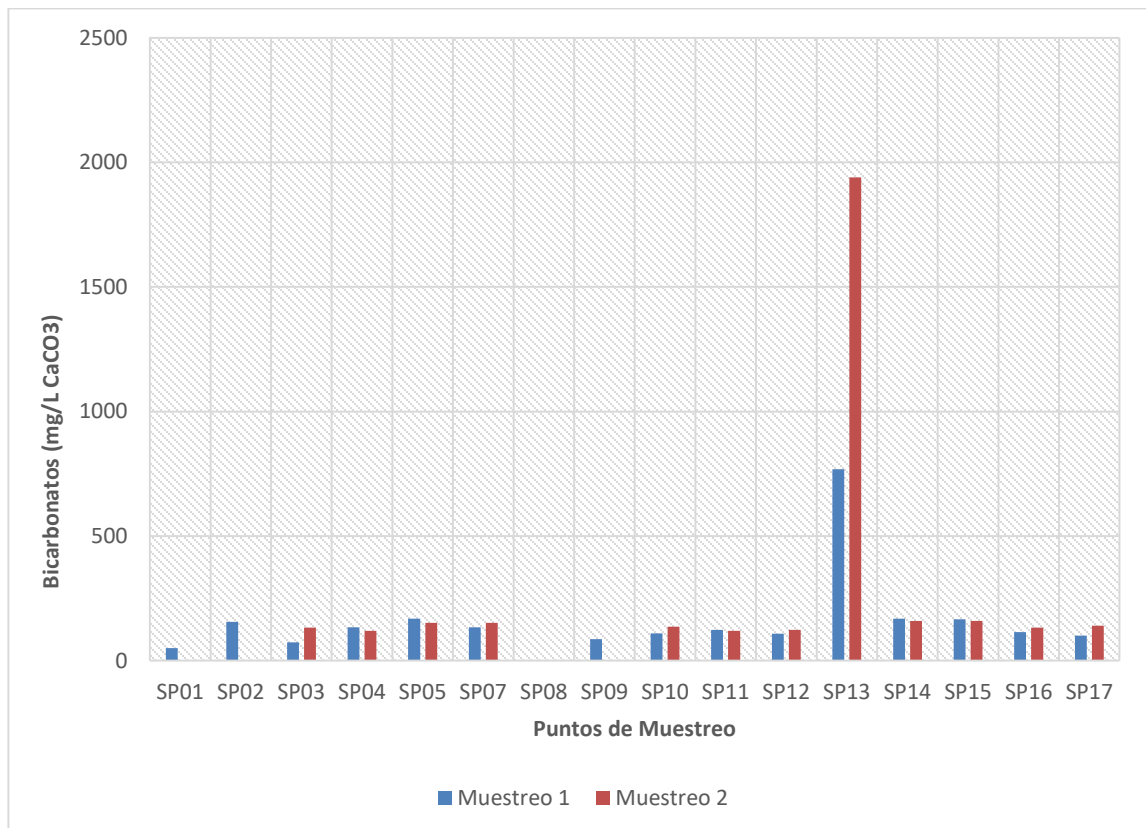


Fuente: elaboración propia.

4.19.2. Bicarbonatos

En el caso del muestreo en época de lluvia los valores oscilan entre 50 mg/L y 768 mg/L de CaCO_3 , correspondientes a las muestras SP01 y SP13. En el caso del muestreo en época seca, los valores están dentro del rango de 0 mg/L a 1940 mg/L de CaCO_3 , correspondientes a las muestras SP02 y SP13. En este caso también se observa que la muestra SP13 presenta valores atípicos con respecto a las demás.

Figura 32. Bicarbonatos (mg/L CaCO_3)



Fuente: elaboración propia.

4.19.3. Hidróxidos

Se encontraron hidróxidos en el muestreo en época seca, específicamente en la muestra SP02, con valor de 40 mg/L de CaCO₃.

4.20. Olor

La única muestra que presentó olor fue la SP13, el cual parecía ser de materia orgánica en descomposición.

4.21. Bacteriológico

Según la norma COGUANOR NTG 29001, tanto los coliformes fecales como los coliformes totales, no deben ser detectables en 100 mL. En el caso del muestreo en época de lluvia, las muestras que no presentaron coliformes fecales fueron las SP01, SP09, SP11, SP13, SP15 y SP17, y la única muestra que no presentó coliformes totales fue la SP09.

En el caso del muestreo en época seca (sin tomar en cuenta las muestras SP01 y SP09), las muestras que no presentaron coliformes fecales son SP02, SP05, SP07, SP11, SP13, SP16 y SP17. Todas las muestras presentaron coliformes totales.

5. CLASIFICACIÓN DE AGUA

Se utilizaron diferentes metodologías para la clasificación y comparación de las muestras de aguas obtenidas en el municipio de San Pedro la Laguna, las cuales se describen a continuación.

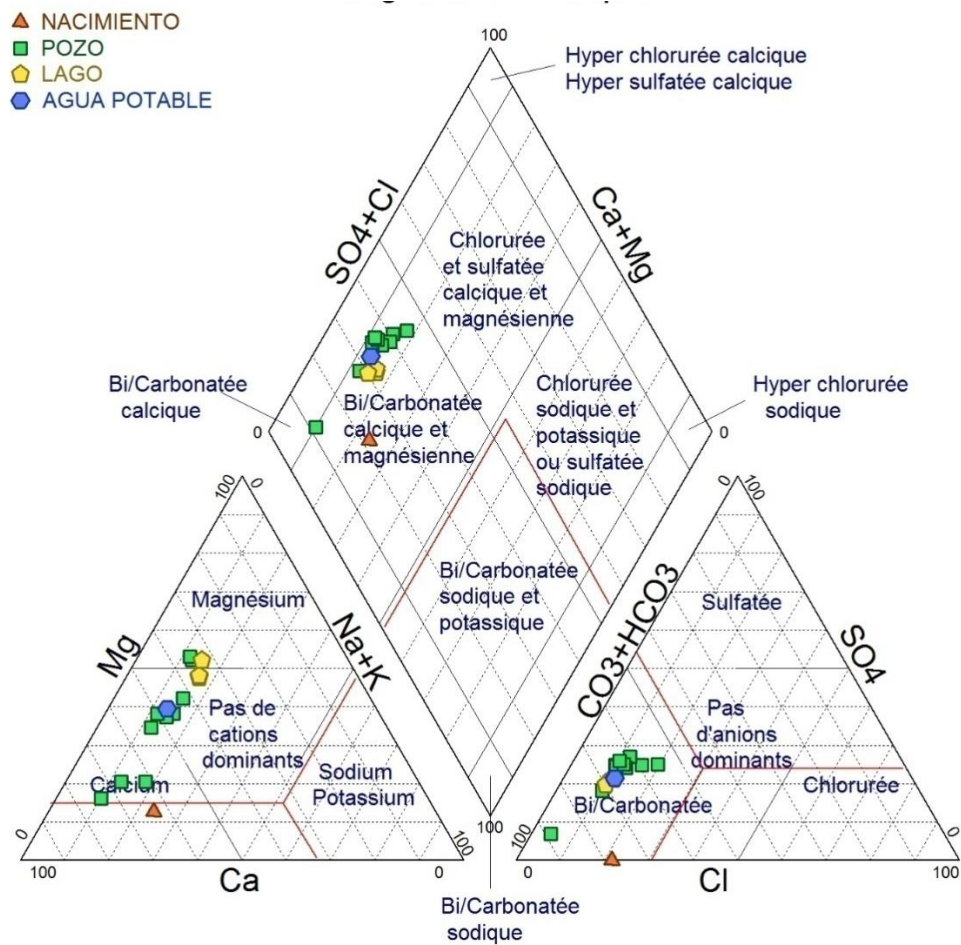
5.1. Diagramas de PIPER

El diagrama de Piper está compuesto por dos triángulos equiláteros que representan la composición aniónica y catiónica de las aguas, y en el centro un rombo que representa la composición del agua a partir de los aniones y cationes que contiene. Este se utiliza para clasificar el agua en grupos, para tener información clara y sencilla.

Se realizó un primer análisis separando en cuatro categorías las muestras de agua (nacimiento, pozo, lago y agua potable), incluyendo la concentración de nitratos y no incluyendo la concentración de nitratos.

En el muestreo en época de lluvia, cuando en el análisis no se incluyen las concentraciones de nitratos, todas las muestras se encuentran en la zona que el diagrama de Piper clasifica como “Bi/carbonatadas, cálcicas y magnésicas”. En el área de los cationes se encuentran dentro del área de calcio, magnesio y un par de iones dominantes, y en los aniones principalmente en la zona de Bi/carbonatos.

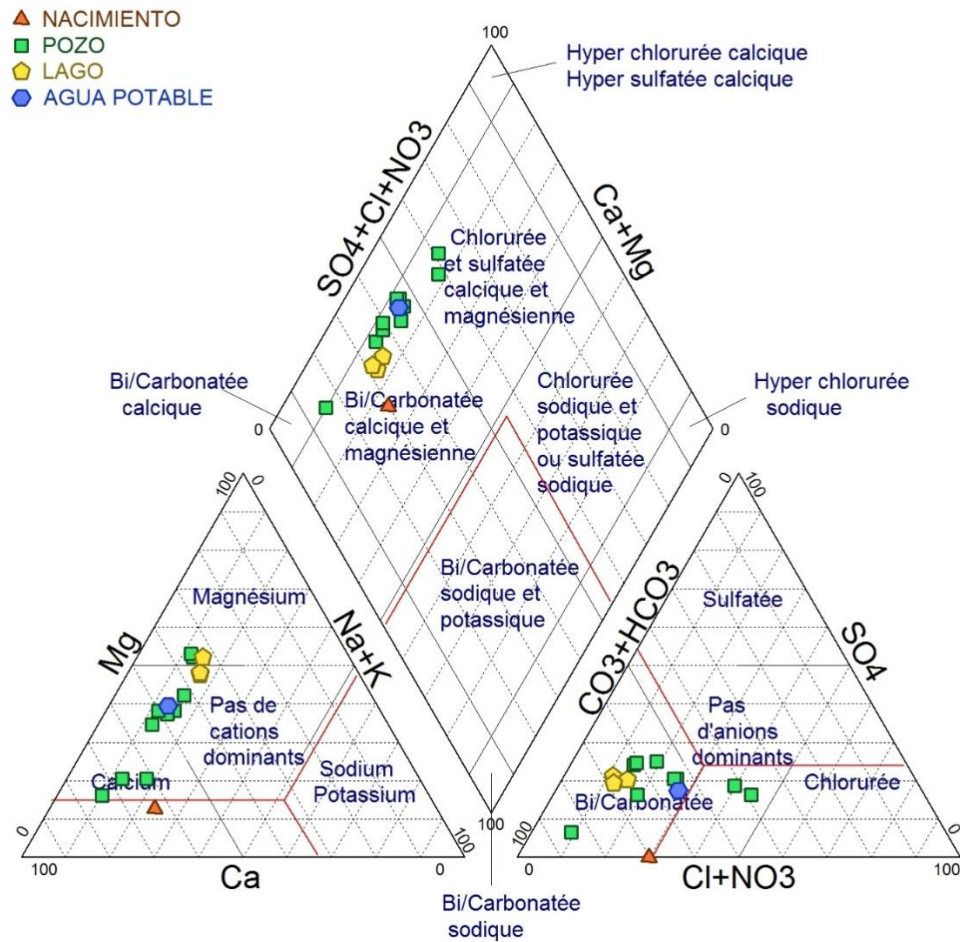
Figura 33. Diagrama de Piper sin nitratos. Muestreo en época de lluvia



Fuente: elaboración propia, empleando Diagrammes

Pero cuando se incluye la concentración de nitratos, las muestras se mueven con tendencia hacia la zona del diagrama de Piper clasificada como "Cloruro, sulfato cálcico y magnésico". Dos muestras se encuentran en esa zona del diagrama. En el caso de los aniones, estos se mueven a la zona donde hay varios aniones dominantes.

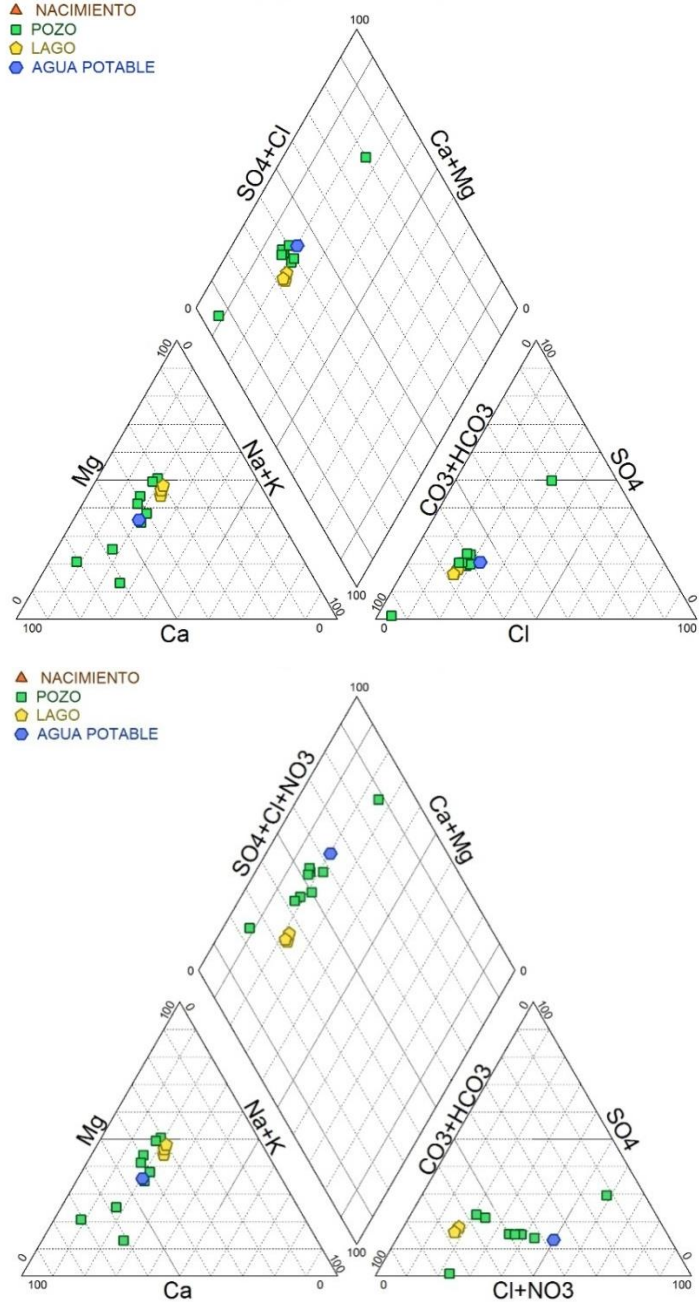
Figura 34. Diagrama de Piper con nitratos. Muestreo en época de lluvia



Fuente: elaboración propia, empleando Diagrammes.

En el caso del muestreo en época seca, debido a que las concentraciones de nitratos son mayores, esta tendencia se observa mayormente, ya que varias muestras se encuentran dentro del área de “Cloruro, sulfato cálcico y magnésico”.

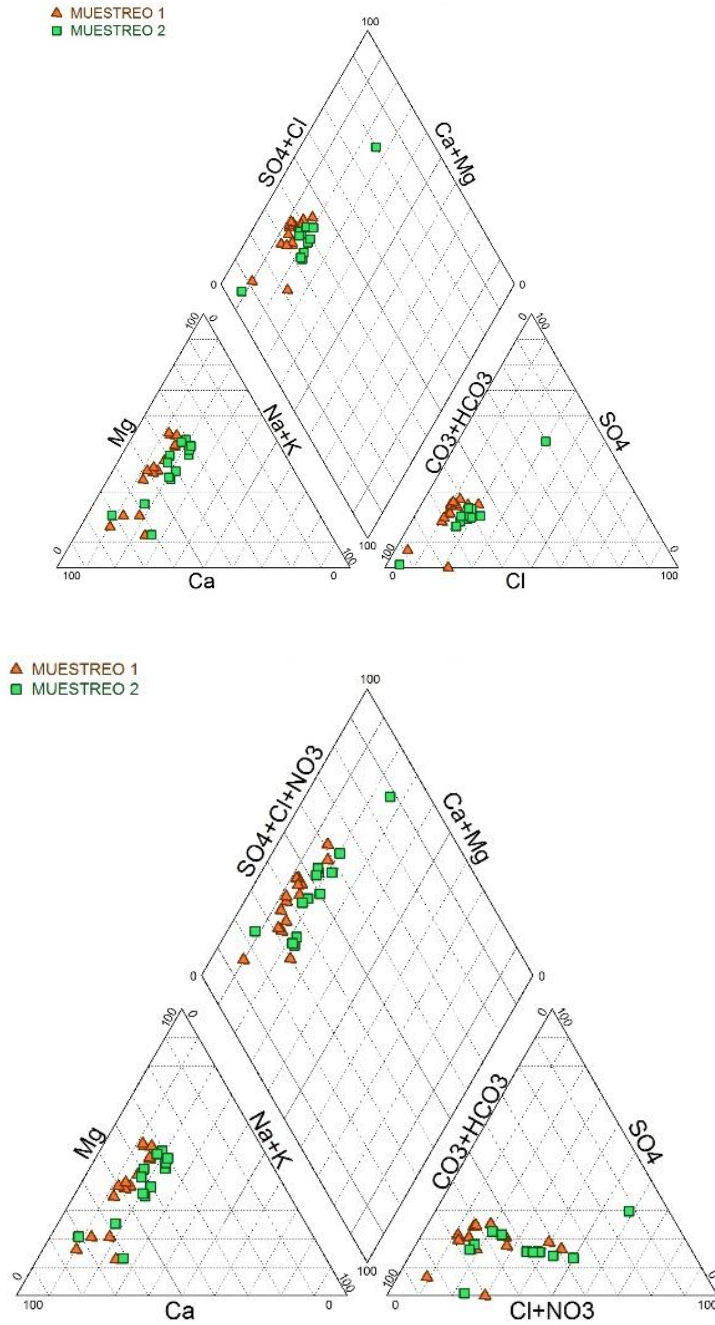
Figura 35. Diagramas de Piper sin nitratos y con nitratos. Época seca



Fuente: elaboración propia, empleando Diagrammes.

En el muestreo en época seca se observa claramente que la concentración de nitratos cambia las características iónicas del agua, haciendo que algunas de estas muestras cambien su composición iónica y se clasifiquen de distinta manera. En la siguiente figura se observan los dos muestreos en el diagrama de Piper, donde se evidencia que, si no se incluye la concentración de nitratos en el análisis, las aguas de los dos muestreos serían clasificadas como “Bi/carbonatadas, cálcicas y magnésicas” (con excepción de la muestra SP02 del muestreo en época seca, cuya composición, como se explicó anteriormente, pudo verse afectada por trabajos de obra civil realizados en el pozo). Cuando se incluye la concentración de nitratos en el diagrama se observa, en los dos muestreos, el desplazamiento hacia la zona “Cloruro, sulfato cálcico y magnésico”. Se nota también que las concentraciones de aniones en los dos muestreos se focalizan en el área de Bi/carbonatos, pero cuando se incluye a los nitratos en el análisis hay un desplazamiento hacia la zona de par de iones dominantes.

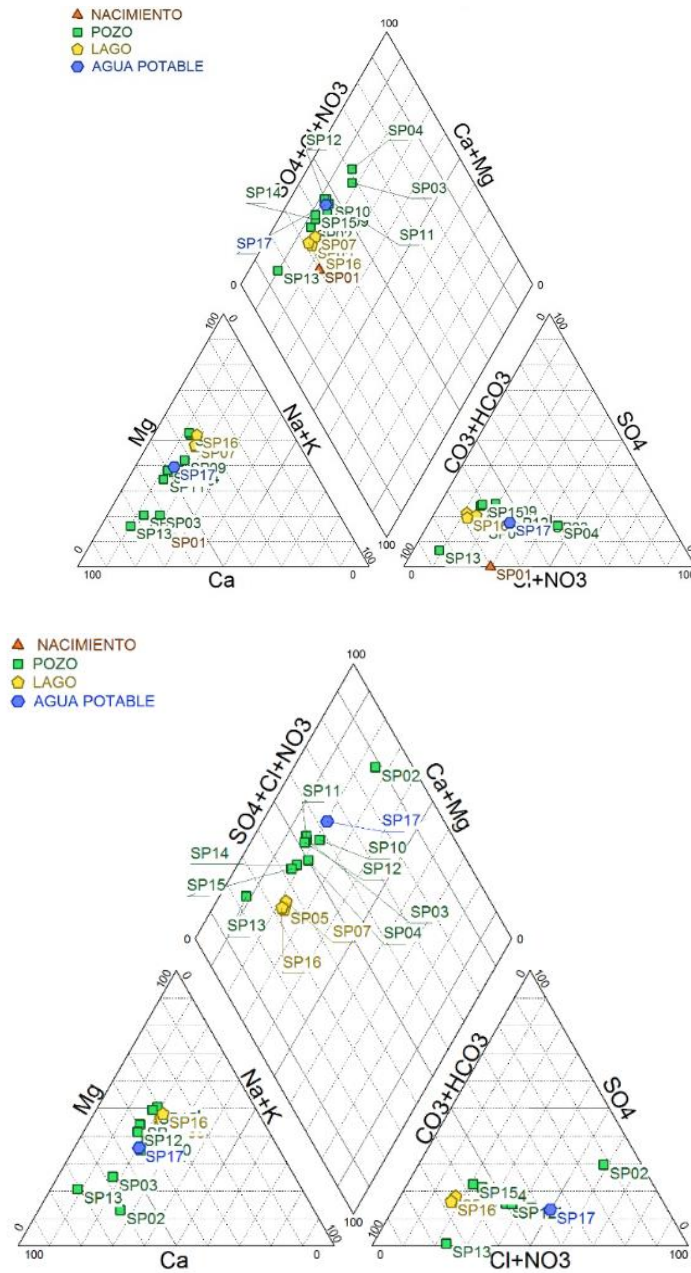
Figura 36. Diagramas de Piper sin nitratos y con nitratos



Fuente: elaboración propia, empleando Diagrammes.

En el segundo análisis utilizando el diagrama de Piper, se determinó qué tipo de muestras de agua son las más afectadas por las concentraciones de nitratos. Como se observa en la figura siguiente, las muestras del Lago de Atitlán no presentan cambios significativos en el diagrama así se aumenten o no las concentraciones de nitratos. En el caso de las muestras en pozos, se observa que estas si se ven afectadas directamente, ya que, en el caso del muestreo en época de lluvia, las muestras SP04 y SP03 modifican sus concentraciones iónicas y cambian a la zona “Cloruro, sulfato cálcico y magnésico”. En el muestreo en época seca se observa que las muestras de pozos que pasan a la zona “Cloruro, sulfato cálcico y magnésico” son las SP02, SP03, SP04, SP10, SP11 y SP12.

Figura 37. **Diagramas de Piper con nitratos. Muestreo en época de lluvia y muestreo en época seca**



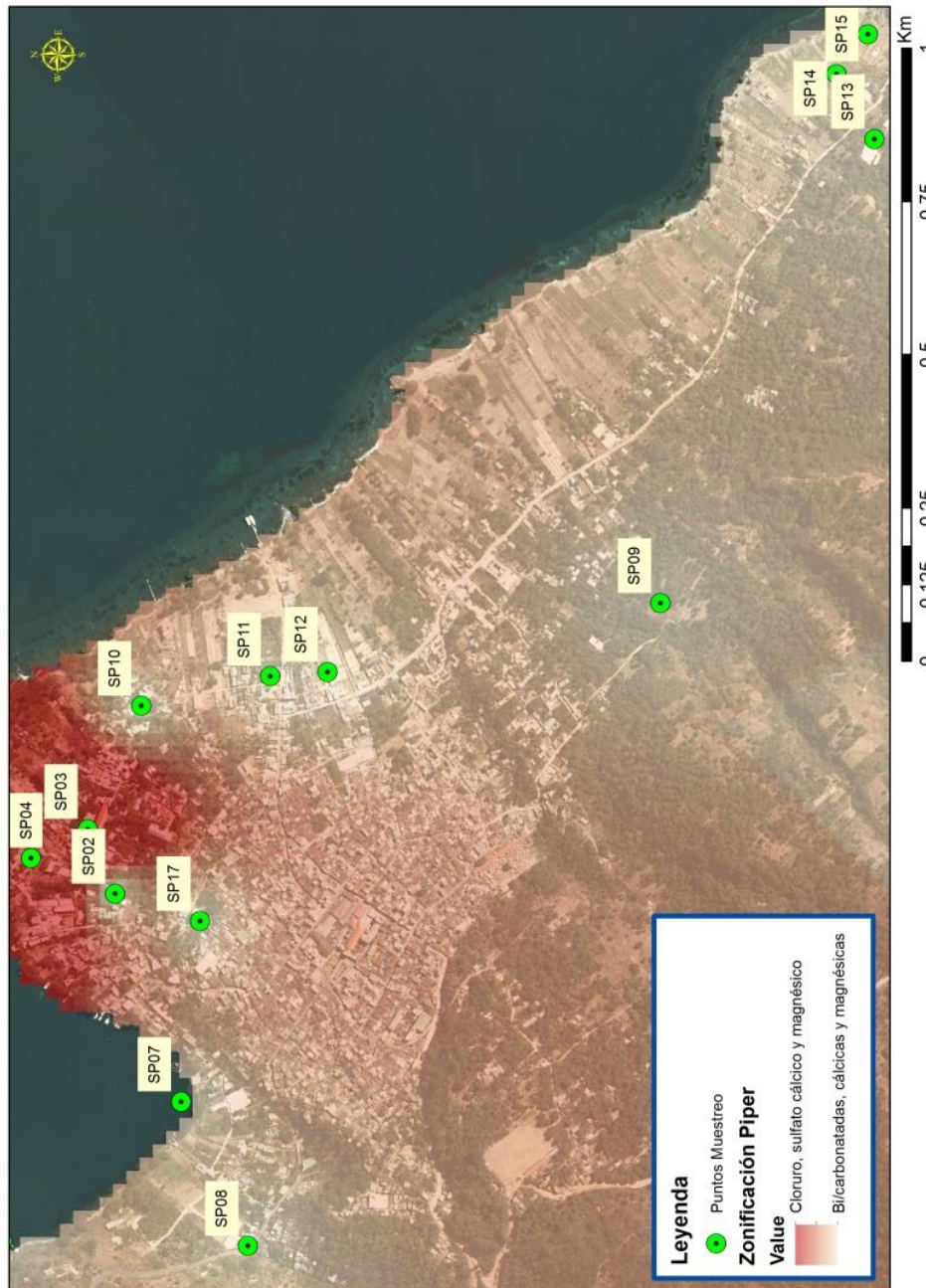
Fuente: elaboración propia, empleando Diagrammes.

La muestra del nacimiento solo se tomó en el muestreo en época de lluvia, pero en el análisis de este en específico se observa que no sufre cambios significativos, se incluya o no la concentración de nitratos. Y para el caso de la muestra de agua potable, se observó que esta sigue la tendencia de los pozos; en el muestreo en época de lluvia no sobrepasa la zona “Bi/carbonatadas, cálcicas y magnésicas”, pero en el muestreo en época seca sí sobrepasa esta zona y se ubica en “Cloruro, sulfato cálcico y magnésico”.

5.1.1. Zonificación de composición de aguas según el análisis de PIPER

Con base en el análisis anterior se puede determinar la zona aproximada en el muestreo en época de lluvia donde se modifica la composición iónica del agua por las concentraciones de nitratos, la cual se ilustra en la figura 38. La determinación de la zonificación se realizó a través de interpolación de datos por ArcMap.

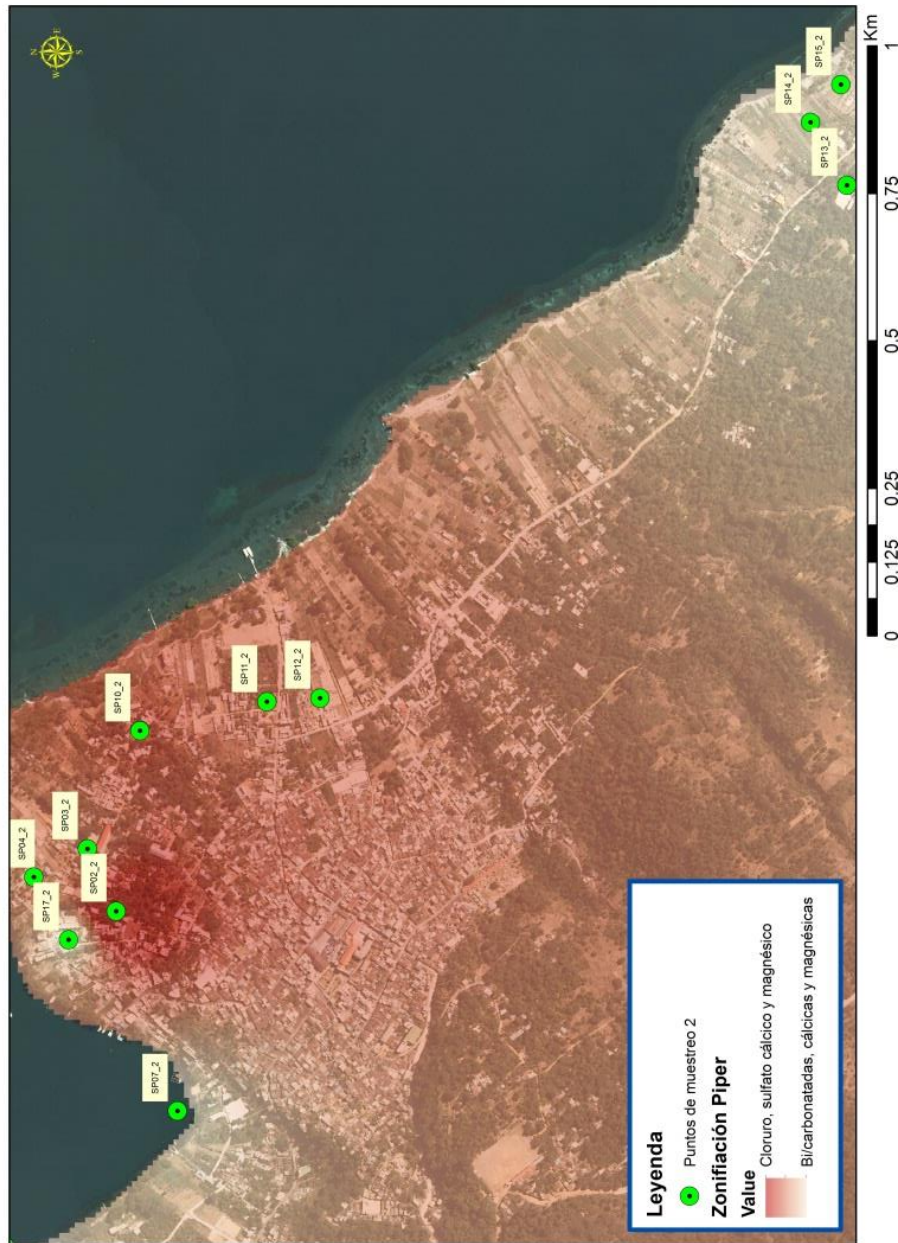
Figura 38. Análisis de PIPER. Muestreo en época de lluvia



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

En comparación con el muestreo en época seca, se observa que esta zona aumenta principalmente en la zona baja del área poblada, observándose que los cambios significativos de concentraciones iónicas de las aguas, a causa del aumento de la concentración de nitrato, se dan principalmente en el área poblada.

Figura 39. Análisis de PIPER. Muestreo en época seca



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

5.2. Por dureza

Se determinó que el 56 % de las muestras del muestreo en época de lluvia tienen dureza mayor a 120 mg/L de CaCO₃, por lo que se consideran aguas duras, el 38% presentó concentraciones entre 61 mg/L y 120 mg/L, por lo que se consideran aguas moderadamente duras, y el 6% de las muestras tuvieron un valor por debajo de 60 mg/L, por lo que se consideran aguas blandas.

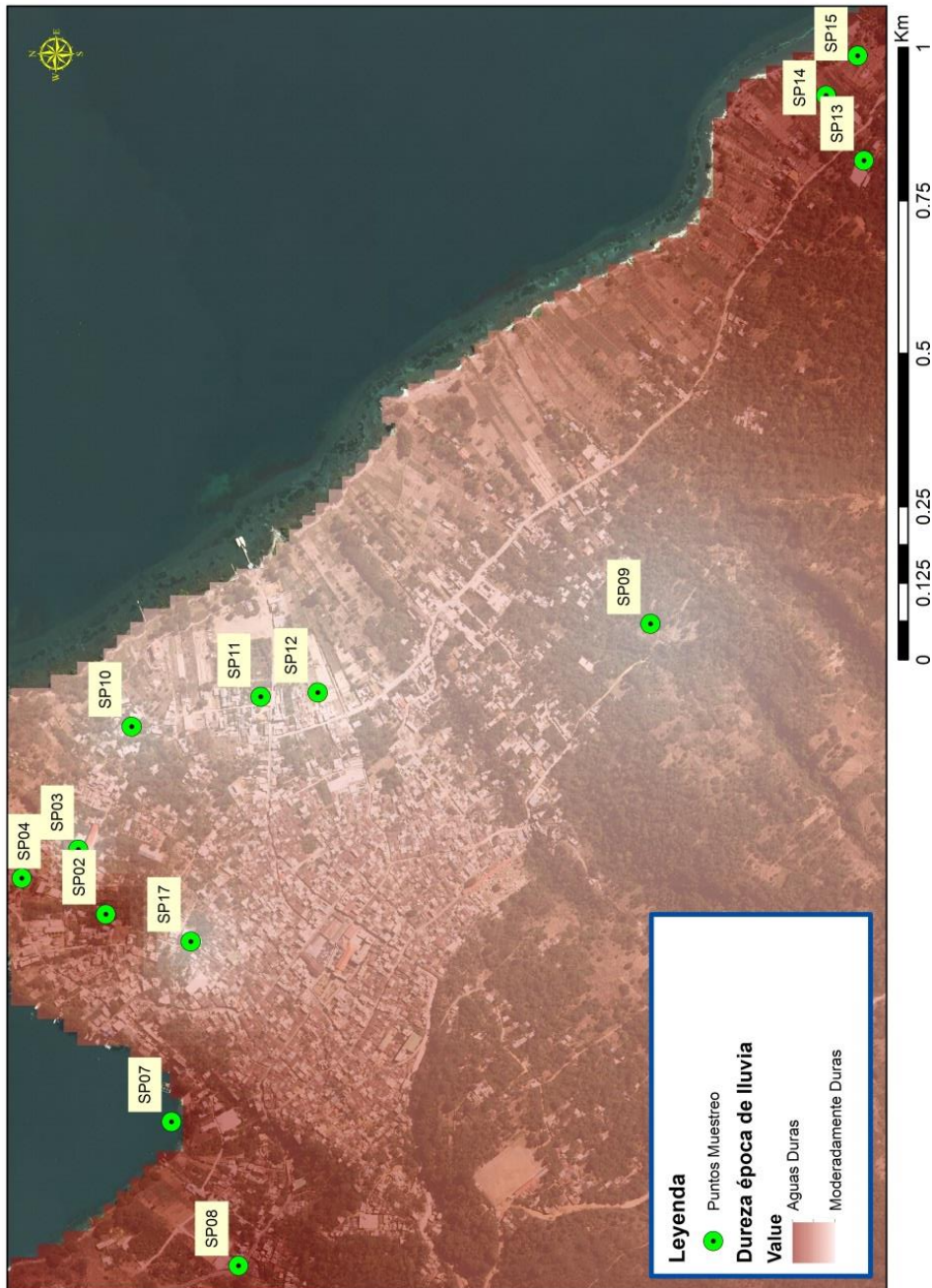
Tabla X. **Clasificación por dureza. Muestreo en época de lluvia**

Tipo de agua	Dureza (mg/L de CaCO ₃)	Muestra	Porcentaje
Agua blanda	0-60	SP01	6%
Agua moderadamente dura	61-120	SP03, SP09, SP10, SP11, SP12, SP17	38%
Agua Dura	121-180	SP02, SP04, SP05, SP07, SP13, SP14, SP15, SP16	56%
Agua muy dura	>180	Ninguna	0%
			100%

Fuente: elaboración propia.

Se observa que el agua moderadamente dura se encuentra en el área poblada, y las aguas duras se encuentran a los lados. Este comportamiento se identificó en la siguiente figura:

Figura 40. Dureza del agua. Muestreo en época de lluvia



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

En el caso del muestreo en época seca, se observó que, de las muestras analizadas, el 76,9 % son aguas duras, el 15,4 % son aguas moderadamente duras, y el 7,7 % son aguas muy duras. Se debe tomar en cuenta que en el muestreo en época seca no se tomó la muestra del nacimiento de agua SP01 y de la muestra SP09, por lo que los porcentajes anteriormente mencionados son sin incluir estos dos análisis.

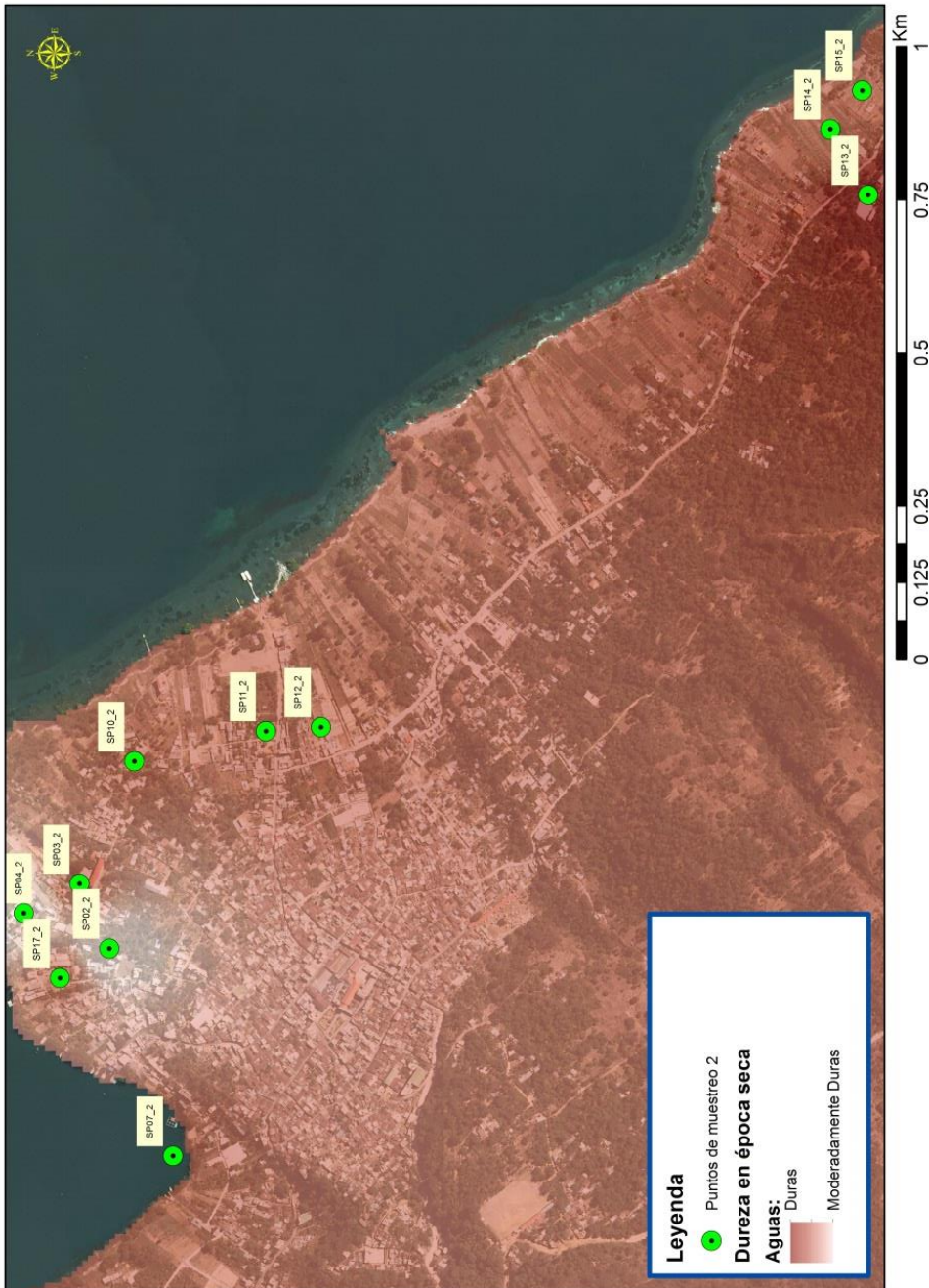
Tabla XI. **Clasificación por dureza. Muestreo en época seca**

Tipo de agua	Dureza (mg/L de CaCO ₃)	Muestra	Porcentaje
Agua blanda	0-60		
Agua moderadamente dura	61-120	SP02, SP04	15,4%
Agua Dura	121-180	SP03, SP05, SP07, SP10, SP11, SP12, SP14, SP15, SP16, SP17	76,9%
Agua muy dura	>180	SP13	7,7%
			100%

Fuente: elaboración propia.

Se observa que hay un aumento en las concentraciones de calcio y magnesio en las muestras analizadas y, como resultado de esto, hay un aumento en la dureza total. Con base en lo anterior se determinó que, en época seca, el aumento de las concentraciones de las aguas duras se produce principalmente en el área poblada, reduciendo el porcentaje de aguas moderadamente duras a una pequeña área.

Figura 41. Dureza del agua. Muestreo en época seca



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap....

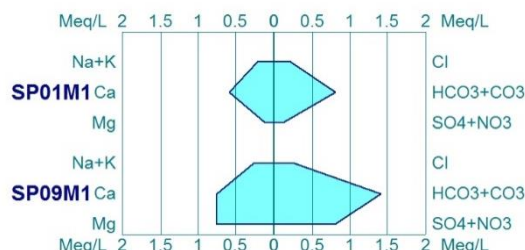
5.3. Diagramas de Stiff

Son representaciones en rectas paralelas con segmentos proporcionales, de concentración de cationes y aniones (en meq/L), donde se unen los extremos para formar un polígono. La forma de cada polígono proporciona información del tipo de agua y la cantidad del contenido iónico total.

De lo cual se puede determinar que existen 4 tipos diferentes formas: el primero corresponde al nacimiento de agua, el segundo al SP02, el tercero correspondiente a las muestras SP03, SP04, SP09, SP10, SP11, SP12, SP13 y SP17, y el cuarto correspondiente a las muestras del lago (SP05, SP07 y SP16), y las cercanas al mismo, que poseen características similares: SP14 y SP15. En el caso del muestreo en época seca, sigue la misma tendencia que la clasificación anterior (sin tomar en cuenta el nacimiento de agua).

La forma que presenta el nacimiento de agua corresponde a un hexágono con los extremos medios derecho e izquierdo alargados, asemejándose a una proyección isométrica de una flecha. Esta misma forma presentó la muestra SP02 en el muestreo en época de lluvia, no así en el muestreo en época seca, en el que tiene una forma completamente diferente, la cual parece una flecha que apunta hacia la izquierda.

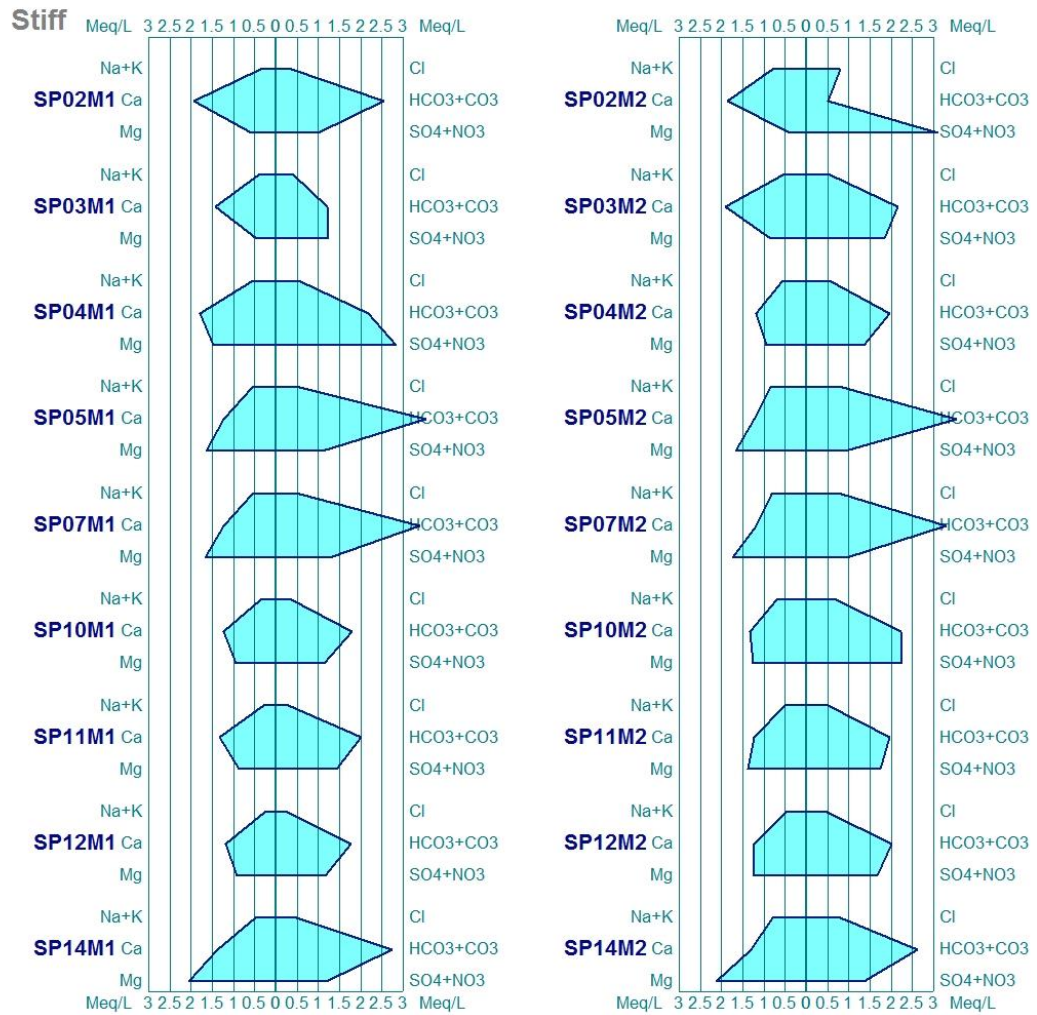
Figura 42. Diagramas de Stiff



Fuente: elaboración propia, empleando Diagrammes.

El grupo 3 corresponde a las muestras SP03, SP04, SP09, SP10, SP11, SP12 y SP17. Se observa que se pierde la forma de las flechas isométricas, ya que la parte inferior (la base) de la figura aumenta su tamaño, llegando a valores similares a los extremos medios de la figura, y para el caso del muestreo en época seca, parecen figuras truncadas en los extremos. La excepción a este comportamiento es presentada en la muestra SP13, pero es de notar que esta se encuentra a una escala totalmente diferente de todas las muestras, ya que para su diagrama se utilizó el rango de 30 meq/L, mientras que para todas las demás muestras, de 2 meq/L a 4 meq/L.

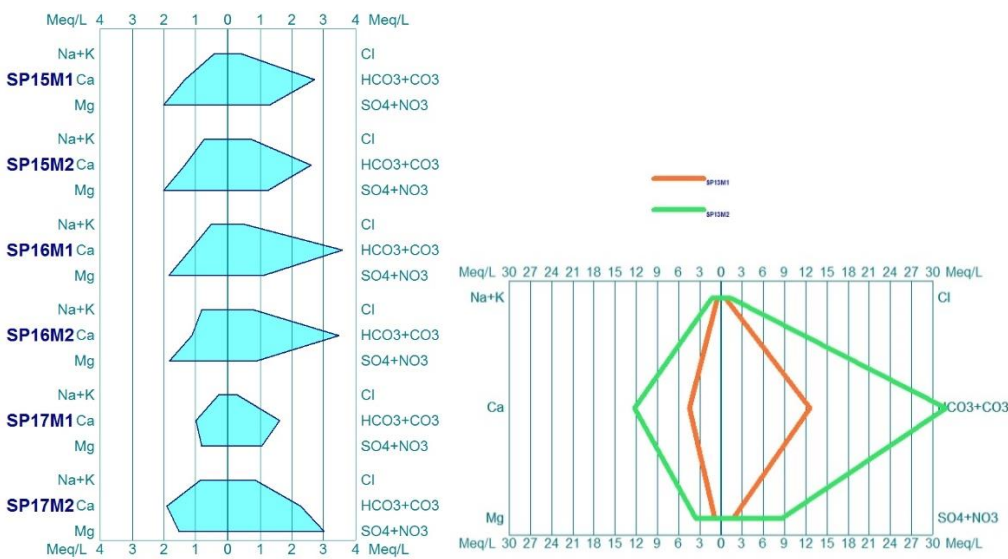
Figura 43. Diagramas de Stiff. Muestreo en época de lluvia y muestreo en época seca



Fuente: elaboración propia, empleando Diagrammes.

En el caso del cuarto grupo, SP05, SP07, SP14, SP15 y SP16, se pierde totalmente la isometría y eso da lugar a una figura de flecha alargada en dirección a la derecha; la parte inferior del hexágono está totalmente alargada, así como la parte media derecha.

Figura 44. Diagramas de Stiff



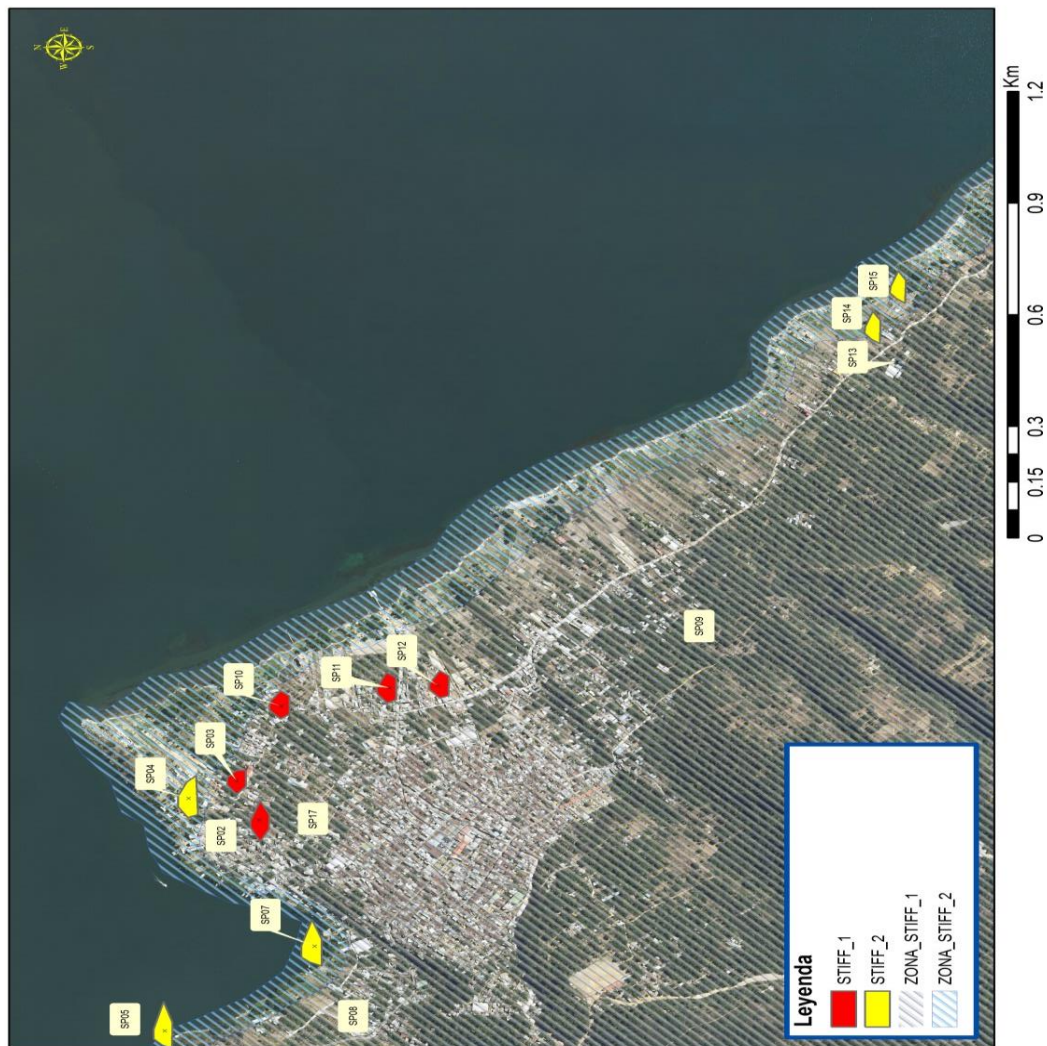
Fuente: elaboración propia, empleando Diagrammes.

Los cambios en las figuras están directamente relacionados con las concentraciones de los cationes de calcio, magnesio, sodio y potasio, y los aniones cloruros, carbonatos y bicarbonatos, y sulfatos y nitratos. Se observa claramente cuáles muestras son afectadas por las concentraciones de estos iones y de esta forma se determinaron 4 zonas dentro del área de estudio donde las muestras de agua tienen características iónicas diferentes.

En la comparación de las figuras de los dos muestreos se observa que las figuras cambian principalmente por las concentraciones de sulfatos y nitratos,

haciendo una modificación en las formas de las mismas. Es de notar que estas modificaciones se dieron principalmente en muestras de pozos clasificadas en el grupo 3. Con base en lo anterior se pueden identificar las zonas en el mapa, obteniéndose los siguientes resultados:

Figura 45. **Análisis Stiff**



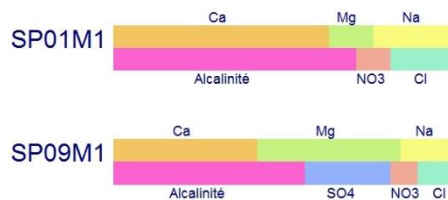
Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

En función a este análisis se pudo determinar una zona aproximada de la mezcla de las aguas subterráneas y el agua del lago.

5.4. Diagramas de balance iónico de Stabler

En este se muestra la distribución de iones encontrados en las muestras analizadas, y se puede observar que la SP01 es la única que no presenta sulfatos. En las demás muestras los sulfatos son parte importante del balance iónico de cada una. En el caso de la muestra SP09, se observa que los BI/carbonatos son predominantes, seguidos de los sulfatos, cloruros y, por último, nitratos.

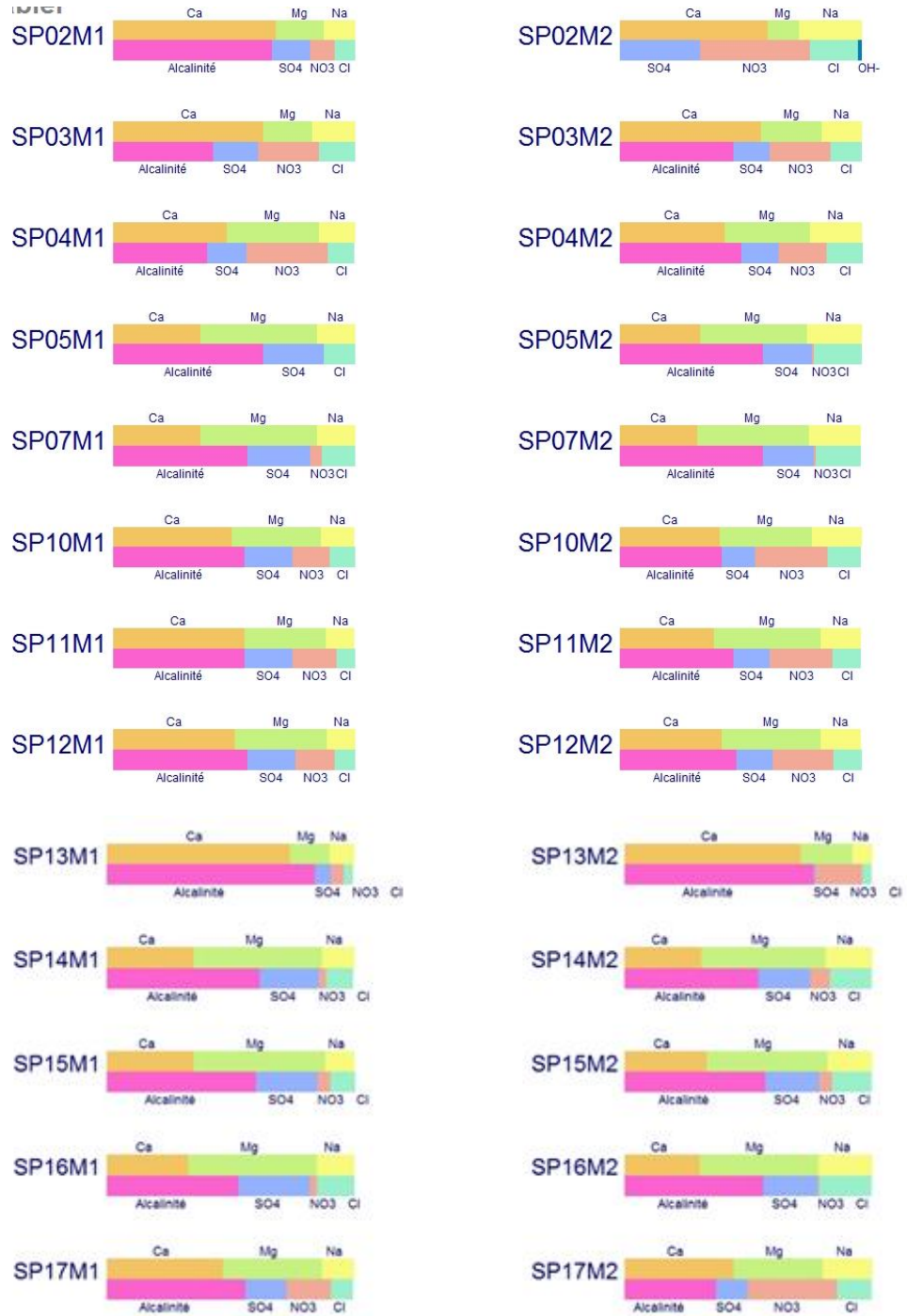
Figura 46. Diagrama de balance iónico



Fuente: elaboración propia, empleando Diagrammes.

La única muestra que presentó el ion hidroxilo (OH⁻) fue la SP02 en el muestreo en época seca. Se mencionó anteriormente que esta muestra pudo verse afectada por trabajos de obra civil realizados cuando se procedió a la toma de la segunda muestra. Como se observa, esta es la única que cambió drásticamente su balance iónico, ya que en el muestreo en época seca no presenta iones Bi/carbonatos, como sí lo hizo en el muestreo en época de lluvia, donde la concentración predominante es la de nitratos, seguida de sulfatos, cloruros e ion hidroxilo.

Figura 47. Diagrama de balance iónico

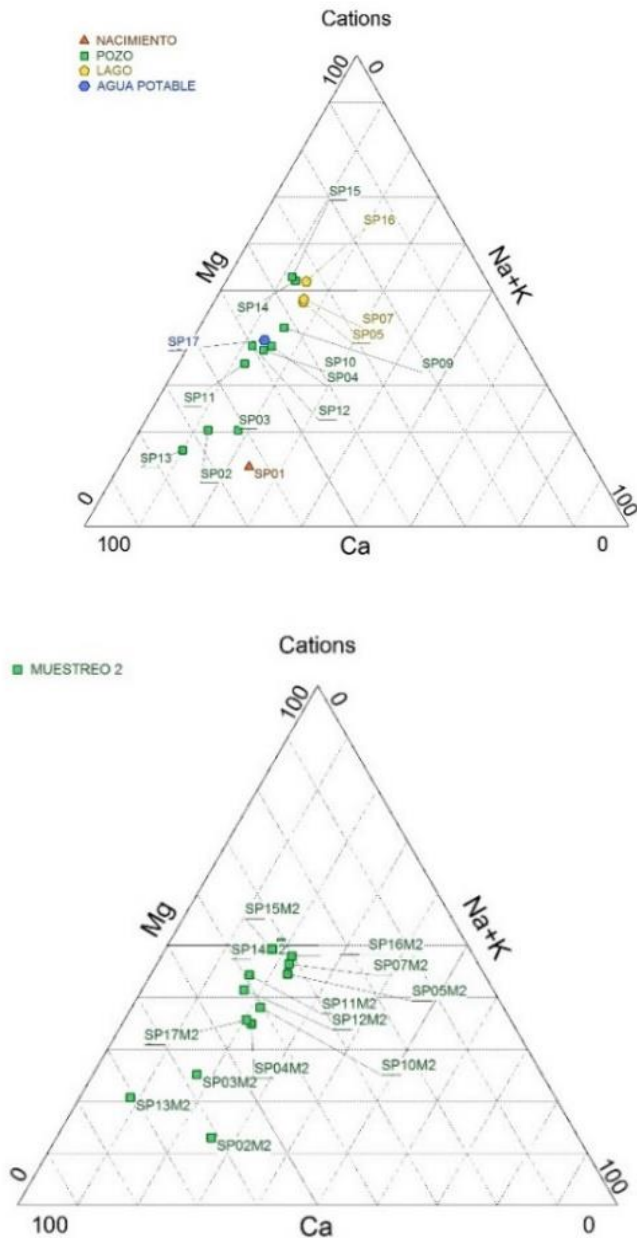


Fuente: elaboración propia, empleando Diagrammes.

En el caso de los cationes, en el muestreo en época de lluvia pueden diferenciarse 3 grupos marcados: los que tienen alta fracción (concentración) de calcio, mayor al 50 %, dentro de los cuales pueden enumerarse las muestras SP01, SP02, SP03, SP11, SP12 y SP13; los que tienen una concentración de calcio entre 40 y 50%, entre los cuales están SP04, SP09, SP10 y SP17, y los que tienen concentración de calcio entre 30% y 40 %, los cuales son SP05, SP07, SP14, SP15 y SP16 de magnesio.

En el caso del muestreo en época seca, las muestras mayores al 50 % corresponden a SP02, SP03 y SP13; entre las que están entre 40% y 50 % están las SP04, SP10, SP12 y SP17, y entre las de 30% y 40 % están SP05, SP07, SP11, SP14, SP15 y SP16. Las muestras que presentaron un cambio respecto del muestreo en época de lluvia y muestreo en época seca son las SP11 y SP12, las demás presentan similares características en los dos muestreos. En este análisis se puede diferenciar que las muestras del lago y las cercanas al mismo poseen concentraciones de calcio entre 30 y 40 % (SP05, SP07, SP14, SP15 y SP16).

Figura 48. Diagrama ternario de cationes. Muestreo en época de lluvia y muestreo en época seca

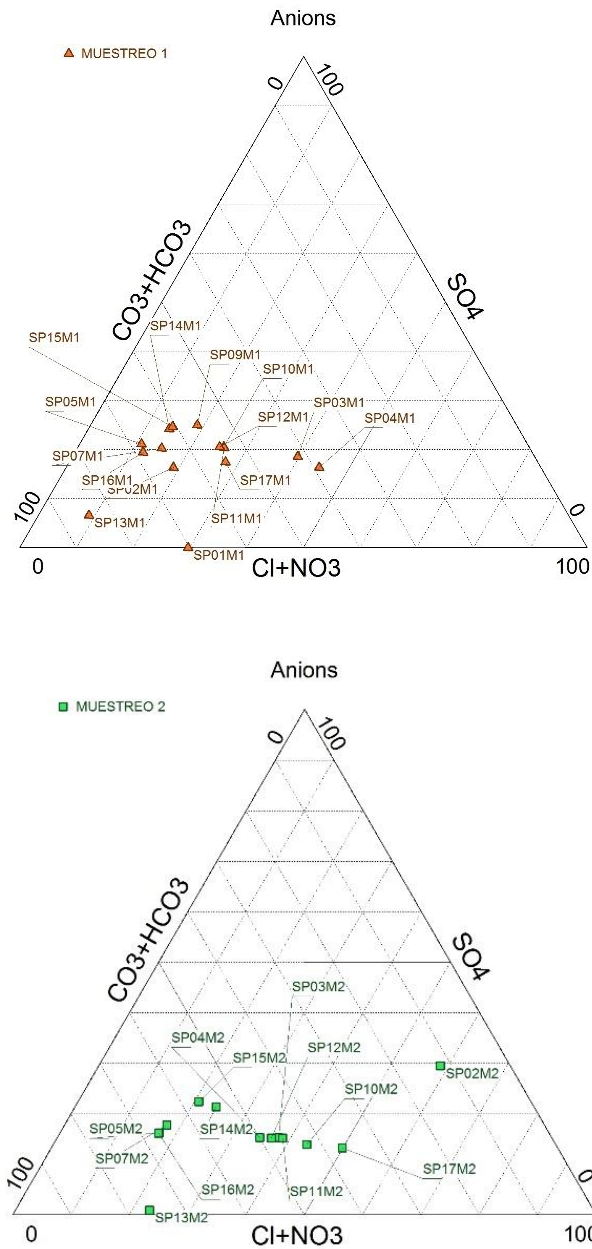


Fuente: elaboración propia, empleando Diagrammes.

En el caso del muestreo en época de lluvia, en los aniones se observan 3 tendencias marcadas: los que tienen concentraciones menores al 50 % de Bi/carbonatos (SP03 y SP04), los que presentan concentraciones entre 50% y 70% de Bi/carbonatos (SP02, SP05, SP07, SP09, SP10, SP11, SP12, SP14, SP15, SP16 y SP17), y los mayores del 70 %, los cuales son SP01 y SP13.

En el muestreo en época seca se observa que hay una variación en estas tendencias, ya que las muestras que presentan concentraciones menores al 50 % de Bi/carbonatos aumentan (SP02, SP03, SP04, SP10, SP11 y SP12). Las que presentan concentraciones entre 50 y 70 % son SP05, SP07, SP14, SP15 y SP16, y nuevamente se observa que estas no sufrieron mayor cambio en relación a las proporciones de iones, y la que presentó concentraciones mayores a 70 % es la muestra SP13.

Figura 49. Diagrama ternario de aniones. Muestreo en época de lluvia y muestreo en época seca



Fuente: elaboración propia, empleando Diagrammes.

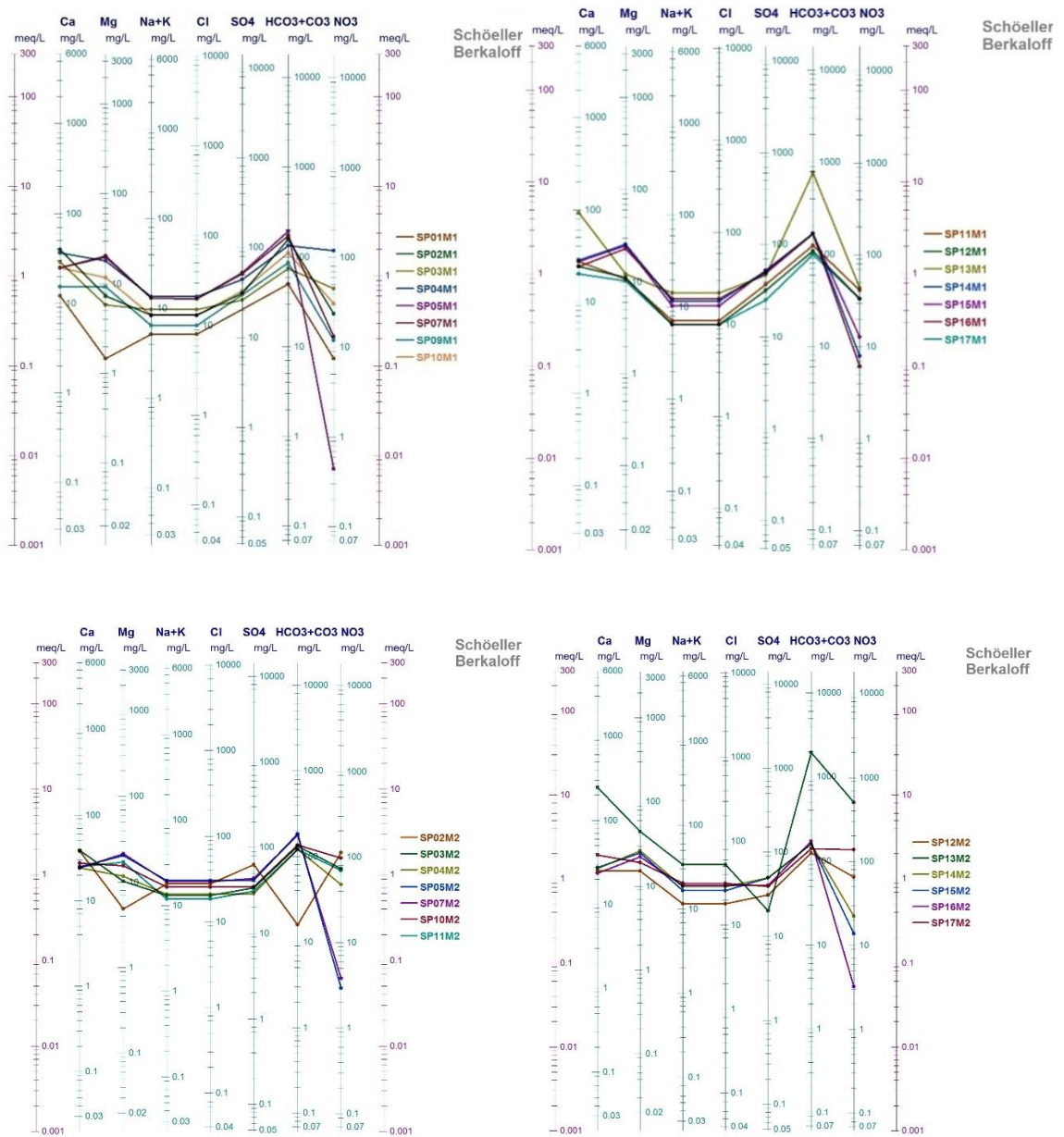
La variación en las fracciones de los iones puede ser principalmente por 2 factores: la disminución o el aumento de la concentración de uno o varios de ellos. En el caso de los cationes, se observa que las únicas muestras que mostraron comportamiento distinto fueron las SP11 y SP12. Pero en el caso de los aniones, se vio una marcada diferencia y esta se presume fue causada por el aumento de la concentración de iones nitrato en esas aguas, haciendo que la fracción de Bi/carbonatos disminuyera, y aumentando la fracción de Cl + NO₃; y, como se mencionó anteriormente, las muestras del lago y cercanas (SP05, SP07, SP14, SP15 y SP16) no sufrieron una modificación notable, quedando dentro de los rangos de 50 % y 70 % en los dos muestreos.

5.5. Diagrama de Schoeller

También llamado 'spider', permite representar varias muestras en un mismo diagrama, para que puedan ser comparadas. La visualización de la concentración (en ppm, mg.L-1 ó meq.L-1) de los diferentes iones no es directa al utilizar una escala semilogarítmica. Es apropiado para estudiar evoluciones temporales de aguas en un mismo punto, o variaciones composicionales en muestras de diferentes localidades.

En este caso, se determinó que hay diferencias en cada uno de los puntos analizados, pero las composiciones de los iones siguen una tendencia similar, como se puede observar en las figuras siguientes, en que se muestran los diagramas para el muestreo en época de lluvia y muestreo en época seca.

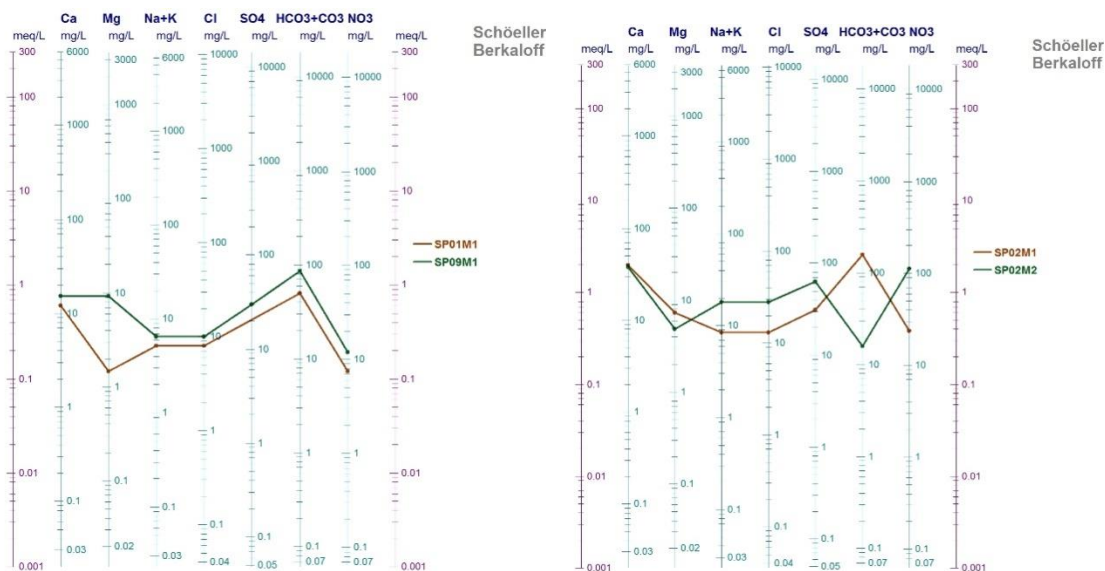
Figura 50. Diagrama de Schoeller. Muestreo en época de lluvia y muestreo en época seca



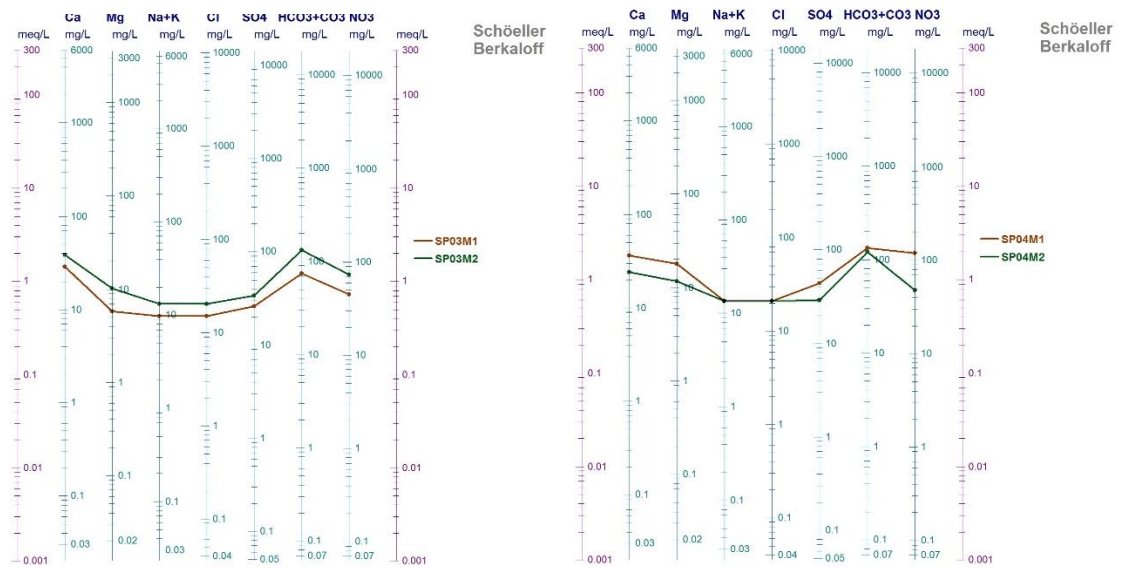
Fuente: elaboración propia, empleando Diagrammes.

Se realizó una comparación del muestreo en época de lluvia y el muestreo en época seca de cada una de las muestras de agua, observando cómo fue su comportamiento en época seca y lluviosa. En la mayoría de las figuras se observa que el muestreo dos tiene valores un poco más altos, aunque hay excepciones; además, se observa que hay muestras que no siguen el patrón característico de las demás.

Figura 51. Diagrama de Schoeller



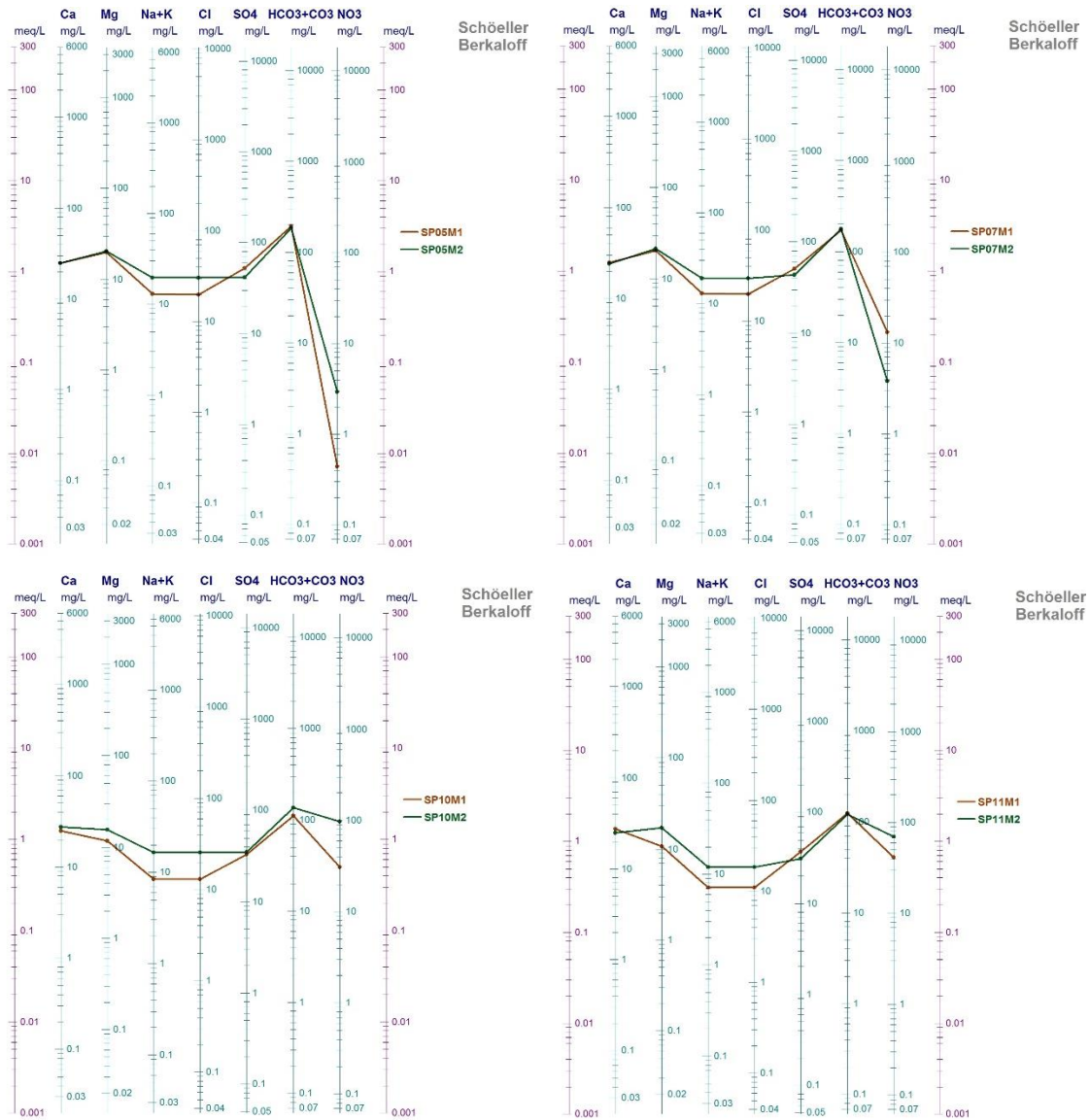
Continuación figura 51



Fuente: elaboración propia, empleando Diagrammes.

Las muestras que muestran comportamientos diferentes en la comparación son la SP02 y la SP13, como se mencionó anteriormente estas pudieron ser afectadas por factores externos.

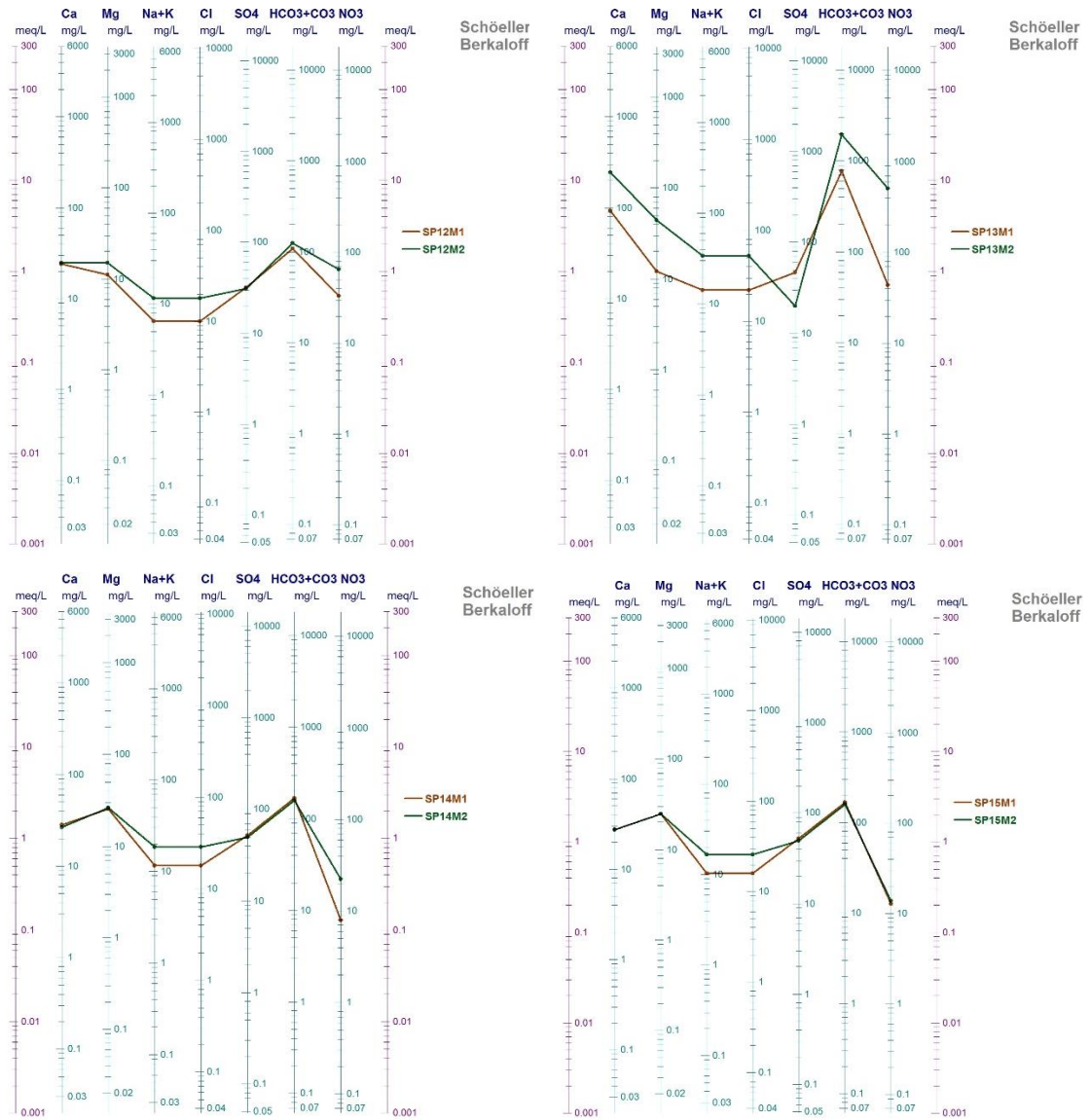
Figura 52. Diagrama de Schoeller



Fuente: elaboración propia, empleando Diagrammes.

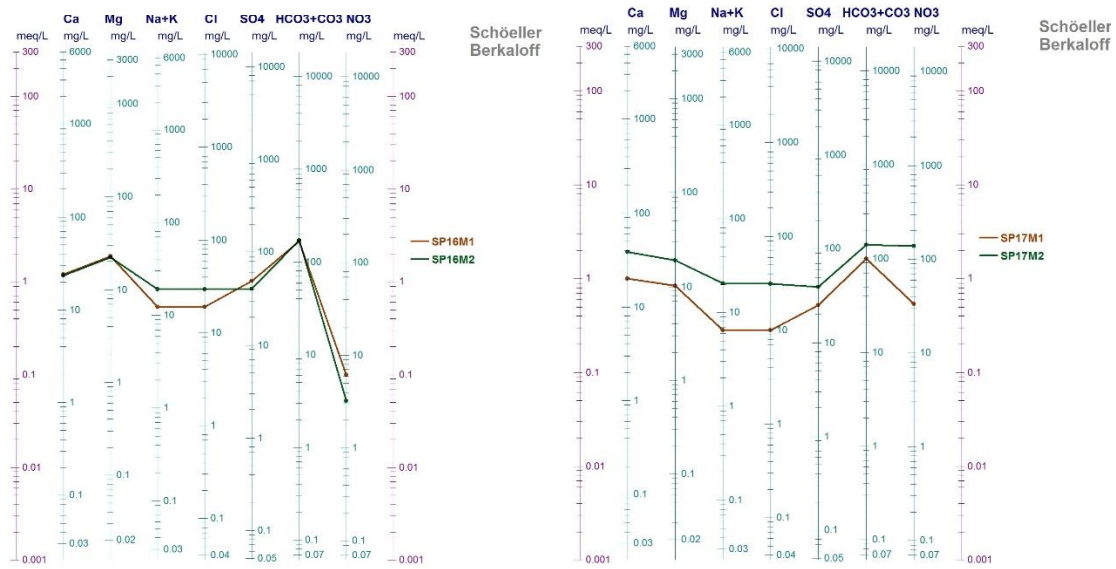
La muestra SP02 pudo ser afectada por los trabajos de obra civil realizados, en el caso de la muestra SP13, por ser un pozo abandonado que no está completamente sellado y puede contaminarse por sustancias externas.

Figura 53. Diagrama de Schoeller



Fuente: elaboración propia, empleando Diagrammes.

Figura 54. Diagrama de Schoeller



Fuente: elaboración propia, empleando Diagrammes.

Las demás muestras muestran comportamientos similares, teniendo un aumento visible en las concentraciones de cloruros y sodio respecto al muestreo en época de lluvia, y una disminución de la última parte de las gráficas debido a un aumento en la concertación de nitratos.

6. CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Con base en los resultados de los análisis de calidad de agua se determina que en las aguas subterráneas del municipio de San Pedro La Laguna y en las zonas de estudio del cuerpo de agua del Lago de Atitlán, existe contaminación por Nitratos (NO_3^-) y de tipo bacteriológica. Los parámetros que registraron valores por encima de los límites máximos permisibles establecidos en la norma COGUANOR NTG 29001, fueron los Nitratos (NO_3^-) en algunas de las muestras, y los coliformes fecales y los coliformes totales en todas las muestras. Los valores específicos de cada muestra para estos parámetros se presentan en la tabla XII, en la que también se indican los límites máximos permisibles y, en color rosado, se indican los valores que exceden los límites de la norma.

Tabla XII. Datos que exceden los parámetros de la norma

PUNTO DE TOMA	TIPO	NITRATO (NO ₃ ⁻) (mg/l)				Coliformes fecales (NMP/100 mL)			Coliformes Totales (NMP/100 mL)				
		LMP		M 1	M 2	LMP		M 1	M 2	LMP		M 1	M 2
		COGUANOR NGO 29001	COGUANOR NTG 29001			COGUANOR NTG 29001	COGUANOR NTG 29001			COGUANOR NTG 29001	COGUANOR NTG 29001		
SP01	Nacimiento brote definido	10	50	7,48	---	No deben ser detectables en 100mL de agua	<3	---	No deben ser detectables en 100mL de agua	210	---		
SP02	Pozo excavado			23,76	112,5		1100	<1		>2400	179,3		
SP03	Pozo excavado			45,32	72,9		75	42		210	>2419,6		
SP04	Pozo excavado			118,8	47,7		20	1		1100	248,1		
SP05	Lago			0,44	2,9		93	<1,8		1100	11		
SP07	Lago			13,2	3,8		28	<1,8		>2400	4,5		
SP08	Pozo Perforado			38	0,0		4	---		13	---		
SP09	Pozo perforado			11,88	0,0		<3	---		<3	---		
SP10	Pozo excavado			30,8	96,4		28	24,1		210	648,8		
SP11	Pozo excavado			41,36	69,8		<3	<1		>2400	155,3		
SP12	Pozo excavado			33	65,0		150	98		460	>2419,6		
SP13	Pozo excavado			44	506,0		<3	<1		14	>2419,6		
SP14	Pozo excavado			7,92	22,4		25	58,3		460	307,6		
SP15	Pozo excavado			12,76	13,8		<3	4,1		>2400	235,9		
SP16	Lago			6,16	3,2		75	<1,8		1100	4,2		
SP17	Grifo			33,44	136,8		<3	<1		93	238,2		

Fuente: elaboración propia.

De los valores señalados en la tabla anterior, los Nitratos (NO₃⁻) tienen una importancia particular, considerando que la depuración de los mismos puede ser compleja, así como los efectos en la salud que conllevan las altas concentraciones de estos en el agua para consumo humano. La concentración

de nitratos en su límite máximo permisible para el consumo humano según la Norma COGUANOR NTG 29001 es de 50 mg/L.

La existencia de nitratos en las aguas subterráneas se asocia con actividades de tipo antrópico, como la disposición de las aguas residuales y la extensiva utilización de fertilizantes. En general, la contaminación del agua subterránea asociada a actividades antrópicas puede agruparse de la siguiente forma:

- Contaminación urbana y doméstica
- Contaminación agrícola
- Contaminación industrial
- Contaminación inducida por bombeo

Considerando los usos de suelo en el área de estudio (ver figura 55), se evidencia que existe una alta carga poblacional y la contaminación puede asociarse directamente a la contaminación de tipo urbana y doméstica.

Figura 55. **Uso del suelo en área de estudio**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

Las actividades domésticas generan principalmente dos tipos de residuos: los residuos sólidos y los residuos líquidos.

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. Comúnmente los contenidos de dureza, sólidos disueltos y concentraciones de HCO_3^- , Cl^- , SO_4^- , HCO_3^- , Na^+ , K^+ , SO_4^- , Ca^{++} y Mg^{++} son elevados.²⁴

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 XIII presenta las características de los residuos líquidos de tipo doméstico, y en la tabla XIV la composición tipo de las aguas residuales según varios autores.

Tabla XIII. **Residuos líquidos domésticos**

RESIDUOS LÍQUIDOS DOMÉSTICOS			
FUENTE	Características potenciales de efluente mg/l		Tasa de producción efluentes
AGUAS RESIDUALES (HECES Y ORINA HUMANA)	Sólidos en suspensión	$\sim 6 \times 10^4$	0,4-0,6 m ³ /persona/año
	DBO ₅	$\sim 5 \times 10^4$	0,3-0,5 kg/persona/año
	N (Total)	$\sim 1 \times 10^4$	
	Coliformes fecales	$\sim 1 \times 10^7$	
	Estreptococos fecales	$\sim 1 \times 10^6$	
FOSAS SÉPTICAS	Sólidos en suspensión	100-300	
	DBO ₅	50-400	
	COT	100-300	
	Total de sólidos	300-600	40-60 m ³ /persona/año
	Amoníaco	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

Tabla XIV. **Composición de aguas residuales domésticas.**

COMPOSICIÓN APROXIMADA DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS EN mg/l						
AUTOR		Imhoff	Hammer	Babbit	Metcif-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
	Fijos	530	360	150	350	350
Sólidos en susp. Totales		600	240	300	200	200
	Volátiles	400	180	250	150	150
	Fijos	200	60	50	50	50
Sólidos en susp. decant.		400	120	-	100	-
	Volátiles	270	80	-	75	-
	Fijos	130	40	-	25	-
Sólidos en susp. no decan.		200	120	-	100	-
	Volátiles	130	100	-	75	-
	Fijos	70	20	-	25	-
Sólidos disueltos total		660	560	200	500	450
	Volátiles	330	260	100	200	160
	Fijos	330	300	100	300	290
D.B.O. ₅		-	200	200	200	100-300
Nitrógeno Total		-	35	50	40	20-85
Fósforo Total		-	4	4	4	-

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

6.1. **Mecanismos de introducción y propagación de la contaminación en el acuífero**

Los mecanismos por los cuales un agente contaminante puede alcanzar un acuífero y propagarse son tres:

- Mecanismo de propagación a partir de la superficie: arrastre de contaminantes a partir de la superficie del terreno, por ejemplo, el uso de los fertilizantes, lixiviados de los desechos sólidos, entre otros.

- Mecanismos de propagación desde la zona no saturada: dentro de este grupo pueden incluirse la contaminación de fosas sépticas, letrinas y sumideros en los que se hacen descargas de aguas residuales por encima del nivel freático.
- Mecanismos de propagación originados en la zona saturada: los dos tipos más comunes de contaminación asociados a este tipo son la inyección de pozos de infiltración y la intrusión salina por la alteración del régimen de flujo.

Con base en el tipo de disposición de las aguas residuales en el municipio de San Pedro La laguna, la intrusión de contaminantes se desarrolla a través del mecanismo de propagación desde la zona no saturada.

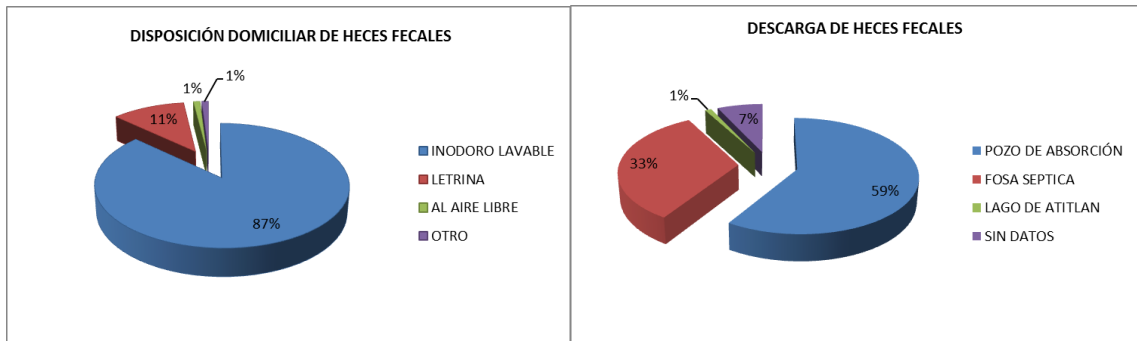
6.1.1. Sistema de disposición de aguas residuales del municipio de San Pedro La Laguna

El municipio de San Pedro La Laguna cuenta con una cobertura del 99 % en el suministro de agua, siendo el 97 % para uso familiar. En cuando a la disposición de las heces fecales, el 87 % lo hace a través de letrinas lavables.²⁵

La descarga de las aguas residuales generada por las letrinas lavables, en un 59 % es a través de pozos de absorción sin un tratamiento, mientras que un 33 % cuenta con fosas sépticas de las que la mayoría se encuentran en mal estado, sin cumplir con ninguna actividad de depuración; un 1 % realiza las descargas directas al Lago de Atitlán y de un 7 % no se cuenta con datos. En las siguientes gráficas se presenta la relación porcentual de la disposición de heces fecales y la relación porcentual del tipo de descarga.

²⁵MANCLALAGUNA. *Estudio de pre-factibilidad: soluciones integrales de agua potable y saneamiento en San Pedro La Laguna, Departamento de Sololá*. 2011. P. 61

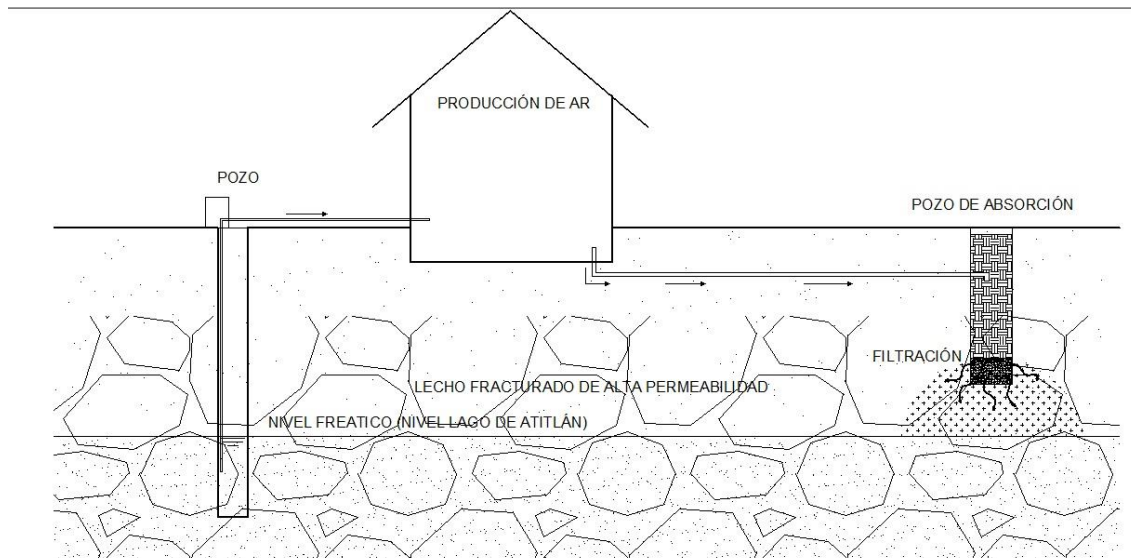
Figura 56. Sistema de disposición de aguas residuales



Fuente: elaboración propia.

Los sistemas de disposición de aguas residuales en el municipio se basan en la infiltración, aspecto que se ve favorecido por las condiciones geológicas de la zona, en la que los niveles de permeabilidad son altos. La imagen 57 presenta el esquema de disposición de las aguas residuales en el terreno que utiliza el 92 % de la población (un 33 % incluye entre la producción y descarga una fosa séptica).

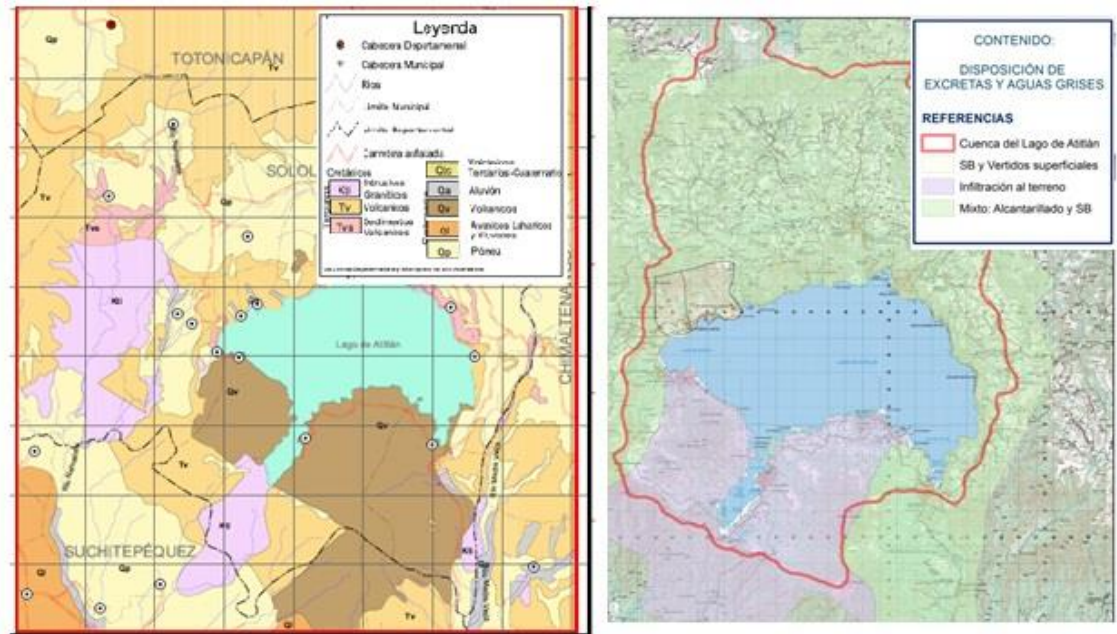
Figura 57. **Sistema de disposición de aguas residuales**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

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 terreno, aspecto que se asocia a la geología de la zona. En la imagen 58 se presenta la relación entre el tipo de disposición y la geología local del terreno.

Figura 58. Sistema de disposición de aguas residuales



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

La alta permeabilidad de la zona ha incidido en que las unidades de infiltración no se colmatan ni se llenan 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, así como la infiltración de agroquímicos.

6.1.2. Producción de aguas residuales en el municipio de San Pedro La Laguna

Los factores que influyen en la producción de aguas residuales en el municipio de san Pedro La Laguna son: la cobertura de abastecimiento de agua,

la dotación de suministro de agua, el número de habitantes y el sistema de disposición de las aguas residuales. Según el último censo municipal realizado en el año 2011, la población en ese año era de 15478 habitantes distribuidos en 3310 inmuebles. Considerando una tasa de crecimiento del 2,5%, y con una proyección geométrica, la población el año 2015 es de 17085 habitantes, que producen un estimado de 1640 m³ de aguas residuales durante el día. En la tabla XV se presenta el resumen de los cálculos de la estimación de las aguas residuales que se producen en el municipio.

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

Población 2011	15478 habitantes
Tasa de crecimiento	2,5 %
Población 2015	17085 habitantes
Dotación	120 L/hab/día
Factor de retorno	0,8
Caudal de aguas residuales	18,98 l/s
Caudal de aguas residuales día	1640,14 m ³ /día

Fuente: elaboración propia.

Considerando que el 33 % de la población cuenta con una fosa séptica, puede estimarse que 542,24 m³ son vertidos con un tratamiento básico y que 1098 m³ son vertidos si ningún tipo de tratamiento. Es importante destacar que, aunque existen viviendas con fosas sépticas, en la mayoría de los casos se constató que estas unidades no han recibido mantenimiento desde que se instalaron, por lo que el tratamiento a las aguas es mínimo.

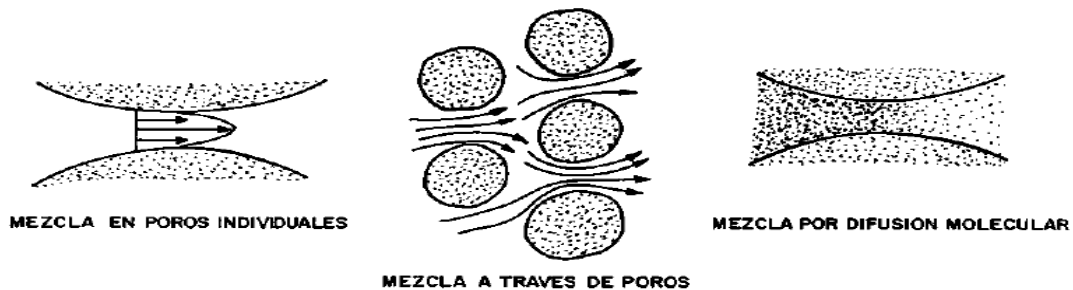
6.2. Procesos de transporte y atenuación de los contaminantes

El comportamiento de las aguas subterráneas obedece a la ley de Darcy, con un movimiento desde la zona de recarga a la zona de descarga, siendo la velocidad del agua directamente proporcional a la permeabilidad del acuífero y al gradiente hidráulico. En cuanto al transporte de contaminantes, las sustancias una vez disueltas en el agua se transportan por el propio movimiento del agua, difusión o una mezcla de ambas situaciones. Es importante distinguir las posibles situaciones que pueden darse:

- Inexistencia de ningún tipo de interacción con el medio geológico: el contaminante es transportado obedeciendo al flujo subterráneo de agua: advección, difusión y dispersión (mecánica e hidrodinámica). Proceso específico para solutos no reactivos o conservativos.
- Interacciones entre las sustancias contaminantes con el medio geológico: adsorción, precipitación o disolución, y diversas reacciones químicas.

Las interrelaciones con el terreno obedecen a las tortuosidades de este, en las que los solutos tienden a separarse de la trayectoria ideal del agua y a moverse con una velocidad distinta.

Figura 59. **Procesos de dispersión a escala microscópica**

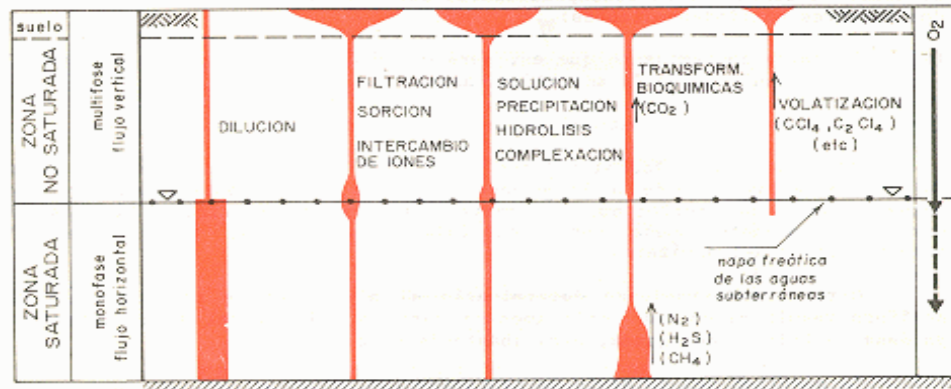


Fuente: IGME. *Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España*. Madrid, 1985.

El suelo cumple con una función de atenuación activa de varios contaminantes, los cuales han sido reconocidos por mucho tiempo como un sistema potencialmente efectivo para la disposición segura de excretas humanos y de aguas residuales domésticas. Adicionalmente, la dispersión hidrodinámica que acompaña el flujo de aguas subterráneas resulta en dilución de los contaminantes persistentes y móviles, especialmente en la zona saturada (figura 60)²⁶.

²⁶OMS / OPS-HPE / CEPIS. *Contaminación de las aguas subterráneas: un enfoque de la situación en América Latina y el Caribe en relación con el suministro de agua potable*. 1987, actualizado 2002. www.bvsde.ops-oms.org/eswww/fulltext/repind46/contami/contami.html. [Consulta: enero de 2016].

Figura 60. **Procesos que producen atenuación de contaminantes en los sistemas de aguas subterráneas**



Fuente: OMS / OPS-HPE / CEPIS. *Contaminación de las aguas subterráneas: un enfoque de la situación en América Latina y el Caribe en relación con el suministro de agua potable. 1987, actualizado 2002.* www.bvsde.ops-oms.org/eswww/fulltext/repind46/contami/contami.html.

[Consulta: enero de 2016].

6.2.1. Transporte de contaminantes bacteriológicos

La zona no saturada corresponde a la zona de protección del acuífero y la sección en donde se favorece a la atenuación y la eliminación de bacterias y virus. Los factores que afectan el transporte de contaminantes bacteriológicos son la filtración y la adsorción.

La filtración es un proceso que limita el desplazamiento de las bacterias a través del subsuelo en la zona no saturada, por lo que puede considerarse un mecanismo de eliminación de bacterias, siempre y cuando el tiempo de transporte por la zona de atenuación sea el adecuado, mientras que en el de la zona saturada la filtración no constituye un mecanismo de eliminación de bacterias, a excepción de que esta zona este compuesta por estratos de granulación fina, con poros de diámetros inferiores al de los microorganismos.

Por otro lado, la adsorción es un mecanismo que favorece a la eliminación de los virus, considerando que estos son extremadamente pequeños. Así, los factores que influyen en el desplazamiento de las bacterias y virus se resumen en la tabla XVI:

Tabla XVI. **Factores que influyen en el transporte de bacterias y virus a través del suelo**

FACTOR	DESCRIPCIÓN
Composición del suelo	Las bacterias y los virus son fácilmente adsorbidos por la arcilla bajo condiciones apropiadas, y cuanto mayor sea el contenido de arcilla en el suelo, más intenso será el proceso de atenuación. Otros suelos que contienen materia orgánica favorecen igualmente la atenuación.
pH	Un pH bajo favorece la adsorción de virus; los pH elevados ocasionan la desorción de los virus adsorbidos.
Materia orgánica soluble	Se ha comprobado que la materia orgánica soluble compite con los organismos para ocupar los lugares de adsorción en las partículas del suelo, de ahí la menor adsorción e incluso la desorción de los virus ya adsorbidos.
Cationes	Los cationes, especialmente los bivalentes, pueden favorecer la neutralización o reducir las fuerzas repulsivas entre los microorganismos y las partículas del suelo cargadas negativamente permitiendo que prosiga la adsorción.
Carga hidráulica del suelo	Los microorganismos penetran más profundamente al aumentar la velocidad del flujo. La carga hidráulica se eleva naturalmente durante períodos de recarga de las aguas subterráneas por la infiltración de las lluvias.
Precipitación	Los microorganismos que quedan retenidos próximos a la superficie del suelo se pueden desabsorber después de una fuerte lluvia, debido al establecimiento de gradientes iónicos dentro de la columna de suelo.

Fuente: elaboración propia, con base en: GERBA, C. P. *Pathogen removal from wastewater during groundwater recharge. Municipal Wastewater Reuse News* 26. 1979.

En la tabla XVII se presentan los factores que influyen para la supervivencia de las bacterias:

Tabla XVII. Factores que influyen en la supervivencia de las bacterias

FACTOR	DESCRIPCIÓN
Grado de humedad	Mayor supervivencia en suelos húmedos y durante períodos de alta precipitación pluvial.
Capacidad de retención	El período de supervivencia es menor en suelos arenosos que en suelos con mayor capacidad para retener la humedad.
Temperatura	Mayor supervivencia a temperaturas más bajas.
Adsorción	Al adsorberse los virus en el suelo se prolonga su supervivencia.
pH	El período de supervivencia de bacterias es menor en los suelos ácidos (pH 3-5) que en los alcalinos.
Luz solar	Menor período de supervivencia en la superficie del suelo.
Materia orgánica	Mayor período de supervivencia de las bacterias y posibilidad de reproducción en presencia de cantidades suficientes de materia orgánica.
Antagonismo de la microflora del suelo	Mayor supervivencia en suelo estéril; la microflora del suelo y las bacterias compiten por los nutrientes; los microorganismos aeróbicos del suelo afectan adversamente la supervivencia de los virus, mientras que los microorganismos anaeróbicos no la afectan.

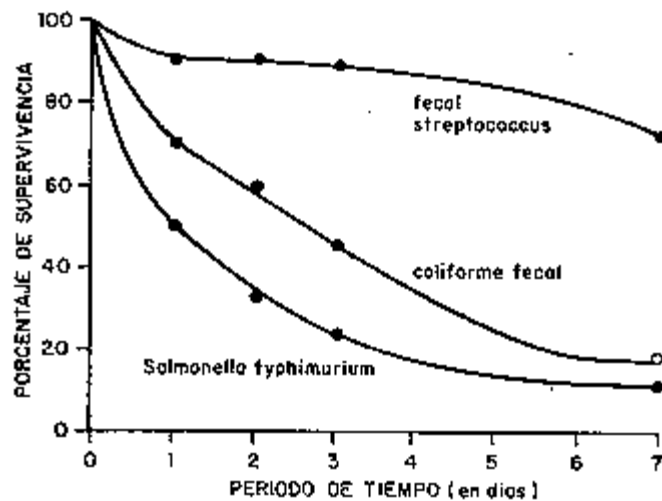
Fuente: elaboración propia, con base en GERBA, C.P. *Pathogen removal from wastewater during groundwater recharge. Municipal Wastewater Reuse News* 26, 20-23. 1979

La supervivencia de las bacterias y los virus en las aguas subterráneas es otro factor importante que influye en la contaminación de los acuíferos. En los estudios de campo realizados por Wellings y otros autores hacia 1975, se sugiere que los enterovirus pueden sobrevivir por lo menos 28 días en las aguas subterráneas²⁷, mientras que, según la CEPIS, para las bacterias el período de supervivencia suele ser mayor en las aguas subterráneas que en las aguas superficiales, debido a la ausencia de luz solar y a la poca competencia de nutrientes disponibles.

²⁷CEPIS. *Análisis de contaminación de las aguas subterráneas por sistemas de saneamiento básico. Textos completos, 1988.* <http://www.bvsde.ops-oms.org/eswww/fulltext/repind46/analisis/analisis.html>. [Consulta: enero de 2016].

En la figura 61 se presentan los porcentajes de supervivencia de las bacterias en función del tiempo, demostrando que los estreptococos fecales (SF) de humanos, con frecuencia persisten más en el tiempo que los coliformes fecales.

Figura 61. **Tiempo de residencia versus tasa de extinción de bacterias seleccionadas en muestras de agua de 11, conservadas a 10° C**



Fuente: Geldreich; et al. *The bacteriological aspects of stormwater pollution*. 1968


En los registros obtenidos en la zona de estudio, el total de las muestras levantadas presentó contaminación bacteriológica y, considerando que los estratos de filtración son lechos volcánicos de una alta permeabilidad, los procesos de atenuación son mínimos y la mayor eficiencia se asocia directamente con el espesor del estrato de infiltración.

En la figura 62 se analizan los resultados de dos puntos con similares características contaminantes de entorno y con un nivel piezométrico distinto, evidenciando que para el pozo SP10, con un nivel piezométrico superior, la

contaminación por coliformes es inferior, desarrollándose un proceso de atenuación vinculado al espesor de estrato filtrante.

Figura 62. **Análisis de contaminantes bacteriológicos en dos puntos con distinto nivel piezométrico**

Muestra	Tipo	Profundidad nivel piezométrico	Coliformes Totales (NMP/100 mL)
SP10	Pozo excavado	7,27	210
SP11	Pozo excavado	3,76	>2400

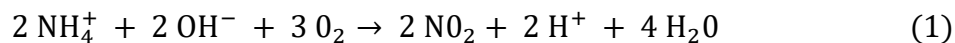


Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

6.2.2. Transporte de nitratos

En las aguas subterráneas, los nitratos son el resultado de la degradación de las sustancias orgánicas nitrogenadas (como proteínas) en iones amónicos (NH_4^+), que luego son biológicamente oxidados convirtiéndose en nitritos y

nitratos con base en dos reacciones desarrolladas por diferentes bacterias. En la primera se encargan las nitrosomas y en la segunda las nitrobacterias:



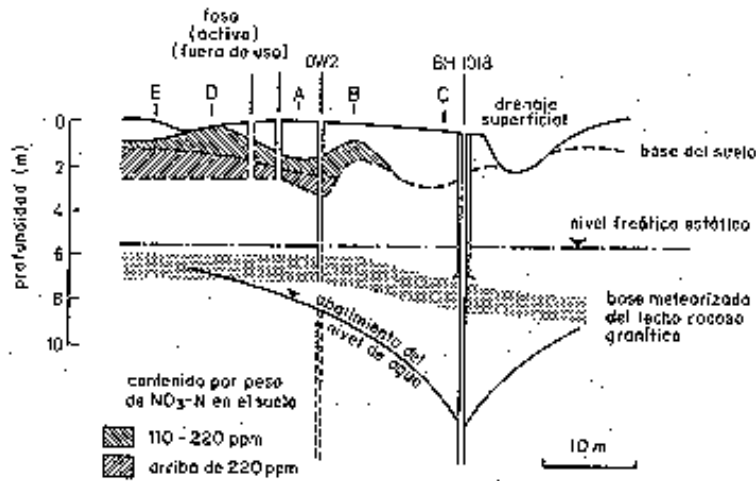
Las prácticas de evacuación de excretas sin tratamiento son la principal fuente de nitratos en la zona de análisis. Existen estudios que han determinado que se desarrollan procesos de atenuación en función de los espesores de suelo y características hidrogeológicas en la zona libre del acuífero. Walker y otros autores, en 1973, calcularon que, en Wisconsin, EUA, el promedio de nitrógeno que llega hasta el agua subterránea cada año es de unos 7,5 kg, en el caso de una familia de 4 personas que descargue sus tanques sépticos en suelos arenosos, o 35-40 % del total depositado, porcentaje que varía para otras zonas de EUA en función de las condiciones hidrogeológicas.²⁸

Con respecto al impacto de las descargas de excretas sin tratamiento, un estudio de referencia es el desarrollado en 1980 por Lewis y otros autores, quienes realizaron un estudio hidrogeológico en la zona aledaña a un pozo de suministro de agua que se encontraba contaminado con una concentración de nitratos superior a 135 mg NO₃-N/L. La figura 63 representa los resultados del estudio, con lo que se demostró que las fosas secas habían provocado una significativa concentración de sustancias nitrogenadas en el suelo y, desde ahí, las partículas de nitratos se lixiviaban intermitentemente con las infiltraciones pluviales²⁹.

²⁸CEPIS. *Análisis de contaminación de las aguas subterráneas por sistemas de saneamiento básico. Textos completos, 1988.* <http://www.bvsde.ops-oms.org/eswww/fulltext/repind46/analisis/analisis.html>. [Consulta: enero de 2016].

²⁹Ibidem.

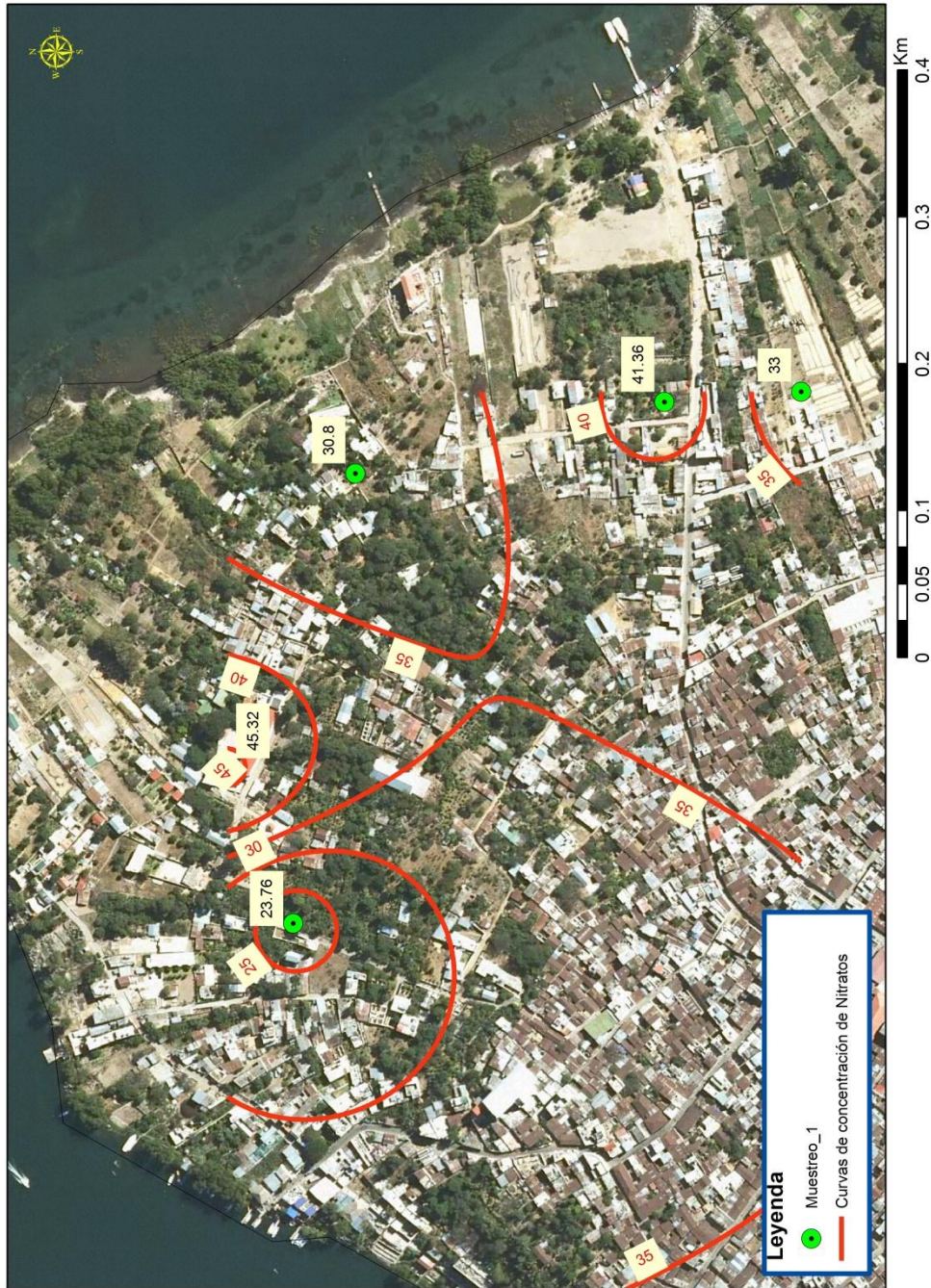
Figura 63. **Corte hidrogeológico que indica la acumulación de nitratos en el suelo alrededor de una fosa seca**



Fuente: LEWIS, W.J.; FARR, J.L.; FOSTER, S. S. D. *The pollution hazard to village water supplies in eastern Botswana. Proceedings of the Institution of Civil Engineers.*

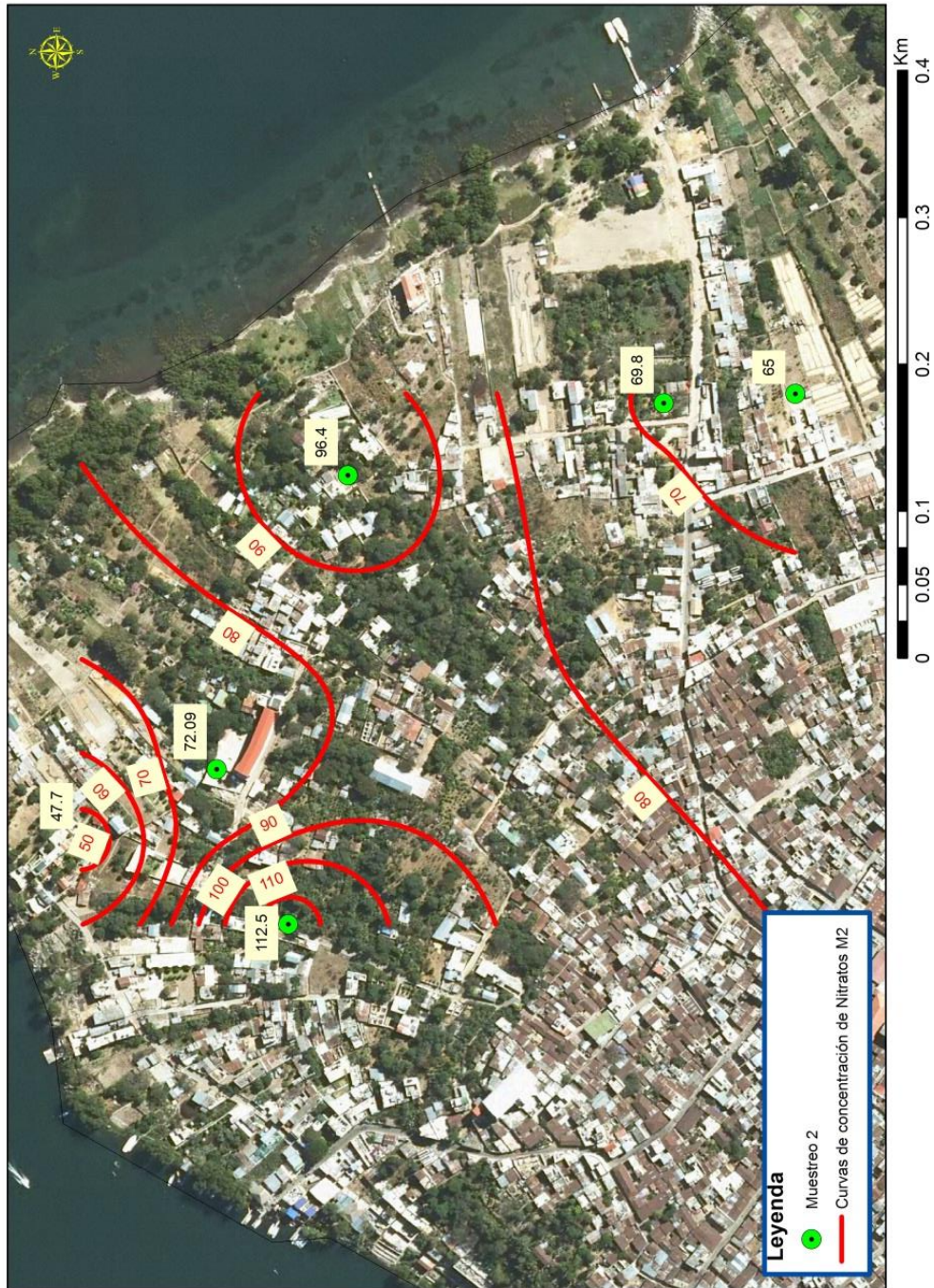
Las figuras 64 y 65, en las páginas siguientes, demuestran la distribución de nitratos (mg/l) en la zona de estudio, así como la proyección aproximada de curvas de concentración para los muestreos realizados en septiembre de 2015 (época de lluvia) y febrero de 2016 (época seca).

Figura 64. Distribución de nitratos (mg/L). Muestreo en época de lluvia



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

Figura 65. Distribución de nitratos (mg/L). Muestreo época seca

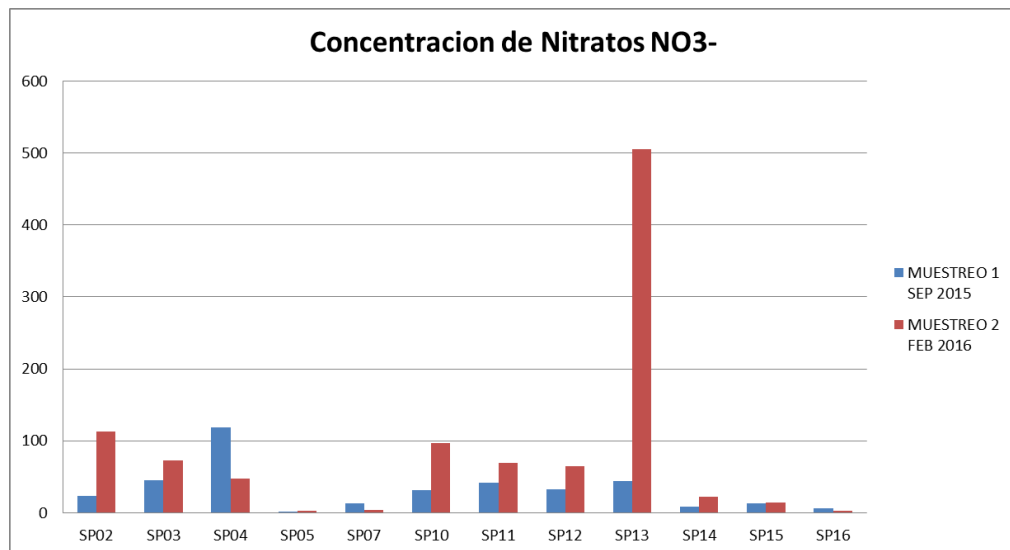


Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

Las curvas de concentración obtenidas a partir de los datos muestran la distribución de nitratos con una mayor carga contaminante desde la zona poblada, partiendo de valores punta de 40 mg/l en la época lluviosa y 110 mg/l en la época seca. La disminución en la concentración de nitratos desde la zona volcánica en dirección al flujo hasta la zona lacustre, y considerando las condiciones geológicas, indican que pueden existir procesos de atenuación (desnitrificación) considerando el flujo de las aguas.

Otro aspecto importante a destacar es la influencia del régimen de lluvias en la zona, dado que se ha observado que la concentración de nitrato en el 75% de los puntos de muestreo (9 de 12) se incrementó en la época de estiaje. La figura 66 presenta el cambio que se obtuvo en las concentraciones entre cada muestreo realizado.

Figura 66. **Distribución de nitratos (mg/L)**



Fuente: elaboración propia.

7. VULNERABILIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL MUNICIPIO DE SAN PEDRO LA LAGUNA

La vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero es el conjunto de características intrínsecas que determinan la susceptibilidad de este a ser afectado por una carga contaminante³⁰.

7.1. Determinación de la vulnerabilidad a través del método GOG (*Groundwater occurrence-overall aquifer class-Depth*)

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:

$$\text{INDICE DE VULNERABILIDAD} = G \times O \times D$$

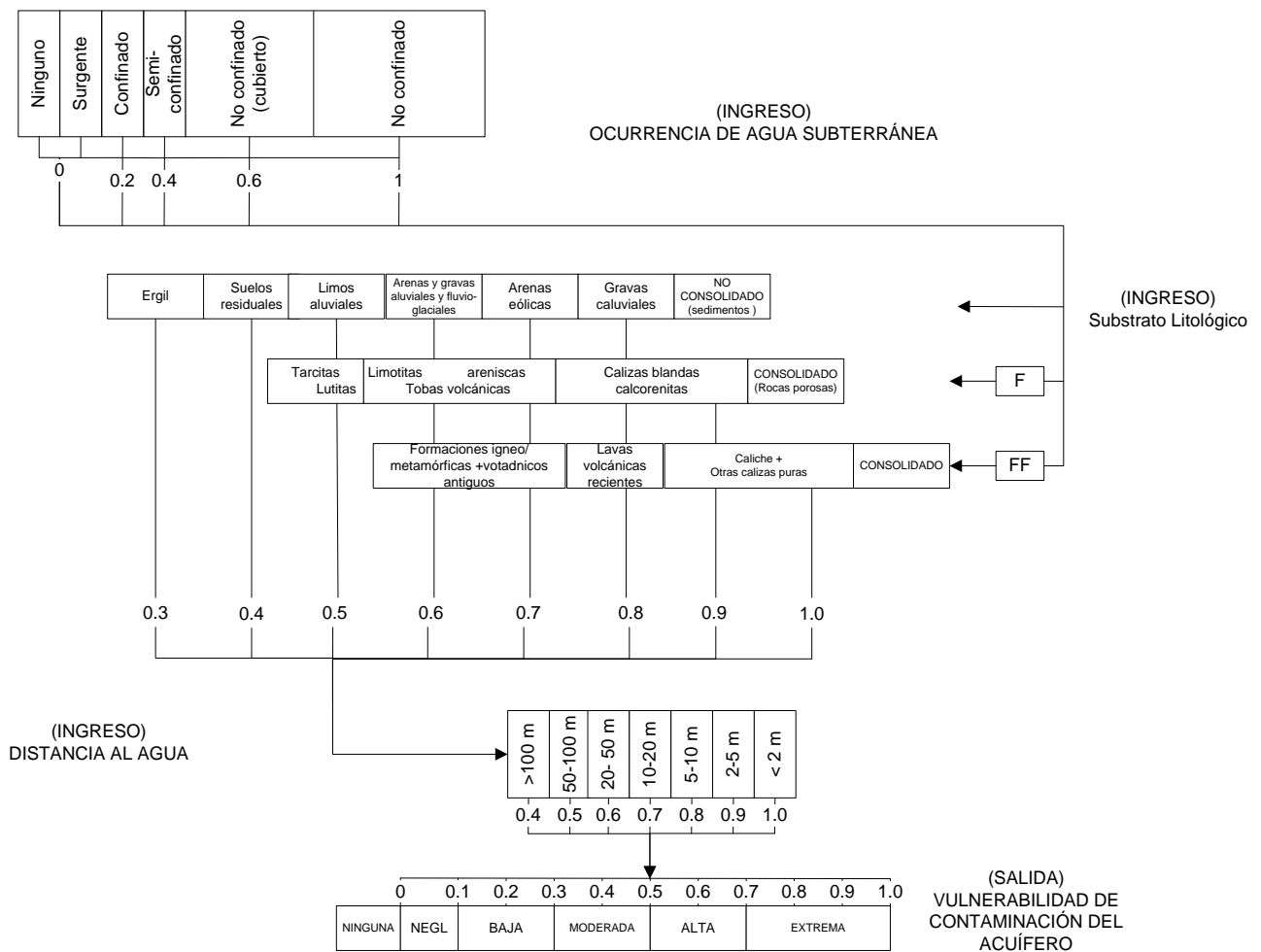
Donde:

- 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.

³⁰ FOSTER, S. *Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution, risk and protection strategy*. TNO. Comm. on Hydro Research. Proceed, an Information 38: 69-86. The Hague.

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 67:

Figura 67. Unidades contaminantes y carga poblacional



Fuente: FOSTER; et al. *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Las clases de vulnerabilidad que pueden definir un planeamiento de protección territorial*. Consulta: 2016.

Con la definición de las clases de vulnerabilidad se puede definir un planeamiento de protección territorial.

Las definiciones de las vulnerabilidades son:

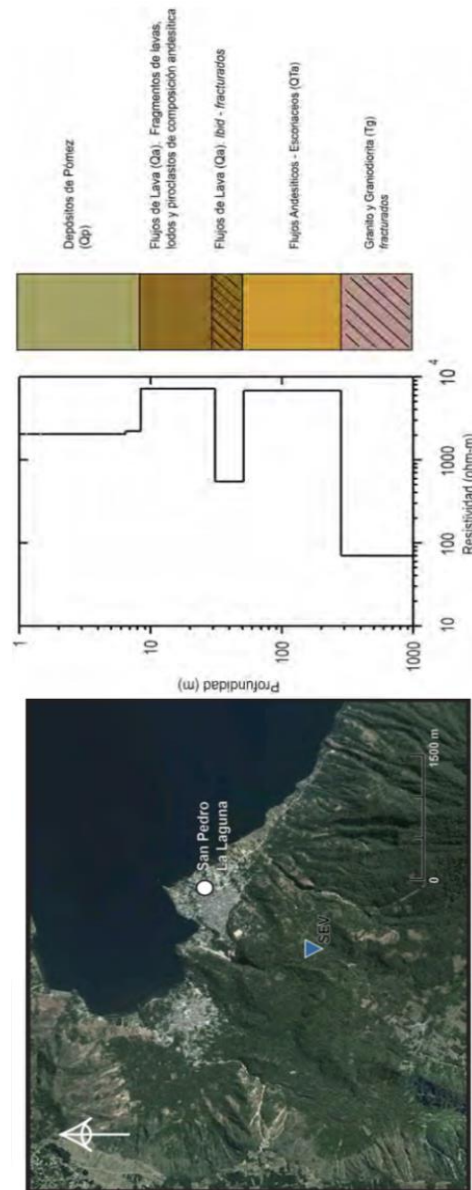
- “Extrema: vulnerable a la mayoría de los contaminantes del agua, con rápido impacto en muchos escenarios de polución.
- Alta: vulnerable a muchos contaminantes (excepto los fuertemente absorbidos o rápidamente transformados) en muchos escenarios de polución.
- Moderada: vulnerable a algunos contaminantes, pero sólo cuando hay descargas continuas o lixiviación.
- Baja: sólo vulnerable a contaminantes conservativos, a largo plazo, cuando son continuamente y ampliamente descargados.
- Nula: capas confinantes presentes, con flujo de agua subterránea vertical ascendente”³¹.

A continuación se determina la clasificación de la vulnerabilidad en la zona de estudio:

- Índice G: la zona de estudio presenta una zona de acuífero libre, y el índice correspondiente según la figura 67 es 1,0.
- Índice O: las condiciones litológicas corresponden a rocas volcánicas cuaternarias y una geología superficial que incluye depósitos de flujos piroplásticos, coladas de lava, depósitos pomacéos y tobas volcánicas. En la figura 68 se presenta el perfil litológico de la zona sur de estudio:

³¹ESPINOZA, C. *Dinámica de aguas subterráneas, vulnerabilidad y riesgo de contaminación. Aplicación al acuífero de Santiago Norte*. Santiago. Universidad de Chile, 2005, p. 69-127

Figura 68. **Columna litológica inferida, resultante de la inversión de datos SEV**



Fuente: 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).* Fecha de consulta: 2016.

Considerando las condiciones litológicas mencionadas, el índice correspondiente según la figura 67 es 0,8.

- Índice D: según el monitoreo realizado, se determinó que el gradiente hidráulico entre los puntos de estudio y el nivel del espejo de agua del Lago de Atitlán son mínimos, determinando que el nivel piezómetro es el mismo.

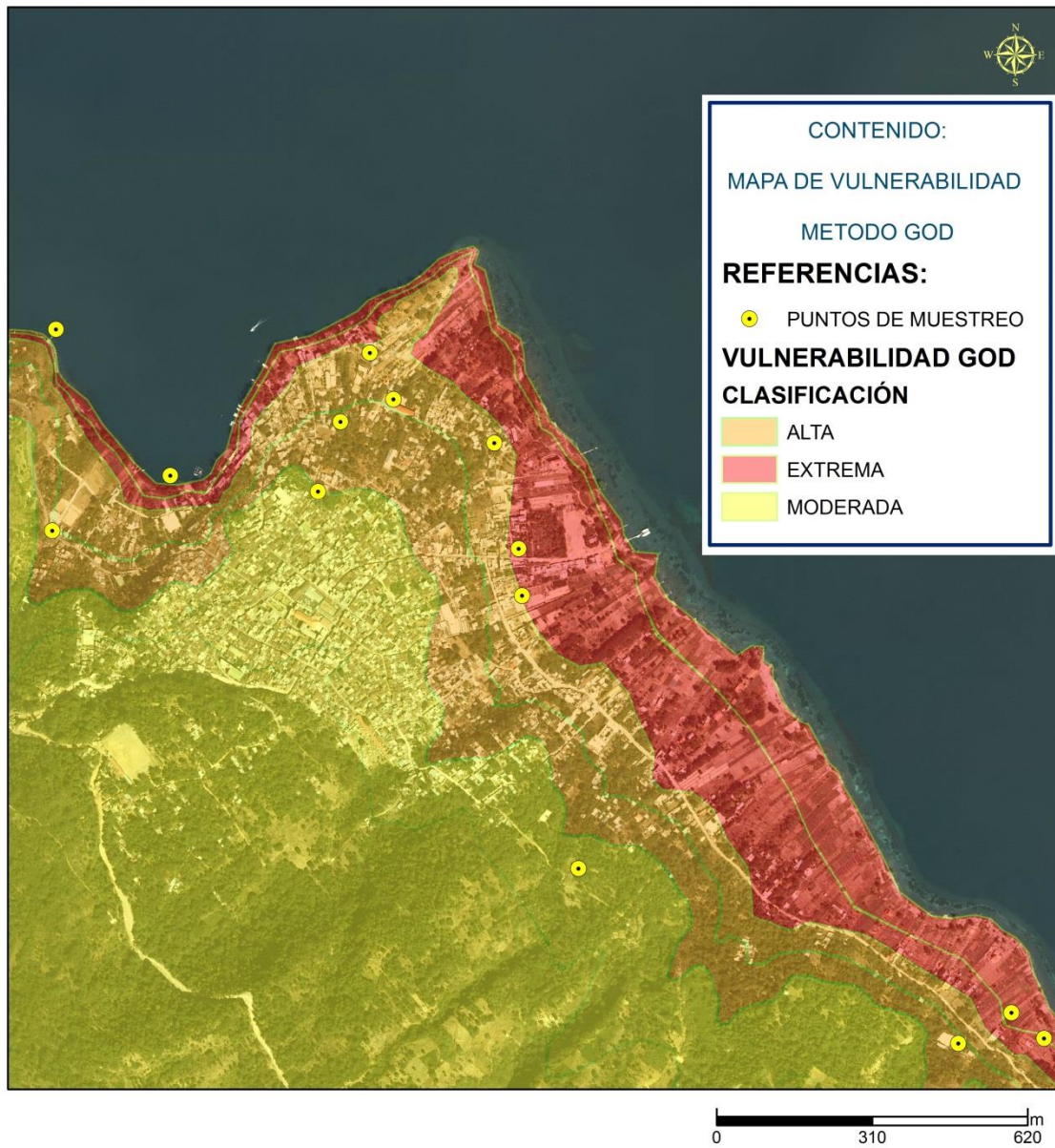
En la tabla XVIII se presentan los resultados del cálculo de la vulnerabilidad, considerando las distintas elevaciones del terreno y distancias hacia el nivel piezométrico:

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

PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREÁTICO (m)	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

Fuente: elaboración propia.

Figura 69. **Mapa de vulnerabilidad del acuífero**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

Las zonas de mayor vulnerabilidad son las aledañas al Lago de Atitlán y la vulnerabilidad va disminuyendo en función a la altura topográfica del terreno.

7.2. Análisis de riesgo de contaminación del acuífero según el método POSH

El método POSH (Pollutant Origin Surchage Hydraulically) fue desarrollado por Foster e Hirata 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.³²El 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. En la tabla mostrada en la siguiente página se resumen las mismas:

³²Miliarium. *Método POSH (Pollutant Origin Surchage Hydraulically)*. <http://www.miliarium.com/prontuario/MedioAmbiente/Aguas/MetodoPOSH.asp>. [Consulta: 2008].

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

ACTIVIDADES GENERADORAS DE CONTAMINACIÓN 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 AR 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	+	
Descargas de efluentes en los ríos	u P-L	t o h s	++	++
Lixiviación de volcaderos	u/r P	o h s t		
Drenaje de 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 todos	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 MINERA				
Alteración del régimen hidráulico	r/u P-D	s h		
Descarga de aguas de drenaje	r/u P-D	h s	++	++
Agua de procesos	r/u P	h s	+	+
Lixiviación de volcaderos	r/u P	s h		
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) 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.

La principal fuente de contaminación determinada para el área de estudio se debe al saneamiento sin alcantarillado, con un estimado de 3310 puntos de contaminación (multipuntual), que se indican en la figura 70:

Figura 70. **Unidades contaminantes**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

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. Para el caso en estudio, la fuente de contaminación es de tipo dispersa/multipuntual, y la determinación del potencial de carga contaminante se establece a través de la siguiente tabla:

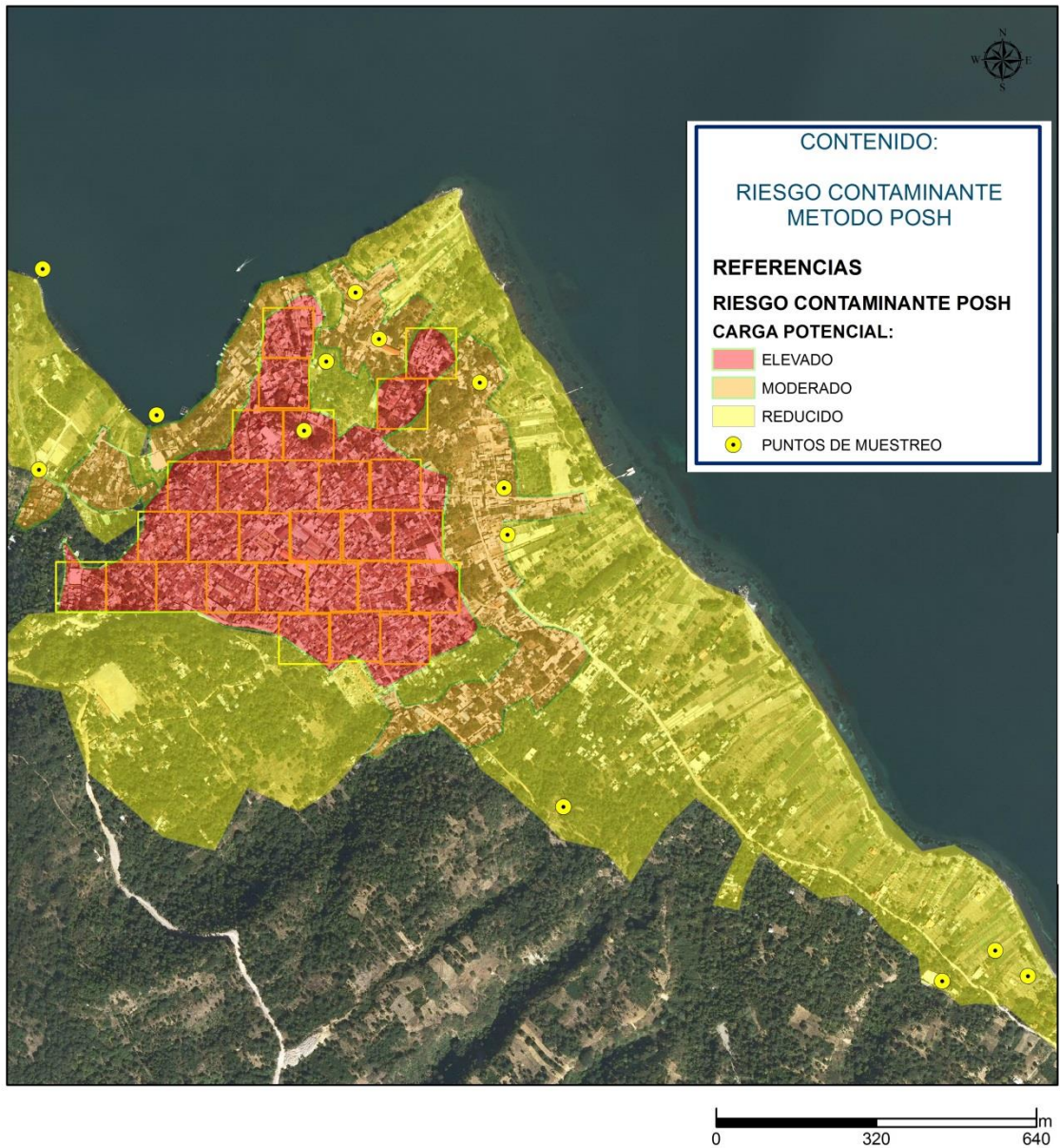
Tabla XX. **Clasificación de cargas contaminantes de fuentes dispersas**

CLASIFICACIÓN DE CARGAS CONTAMINANTES DE FUENTES DISPERSAS/MULTIPUNTUALES		
Potencial de carga contaminante	Fuente de contaminación	
	saneamiento in situ	prácticas agrícolas
Elevado	Cobertura de la red de alcantarillado <25% Densidad poblacional > 100 hab/ha	Cultivos comerciales intensivos y la mayoría de los monocultivos en suelos bien drenados en clima húmedo o con baja eficiencia en el riego, pastoreo intensivo sobre praderas altamente fertilizadas
Moderado	Intermedio	Los demás casos
Reducido	Cobertura de la red de alcantarillado >75% Densidad poblacional < 50 hab/ha	Rotación de cultivos tradicionales, pastoreo extensivo, sistemas de granjas ecológicas, cultivos bajo riego de alta eficiencia en tierras áridas (<250 mm/año)

Fuente: Elaboración propia, con base en FOSTER, S.; HIRATA, R. *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*, la figura 71 presenta la delimitación del potencial de carga contaminante:

Figura 71. Identificación del riesgo conteniente determinado con el método POSH



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

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 72 se presenta el método para la determinación de prioridades de acción:

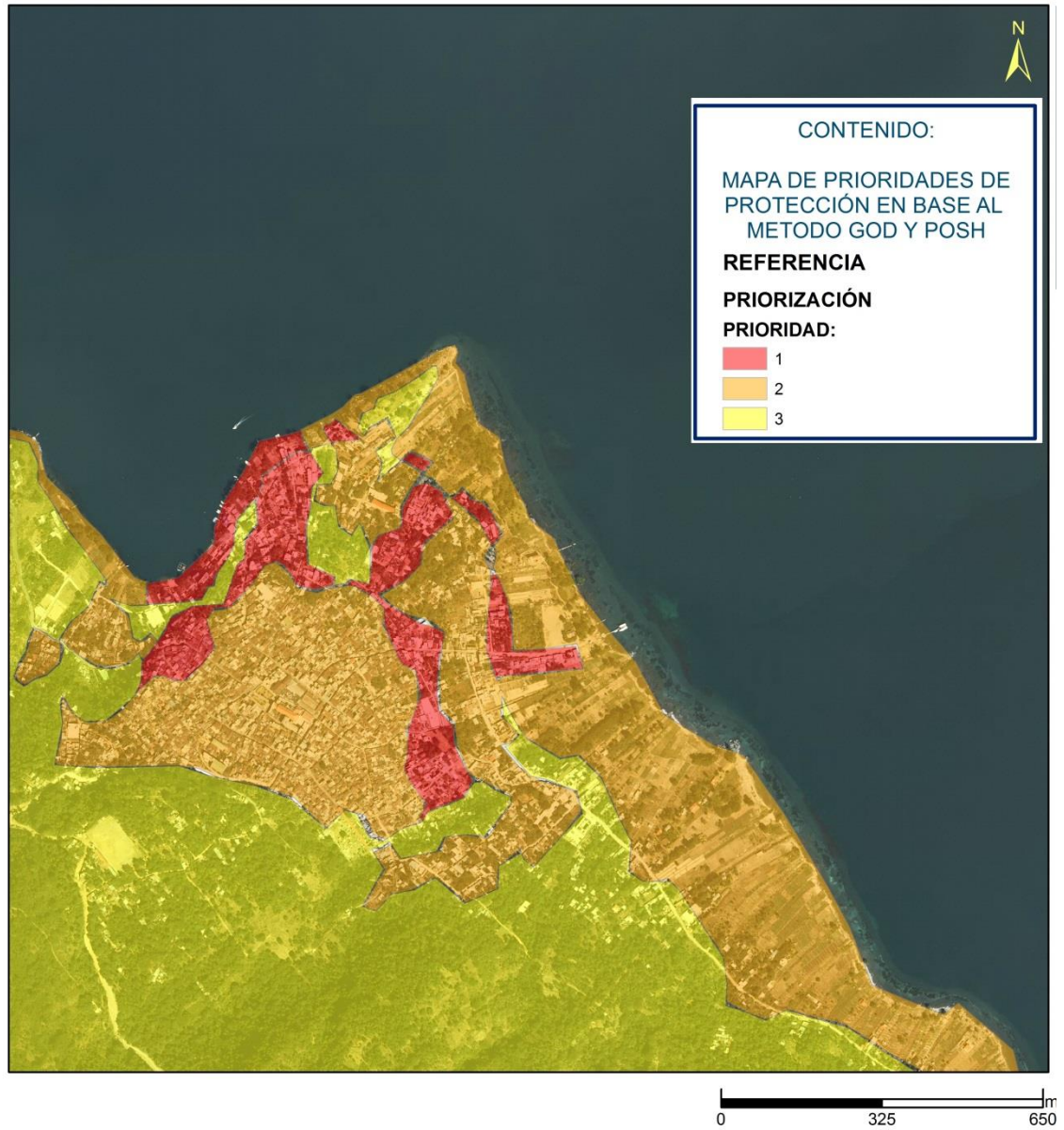
Figura 72. **Método para la determinación de prioridades de acción.**

		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.

Con los resultados de la superposición de cargas contaminantes y el nivel de vulnerabilidad de acuífero en la zona se determina la representación que se indica en la figura 73, en la que se evidencian las zonas de priorización de acciones de protección:

Figura 73. Zonas de priorización de acciones de protección



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

8. EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

A continuación se hace una descripción de los efectos asociados a la contaminación por nitratos y contaminación bacteriológica detectada en las aguas subterráneas del municipio de San Pedro La Laguna.

8.1. Efectos sobre el cuerpo de agua del Lago de Atitlán

El Lago de Atitlán se encuentra en un proceso de eutrofización acelerada debido al incremento de nutrientes (nitrógeno y fósforo) que favorecen al crecimiento de fitoplancton.³³ Según se definió en la sección 2.3 de este documento, las aguas subterráneas en el municipio de San Pedro La Laguna entran en contacto con las aguas del Lago de Atitlán y, considerando el flujo preferencial al que están sometidas y las condiciones mínimas de atenuación en medios fracturados, el transporte de nitratos es latente.

El alto contenido de nutrientes en el cuerpo de agua es uno de los factores que incide en el crecimiento acelerado de cianobacterias, las cuales en algunos casos producen cianotoxinas que son una potencial causa de daños a la salud de personas y animales que consuman o que entren en contacto con estas. Varios estudios han detectado en el Lago de Atitlán la presencia de cianobacterias, identificando la *Microcystis* y *Lyngbya robusta*, esta última con

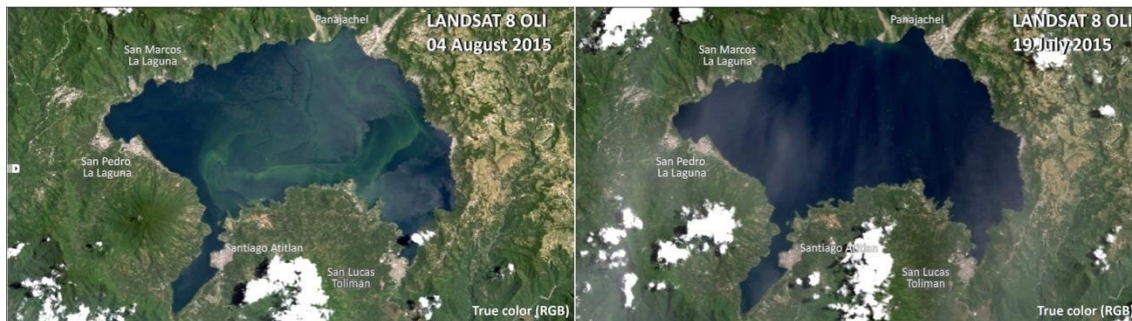
³³DIX, Margaret.; MEDINILLA, Oscar; et al. *Diagnóstico ecológico-social en la cuenca de Atitlán*. Guatemala: publicado por Universidad del Valle de Guatemala/The Nature Conservancy, 2003. p 35.

floraciones impactantes como la del año 2009, que en su etapa de mayor crecimiento cubrió el 38% del área superficial del Lago de Atitlán.³⁴

Según información de la plataforma SERVIRGLOBAL, los sensores satelitales de la NASA, Lansat, EO-1 y Terra/ASTER, proporcionan mediciones visibles de la clorofila presente en el Lago de Atitlán, aspecto importante considerando que las cianobacterias contienen clorofila.³⁵

La figura 74 presenta una imagen del 4 de agosto de 2015 (proveniente de Lansat 8), en la que se evidencia la presencia significativa de clorofila en el lago, y la comparación con una imagen que corresponde al 19 de julio de 2015, evidenciando el rápido florecimiento debido a condiciones específicas que pueden darse en un lapso de tiempo muy corto.

Figura 74. **Clorofila en Lago de Atitlán**



Fuente: SERVIR. *Contaminación del Lago de Atitlán*, SERVIGLOBAL. 2015.

<http://www.servir.net/servir-en-accion/analisis-ambientales/720-contaminacion-lago-atitlan.html>.

[Consulta: enero de 2016].

³⁴AMSCLAE, *La cianobacteria en el Lago de Atitlán*. Panajachel, Guatemala: 2011.

³⁵SERVIR. *Contaminación del Lago de Atitlán*, SERVIGLOBAL. 2015.
<http://www.servir.net/servir-en-accion/analisis-ambientales/720-contaminacion-lago-atitlan.html>.
[Consulta: enero de 2016].

En los análisis realizados por AMSCLAE y la UVG, el 5 y 10 de agosto de 2015, se determinó que las especies de cianobacterias detectadas en este último afloramiento fueron tres tipos de cianobacterias: Dolichospermum, Limnoraphis y Microcystis.³⁶

8.2. Efectos sobre la salud humana

Los principales efectos de la contaminación de las aguas subterráneas sobre la salud humana se pueden relacionar con las enfermedades de origen hídrico, debidas al consumo y uso del agua, aspecto latente en San Pedro La Laguna, considerando que las principales fuentes de suministro de agua son dos pozos mecánicos que se encuentran dentro de la zona de estudio en la que se ha detectado contaminación. Aunque se definió anteriormente que para la contaminación de tipo bacteriológica existe un proceso de atenuación en función del espesor filtrante de las aguas residuales que se infiltran en el suelo, en los puntos de suministro del sistema de agua municipal se detectó contaminación bacteriológica (pozos) y en las unidades de consumo (grifos). En los grifos, los registros de contaminación fueron superiores a los detectados en los pozos.

En las páginas siguientes, en la pestaña XXI se presentan los registros de contaminación, y la figura 75 indica los puntos de toma de muestras (pozos de suministro y grifos en la red):

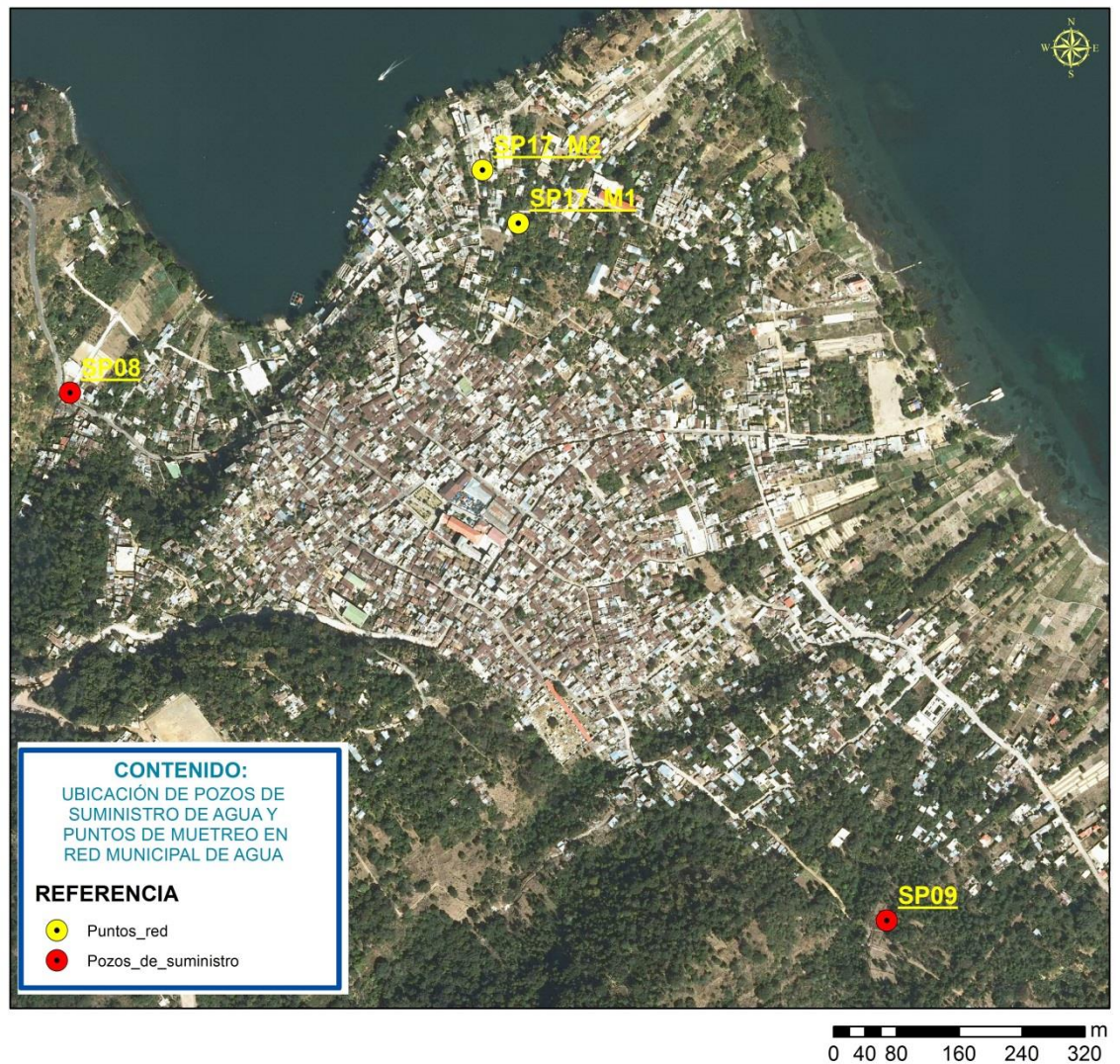
³⁶Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno. Universidad del Valle de Guatemala. *Reporte científico*. Guatemala, UVG AMSCLAE, 2015. P. 17.

Tabla XXI. **Registros de contaminación en pozos del sistema municipal de abastecimiento de agua**

PUNTO DE TOMA	TIPO	NITRATO (NO ₃ -) (mg/l)			
		LMP		MUESTREO 1 SEP 2015	MUESTREO 2 FEB 2016
		COGUANOR NGO 29001	COGUANOR NTG 29001		
SP08	Pozo Perforado	10	50	38	No levantada
SP09	Pozo Perforado			11.88	No levantada
SP17	Grifo			33.44	136.8
PUNTO DE TOMA	TIPO	Coliformes fecales (NMP/100 mL)			
		LMP		MUESTREO 1 SEP 2015	MUESTREO 2 FEB 2016
		COGUANOR NTG 29001			
SP08	Pozo Perforado	No deben ser detectables en 100mL de agua		4	---
SP09	Pozo Perforado			<3	---
SP17	Grifo			<3	<1
PUNTO DE TOMA	TIPO	Coliformes Totales (NMP/100 mL)			
		LMP		MUESTREO 1 SEP 2015	MUESTREO 2 FEB 2016
		COGUANOR NGO 29001			
SP08	Pozo Perforado	No deben ser detectables en 100mL de agua		13	---
SP09	Pozo Perforado			<3	---
SP17	Grifo			93	238.2

Fuente: elaboración propia.

Figura 75. **Ubicación de pozos de suministro de agua y puntos de suministro en la red que fueron muestreados**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

Es importante analizar el caso de los incrementos de la contaminación bacteriológica, la cual puede deberse a la estructura y configuración del sistema de suministro de agua del municipio, en el que se mezclan las aguas extraídas de los pozos con las aguas provenientes de un nacimiento ubicado en el municipio de San Marcos La Laguna, y en algunos casos con un sistema de bombeo de agua del lago. En la figura 76 se presenta el esquema del sistema de suministro de agua a la red municipal de San Pedro La Laguna:

Figura 76. Puntos de suministro de agua e interconexión de tanques en sistema de agua municipal. San Pedro La Laguna



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

El consumo de agua con contaminación bacteriológica tiene una relación directa con los índices de morbilidad y mortalidad asociados a enfermedades de origen hídrico. En la tabla XXII se presentan los 444 registros de morbilidad asociada a enfermedades de origen hídrico en el municipio de San Pedro La

Laguna, que se registraron durante el año 2013 por el puesto de salud de la localidad, con lo que se pone en evidencia la latencia de enfermedades que pueden estar asociadas al consumo de agua contaminada.

Tabla XXII. **Registros de morbilidad asociada a enfermedades de origen hídrico**

No .	Causas de morbilidad infantil	Niños de 0 a 9 años	Niñas de 0 a 9 años	Niños de 10 a 14 años	Niñas de 10 a 14 años	Número de casos	%
1	Amebiasis	4	2	2	2	10	2 %
2	Parasitosis	130	130	23	28	311	70 %
3	Diarrea	20	18	1	2	41	9 %
4	Infección Intestinal	50	28	2	2	82	18 %
5	Disentería	0	0	0	0	0	0 %
Total						444	100 %

Fuente: elaboración propia, con base en: datos del Centro de Salud del MSPAS.

Con respecto a la contaminación por nutrientes, las elevadas cargas inciden en la aparición de cianobacterias que en algunos de los casos producen cianotoxinas que, al estar en contacto con los seres humanos, son un riesgo latente para la salud.

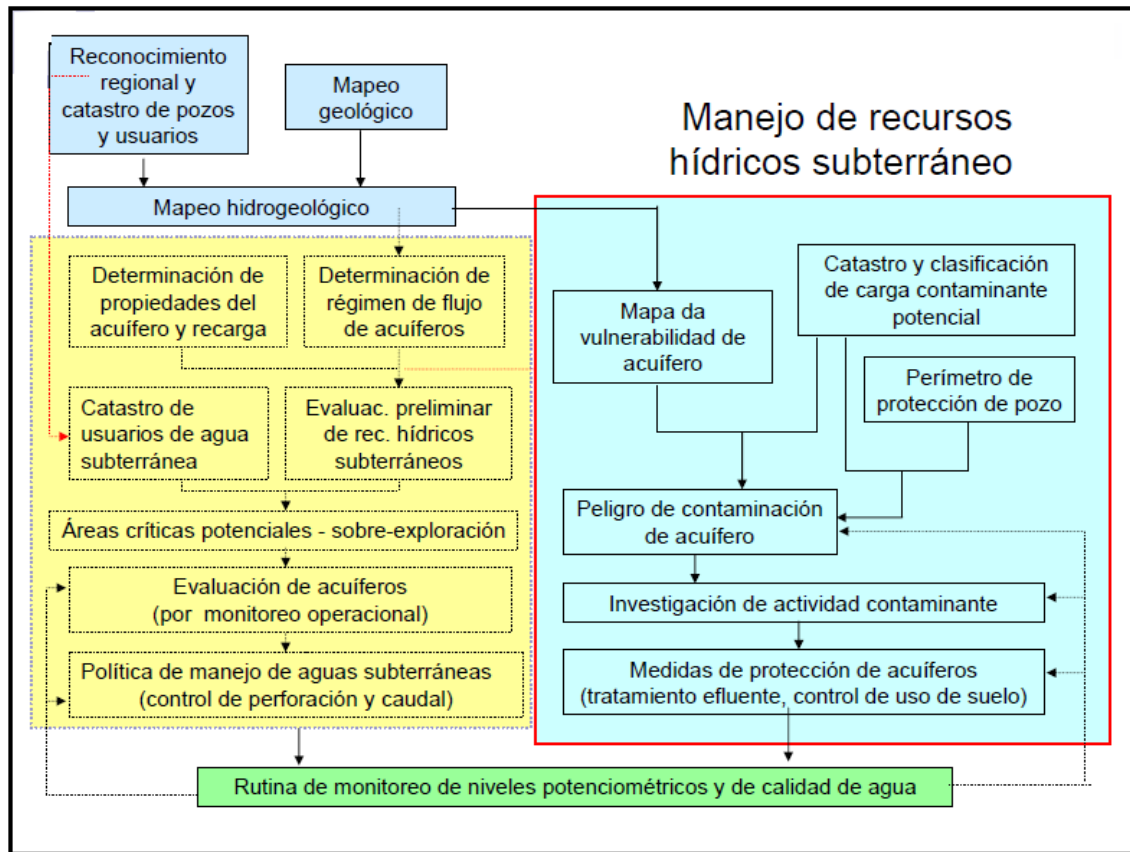
9. PROPUESTA DE ACCIONES

La importancia del control de la calidad de las aguas subterráneas en el acuífero situado en el municipio de San Pedro La Laguna debe ser una prioridad indiscutible, considerando que el suministro de agua para abastecimiento humano corresponde en un 70 % de este. 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. En la zona de estudio no existen iniciativas que se enfoquen en la protección de las aguas subterráneas o en programas de monitoreo de la calidad de las mismas, por lo que, como acción primordial, se plantea el desarrollo de un programa de protección de las aguas subterráneas.

9.1. Programa de protección de aguas subterráneas

Un programa de protección de los recursos hídricos subterráneos se basa en un análisis técnico detallado de las condiciones del acuífero, la vulnerabilidad, las condiciones del entorno y el detalle del terreno y las restricciones de ocupación que deben establecerse. En la figura 77 se presenta un esquema sobre las acciones de un programa de protección de recursos hídricos subterráneos y el vínculo de desarrollo y realización de estas:

Figura 77. Foco y aplicación de niveles de evaluación de peligro de contaminantes



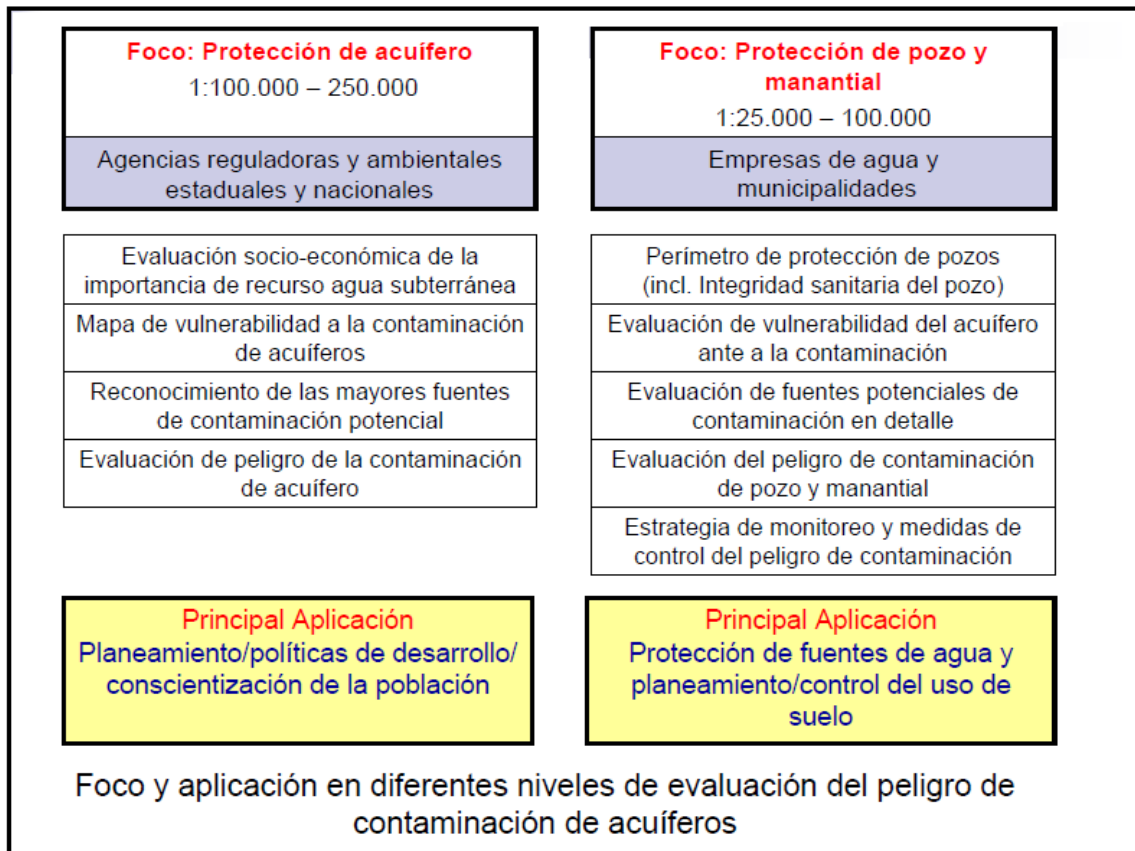
Fuente: HIRATA, R. *La degradación de la calidad de las aguas subterráneas: importancia y causas*. Universidad complutense El Escorial.

http://aguas.igme.es/igme/publica/Resumenes_de_congresos_simposios_jornadas/CursoVeranoEIEscorial/13%20p%20Hirata.pdf. [Consulta: 2016].

Los programas de protección de los acuíferos establecen el foco de protección con base en las dimensiones del acuífero, delimitan responsabilidades

para los distintos actores institucionales y definen una principal aplicación,³⁷ según se indica en la figura 78.

Figura 78. **Foco y aplicación de niveles de evaluación de peligro de contaminantes**



Fuente: HIRATA, R. *La degradación de la calidad de las aguas subterráneas: importancia y causas*. Universidad complutense El Escorial.

http://aguas.igme.es/igme/publica/Resumenes_de_congresos_simposios_jornadas/CursosVeranoElEscorial/13%20p%20Hirata.pdf. [Consulta: enero de 2016].

³⁷HIRATA, R, op. cit.

El análisis que se presenta a continuación es una proyección general, basada en la información obtenida con este estudio y la revisión bibliográfica asociada al tema. El desarrollo de un programa de protección de las aguas subterráneas debe plantearse como una estrategia promovida por las autoridades locales (municipalidad) responsables de la gestión del territorio y los entes reguladores e instituciones asociadas a la gestión del agua del territorio como AMSCLAE, MARN, MSPAS e INFOM.

El programa de protección debe basarse en el control y regulación del uso del suelo, por lo que es imprescindible contar con un plan municipal de ordenamiento territorial frente a:

- La vulnerabilidad del acuífero.
- Inventario y clasificación de las actividades potencialmente contaminantes.
- Establecimiento de los perímetros de protección para pozos y nacimientos.
- Establecimiento de los niveles de riesgo.
- Las proyecciones de crecimiento poblacional y zonas latentes de extensión de la cabecera municipal.

En el capítulo 8 se determinó la vulnerabilidad, el riesgo y el mapa de prioridades, a partir de los cuales se pueden establecer los perímetros de protección, con base en la metodología que se presenta en la figura 79³⁸³⁹.

³⁸FOSTER, 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.*

³⁹HIRATA, Ricardo; REBOUÇAS, Antonio. *La protección de los recursos hídricos subterráneos: una visión integrada, basada en perímetros de protección de pozos y vulnerabilidad de acuíferos.* Boletín geológico y minero, 1999, vol. 110, no 4, p. 79-92.

Figura 79. **Determinación de perímetros de protección para pozos con base en los niveles de prioridad definidos en el acuífero**

		VULNERABILIDAD DE ACUÍFERO			PERIMETRO DE PROTECCIÓN DE POZO			
		BAJA	MOD.	ALTA	IV	III	II	I
CARGA CONTAMINANTE	REDUC.	3	3	2	3	3	1	1
	INTERM.	2	2	1	3	2	1	1
	ELEV.	2	1	1	2	1	1	1
		PRIORIZACIÓN			PRIORIZACIÓN			

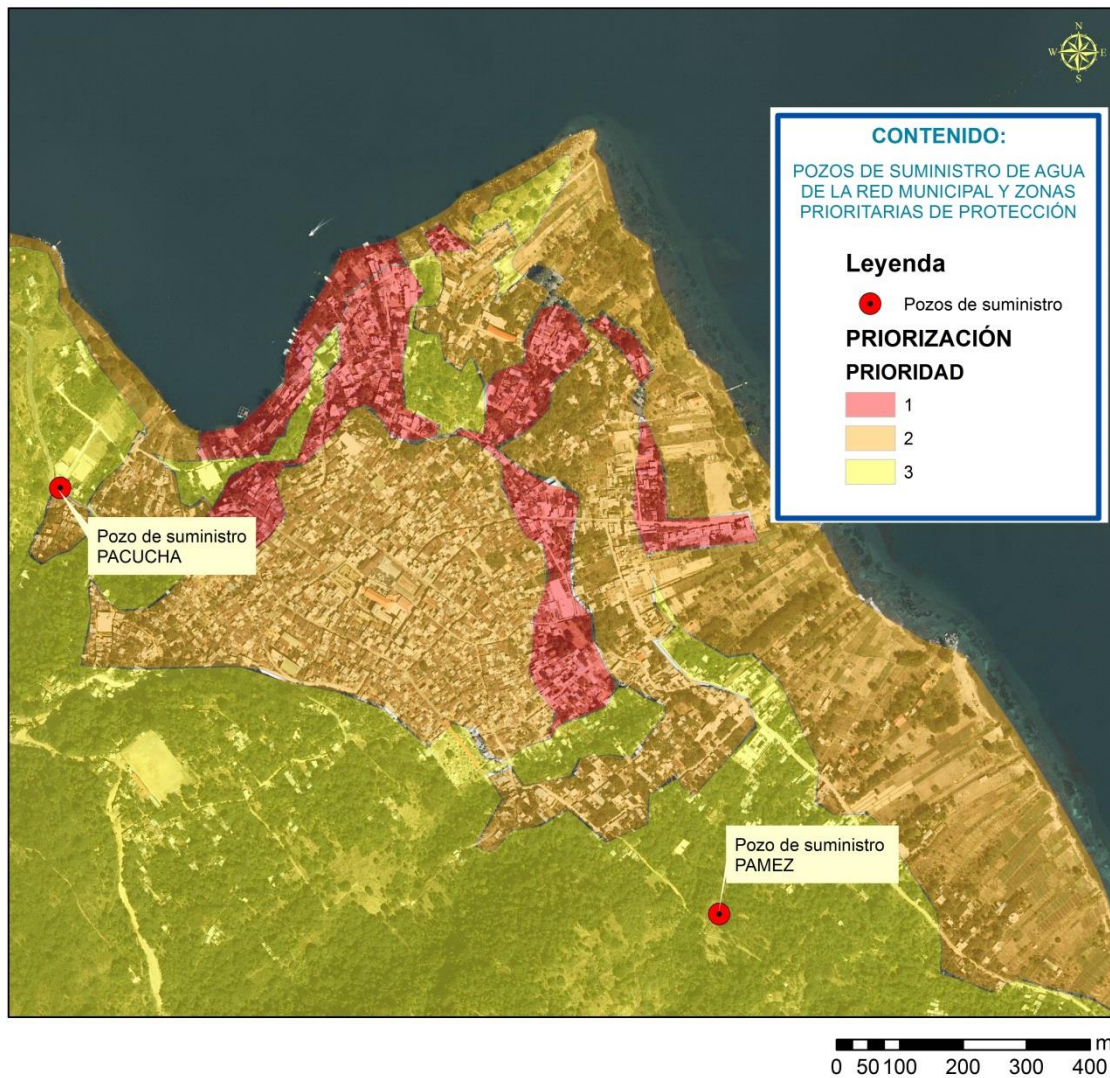
Fuente: HIRATA, R. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología n.2*, 2002.

El método anterior establece 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

Con base en las consideraciones del método y la representación gráfica de la figura 80, en la que se muestra el orden de prioridades y la ubicación de los pozos, se determina que para los pozos de suministro de agua en el municipio, las acciones de protección del acuífero se deben enfocar en la recarga hídrica y protección de derrame de productos químicos.

Figura 80. **Ubicación de pozos de suministro de agua y delimitación de las zonas de priorización de acciones**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

Uno de los fines principales de un programa de protección de aguas subterráneas es la caracterización de las acciones contaminantes y, dependiendo el caso, determinar la remoción/anulación de actividades

potencialmente contaminantes y que signifiquen un peligro potencial para el acuífero.

En la zona de estudio se llegó a determinar que la principal fuente de contaminación son los sistemas de disposición de aguas residuales y, como contención a esta contaminación y considerando las características hidrogeológicas del medio, se deben considerar sistemas de disposición de aguas residuales distintos a la filtración: sistemas de alcantarillado con sistemas de tratamiento acordes a las exigencias de depuración del Lago de Atitlán y/o exportación de las aguas residuales y tratamiento fuera de la cuenca del mismo.

CONCLUSIONES

1. Se determinó que el acuífero sobre el que se emplaza el municipio de San Pedro La Laguna está contaminado con nitratos y coliformes. Estos contaminantes proceden de un aproximado de 1640 m³/día de aguas residuales aportadas a las aguas subterráneas por los sistemas actuales de disposición.
2. En el muestreo en época de lluvia para el parámetro de nitrato, la muestra SP04 sobrepasa el LMP establecido por la norma COGUANOR (50 mg/L NO₃⁻) con un valor de 118,8 mg/L NO₃⁻. Las demás muestras se encuentran dentro del rango de 0,44 mg/L NO₃⁻ y 45.32 NO₃⁻. En el muestreo en época seca, los pozos que tienen concentración mayor al límite máximo permisible de la norma son: SP02, SP03, SP10, SP11, SP12, SP13 y SP17. Los valores del muestreo en época seca oscilan entre 2,93 mg/L y 506 mg/L de NO₃⁻.
3. En el muestreo en época de lluvia las muestras que no presentaron coliformes fecales fueron las SP01, SP09, SP11, SP13, SP15 y SP17, y la única muestra que no presentó coliformes totales fue la SP09. La muestra SP02 presentó la mayor concentración de coliformes fecales con 1100 NMP/100 mL. En el muestreo en época seca, las muestras que no presentaron coliformes fecales son SP02, SP05, SP07, SP11, SP13, SP16 y SP17, y todas las muestras presentaron coliformes totales. Y la muestra SP14, con un valor de 58 NMP/100 mL, tuvo la mayor concentración encontrada.

4. En el muestreo en época de lluvia se determinó que los pozos que no cumplen con parámetros de la norma COGUANOR NTG 29001 son: olor, presente en la muestra COGUANOR NTG 29001 SP13; turbiedad, en las muestras SP02 (76,9 NTU) y SP13 (62,1 NTU); conductividad eléctrica, en la muestra SP13 (3153 $\mu\text{S}/\text{cm}$); pH, en las muestras SP05, SP07 y SP16, con valores de 8,7 (estas corresponden al lago) y la muestra SP13, con valor de 6,9; sólidos disueltos totales, en la muestra SP13 (2142 mg/L); y manganeso 0,6 mg/L.
5. En el muestreo en época seca se determinó que los pozos que no cumplen con parámetros de la norma COGUANOR NTG 29001 son: olor, en la muestra SP13; turbiedad, en las muestras SP02 (73,2 NTU) y SP13 (1253 NTU); conductividad eléctrica, en la muestra SP13 (3666 $\mu\text{S}/\text{cm}$); pH en las muestras SP02 (9,9); sólidos disueltos totales, en la muestra SP13 (2562 mg/L); dureza, en la muestra SP13 (802 mg/L CaCO_3); calcio, en la muestra SP13 (248,5 mg/L Ca); manganeso, en las muestras SP04 (0,95 mg/L Mn) y SP14 (0,55 mg/L Mn); hierro, en la muestra SP13 (5,77 mg/L Fe), y nitritos, en la muestra SP02 (15,23 mg/L NO_2).
6. La influencia del régimen de lluvias en la contaminación del acuífero es notable, dado que se ha observado que la concentración de nitrato en el 75 % de los puntos de muestreo (9 de 12) se incrementó en la época de estiaje, aspecto que puede estar influenciado por un régimen de dilución al momento de la filtración de las aguas pluviales. El mismo comportamiento se obtuvo en cuanto a la dureza total de las muestras de agua, ya que estas aumentaron su concentración en la época de estiaje.

7. Las presencias de nitratos en las aguas subterráneas proporcionan cambios significativos en la composición iónica del agua, tal como se determinó en los análisis de los datos obtenidos por medio del método de Piper, los cuales ocurren en mayor medida en la época de estiaje. Según el análisis de Piper, las aguas están en dos zonas definidas, las cuales son “Bi/carbonatadas, cálcicas y magnésicas”, cuando no se incluye la concentración de nitratos, y “Cloruro, sulfato cálcico y magnésico”, cuando se incluye la concentración e nitratos.
8. La atenuación de bacterias en el estrato no saturado del acuífero es mínimo, dado que la zona de filtración es un lecho fracturado y que las características litológicas de la zona de filtración limitan el desplazamiento de las bacterias, siempre y cuando el tiempo de transporte y atenuación sea el adecuado.
9. Existe un incremento de contaminación bacteriológica desde los puntos de suministro (pozos municipales) y la distribución (grifos en la red), aspectos que se deben a la configuración del sistema de suministro de agua, en el que se mezclan en los tanques de distribución las aguas provenientes de varios puntos y, en algunos casos, se utiliza un sistema de bombeo del lago. Algunos de los puntos de suministro están con una presencia contaminante más alta que otros.
10. Con base en el análisis de vulnerabilidad del acuífero, se determinó que en la zona de estudio existen zonas de vulnerabilidad moderada, alta y extrema, y los pozos de suministro de agua se encuentran dentro de la zona de vulnerabilidad alta y, según el orden de prioridades de protección, las acciones se deben enfocar en la recarga hídrica y protección de derrames de productos químicos.

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

RECOMENDACIONES

1. La importancia de la calidad de las aguas subterráneas en el municipio de San Pedro La Laguna debe ser una prioridad indiscutible, considerando que el suministro de agua para abastecimiento humano corresponde en un 70 % de este.
2. Es importante determinar las implicaciones económicas que se están generando con la contaminación del acuífero (costes en potabilización de agua, pérdidas en turismo por afecciones al paisaje y/o no brindar servicios turísticos con acceso a agua potable), lo cual puede ser un aliciente para despertar la conciencia sobre la necesidad de protección del acuífero.
3. Es importante el desarrollo de un programa de protección de las aguas subterráneas que debe plantearse como una estrategia promovida por las autoridades locales (municipalidad), responsables de la gestión del territorio, y los entes reguladores e instituciones asociadas a la gestión del agua y el territorio como AMSCLAE, MARN, MSPAS e INFOM. El programa de protección debe basarse en el control y regulación del uso del suelo, por lo que es imprescindible contar con un plan municipal de ordenamiento territorial.
4. La principal fuente de contaminación son los sistemas de disposición de aguas residuales y, como contención a esta contaminación y considerando las características hidrogeológicas del medio, se deben considerar sistemas de disposición de aguas residuales distintos a la

filtración: sistemas de alcantarillado con sistemas de tratamiento acorde a las exigencias de depuración del Lago de Atitlán y/o exportación de las aguas residuales, y tratamiento fuera de la cuenca del Lago de Atitlán.

BIBLIOGRAFÍA

1. Agencia de Cooperación Internacional de Japón e Instituto Nacional de Fomento Municipal. *Estudio sobre el desarrollo de las aguas subterráneas en el altiplano central de la república de Guatemala*. Kokusai Koguo CO., LTD. Tokio: JICA, 1995. 392 p.
2. Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno. *La Cianobacteria en el Lago de Atitlán..* Guatemala: AMSCLAE, 2011. 6 p.
3. Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno. / Universidad del Valle de Guatemala. *Reporte científico 2015*. Guatemala: AMSCLAE UVG, 2015. 17 p.
4. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. *Análisis de contaminación de las aguas subterráneas por sistemas de saneamiento básico. Textos completos, 1988*. [en línea]. <http://www.bvsde.ops-oms.org/eswww/fulltext/repind46/analisis/analisis.html>. [Consulta: enero de 2016].
5. DIX, Margaret.; MEDINILLA, Oscar; et al. *Diagnóstico ecológico-social en la cuenca de Atitlán*. Guatemala: publicado por Universidad del Valle de Guatemala/The Nature Conservancy, 2003. 161 p.

6. ELECTRO-WATT. *Atitlán project feasibility report*. Guatemala: Ingenieros Consultores S.A., 1971.74 p.
7. ESPINOZA, Carlos. *Dinámica de aguas subterráneas, vulnerabilidad y riesgo de contaminación. Aplicación al acuífero de Santiago Norte*. Santiago, Universidad de Chile, 2005, p. 69-127.
8. 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.
9. 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
10. 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.
11. GELDREICH, Edwin E.; et al. *The bacteriological aspects of stormwater pollution*. Journal (Water Pollution Control Federation), 1968, p. 1861-1872.
12. GEO Ciencia Aplicada. *Estudio geofísico-sondeos eléctricos verticales, Santiago Atitlán y San Pedro La Laguna*. Guatemala: 2012. 14 p.
13. 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.

14. GERBA, C.P. *Pathogen removal from wastewater during groundwater recharge*. Municipal Wastewater Reuse News 26, 20-23. 1979.
15. HISDROCONSULT. *Estudio Hidrogeológico para la selección de sitios para la perforación de pozos mecánicos para mejora del abastecimiento de agua potable para la cabecera municipal de San Pedro la Laguna, Departamento de Sololá*. Financiado por la Mancomunidad La Laguna (Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento de la Cooperación Española). Guatemala: 2011. 108 p.
16. HIRATA, Ricardo; REBOUÇAS, Antonio. *La protección de los recursos hídricos subterráneos: una visión integrada, basada en perímetros de protección de pozos y vulnerabilidad de acuíferos*. Boletín geológico y minero, 1999, vol. 110, no 4, p. 79-92.
17. HIRATA, R. *Revista latino-americana de hidrogeología No. 2*. 2002. p. 81-90,
18. HIRATA R. *La degradación de la calidad de las aguas subterráneas: importancia y causas*. Universidad complutense El Escorial. [en línea].
http://aguas.igme.es/igme/publica/Resumenes_de_congresos_simposios_jornadas/CursoVeranoEIEscorial/13%20p%20Hirata.pdf.
[Consulta: enero de 2016].

19. Instituto Geológico y Minero de España. *Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España*. Madrid, España: IGME 1985. 281 p.
20. LEWIS, W.J.; FARR, J.L.; FOSTER, S.S.D. *The pollution hazard to village water supplies in eastern Botswana*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 69. Part 2. 1980 281-293p ,
21. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. *Caracterización hidrogeológica de la zona saturada presente en el valle de Chimaltenango*. Guatemala: MAGA, 1991. 85 p.
22. MANCLALAGUNA. *Estudio de pre-factibilidad: soluciones integrales de agua potable y saneamiento en San Pedro La Laguna, Departamento de Sololá*. San Pedro La Laguna: 2011. 97 p.
23. MILIARIUM. *Método POSH (Pollutant Origin Surcharge Hydraulically)* 2008. [en línea]. <http://www.miliarium.com/prontuario/MedioAmbiente/Aguas/MetodoPOSH.asp>. [Consulta: enero de 2016].
24. NEWHALL C. G.; ROSE W.I.; BORNHORST T.J.; SELF. *Quaternary silicic pyroclastic deposits of Atitlan caldera, Guatemala*. Journal of volcanology and Geothermal Research, 33. Elsevier Science Publishers B.V.; Amsterdam: 1987. P. 57-80.
25. OMS / OPS-HPE / CEPIS. *Contaminación de las aguas subterráneas: un enfoque de la situación en América Latina y el Caribe en relación con el suministro de agua potable. 1987, actualizado 2002*. [en

- línea]. www.bvsde.ops-oms.org/eswww/fulltext/repind46/contami/contami.html. [Consulta: enero de 2016].
26. SERVIR. *Contaminación del Lago de Atitlán*. SERVIGLOBAL, 2015. [en línea]. <http://www.servir.net/servir-en-accion/analisis-ambientales/720-contaminacion-lago-atitlan.html>. [Consulta: enero de 2016].
27. SERVIR. Lago de Atitlán. SERVIGLOBAL, 2009. [en línea]. <http://www.servir.net/servir-en-accion/analisis-ambientales/720-contaminacion-lago-atitlan.html>. [Consulta: enero de 2016].
28. Universidad del Valle de Guatemala. *El Lago de Atitlán. Guatemala: su estado ecológico octubre 2009 - diciembre 2011. Artículo de investigación*. Universidad del Valle de Guatemala-Altiplano. 2012. 50 p.
29. WEISS, Charles. *Water Quality Investigations Guatemala, Like Atitlán 1968-1971. A cooperative study involving the Regional School of Sanitary Engineering of the University of San Carlos, the Instituto Geográfico Nacional and the University of North Carolina*. Mayo 1971. 175 p.

APÉNDICES

A.1. Foto 1: sonda piezométrica; Foto 2 – 4: medición de niveles piezométricos en pozos SP02, SP03 y SP04



Fuente: elaboración propia.

A.2. Toma de muestras para pozos



Fuente: elaboración propia.

A.3. Descripción de cada parámetro determinado y el método utilizado

- Olor: la determinación de este parámetro organoléptico es por medio del sentido del olfato del laboratorista.
- Temperatura ($^{\circ}\text{C}$): parámetro determinado *in situ*.
- Turbiedad (NTU): determinada por medio de turbidímetro.
- Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$).
- pH: parámetro determinado *in situ*.
- Sólidos disueltos (mg/L): parámetro determinado *in situ*.
- Cloruros (mg/L): se determina por medio de titulación con nitrato de plata 0,0141 N.
- Dureza total ($\text{mg}/\text{L CaCO}_3$): titulación con EDTA e indicador negro de ericromo T.

- Calcio (mg/L Ca)
- Magnesio (mg/L Mg): determinación por medio de estequiometría con los resultados de dureza total y calcio.
- Sulfatos (mg/L SO₄): se determina en espectrofotómetro marca HACH, por el método de Sulfaver 4.
- Aluminio (mg/L Al): se determina en espectrofotómetro marca HACH, por el método de Aluver 3.
- Manganeso (mg/L Mn): se determina por espectrofotometría.
- Hierro (mg/L Fe): se determina en espectrofotómetro marca HACH, por el método de Ferrover.
- Nitratos (mg/L NO₃): se determina en espectrofotómetro marca HACH, por el método de NitraVer 5. Se utiliza el programa 355.
- Nitritos (mg/L NO₂): se utiliza el programa 371 para nitrito de bajo rango, con Nitriver 3.
- Fosfatos (mg/L PO₄): el programa utilizado es el 490, reactivo FosVer 3.
- Amoniacaco (mg/L NH₃): por medio de reactivo Nessler, programa 380.
- Fluoruros (mg/L F): por medio de reactivo SPADNS, programa 190.
- Alcalinidad
 - Carbonatos (mg/L CaCO₃)
 - Bicarbonatos (mg/ CaCO₃)
- Coliformes fecales (NMP/100 mL) y coliformes totales (NMP/100 ml): se realizó el experimento por medio de tubos de fermentación en series de 3. Se realizó la prueba presuntiva y la confirmativa, por el método Colilert.

La temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos y pH fueron leídos *in situ*. Los demás parámetros fueron obtenidos en laboratorio por medio de titulaciones y espectrofotometría siguiendo los procedimientos del *Standard Methods*.

Los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos realizados se muestran en la tabla IV a la tabla IX de este trabajo, donde los datos enmarcados en rosado son los valores fuera de la norma COGUANOR NTG 29001.

Fuente: elaboración propia.