



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

**DELIMITACIÓN DE PERÍMETROS DE PROTECCIÓN EN POZOS DE AGUA  
MECÁNICOS PARA CONSUMO HUMANO, QUE ABASTECEN EL CAMPUS  
CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

**Oscar René García y García**

Asesorado por el Ing. Fernando Samayoa Roldán

Guatemala, marzo de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DELIMITACIÓN DE PERÍMETROS DE PROTECCIÓN EN POZOS DE AGUA  
MECÁNICOS PARA CONSUMO HUMANO, QUE ABASTECEN EL CAMPUS  
CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**OSCAR RENÉ GARCÍA Y GARCÍA**

ASESORADO POR EL ING. FERNANDO SAMAYOA ROLDÁN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, MARZO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel López Juárez
EXAMINADOR	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Armando Fuentes Roca
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

### **DELIMITACIÓN DE PERÍMETROS DE PROTECCIÓN EN POZOS DE AGUA MECÁNICOS PARA CONSUMO HUMANO, QUE ABASTECEN EL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 18 de febrero de 2018.

**Oscar René García y García**

Guatemala 7 de noviembre de 2019

Ingeniero  
Juan Carlos Linares Cruz  
Coordinador del Área de Planeamiento  
Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero:

Por medio de la presente me permito informar que, en calidad de asesor nombrado por la dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, he procedido a la revisión final del trabajo de graduación titulado **Delimitación de perímetros de protección en pozos mecánicos para consumo humano, que abastecen el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala**, desarrollado por el estudiante universitario Oscar René García y García, Carné No. 2012-12500, determinando que el mismo cumple con los requisitos establecidos, por lo que de la manera más atenta solicito se autorice continuar con los trámites pertinentes para la aprobación final.

Atentamente,



**José Fernando Samayoa Roldán**  
Ingeniero Civil e Hidrogeólogo  
Colegiado No. 2299

---

Ingeniero Civil e Hidrogeólogo José Fernando Samayoa Roldán

Asesor

No. de Colegiado 2299



Guatemala, 25 de noviembre de 2019  
EIC-JP-010-2019/jcl

Ingeniero  
Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Director Escuela Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos

Ingeniero Aguilar:

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **DELIMITACIÓN DE PERÍMETROS DE PROTECCIÓN EN POZOS DE AGUA MECÁNICOS PARA CONSUMO HUMANO, QUE ABASTECEN EL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Oscar René García y García, quien contó con la asesoría del Ingeniero José Fernando Samayoa Roldán.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la Ingeniería nacional y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO  
DE  
PLANEAMIENTO  
USAC



Ing. Civil Juan Carlos Linares Cruz  
Jefe Del Departamento de Planeamiento

Cc: Estudiante Oscar René García y García  
Archivo





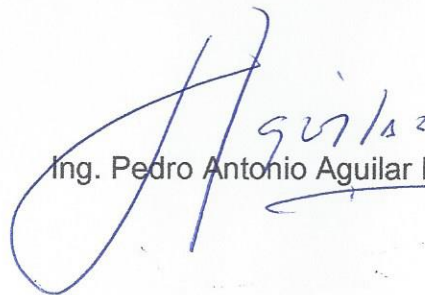
**USAC**  
**TRICENTENARIA**  
 Universidad de San Carlos de Guatemala  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. José Fernando Samayoa Roldán y Coordinador del Departamento de Planeamiento Ing. Juan Carlos Linares Cruz al trabajo de graduación del estudiante Oscar René García y García **DELIMITACIÓN DE PERÍMETROS DE PROTECCIÓN EN POZOS DE AGUA MECÁNICOS PARA CONSUMO HUMANO, QUE ABASTECEN EL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
 Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco



Guatemala, marzo 2020

/mrm.



Universidad de San Carlos  
de Guatemala




Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref.DTG.098.2020

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **DELIMITACIÓN DE PERÍMETROS DE PROTECCIÓN EN POZOS DE AGUA MECÁNICOS PARA CONSUMO HUMANO, QUE ABASTECEN EL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Oscar René García y García**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada  
Decana

Guatemala, marzo de 2020

AACE/asga



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por ser mi guía y brindarme sabiduría para alcanzar esta meta.
- Mis abuelos** Eloísa García (q.e.p.d.) y Norberto García (q.e.p.d.); por sus consejos y su amor incondicional desde siempre, los extraño mucho.
- Mi madre** Rosario García, por su esfuerzo y amor incondicional en todo momento.
- Mercedes y Werner** Por su apoyo desde niño hasta la actualidad, sin ustedes no sería quien soy.
- Mis tíos, tías y primos** Rebeca García, Barbara Ortíz, Demby Rivera, Vivian, Diego, Luis y Edwin Tatuaca (q.e.p.d.), Elvia, Norberto y Randolpho García (q.e.p.d.), espero estés orgulloso, y mi familia en general, por su apoyo y cariño siempre.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por formarme como profesional y ser parte de tan prestigiosa casa de estudios.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por ser una importante influencia en mi carrera entre otras cosas.
<b>Mi asesor</b>	Ingeniero Fernando Samayoa, por su asesoría y compartir su sabiduría para realizar este trabajo de graduación.
<b>Mis amigos</b>	Alejandra Franco, Jaime Rojas, Katy de Paz, Horacio Linares, Gaby Barrios, Antonio Camacho, Eder Quiroa y todos con los que compartí momentos de alegría y satisfacción en toda la carrera.
<b>Mi novia</b>	Evelin, por todo tu amor y apoyo.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XIII
GLOSARIO .....	XV
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
1. DETERMINACIÓN DE ZONAS EN LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN Y SUS RESTRICCIONES .....	1
1.1. Zonas y perímetros de protección para un acuífero .....	1
1.2. Diferentes zonas establecidas en un perímetro de protección.....	3
1.2.1. Zona inmediata o de restricciones absolutas.....	3
1.2.2. Zona próxima o de restricciones máximas .....	4
1.2.3. Zona alejada o de restricciones moderadas .....	4
1.2.4. Zonas satélites de protección .....	5
1.2.5. Zona de protección contra la intrusión.....	5
1.3. Restricción de actividades .....	5
1.4. Criterios para la protección de la cantidad y calidad del agua en un perímetro de protección.....	11
1.4.1. Protección de la calidad de agua en un perímetro de protección.....	11
1.4.1.1. Criterios para la delimitación de perímetros de protección .....	11
1.4.1.1.1. Distancia.....	12

	1.4.1.1.2.	Descenso .....	13
	1.4.1.1.3.	Tiempo de tránsito .....	13
	1.4.1.1.4.	Criterios hidrogeológicos .....	14
	1.4.1.1.5.	Poder autodepurador del terreno .....	14
	1.4.1.2.	Elección del criterio .....	15
	1.4.1.3.	Métodos para la delimitación del perímetro de protección de un pozo mecánico que protege la calidad del agua .....	17
	1.4.1.3.1.	Radio fijo calculado en función del tiempo de tránsito .....	17
	1.4.1.3.2.	Método de Wyssling .....	18
	1.4.1.3.3.	Métodos hidrogeológicos por medio de mapas.....	22
	1.4.2.	Protección de la cantidad de agua en un perímetro de protección .....	22
2.	ESTUDIOS PREVIOS.....		25
2.1.	Demanda urbana en el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala .....		25
2.1.1.	Población y su evolución .....		26
2.1.2.	Volúmenes de consumo de agua potable actual en el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala .....		28

2.1.3.	Volúmenes de consumo de agua potable en el futuro para el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.....	30
2.2.	Actividad socioeconómica del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.....	32
2.3.	Situación geográfica del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala .....	33
2.4.	Marco geológico del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala .....	35
2.5.	Hidrogeología del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.....	39
2.5.1.	Acuífero del valle sur de la Ciudad de Guatemala..	40
2.5.2.	Parámetros hidrogeológicos .....	41
2.5.2.1.	Transmisividad.....	41
2.5.2.2.	Gradiente hidráulico.....	42
2.5.2.3.	Conductividad hidráulica.....	42
2.5.2.4.	Coeficiente de almacenamiento.....	43
2.5.3.	Mapas hidrogeológicos .....	44
2.5.3.1.	Unidades hidrogeológicas .....	44
2.5.3.2.	Red de flujo de aguas subterráneas ....	47
2.6.	Situación actual del abastecimiento de agua potable y otros servicios del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.....	49
2.6.1.	Puntos de abastecimiento .....	49
2.6.1.1.	Pozo 1, División de servicios generales.....	49
2.6.1.2.	Pozo 2, División de servicios generales.....	53

2.6.1.3.	Pozo finca experimental de Veterinaria .....	56
2.6.1.4.	Pozo finca experimental de Agronomía (CEDA) .....	57
2.6.1.5.	Pozo 1, Facultad de Ingeniería.....	58
2.6.1.6.	Pozo 2, Facultad de Ingeniería.....	59
2.6.2.	Red de distribución de agua potable .....	60
2.6.3.	Red de alcantarillado pluvial.....	62
2.6.4.	Red de alcantarillado sanitario .....	63
2.6.5.	Planta de tratamiento de aguas residuales del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.....	64
3.	VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO FRENTE A LA CONTAMINACIÓN.....	69
3.1.	Modos de contaminación de las aguas subterráneas .....	70
3.2.	Clasificación de focos de contaminación en un perímetro de protección.....	71
3.2.1.	Focos contaminantes areales conservativos.....	72
3.2.2.	Focos contaminantes areales no conservativos.....	73
3.2.3.	Focos contaminantes puntuales conservativos .....	74
3.2.4.	Focos contaminantes puntuales no conservativos .....	75
3.3.	Vulnerabilidad frente a la contaminación de las diferentes zonas.....	75
4.	PERÍMETROS DE PROTECCIÓN .....	83
4.1.	Método de radio fijo calculado en función del tiempo de tránsito .....	83

4.1.1.	Conductividad .....	83
4.1.2.	Gradiente hidráulico.....	84
4.1.3.	Porosidad eficaz .....	85
4.1.4.	Tiempo de tránsito .....	85
4.1.5.	Cálculos realizados para el método de radio fijo calculado en función al tiempo de tránsito .....	86
4.2.	Método de Wyssling .....	91
4.2.1.	Espesor saturado promedio del acuífero .....	91
4.2.2.	Caudal real bombeado .....	92
4.2.3.	Cálculos realizados para el método de Wyssling....	92
4.3.	Método hidrogeológico por medio de mapas.....	99
4.4.	Comparación de los métodos de delimitación de perímetros de protección según el tiempo de tránsito .....	104
4.4.1.	Comparación de los perímetros de protección para los pozos mecánicos de agua para consumo humano del campus central de la Universidad de San Carlos obtenidos para tiempo de tránsito de 1 día .....	104
4.4.2.	Comparación de los perímetros de protección para los pozos mecánicos de agua para consumo humano del campus central de la Universidad de San Carlos obtenidos para tiempo de tránsito de 30 días.....	108
4.4.3.	Comparación de los perímetros de protección para los pozos mecánicos de agua para consumo humano en el campus central de la Universidad de San Carlos obtenidos para un tiempo de tránsito de 365 días.....	111

4.5.	Propuesta final de perímetros de protección de la calidad del agua de pozos mecánicos para consumo humano en el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.....	114
4.5.1.	Zona inmediata o de restricciones absolutas .....	114
4.5.2.	Zona próxima o de restricciones máximas .....	115
4.5.3.	Zona alejada o de restricciones moderadas.....	115
5.	MECANISMOS DE CONTROL DE LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DEL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA.....	117
5.1.	Restricción de actividades dentro de los límites de los perímetros de protección de los pozos mecánicos de agua para consumo humano.....	117
5.2.	Sistema de vigilancia de los perímetros de protección para los pozos mecánicos de agua para consumo humano.....	119
5.3.	Protección física de la zona inmediata o de restricciones absolutas en los pozos mecánicos de agua para consumo humano en el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala. ....	121
	CONCLUSIONES.....	125
	RECOMENDACIONES .....	127
	BIBLIOGRAFÍA.....	129
	APÉNDICES.....	133



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Zonificación de los perímetros de seguridad.....	2
2.	Esquema de bombeo en un medio poroso utilizado para determinar el método de Wyssling .....	19
3.	Cálculo de perímetros de protección mediante el método de Wyssling.....	21
4.	Fotografía satelital del territorio del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala .....	33
5.	Localización del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala en el municipio de Guatemala .....	34
6.	Mapa de geológico en las proximidades al campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala .....	37
7.	Mapa de los suelos en las proximidades al campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala .....	38
8.	Mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero del valle sur de la Ciudad de Guatemala .....	45
9.	Perfil hidrogeológico A - A' del acuífero del valle sur de la Ciudad de Guatemala.....	46
10.	Perfil hidrogeológico B - B' del acuífero del valle sur de la Ciudad de Guatemala.....	46
11.	Mapa de flujo de aguas subterráneas del acuífero del valle sur de la Ciudad de Guatemala .....	48
12.	Localización de pozos mecánicos en el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala .....	50

13.	Perfil estratigráfico de pozo 1, División de Servicios Generales, año de perforación 1988.....	52
14.	Perfil estratigráfico de pozo 2, División de Servicios Generales, año de perforación 1988.....	55
15.	Red de distribución de agua potable en el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.....	61
16.	Red de alcantarillado pluvial del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.....	62
17.	Red de alcantarillado sanitario del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.....	63
18.	Esquema de recorrido a la entrada de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC .....	65
19.	Esquema de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.....	66
20.	Diversos tipos de contaminación en las aguas subterráneas .....	70
21.	Uso abusivo de fertilizantes .....	73
22.	Vertederos en ríos .....	74
23.	Mapa de vulnerabilidad superficial en el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.....	78
24.	Puntos de contaminación.....	79
25.	Determinación de gradiente hidráulico en el área de los pozos del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.....	84
26.	Mapa de radio fijo calculado en función del tiempo de tránsito de un día.....	88
27.	Mapa de radio fijo calculado en función del tiempo de tránsito de treinta días.....	89
28.	Mapa de radio fijo calculado en función del tiempo de tránsito de trescientos sesenta y cinco días .....	90

29.	Mapa de perímetro de protección por el método de Wyssling con un tiempo de tránsito de un día.....	96
30.	Mapa de perímetro de protección por el método de Wyssling con un tiempo de tránsito de treinta días .....	97
31.	Mapa de perímetro de protección por el método de Wyssling con un tiempo de tránsito de trescientos sesenta y cinco días .....	98
32.	Mapa de perímetro de protección para la zona inmediata o de restricciones absolutas por medio de mapas hidrogeológicos .....	101
33.	Mapa de perímetro de protección para la zona próxima o de restricciones máximas por medio de mapas hidrogeológicos .....	102
34.	Mapa de perímetro de protección para la zona alejada o de restricciones moderadas por medio de mapas hidrogeológicos.....	103
35.	Mapa de los perímetros de protección obtenidos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 1 día .....	107
36.	Mapa de los perímetros de protección obtenidos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 30 días.....	110
37.	Mapa de los perímetros de protección obtenidos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 1 año .....	113
38.	Combinación de muro de block de 39x19x14cm y malla de acero galvanizado con 2.5 metros de altura.....	122

## **TABLAS**

I.	Zonación de los perímetros de protección en la antigua República Federal Alemana.....	7
II.	Regulación de actividades en las diversas zonas en que se dividen los perímetros de protección de captaciones en Alemania .....	8
III.	Planificación de actividades en los perímetros de protección .....	9

IV.	Valoración de los criterios utilizados en la delimitación de los perímetros de protección en función de consideraciones técnicas .....	16
V.	Alumnos inscritos en el campus central por unidad académica, período 2009 - 2019.....	27
VI.	Dotaciones de agua para planteles educacionales.....	29
VII.	Crecimiento poblacional por ciclo académico 2009 – 2018 .....	31
VIII.	Eras geológicas de la Tierra .....	36
IX.	Datos técnicos del pozo 1 de División de Servicios Generales .....	51
X.	Datos técnicos del pozo 2 de División de Servicios Generales .....	53
XI.	Datos técnicos del pozo de finca experimental de Veterinaria.....	56
XII.	Datos técnicos del pozo de la finca experimental de Agronomía (CEDA). .....	57
XIII.	Datos técnicos del pozo 1 de la Facultad de Ingeniería.....	59
XIV.	Datos técnicos del pozo 2 de la Facultad de Ingeniería.....	60
XV.	Comparación entre resultados de estudios realizados por ERIS y límites máximos permisibles establecidos en el Acuerdo Gubernativo 236 - 2 006 .....	67
XVI.	Resumen de datos a utilizar para el método de radio fijo calculado en función del tiempo de tránsito .....	86
XVII.	Resumen de resultados por el método del radio fijo calculado, en función del tiempo de tránsito .....	87
XVIII.	Datos necesarios para la elaboración del método Wyssling.....	91
XIX.	Resumen de caudales obtenidos en cada uno de los pozos del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.....	92
XX.	Resumen de datos a utilizar para el método de Wyssling .....	93
XXI.	Comparación de los perímetros de protección de los pozos mecánicos de agua para consumo humano en el campus central de la Universidad de San Carlos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 1 día .....	105

XXII.	Comparación de los perímetros de protección de los pozos mecánicos de agua para consumo humano en el campus central de la Universidad de San Carlos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 30 días .....	108
XXIII.	Comparación de los perímetros de protección de los pozos mecánicos de agua para consumo humano en el campus central de la Universidad de San Carlos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 365 días .....	111
XXIV.	Implementación de restricción de actividades que se practican dentro de los perímetros de protección de los pozos mecánicos de agua para consumo humano del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala .....	118



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
<b>B</b>	Anchura del frente de llamada
<b>B'</b>	Anchura del frente de llamada a la altura de la captación
<b>Q</b>	Caudal real bombeado
<b>K</b>	Conductividad
<b>Su</b>	Distancia de aguas abajo en dirección del flujo del agua subterránea
<b>d</b>	Distancia aguas arriba de la captación hasta la línea de tiempo de tránsito
<b>So</b>	Distancia de aguas arriba en dirección del flujo del agua subterránea
<b>b</b>	Espesor saturado del acuífero
<b>i</b>	Gradiente hidráulico
<b>°</b>	Grados
<b>g</b>	Gramo
<b>l</b>	Litro
<b>m</b>	Metro
<b>msnm</b>	Metros sobre nivel del mar
<b>mg</b>	Miligramo
<b>mg/l</b>	Miligramo sobre litro
<b>mm</b>	Milímetro
<b>“</b>	Minutos
<b>‘</b>	Pie

<b>me</b>	Porosidad eficaz
<b>“</b>	Pulgada
<b>Xo</b>	Radio de llamada
<b>li</b>	Radio de protección de captación
<b>‘</b>	Segundos
<b>t</b>	Tiempo de tránsito
<b>Ve</b>	Velocidad lineal media



## GLOSARIO

<b>Acuífero</b>	Estructura subterránea que alberga agua.
<b>Acuífugo</b>	Formación geológica subterránea que se caracteriza por ser impermeable.
<b>Acuitardo</b>	Formación geológica semipermeable que absorbe cantidades vastas de agua; sin embargo, es muy difícil transmitir las o extraerlas de una forma eficiente.
<b>Andesita</b>	Tipo de roca ígnea volcánica compuesta de plagioclasa y varios minerales ferromagnésicos.
<b>Anisótropo</b>	Cuerpo que ofrece distintas propiedades cuando se examina o ensaya en direcciones diferentes.
<b>Autodepurador</b>	Es la capacidad que tiene un medio que recibe o ha recibido una carga contaminante, de recuperar las condiciones fisicoquímicas y biológicas previas a su contaminación.
<b>Captación</b>	Cualquier tipo de mecanismo para la recolección y almacenamiento de agua de una fuente, ya sea superficial o subterránea.

<b>Cartografía</b>	Ciencia que estudia los mapas y cartas geográficas y cómo realizarlos.
<b>Conductividad</b>	Representa la facilidad que tiene el medio para dejar pasar el agua a través de él por unidad de área transversal a la dirección del flujo.
<b>Dacitas</b>	Roca ígnea volcánica con alto contenido de hierro.
<b>Degradabilidad</b>	Capacidad de una sustancia de descomponerse en compuestos o elementos menos complejos.
<b>EPA</b>	<i>Environmental Protection Agency</i>
<b>Fluvial</b>	Se refiere a procesos asociados a los ríos, arroyos, depósitos y relieves creados por ellos.
<b>Geomorfología</b>	Parte de la geodesia que estudia la figura del globo terráqueo y la formación de los mapas.
<b>Gradiente</b>	Magnitud vectorial determinada por el incremento de potencial del agua por unidad de distancia.
<b>Infiltración</b>	Proceso en el cual el agua de la superficie de la tierra entra en el suelo.
<b>Intrínsecas</b>	Propio o característico de la cosa que se expresa por sí misma y no depende de las circunstancias.

<b>Isócronas</b>	Línea que une los puntos que tienen el mismo tiempo de desplazamiento en un mapa.
<b>Isopiezas</b>	Línea que une los puntos de un terreno en los que la cabeza de presión del agua subterránea de un acuífero tiene el mismo valor.
<b>Paralelismo</b>	Igualdad de distancia entre todos los puntos de dos o más líneas o planos.
<b>Piezométrico</b>	Altitud o profundidad de límite entre capa freática y la zona no saturada en un acuífero.
<b>Porosidad</b>	Medida de espacios vacíos en un material. Es una fracción del volumen de huecos sobre el volumen total.
<b>Ramblas</b>	Cauce con caudal temporal y ocasional, debido a las lluvias.
<b>Sedimentos</b>	Material sólido que se acumula en la superficie terrestre y que surge por la acción de diversos fenómenos naturales que actúan en la atmósfera, hidrósfera y biosfera.
<b>Sondeo</b>	Perforaciones del terreno que sirven para localizar y alcanzar agua subterránea para su aprovechamiento.

**Transmisividad**

Tasa de flujo bajo un determinado gradiente hidráulico a través de una unidad de anchura de acuífero de espesor dado, y saturado.

## RESUMEN

Este trabajo de graduación se enfoca en establecer áreas de protección de agentes contaminantes en las cercanías de los pozos mecánicos de agua para consumo humano del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en los cuales se pueda prohibir ciertas actividades o propiciar la implementación de personal de seguridad con este fin.

En el primer capítulo se abordan conceptos generales de los perímetros de protección, restricciones que se han implementaron en otros países hace más de cuarenta años y comparación con la actualidad, y los diferentes métodos a utilizar. Luego se muestran los estudios necesarios para aplicar cada uno de los métodos para la protección de los pozos.

En el tercer capítulo se muestran las maneras como puede ser contaminado un acuífero; se identifica y clasifica cada uno de los focos contaminantes según la situación en la que se encuentre.

En el cuarto y quinto capítulo se presenta el marco práctico con el desarrollo de cada uno de los métodos utilizados y el análisis de resultados, respectivamente. Se elabora una lista de normas que se deben implementar para hacer efectiva la protección de los pozos de protección a corto y mediano plazo, que se encuentran dentro del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Delimitar perímetros de protección en pozos mecánicos de agua para consumo humano en el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

### **Específicos**

1. Explicar el proceso e importancia de la delimitación de perímetros de protección en pozos mecánicos de agua potable.
2. Identificar cada uno de los pozos mecánicos del campus central de la Universidad de San Carlos en los que se propondrá la implementación de límites de protección.
3. Analizar las actividades realizadas en el campus central de la Universidad de San Carlos que puedan presentar infiltración dañina para el acuífero proveedor de agua para consumo humano en el sector.
4. Establecer las áreas de protección utilizando 3 métodos de delimitación de límites de protección en pozos mecánicos de agua para consumo humano.

5. Proponer medidas de protección para los límites de protección en pozos mecánicos de agua potable para el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.



## INTRODUCCIÓN

La protección de los pozos mecánicos de agua potable en Guatemala no existe. Normalmente, la única protección que tiene un pozo mecánico en donde sea que se realice, es el cercado por malla metálica o muro block, la función principal de estos es evitar el robo del equipo de bombeo. Actualmente no se tiene la cultura ni la legislación adecuada para la protección de agua, subterránea y superficial, que es utilizada para consumo humano.

Debido a la falta de legislación para la protección de agua para consumo humano y la falta de conciencia de la población en general, se tiene una calidad de agua superficial y subterránea para consumo humano muy baja. Por este motivo se debe invertir grandes cantidades de dinero en el tratamiento del recurso hídrico para abastecer a una población. Sin embargo, existen métodos preventivos los cuales a lo largo del tiempo llegan a dar resultados positivos en la calidad del agua que se extrae. Uno de esos es la protección por medio de perímetros en los pozos mecánicos de agua potable.

El presente trabajo de investigación ayuda a dimensionar el problema de contaminación que tenemos como ciudadanos de un país rico en recursos naturales y el inicio para la gestión de protección por medio de perímetros para los pozos mecánicos de agua potable, comenzando por los que se encuentran dentro del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.



# 1. DETERMINACIÓN DE ZONAS EN LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN Y SUS RESTRICCIONES

## 1.1. Zonas y perímetros de protección para un acuífero

La manera más eficiente de resguardar un acuífero de la contaminación es paralizar cualquier actividad potencialmente contaminante sobre el área de recarga. Lo complicado de este método es que es inviable llevar a cabo, ya que no se puede prohibir actividades en un área poblada, ya que implicaría limitar en locomoción y demás actividades, principalmente económicas, a la población.

“Desde los años ochenta en Europa, se ideó una manera más adecuada de cuidar un acuífero, que consiste en la delimitación de perímetros de protección. Este método radica en establecer un sistema de zonas que rodea los pozos mecánicos utilizados para la extracción de agua potable para actividades cotidianas o para consumo humano. Adentro de estos perímetros de protección se limitan de forma gradual las labores capaces de interferir negativamente en la calidad del agua subterránea en función a la cercanía del pozo mecánico.”<sup>1</sup>

El perímetro tiene como objetivo asegurar que la calidad del agua extraída no sea afectada y no sobrepase los límites aceptables de sustancias químicas perjudiciales para el consumo humano, como lo establece la norma COGUANOR NTG 29 001.

Al delimitar los perímetros de protección, es necesario y de ámbito obligatorio, llegar a un acuerdo con la comunidad que se encuentra dentro de

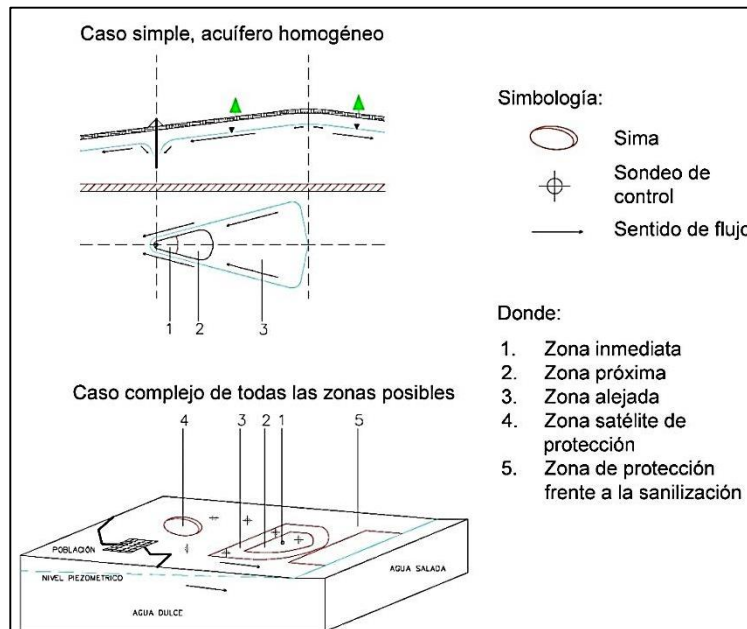
---

<sup>1</sup> MORENO MERINO, Luis. y MARTÍNEZ NAVARRETE, Carlos. *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas.* p. 11. 5.

los límites ya mencionados; en este caso, la comunidad estudiantil de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Solo así se llegará a establecer una protección adecuada al acuífero, sin afectar las actividades económicas de la localidad de una manera negativa.

A continuación, se muestra cómo es empleado este sistema con mucha frecuencia. Se basa en la división del perímetro en muchas zonas alrededor de una captación, graduados de mayor a menor envergadura en cuanto a restricción de actividades (figura 1).

Figura 1. **Zonificación de los perímetros de seguridad**



Fuente: *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas*, ITGE 1991. Zonación de los perímetros de protección y restricción de actividades. p. 12.

## **1.2. Diferentes zonas establecidas en un perímetro de protección**

“Las dimensiones, determinación de zonas, características técnicas y restricciones de los perímetros de protección, se deben considerar en función de criterios objetivos de protección de la cantidad y calidad del agua y de una compatibilización con la ordenación del territorio y la actividad económica en el entorno de la captación.”<sup>2</sup>

Con base en lo mencionado, se realizará un estudio para establecer estos perímetros de protección en la zona más cercana al campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Se tomará como base las técnicas, metodologías y criterios recomendados en la guía para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas, establecida por el Instituto Tecnológico Geo Minero de España, del año 1991.

### **1.2.1. Zona inmediata o de restricciones absolutas**

“Es la más próxima a la captación, su fin primordial consiste en proteger ésta, y sus instalaciones contra inclemencias climatológicas, animales y desaprensivos; asimismo, impide los vertidos e infiltraciones directas sobre las mismas.”<sup>3</sup>

Como principal premisa para esta zona se toma como criterio el tiempo de tránsito. Este es un criterio en el cual “se evalúa el tiempo que un contaminante tarda en llegar a la captación que se pretende proteger.”<sup>4</sup>

---

<sup>2</sup> MORENO MERINO, Luis. y MARTÍNEZ NAVARRETE, Carlos. *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas.* p. 18.

<sup>3</sup> *Ibíd.* p. 11.

<sup>4</sup> *Ibíd.* p. 97.

Este criterio para la zona de restricciones absolutas establece un tiempo de tránsito de 1 día. La extensión en área es pequeña, alrededor de 100 a 400 metros cuadrados donde se incluye el cuarto de máquinas. En el caso que exista algún tipo de grietas o fisuras o el suelo sea altamente absorbente, es necesario ampliar la zona inmediata.<sup>5</sup>

### **1.2.2. Zona próxima o de restricciones máximas**

“Representa el cuerpo principal del perímetro. Comprende un área de extensión variable pero suficiente para proteger el agua contra su contaminación, ya sea asegurando la inactivación, eliminación o dilución del contaminante, ya sea permitiendo una alerta a tiempo para tomar las medidas adecuadas antes de que la sustancia extraña llegue a la captación.

El dimensionado de la zona próxima se hace generalmente en función de un criterio de tiempo de tránsito (50 a 60 días), pretendiendo con ello proteger totalmente contra la contaminación microbiológica y lo más posible contra la química.”<sup>6</sup>

### **1.2.3. Zona alejada o de restricciones moderadas**

“Tiene por objeto proteger frente a contaminantes químicos persistentes o radioactivos. También frente a algunos contaminantes biológicos de alta perdurabilidad en el agua.

El criterio más adecuado para su dimensionado es el de tiempo de tránsito (10 días), aunque para la correcta evaluación de su extensión y forma los

---

<sup>5</sup> MORENO MERINO, Luis. y MARTÍNEZ NAVARRETE, Carlos. *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas*. p. 18.

<sup>6</sup> *Ibíd.* p. 11

criterios geológicos e hidrogeológicos constituyen un importante factor, en especial en el caso de materiales kársticos o fisurados."<sup>7</sup>

#### **1.2.4. Zonas satélites de protección**

"Sus restricciones son iguales a las de la zona próxima. Requieren para su determinación un hidrogeológico en detalle. Su existencia debería considerarse siempre en acuíferos kársticos o fisurados."<sup>8</sup>

#### **1.2.5. Zona de protección contra la intrusión**

"En su interior se limitarán las extracciones de agua y todas aquellas actividades que pueden modificar la posición del frente salino. Su determinación se realizará en base a criterios hidrogeológicos."<sup>9</sup>

Estas limitaciones serán afectadas más que todo en zonas costeras.

### **1.3. Restricción de actividades**

En España se restringen actividades con la ayuda de su legislación, la cual ya tiene establecida una Ley de Aguas desde el año 1985. Gracias a este reglamento pueden prohibir acciones o construcciones dentro de un perímetro de protección que pudieran ser perjudiciales a la calidad y cantidad de agua de un acuífero. También tienen apoyo del Reglamento del dominio público hidráulico desde 1986 y Reglamentación técnico-sanitario para el

---

<sup>7</sup> MORENO MERINO, Luis. y MARTÍNEZ NAVARRETE, Carlos. *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas*. p. 19.

<sup>8</sup> *Ibíd.* p. 19

<sup>9</sup> *Ibíd.* p. 11.

abastecimiento y control de la calidad de las aguas potables de consumo humano público elaborado en el año 1990.

Dichas actividades, que son respaldadas para ser restringidas por la legislación española, son las siguientes:

- “Obras de infraestructura: minas, canteras, extracción de áridos.
- Actividades urbanas: fosas sépticas, cementerios, almacenamiento, transporte y tratamiento de residuos sólidos o aguas residuales.
- Actividades industriales: almacenamiento, transporte y tratamiento de hidrocarburos líquidos o gaseosos, productos químicos, farmacéuticos y radioactivos, industrias alimentarias y mataderos.
- Actividades recreativas, camping, zonas de baños.”<sup>10</sup>

Como se observa, la magnitud e importancia de las restricciones podría paralizar cualquier actividad y evitar el desarrollo económico de una localidad si se aplicara por la extensión del perímetro establecido. No obstante, no son ejecutadas las limitantes en toda su extensión.

Como se muestra, en la tabla I, la determinación de zonas en un perímetro de protección existente en la antigua Alemania Federal siendo una de las más completas y sirvió de modelo para otros países de Europa. En esa legislación el criterio empleado para definir las zonas, varía según el tipo de suelo en la superficie del acuífero y sus características hidrogeológicas. Las regulaciones de actividades existentes en esas zonas se reflejan en la tabla II.

---

<sup>10</sup> MORENO MERINO, Luis. y MARTÍNEZ NAVARRETE, Carlos. *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas*. p. 14.



Tabla I. **Zonación de los perímetros de protección en la antigua República Federal Alemana**

<b>Zona I</b>	Al menor 10 m, 20 si es necesario, alrededor de la captación.			<b>MEDIO POROSO</b>
<b>Zona II</b>	Profundidad del nivel piezométrico < 4 m	Velocidad eficaz < 10 m/día	El límite de la zona corresponde a un tiempo de tránsito de 50 días extendiéndose aguas arriba de la captación una distancia $\geq$ 100 m.	
		Velocidad eficaz > 10 m/día	Zona II A:	
Zona II B:	El límite corresponde a un tiempo de tránsito de 50 días. Restricciones Zona II salvo para empleo agrícola del suelo. Restricción Zona III A.			
Profundidad del nivel piezométrico > 4 m	Se tiene en cuenta el poder depurador del suelo, por ello puede reducirse la extensión de la zona.			
	Velocidad efectiva > 10 m/día	Zona II A:	El límite corresponde a un tiempo de tránsito de 10 días, considerándose el paso a través de la zona no saturada. Restricciones como la Zona II.	
		Zona II B:	El límite corresponde a un tiempo de tránsito de 50 días, teniendo en cuenta el paso por la zona no saturada. Restricciones para el uso agrícola del suelo como en la Zona III A, otras restricciones como en la Zona II.	
<b>Zona III</b>	Profundidad del nivel piezométrico < 4 m	Áreas de alimentación pequeñas	Extensión lateral de la Zona III hasta los límites de la zona de llamada captación, aguas arriba la captación la Zona III se extiende hasta el límite del área de alimentación. Restricciones Zona III.	
		Áreas de alimentación grandes	Zona III A:	
	Zona III B:		Se extiende hasta el límite del área de alimentación.	
Profundidad del nivel piezométrico > 4 m	Se tiene en cuenta el poder auto depurador del suelo			
<b>Zona I</b>	Extensión de 30 m x 30 m. Servidumbres Zona I.			<b>MEDIO KARSTICO</b>
<b>Zona II</b>	Comprende todas las superficies con riesgo de polución extensión de 300 m aguas arriba y 1000 m para los manantiales.			
	Zona II A:	Como Zona II.		
Zona II B:	Zonas satélites con riesgo: abonos líquidos prohibidos fuera del período de vegetación.			
<b>Zona III</b>	Corresponde al límite del área de alimentación si está incluida el límite correspondiente a 50 días de tránsito debe ser ubicada en la Zona I, puede ser dividida en Zona III A y Zona III B.			

Fuente: *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas*, ITGE 1991. *Zonación de los perímetros de protección y restricción de actividades*. p.16.

**Tabla II. Regulación de actividades en las diversas zonas en que se dividen los perímetros de protección de captaciones en Alemania**

Actividades	Zona I	Zona II	Zona III A	Zona III B
Circulación peatonal o de otro tipo	Prohibido			
Todo uso agrícola del terreno	Prohibido			
Construcción, explotaciones industriales y agrícolas	Prohibido	Prohibido		
Silos	Prohibido	Prohibido		
Establos	Prohibido	Prohibido		
Terrenos y almacenes de construcción	Prohibido	Prohibido		
Carreteras, rutas de ferrocarril	Prohibido	Prohibido		
Terrenos de camping y deportivos	Prohibido	Prohibido		
Superficies de agua	Prohibido	Prohibido		
Cementerios	Prohibido		Prohibido o reglamentado	Prohibido o reglamentado
Canteras y excavaciones	Prohibido		Prohibido o reglamentado	
Explotación minera	Prohibido			
Transporte de materiales radioactivos	Prohibido	Prohibido		
Vertido de hidrocarburos	Prohibido	Prohibido		
Pastoraje de animales	Prohibido	Prohibido	Prohibido o reglamentado	
Aplicación y utilización no controlada de abonos orgánicos y minerales	Prohibido	Prohibido		
Transporte de aguas residuales	Prohibido	Prohibido		
Zanjas llegas de agua	Prohibido	Prohibido		
Zanjas receptoras	Prohibido	Prohibido		
Estanques	Prohibido	Prohibido		
Aplicación de herbicidas y pesticidas	Prohibido	Prohibido	Prohibido o reglamentado	
Desagüe de aguas residuales	Prohibido	Prohibido	Prohibido o reglamentado	
Depósitos de hidrocarburos	Prohibido	Prohibido	Prohibido o reglamentado	Prohibido o reglamentado
Estaciones de servicio	Prohibido	Prohibido	Prohibido o reglamentado	
Aeropuertos	Prohibido	Prohibido	Prohibido o reglamentado	
Terrenos militares	Prohibido	Prohibido	Prohibido o reglamentado	
Vertederos	Prohibido	Prohibido	Prohibido o reglamentado	
Estaciones de depuración	Prohibido	Prohibido	Prohibido o reglamentado	
Peroraciones petrolíferas o de gas	Prohibido	Prohibido	Prohibido o reglamentado	
Canalización de productos tóxicos	Prohibido	Prohibido	Prohibido o reglamentado	Reglamentado
Depósitos y productos de desechos químicos o radioactivos	Prohibido	Prohibido	Prohibido o reglamentado	Prohibido o reglamentado
Refererías y fábricas químicas	Prohibido	Prohibido	Prohibido o reglamentado	Prohibido o reglamentado

Fuente: *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas, ITGE 1991. Zonación de los perímetros de protección y restricción de actividades. p.17.*

En la tabla III se muestran las actividades restringidas actualmente en España según las zonas descritas en la guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas.

Tabla III. **Planificación de actividades en los perímetros de protección**

Definición de Actividades	Zona de restricciones absolutas	Zonas de restricciones máximas y zonas satélites			Zonas de restricciones moderadas			Zona de protección contra la intrusión salina			Zona de protección de la cantidad			
	Prohib.	Prohib.	Condic.	Permit.	Prohib.	Condic.	Permit.	Prohib.	Condic.	Permit.	Prohib.	Condic.	Permit.	
Actividades Agrícolas	Uso de fertilizantes	X	X				X							
	Uso de herbicidas	X	X				X							
	Uso de pesticidas	X	X				X							
	Almacenamiento de estiércol	X	X				X							
	Vertido de restos de animales	X	X				X							
	Ganadería intensiva	X	X				X							
	Ganadería extensiva	X	X					X						
	Almacenamiento de materias fermentables para alimentación del ganado	X	X				X							
	Abrevaderos ferugios de ganado	X	X				X							
	Silos	X	X				X							
Actividades Urbanas	Vertidos superficiales de aguas residuales urbanas sobre el terreno	X	X				X							
	Vertidos de aguas residuales urbanas en pozos negros, balsas o fosas sépticas	X	X			X								
	Vertidos de aguas residuales urbanas en cauces públicos	X	X			X								
	Vertido de residuos sólidos urbanos	X	X			X								
	Cementerios	X	X											

Continuación de la tabla III.

Definición de Actividades	Zona de restricciones absolutas	Zonas de restricciones máximas y zonas satélites			Zonas de restricciones moderadas			Zona de protección contra la intrusión salina			Zona de protección de la cantidad		
	Prohib.	Prohib.	Condic.	Permit.	Prohib.	Condic.	Permit.	Prohib.	Condic.	Permit.	Prohib.	Condic.	Permit.
Actividades Industriales	Asentamientos industriales	X	X										
	Vertidos residuos líquidos industriales	X	X			X							
	Vertidos residuos sólidos industriales	X	X			X							
	Almacenamiento de hidrocarburos	X	X										
	Depósitos de productos radioactivos	X	X			X							
	Inyección de residuos industriales en pozos y sondeos	X	X			X							
	Conducciones de líquido industrial	X	X			X							
	Conducciones de hidrocarburos	X	X			X							
	Apertura y explotación de canteras	X	X				X						
	Relleno de canteras o excavaciones	X	X					X					
Otras	Campings	X	X				X						
	Ejecución de nuevas perforaciones o pozos	X	X				X		X			X	
	Acceso peatonal	X			X								
	Drenaje de marjalarías y zonas húmedas								X			X	
	Drenajes geotécnicos								X			X	
	Transporte redes de comunicaciones	X		X			X						

Fuente: *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas, ITGE 1991. Zonación de los perímetros de protección y restricción de actividades. p. 21.*

#### **1.4. Criterios para la protección de la cantidad y calidad del agua en un perímetro de protección**

Los perímetros de protección se pueden enfocar para dos funciones diferentes, protección de calidad de agua y protección de cantidad de agua. Los métodos que se emplea para cada situación son diferentes.

##### **1.4.1. Protección de la calidad de agua en un perímetro de protección**

Para establecer el perímetro para la protección de la calidad del agua es necesario establecer los criterios que se van a utilizar.

##### **1.4.1.1. Criterios para la delimitación de perímetros de protección**

“Para proceder a delimitar un perímetro de protección, debe elegirse previamente en base a qué criterios se va a definir, puesto que los objetivos que se pretenden obtener, variarán en función de éste. Los empleados usualmente son los siguientes:

- Evitar que debido al bombeo en la captación se produzcan variaciones en el flujo del agua subterránea en las inmediaciones de esta que puedan provocar la llegada de sustancias indeseables a la misma (distancia, descenso).
- Asegurar que la contaminación será inactivada en el trayecto entre el punto de vertido y su lugar de extracción (poder auto depurador del terreno, tiempo de tránsito, distancia).

- Proporcionar un tiempo de reacción que permita el empleo de otras fuentes de abastecimiento alternativas, hasta que se reduzca a niveles tolerables el efecto de una contaminación (tiempo de tránsito).
- Garantizar la protección de la calidad de las aguas subterráneas en la totalidad del área de alimentación de una captación (criterios hidrogeológicos).<sup>11</sup>

Ya establecidos se analizará cada uno de ellos:

#### **1.4.1.1.1. Distancia**

“Consiste en delimitar un área definida por un círculo con centro en la captación.

Su tamaño es una decisión arbitraria del organismo encargado del control de la calidad de las aguas subterráneas, si bien éste define frecuentemente sus dimensiones como una media de las obtenidas al aplicar en diferentes casos otros criterios más completos.

Es el más elemental de los existentes, pudiendo valorarse como poco eficaz, puesto que no incorpora ninguna consideración sobre las condiciones de flujo de agua subterránea, ni respecto a los procesos implicados en el transporte de los contaminantes en cada caso particular.”<sup>12</sup>

---

<sup>11</sup> MORENO MERINO, Luis. y MARTÍNEZ NAVARRETE, Carlos. *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas*. p. 94.

<sup>12</sup> *Ibíd.*

#### **1.4.1.1.2. Descenso**

“Este criterio se basa en considerar que en el área en la cual desciende el nivel del agua subterránea, debido al efecto del bombeo, se producen cambios en la dirección del flujo subterráneo y un aumento de la velocidad con la que el agua llega a la captación, debido al incremento del gradiente hidráulico, produciendo o acelerando la migración del contaminante hacia ella.”<sup>13</sup>

#### **1.4.1.1.3. Tiempo de tránsito**

“Mediante este criterio se evalúa el tiempo que un contaminante tarda en llegar a la captación que se pretende proteger.

(...) El objetivo que se pretende con su aplicación es definir zonas alrededor de las captaciones con la suficiente amplitud para que el resultado de una actividad contaminante tarde en llegar a la misma un tiempo determinado que permita su degradación, o proporcione una capacidad de reacción que haga posible un cambio temporal en la fuente de suministro a la población, hasta que la degradación de la calidad de las aguas extraídas disminuya a límites aceptables.

La mayor parte de países han elegido como criterio para definir la zonación el perímetro un tiempo de tránsito de 1 día en la zona inmediata, 50-60 días en la zona próxima y 10 años en la zona alejada en función de la degradabilidad de los agentes contaminantes.”<sup>14</sup>

---

<sup>13</sup> MORENO MERINO, Luis. y MARTÍNEZ NAVARRETE, Carlos. *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas*. p. 94

<sup>14</sup> *Ibíd.* p. 97.

#### **1.4.1.1.4. Criterios hidrogeológicos**

“Su elección se fundamenta en la asunción de que una contaminación que se produjese en el área de alimentación de una captación podría alcanzarla transcurrido (sic) un cierto período de tiempo, por lo que debe delimitarse ésta y protegerla en su totalidad.

Se trata por tanto de identificar los límites hidrogeológicos que delimitan el área en la cual el agua procedente de la precipitación después de infiltrarse podría llegar a alcanzar la captación. Estos son de diversos tipos, pudiendo actuar como tales ríos, canales, lagos, divisorias piezométricas, materiales impermeables, entre otros.

La aplicación de este criterio va a implicar la protección de un área mayor de la necesaria, por lo que se utilizará principalmente al realizar una primera determinación del perímetro, especialmente en los acuíferos constituidos por materiales kársticos y rocas fracturadas que poseen elevadas velocidades de flujo. Su empleo es también muy usual en acuíferos pequeños, en los que el tiempo de tránsito hasta los límites es muy reducido, por lo que disminuye notablemente el área sobreprotegida que su aplicación implicará.”<sup>15</sup>

#### **1.4.1.1.5. Poder autodepurador del terreno**

“Consiste en utilizar la capacidad que poseen los diferentes terrenos para atenuar la concentración de los contaminantes que los atraviesan como criterio para definir la extensión de éstos que debe recorrer un agua contaminada hasta alcanzar una calidad admisible para el consumo humanos.

En esta capacidad depuradora del terreno intervienen proceso físicos, químicos y biológicos que actúan de modo diferente para cada contaminante, por lo cual

---

<sup>15</sup> MORENO MERINO, Luis. y MARTÍNEZ NAVARRETE, Carlos. *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas*. p. 97



deben realizarse experiencias previas que permitan evaluarlos convenientemente.”<sup>16</sup>

#### **1.4.1.2. Elección del criterio**

Al elegir un criterio se debe tomar en cuenta las consideraciones técnicas de cada uno, así como el impacto socioeconómico que implicara su aplicación.

- **Facilidad de aplicación:** Indica si el empleo del método es práctico, considerando también si es necesario estar capacitado para poder ser utilizado este criterio.
- **Facilidad de cuantificar:** Es necesario utilizar métodos matemáticos en su aplicación.
- **Adaptable a cambio:** Consiste en evaluar si es posible realizar algún cambio en el futuro, como por ejemplo variaciones en caudal de bombeo.
- **Facilidad de verificación:** Indica si los resultados pueden ser comprobado con facilidad.
- **Capacidad de considerar el poder autodepurador del terreno:** Se evalúa la facilidad en que se reflejan las características intrínsecas del terreno.
- **Concordancia con el modelo hidrogeológico general:** Al considerar este criterio se debe verificar si tienen concordancia las asunciones que se realizaron al aplicar este criterio con las consideraciones hidrogeológicas regionales.

---

<sup>16</sup> MORENO MERINO, Luis. y MARTÍNEZ NAVARRETE, Carlos. *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas*. p. 97.

- Capacidad de considerar procesos físicos: Refleja si el criterio elegido incorpora los procesos físicos.<sup>17</sup>

A continuación, se muestra una tabla desarrollada por *Environmental Protection Agency*, EPA, por sus siglas en inglés, en la publicación *Guidelines of delineation of wellhead protection areas* la cual amplía de una manera simple la aplicación de cada uno de los criterios antes mencionados.

Tabla IV. **Valoración de los criterios utilizados en la delimitación de los perímetros de protección en función de consideraciones técnicas**

Consideraciones técnicas	Facilidad de aplicación	Facilidad de cuantificar	Adaptable a cambios	Facilidad de verificar	Capacidad de considerar el poder autodepurador del terreno	Consideración en el modelo hidrogeológico general	Capacidad de considerar procesos físicos	Clasificación
Criterio								
Distancia	A	A	A	A	N/A	B	B	1
Descenso	M	A	B	A	N/A	A	B	2
Tiempo de tránsito	M	M	B	B	M	A	A	5
Criterios hidrogeológicos	M	N/A	A	A	N/A	M-A	M	3
Poder auto depurador del terreno	B	B	A	B	A	M-A	M	3

B: Bajo  
M: Medio  
N/A: No Aplica

Nota: Clasificación (1-5)  
5 Máxima puntuación  
A: Criterio seleccionado

1 Mínima puntuación  
A: Alto

Fuente: Guidelines for delineation of wellhead protection areas, EPA. *Delineation criteria*.

p. 3-21.

<sup>17</sup> MORENO MERINO, Luis. y MARTÍNEZ NAVARRETE, Carlos. *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas*. p. 99

### **1.4.1.3. Métodos para la delimitación del perímetro de protección de un pozo mecánico que protege la calidad del agua**

La EPA ha resaltado seis métodos de los cuales, en este caso, se tomarán en cuenta tres por cuestiones de simplicidad y practicidad para la investigación.

- Radio fijo calculado en función al tiempo de tránsito
- Método de Wyssling
- Método hidrogeológico por medio de mapas

Estos criterios han sido utilizados para ser trazados en territorios en los que los bordes han sido mapeados. Cada uno de estos métodos tiene debilidades como también ventajas, por lo que se describirá cada uno de ellos en orden descendente, tomando en cuenta la complejidad técnica de la aplicación, costo en dinero en tiempo.

#### **1.4.1.3.1. Radio fijo calculado en función del tiempo de tránsito**

"Para este método se asume un acuífero con flujo bidimensional con porosidad intergranular, sin discontinuidades, en el que las contaminantes se mueven en el agua subterránea con su misma dirección y velocidad (...). Al aplicarlo se delimita en primer lugar el área de alimentación a la captación (...). Ésta se calcula en base al análisis del mapa de isopiezas, las correspondientes líneas de flujo trazadas hasta la captación y la ley de Darcy."<sup>18</sup>

---

<sup>18</sup> MARTÍNEZ NAVARRETE, Carlos y GARCÍA GARCÍA, Álvaro. *Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio.* p. 51.

Ya definida el área de alimentación se determinará la distancia aguas arriba de la captación, tomando como función los diferentes tiempos de tránsito en las siguientes ecuaciones:

$$\text{Ecuación (1)} \quad V_e = \frac{K \cdot i}{m_e}$$

$$\text{Ecuación (2)} \quad d = V_e \cdot t$$

Donde:

Ve: velocidad lineal media.

K: conductividad.

i: gradiente hidráulico.

m<sub>e</sub>: porosidad eficaz.

t: tiempo de tránsito.

d: distancia aguas arriba de la captación hasta la línea de tiempo de tránsito.

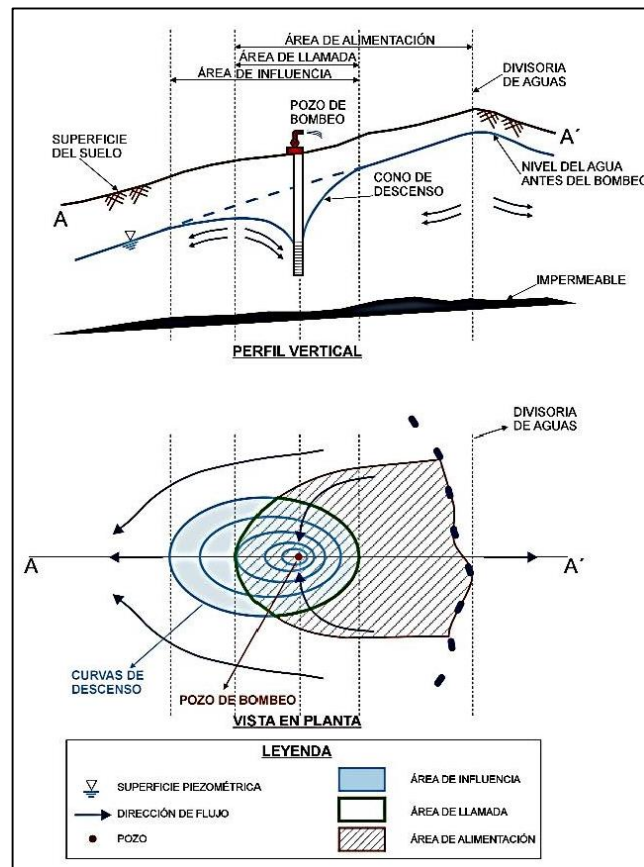
La distancia se traza como el radio de un círculo. Se define con esto el perímetro de protección para cada tiempo de tránsito con base en el área de alimentación definida por el análisis de isopiezas y líneas de flujo ya establecidas anteriormente.

#### **1.4.1.3.2. Método de Wyssling**

El método de Wyssling consiste en el cálculo de la zona de alimentación de un acuífero en la cual puede notarse el descenso piezométrico a consecuencia del bombeo de un pozo. Tomando en cuenta las líneas de corriente que van dirigidas hacia la captación, siempre considerando como

referencia el tiempo de tránsito en cuestión.<sup>19</sup> A continuación, se muestra el esquema de bombeo utilizado para determinar el método de Wyssling:

Figura 2. **Esquema de bombeo en un medio poroso utilizado para determinar el método de Wyssling**



Fuente: *Protección de las captaciones de abastecimiento urbano en medios con porosidad intergranular o asimilables en su funcionamiento de los mismos. Ejemplo de su aplicación en un acuífero detrítico en la localidad de Villacastín.* p. 47.

<sup>19</sup> MARTÍNEZ NAVARRETE, Carlos y GARCÍA GARCÍA, Álvaro. *Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio.* p. 61.

“La resolución del método Wyssling precisa conocer los siguientes parámetros hidráulicos:

i: gradiente hidráulico  
Q: caudal real bombeado  
K: conductividad hidráulica  
 $m_e$ : porosidad eficaz  
b: espesor saturado del acuífero

El procedimiento para calcular los perímetros de protección.

- Se calcula la zona de llamada del acuífero:

En un acuífero libre, si B es la anchura del frente de llamada:

$$\text{Ecuación (3)} \quad Q = K * B * b * i$$

$$\text{Ecuación (4)} \quad B = \frac{Q}{K * b * i}$$

- El radio de llamada puede obtenerse de la ecuación:

$$\text{Ecuación (5)} \quad X_0 = \frac{Q}{2\pi * K * b * i}$$

Y el ancho del frente de llamada a la altura de la captación:

$$\text{Ecuación (6)} \quad B' = \frac{B}{2} = \frac{Q}{2 * K * b * i}$$

- La velocidad eficaz  $V_e$  se calcula como:

$$\text{Ecuación (7)} \quad V_e = \frac{K * i}{m_e}$$

- Una vez determinada la zona de llamada ha de buscarse en la dirección del flujo la distancia correspondiente al tiempo de tránsito deseado (isócronas).

Se emplean las siguientes ecuaciones:

$$\text{Ecuación (8)} \quad S_0 = \frac{l + \sqrt{l * (l + 8 * X_0)}}{2}$$

$$\text{Ecuación (9)} \quad S_u = \frac{-l + \sqrt{l * (l + 8 * X_0)}}{2}$$

Donde:

l:  $V_e * t$

t: tiempo de tránsito

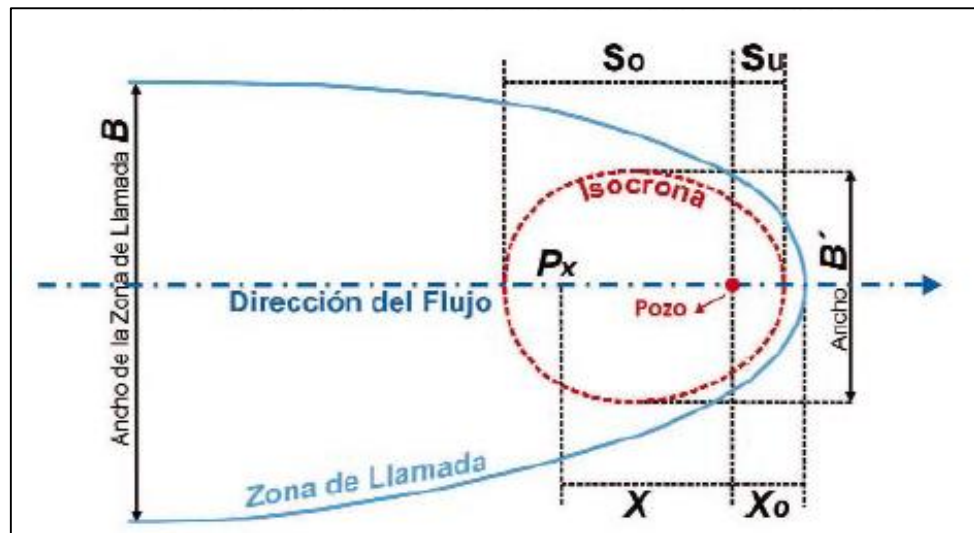
$V_e$ : velocidad eficaz

$S_0$ : distancia aguas arriba en la dirección del flujo correspondiente a un tiempo de tránsito t

Su: distancia aguas abajo en la dirección del flujo correspondiente a un tiempo de tránsito  $t^{20}$

A continuación, se muestra una ilustración de cómo funciona este método y cada una de sus variables.

Figura 3. **Cálculo de perímetros de protección mediante el método de Wyssling**



Fuente: *Protección de las captaciones de abastecimiento urbano en medios con porosidad intergranular o asimilables en su funcionamiento de los mismos. Ejemplo de su aplicación en un acuífero detrítico en la localidad de Villacastín.* p. 62.

<sup>20</sup> MARTÍNEZ NAVARRETE, Carlos y GARCÍA GARCÍA, Álvaro. *Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio.* p. 63.

#### **1.4.1.3.3. Métodos hidrogeológicos por medio de mapas**

La delimitación de perímetros de protección está basado en métodos hidrogeológicos, enfocados en el análisis de los límites del acuífero en estudio, cartografía hidrogeológica en el entorno, análisis de las isopiezas y direcciones de flujo, tomando en cuenta también los ríos que se encuentran la zona.<sup>21</sup>

Este método es utilizado cuando se pretende proteger captaciones situadas en acuíferos kársticos o en rocas fisuradas, en los cuales no son aplicables la mayor parte de métodos mencionados, al ser acuíferos heterogéneos y anisótropos. En ellos la velocidad es alta, por lo que un contaminante puede recorrer distancias largas en poco tiempo. En este caso se recomienda complementar el estudio con el uso de otras técnicas más elaboradas, por lo que de igual manera se tomarán en cuenta los métodos antes mencionados.

#### **1.4.2. Protección de la cantidad de agua en un perímetro de protección**

Todos los métodos mencionados son aplicados para la protección de la calidad del agua extraída en las captaciones de aguas subterráneas. Para poder obtener el agua constante en un largo periodo de tiempo, es necesario garantizar la permanencia de los caudales obtenidos de las mismas.

Esta investigación está enfocada en la protección de la calidad del agua extraída de pozos mecánicos. Para proteger los caudales extraídos por las

---

<sup>21</sup> MARTÍNEZ NAVARRETE, Carlos y GARCÍA GARCÍA, Álvaro. *Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio.* p. 51.



captaciones de agua potable requiere una metodología diferente, por lo que solo se hará mención de algunas consideraciones que deben ser tomadas si se quiere cuidar el agua en término de cantidad.

Para tener una protección adecuada a la cantidad de agua extraída debe ampliarse el área que se va a proteger; es decir, debe extenderse más allá de los límites del campus central la Universidad de San Carlos de Guatemala. Esta es un área mínima en comparación a toda la que corresponde a la ciudad de Guatemala, la cual cuenta con otras captaciones utilizadas para el abastecimiento de industria y población en general.

En Guatemala no existe una Ley de Aguas establecida de la que se pueda tomar referencia para una protección adecuada del recurso hídrico, por lo que se propondrán varias medidas para la protección del caudal de un acuífero del cual se extrae agua por varias captaciones al mismo tiempo:

- En el actual código civil, se menciona en el artículo 582 una distancia mínima de 40 metros a edificios ajenos, de un ferrocarril o carretera, ni a menos de 100 metros de otra fuente de agua, río, canal o abrevadero público sin la licencia correspondiente de la municipalidad.
- Mantener un balance entre el caudal de extracción y la infiltración hacia el acuífero utilizado para la captación de agua potable.
- Establecer una prioridad de extracción según la utilización que se le dé al recurso, clasificándolo desde uso para consumo humano, industria, agricultura, recreativo, entre otros.

- Establecer un límite de extracción para las industrias y empresas que utilicen el recurso para uso recreativo.
- Promover la reutilización del recurso hídrico en general.

Realizar una zona de protección de la cantidad de agua es complicado para los lugares en donde no se ha realizado un plan hidrológico, caso que representa a Guatemala. En un plan hidrológico se deben indicar todas las medidas mencionadas, con un mayor grado de especificación en cada caso, por lo que se limitará a realizar el análisis solamente para la protección de la calidad del agua.

## **2. ESTUDIOS PREVIOS**

Para ejecutar los estudios previos a la delimitación de perímetros de protección en el campus central de la Universidad de San Carlos es necesario recabar información importante para aplicar las definiciones y conceptos de valoración existentes.

### **2.1. Demanda urbana en el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala**

En la actualidad, el campus central está formado por edificios utilizados para aulas, actividades administrativas e investigativas. Estos edificios repartidos entre 9 facultades y 7 escuelas facultativas, cuentan con la infraestructura para proveer a los estudiantes y trabajadores los servicios necesarios y estos son: instalaciones deportivas, biblioteca, diferentes bancos, clínicas médicas y odontológicas, cafeterías y espacios para parqueo. El centro educativo también cuenta con dos centros de desarrollo experimental: la finca experimental de Veterinaria y el Centro Experimental de Agronomía (CEDA).

Como en todo lugar que acoge una gran cantidad de personas, en este caso un centro educativo importante a nivel nacional, es de suma importancia que tengan servicios esenciales como el agua potable y drenaje, de los cuales no pueden prescindir los estudiantes, personal docente y administrativo para sus necesidades fisiológicas y limpieza de las instalaciones.

La mayor demanda de agua potable es para satisfacer las necesidades de la población de estudiantes, ya que son los más importantes en cuando a

cantidad. La población estudiantil crece todos los años, por lo que el servicio de agua potable sufre cambios constantes en su caudal.

### **2.1.1. Población y su evolución**

El encargado en la Universidad de San Carlos de Guatemala de recaudar datos de población, tanto estudiantil como docente, entre otras cosas, es el Departamento de Registro y Estadística. A lo largo de los años ha obtenido una base de datos muy importante para la utilización de estudiantes y población en general.

Para realizar el estudio de población que utilizan los servicios de agua potable se analizarán los últimos 10 años, los ciclos académicos del año 2009 al año 2018 (tabla V). Las facultades que alberga el campus central son: Agronomía, Arquitectura, Ciencias Económicas, Ciencias Jurídicas y Sociales, Ciencias Médicas, Ciencias Químicas y Farmacia, Humanidades, Ingeniería, Odontología, Medicina Veterinaria y Zootecnia; entre ellas, las escuelas facultativas: Ciencias Psicológicas, Historia, Trabajo Social, Ciencias de la Comunicación, Ciencia Política, EFPEM, Escuela de Ciencias Lingüísticas, Escuela Superior de Arte -ESA-, Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas, Centro de Estudios del Mar y Acuicultura -CEMA-, Instituto Nacional de Administración Pública -INAP-.

En la tabla V se muestra un declive de personas inscritas comparando los ciclos de 2018 con el 2017 en todas las unidades, se observa el mayor declive en la Facultad de Humanidades y se mantuvo el mismo rango de inscritos la Facultad de Ingeniería. Por estas razones no es adecuado analizar cada una de las facultades por separado, ya que no daría un dato representativo del crecimiento poblacional del centro de universitario.

Por otro lado, en la misma tabla se muestra un resultado de la totalidad de personas inscritas en cada ciclo educativo. Aun así, es necesario buscar un parámetro representativo de la cantidad de estudiantes que asiste a las aulas todos los días, a lo largo de todo el horario que las instalaciones están abiertas. En la siguiente unidad se hará un cálculo de la demanda de agua potable en el campus central, tomando los criterios que competen para este tipo de análisis.

**Tabla V. Alumnos inscritos en el campus central por unidad académica, período 2009 - 2019**

<b>Unidad Académica</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>
Agronomía	1 266	1 357	1 443	1 576	1 743	1 850	1 929	1 919	2 100	1 950	2 046
Arquitectura	4 082	3 969	3 836	3 642	3 868	3 894	4 023	3 656	3 841	3 467	3 596
Ciencias Económicas	21 637	22 375	22 239	21 676	21 249	20 659	20 388	19 473	21 395	19 107	20 447
Ciencias Jurídicas y Sociales	15 885	16 180	16 371	17 984	18 795	18 092	18 282	17 917	20 993	18 179	19 249
Ciencias Químicas y Farmacia	2 487	2 423	2 362	2 249	2 189	2 030	2 066	1 995	2 372	2 169	2 264
Humanidades	12 212	16 090	19 733	23 408	31 079	32 667	36 774	27 580	23 073	13 830	11 086
Ingeniería	12 468	12 680	12 934	12 813	13 910	13 670	13 587	12 615	14 431	13 072	13 424
Odontología	1 188	1 217	1 290	1 237	1 221	1 167	1 129	1 088	1 124	1 115	1 066
Medicina Veterinaria y Zootecnia	1 051	1 083	1 036	1 045	1 158	1 211	1 200	1 149	1 247	1 238	1 238
Historia	980	972	997	1 120	1 183	1 182	1 317	1 295	1 303	1 056	996
Trabajo Social	1 103	1 005	986	978	1 050	1 032	1 144	1 151	1 361	1 343	1 389
Ciencias de la Comunicación	4 944	4 847	4 521	4 733	4 729	4 425	4 467	4 013	4 098	3 759	3 669
Ciencia Política	1 610	1 694	1 575	1 546	1 579	1 682	1 589	1 469	1 580	1 439	1 534
EFPEM	3 281	3 632	3 684	3 798	4 037	4 414	4 550	4 430	4 700	4 221	3 836
Escuela de Ciencias Lingüísticas	156	213	295	422	488	570	596	562	653	654	646
Escuela Superior de Arte -ESA-	271	232	250	307	351	378	425	421	483	435	459
Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas	0	0	0	0	0	0	148	161	185	194	185
Centro de Estudios del Mar y Acuicultura - CEMA-	167	169	156	153	156	158	156	128	148	119	117
Instituto Nacional de Administración Pública -INAP-	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>84 788</b>	<b>90 138</b>	<b>93 708</b>	<b>98 687</b>	<b>108 785</b>	<b>109 081</b>	<b>113 770</b>	<b>101 022</b>	<b>105 088</b>	<b>87 347</b>	<b>87 247</b>

Fuente: Departamento de registro y estadística de la Universidad de San Carlos de Guatemala, junio 2019.

### **2.1.2. Volúmenes de consumo de agua potable actual en el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala**

En el campus central de la Universidad de San Carlos normalmente están en uso cinco pozos de extracción de agua subterránea; de estos, solo tres abastecen de agua potable los edificios de aulas y de uso administrativo. Los dos pozos restantes abastecen de agua potable a las granjas experimentales de Veterinaria y Agronomía, respectivamente.

Para calcular el volumen de agua para consumo humano que se requiere al día en el campus central, se debe obtener el número actual de alumnos, número de jornadas en las que está disponible el servicio y las dotaciones recomendadas por la entidad correspondiente. En la tabla V se muestra la cantidad de alumnos inscritos en el campus central de la Universidad de San Carlos (período 2009 a 2018). Para obtener la demanda actual se toma en cuenta la cantidad de estudiantes inscritos en el ciclo 2018.

En la actualidad se utiliza el Reglamento para presentación, diseño y construcción de redes de distribución de agua potable, de EMPAGUA para saber la dotación de agua en edificios escolares, con la finalidad de normalizar las técnicas y parámetros de diseño de los mismos.

A continuación, se muestran los criterios recomendados por el reglamento de EMPAGUA:

Tabla VI. **Dotaciones de agua para planteles educativos**

<b>Planteles educativos</b>	<b>Litros / alumnos día</b>
Alumnos externos	40
Alumnos internos	200
Alumnos (0,25) internos	70
Personal residente	200
Personal no residente	50

Fuente: Reglamento para presentación, diseño y construcción de redes de distribución de agua potable. p. 11.

Al tener definidas las dotaciones recomendadas por EMPAGUA en la tabla VI, los estudiantes del campus central reciben la clasificación como estudiantes externos, a los cuales les corresponde una dotación de 40 litros por día. Tomando en cuenta la tabla V, la población de estudiantes correspondiente al año 2018 es de 87 347 personas. Se asume que asisten en tres jornadas diarias, lo cual reduce la dotación a 13,33 litros por día. El cálculo de demanda diaria de agua potable da como resultado:

$$87\,247 \text{ alumnos} \times 13,33 \frac{\text{litros}}{\text{día}} = 1\,163\,002 \frac{\text{litros}}{\text{día}}$$

Esta cantidad equivale a 1 163 metros cúbicos de agua potable diaria para abastecer a la población de estudiantes que asisten al centro universitario. Por cuestiones de investigación no se tomará en cuenta el personal administrativo y docente, ya que es de conocimiento general que los estudiantes no asisten en su totalidad en todas las jornadas, por lo que se tomará el número de estudiantes total como la población completa para motivos estadísticos e investigativos.

Demanda actual: 1 163 m<sup>3</sup> de agua potable al día

### **2.1.3. Volúmenes de consumo de agua potable en el futuro para el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala**

En el caso particular de la Universidad de San Carlos es muy complicado realizar una predicción de población futura, ya que el número de estudiantes inscritos en un ciclo escolar no siempre aumenta con respecto de un año con el siguiente. Por tanto, esta proyección podría ser tema de debate muy importante en cuanto al desarrollo de educación profesional en el país.

Tomando en cuenta este criterio, para realizar una predicción de la población futura en comunidades en vías de desarrollo normalmente se hace por medio del método de crecimiento geométrico, cuya ecuación es la siguiente:

$$P_n = P_i (1 + i)^n$$

Donde:

$P_n$  = población proyectada a futuro

$P_i$  = población actual o inicial

$i$  = tasa de crecimiento

$n$  = número de años

Para comparar la tasa de crecimiento de población entre ciclos académicos se necesita despejar el valor “ $i$ ” de la fórmula anterior, utilizando dos valores de población. A continuación, se muestra la tasa de crecimiento o disminución de población en cada uno de los períodos en estudio:



Tabla VII. **Crecimiento poblacional por ciclo académico 2009 – 2018**

Ciclos académicos		Tasa de crecimiento poblacional
De	A	i
2009	2010	6,31 %
2010	2011	3,96 %
2011	2012	5,31 %
2012	2013	10,23 %
2013	2014	0,27 %
2014	2015	4,30 %
2015	2016	-11,21 %
2016	2017	4,02 %
2017	2018	-16,88 %
2018	2019	-0,11 %

Fuente: elaboración propia.

Se realizó un estudio de la tasa de crecimiento poblacional entre ciclos de estudio de un año, con el objetivo de obtener una mejor visualización del crecimiento o disminución de población con respecto a un año anterior. Se hizo énfasis solo en el área de estudio; en este caso, en el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Se puede notar varios cambios significativos, en especial de los años 2012 a 2013, 2015 a 2016 y 2017 a 2018, en los que el índice incrementa o disminuye significativamente. Para proyectar una población futura será necesario realizar un promedio de los datos de tasa de población, se obtuvo 0,621 %.

Para realizar una proyección de población en el centro universitario se tomará un período de diseño de 10 años.

$$P_n = 87\,247 (1 + 0,621)^{10}$$

$$P_n = 87\,703 \text{ estudiantes}$$

La proyección de población muestra una cantidad aproximada de 87 703 estudiantes en el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala para el año 2029. Para el cálculo de la dotación se emplea el mismo criterio de jornadas mencionado.

$$87\,703 \text{ estudiantes} \times 13,33 \frac{\text{litros}}{\text{día}} = 1\,169\,080,99 \frac{\text{litros}}{\text{día}}$$

Siguiendo el mismo criterio de población (sin tomar en cuenta a personal administrativo y docente) la demanda de agua potable para el campus central llegará a 1 169,08 m<sup>3</sup> por día.

Demanda a futuro (año 2029) 1 169,08 m<sup>3</sup> de agua potable al día.

## **2.2. Actividad socioeconómica del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala**

La economía del centro educativo se basa principalmente en la venta de comida rápida para la comunidad estudiantil. Con una amplia variedad; desde restaurantes conocidos de pizza y cafeterías de comida gourmet hasta ventas de panes con embutidos, granizadas y almuerzos a un precio accesible. Adicionalmente a eso se encuentra la venta de tilapia en el campo experimental de veterinaria y la venta de chicharrones y carnitas de cerdo en el campo experimental de agronomía. Cada facultad cuenta con un área de cafetería y adicionalmente con uno o dos puestos de comida rápida en los alrededores de los edificios destinados para aulas.

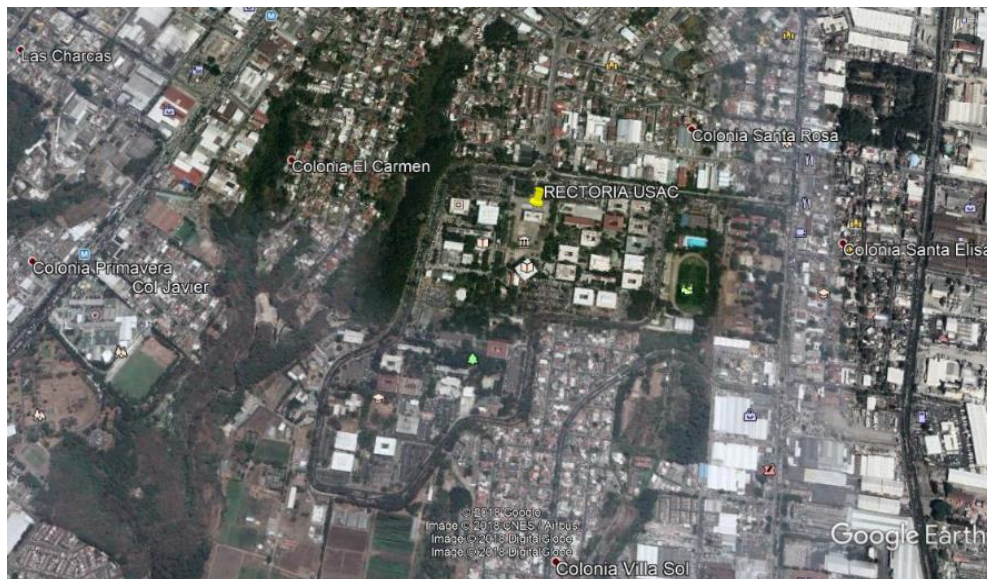
El campus central se encuentra rodeado de industria al lado este, y colonias con población densa al lado oeste. Se dedican a textiles y apartamentos o colonias de casas unifamiliares respectivamente.

Por último, se encuentra localizada una clínica en la Facultad de Odontología, la cual es utilizada para que los estudiantes pongan en práctica los conocimientos adquiridos a lo largo de toda la carrera y a la vez realicen una labor social. Están al servicio de la población guatemalteca en general y de los estudiantes que necesiten atención odontológica y que no cuentan con los recursos para un tratamiento necesario.

### **2.3. Situación geográfica del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala**

El centro universitario se encuentra ubicado en la zona 12 de la ciudad de Guatemala. Tiene dos puntos de ingreso, el primero por el final del anillo periférico y el segundo por la 32 calle de la avenida Petapa (figura 4).

**Figura 4. Fotografía satelital del territorio del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala**

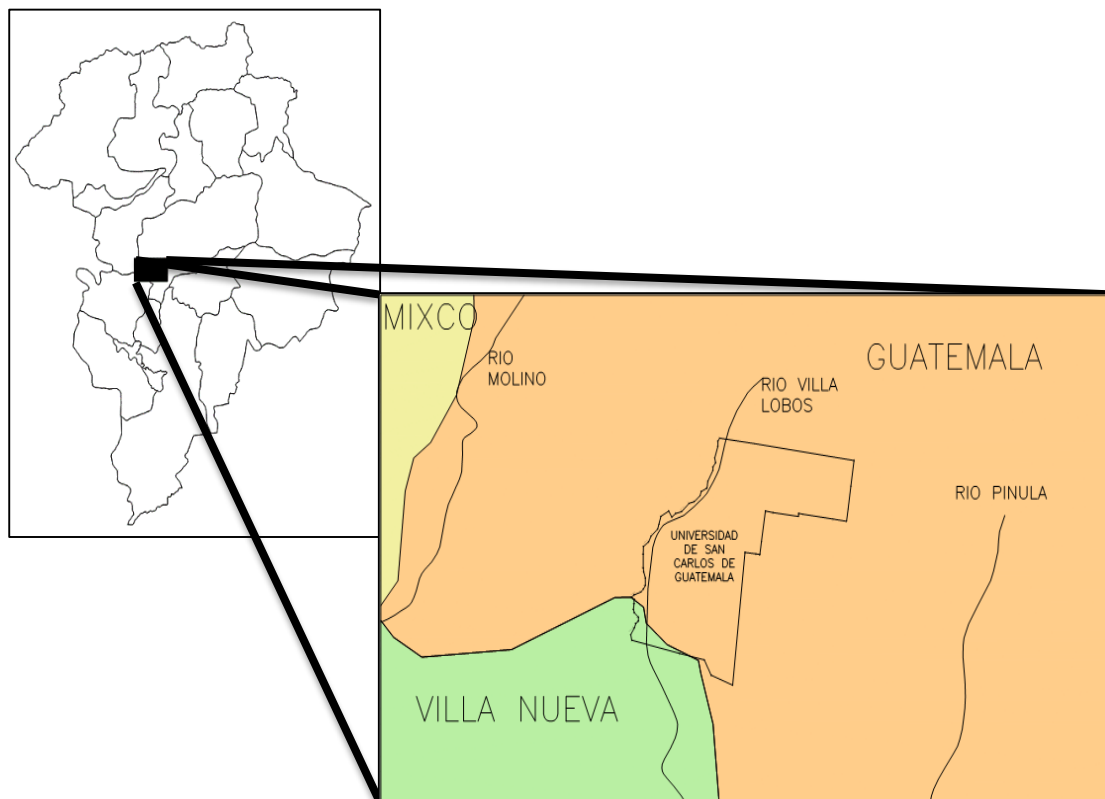


Fuente: Google Earth Pro, junio de 2 018.

La posición geográfica del edificio de rectoría del campus central se encuentra en las coordenadas latitud  $14^{\circ}35'17,78''$  norte y longitud  $90^{\circ}33'5,96''$  oeste, a una elevación promedio sobre el nivel del mar de 1 485 metros.

El campus central tiene colindancia al oeste con el río Villalobos y la zona 12, al norte y este con la zona 12 de la ciudad capital y al sur con territorio del municipio de Villa Nueva (figura 5).

Figura 5. **Localización del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala en el municipio de Guatemala**



Fuente: elaboración propia.

## 2.4. Marco geológico del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala

La Geología tiene como objetivo estudiar la evolución del planeta y sus habitantes, desde tiempos más antiguos hasta la actualidad, mediante el análisis de rocas. Es considerada una ciencia histórica ya que la formación del relieve actual de la Tierra es resultado de una larga evolución, por lo que es motivo de estudio cada uno de los factores y fuerzas que le dieron forma a lo que actualmente conocemos tanto en el exterior como en el interior del planeta.<sup>22</sup>

Las rocas se dividen en varios grupos, entre estos se encuentran los siguientes:

- Las rocas ígneas: son generadas por el enfriamiento de una masa líquida de composición silicatada que procede del interior de la Tierra, fundida a altas temperaturas. Cuando se solidifica en la superficie recibe el nombre de roca volcánica.
- Las rocas metamórficas: generadas a partir de rocas preexistentes, que como consecuencia de sufrir un aumento importante de temperatura y de presión se someten a cambios en su estructura física y química de forma que la roca original se transforma en un nuevo tipo de roca.<sup>23</sup>

La composición de estas rocas o cambios que estas sufren son producidos a lo largo de períodos de millones de años. Estos periodos están divididos en varios grupos, por era, período y época, como se muestra a continuación.

---

<sup>22</sup> Servicio geológico mexicano. *¿Qué es Geología?* <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/157537/Que-es-la-Geologia.pdf>.

<sup>23</sup> Instituto de Geociencias (CSI-UCM). *Clasificación de rocas*. [http://www.ciudadciencia.es/doc/files/FICHA\\_CLASIFICACION%20DE%20ROCAS\\_CC.pdf](http://www.ciudadciencia.es/doc/files/FICHA_CLASIFICACION%20DE%20ROCAS_CC.pdf).

Tabla VIII. Eras geológicas de la Tierra

Era	M.A.	Período	Época	
Cenozoica	0,01	Cuaternario	Holocena	
	2		Pleistocena	Humanos modernos
	7	Terciario	Plioceno	Primeros homínidos
	26		Mioceno	
	38		Oligoceno	Mamíferos modernos
	54		Eoceno	Primeras ballenas
	65		Paleoceno	
Mesozoica	136	Cretácico		Primeras plantas con flor
	196	Jurásico		Primeros pájaros
	225	Triásico		Primeros dinosaurios y mamíferos
Paleozoica	280	Pérmico		Primeros reptiles
	345	Carbonífero		Primeros anfibios terrestres
	395	Devónico		Primeros insectos
	440	Silúrico		Primeras plantas terrestres
	500	Ordovícico		Primeros peces
	670	Cámbrico		Primeros cordados
Arqueozoica	800	Precámbrico		Primeras formas de vida pluricelulares
	1 000			Primeras formas de vida unicelulares
	2 500			

Fuente: Apuntes de Geología General. <https://www.geovirtual2.cl/geologiageneral/ggcap08.htm>.

Consulta: 25 de octubre de 2019.

“En el caso del valle de la ciudad de Guatemala, se considera que se ha formado una estructura tipo *pull apart basin* (cuenca distensión). En su formación han interactuado eventos tectónicos como, por ejemplo, el terremoto de 1976, y volcánicos como la erupción de ceniza en el año 2010, del volcán de Pacaya”.<sup>24</sup>

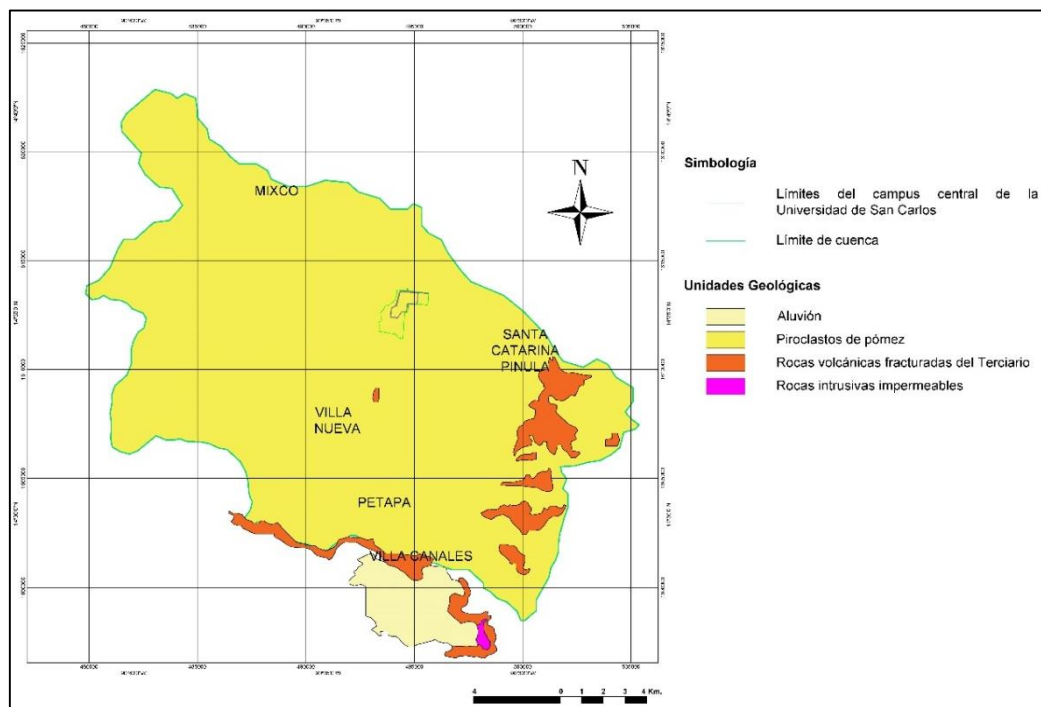
El valle de la ciudad se encuentra rodeado por varias fallas importantes para la estructura geológica del país. En la época del Mioceno medio se inician actividades en las fallas de Motagua y Jalpatagua, las cuales provocan una fractura de la corteza terrestre que permiten el ascenso de magma que forma varias estructuras

<sup>24</sup> PÉREZ, Carlos L. *Estructura geológica del valle de la ciudad de Guatemala interpretada mediante un modelo de cuenca por distensión*. p. 71-78.

volcánicas en el lugar donde actualmente se encuentra el valle de la ciudad de Guatemala. La misma actividad continúa hasta el Plioceno medio, período en el que se considera que ya está formado el centro volcánico Pinula, ubicado al oeste de la ciudad. Al este de la ciudad se encuentra la falla de Mixco, al oeste de la misma la falla de El Trébol.<sup>25</sup>

El campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala está sobre el centro de un cuerpo de rocas ígneas y metamórficas provenientes del período Cuaternario. Clasificadas por sus características por el MAGA como "Rellenas y cubiertas gruesas de cenizas pómez de origen diverso". En los extremos este y oeste se encuentran cuerpos igualmente de rocas ígneas y metamórficas pero provenientes del período Terciario. Son clasificadas igualmente por el MAGA como "Rocas volcánicas sin dividir. Predominantemente mio-piloceno. Incluye Tobas, coladas de lava, material lahárico y sedimentos volcánicos."<sup>26</sup>

**Figura 6. Mapa de geológico en las proximidades al campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala**



Fuente: *Estudio hidrogeológico de los acuíferos volcánicos de la República de Guatemala*. p. 35

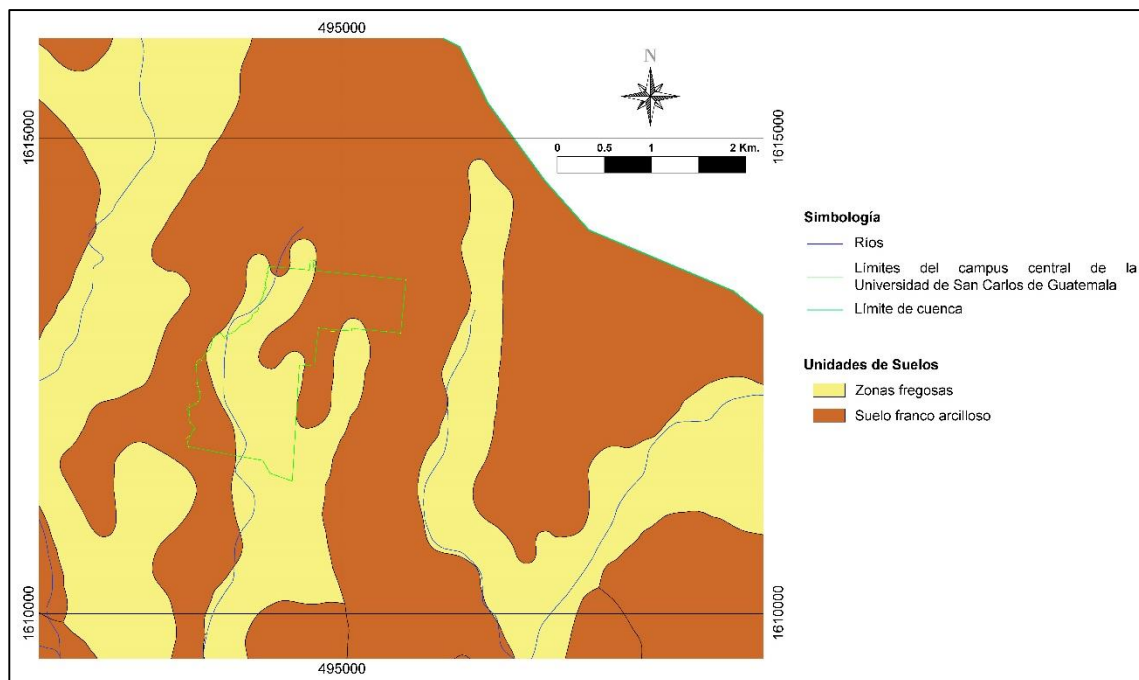
<sup>25</sup> PÉREZ, Carlos L. *Estructura geológica del valle de la ciudad de Guatemala interpretada mediante un modelo de cuenca por distensión*. p. 71-78

<sup>26</sup> HERRERA, Isaac R. et al. *Estudio hidrogeológico de los acuíferos volcánicos de la República de Guatemala*. p. 21.

El suelo de la ciudad universitaria está constituido al norte y este, por un material franco arcilloso a arcilla en la superficie, y una sub superficie arcillosa a franco arcilloso o franco arcillo arenosa. En el centro, sur y oeste se describe un área fregosa con relieve de barranco.

El suelo arcilloso a menudo puede presentar un desafío grande para la infiltración, ya que tiene una baja capacidad de drenaje; tiende también a compactarse y desboronarse cuando se le trabaja húmedo. A diferencia del suelo arenoso, el arcilloso tiene espacio poroso de mayor capacidad para absorber y retener agua. Esto es lo que provoca la poca capacidad de filtración.

Figura 7. **Mapa de los suelos en las proximidades al campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala**



Fuente: MAGA, 2001. *Suelos a nivel de orden*. <http://ideg.segeplan.gob.gt/geoportal/>. Consulta: 25 de octubre de 2019.



## **2.5. Hidrogeología del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala**

La ciudad de Guatemala en la actualidad se abastece de agua por medio de fuentes subterráneas y superficiales. El agua subterránea proporciona más del cincuenta por ciento del agua potable consumida. Es distribuida por la Empresa Municipal de Agua (EMPAGUA), la cual ha explotado este recurso por casi cincuenta años.

En la actualidad, el centro universitario se abastece por medio de fuentes subterráneas, las cuales representan el cien por ciento del abastecimiento de agua potable consumible. Al igual que la Empresa Municipal de Agua, han sido explotados desde los años setenta, según registros de la Dirección de Servicios Generales de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

La ciudad capital se apoya en el conocido Valle de Guatemala, que geológicamente es llamada fosa tectónica. Está delimitada al este y oeste por los pilares tectónicos de Santa Catarina Pinula y de Mixco, respectivamente.

Las cuencas hidrogeológicas corresponden en gran medida a las hidrográficas, por condiciones de simetría hidráulica y paralelismo geomorfológico, por lo que, se separan por cuenca norte o del río Las Vacas (180 km<sup>2</sup>), cuenca noreste de los ríos Los Ocotes y Teocinte (198,72 km<sup>2</sup>), y por cuenca sur o del río Villalobos (346,36 km<sup>2</sup>), con un total de 725,08 km<sup>2</sup>. El límite entre las cuencas lo constituye el parte aguas continental (Pacífico / Atlántico), de orientación noroeste a sureste que presenta un relieve tectónico alto con elevaciones entre 1 500 a 1 600 metros sobre el nivel del mar (msnm) en la parte central. Mientras que en las partes al noreste y noroeste las elevaciones son mayores de 2 000 msnm.<sup>27</sup>

Las cuencas noroeste y sur del valle de la ciudad de Guatemala contienen mayormente rocas volcánicas que forman un acuífero de suma importancia

---

<sup>27</sup> HERRERA, Isaac R. et al. *Estudio hidrogeológico de los acuíferos volcánicos de la República de Guatemala*. p. 22.

para las poblaciones del área. No obstante, el acuífero norte está formado principalmente por rocas carbonatadas y rocas intrusivas, con características diferentes.

Para la investigación actual se prestará atención al acuífero del valle sur de la ciudad de Guatemala, ya que es el que está ubicado por debajo de las instalaciones del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

### **2.5.1. Acuífero del valle sur de la Ciudad de Guatemala**

La ciudad universitaria se encuentra localizada al norte del acuífero del valle sur de la ciudad de Guatemala.

El norte del acuífero sur del Valle de Guatemala está delimitado por la divisoria continental, desde la Calzada Roosevelt al oeste, el Trébol se encuentra en el centro yendo por todo lo largo de la avenida Los Próceres hasta Puerta Parada al oeste. Teniendo elevaciones de 1 530 msnm en su parte central (Figura 8). El límite oeste se encuentra en el Cerro Las Limas con 2 200 msnm, con el Cerro El Astillero a 2 374 msnm y la Montaña Carmona con 2 430 msnm. El límite este se encuentra en Puerta Parada, Don Justo y Canchón en el municipio de Santa Catarina Pinula y la aldea Cumbre de San Nicolás, con elevaciones alrededor de 1 900 msnm. Las elevaciones más bajas corresponden a las orillas del Lago de Amatitlán con 1 200 msnm, al sur del acuífero en cuestión. Mostrando una pendiente variable de 8 % a 14 % en las partes altas y de 1 % a 4 % en los sectores bajos con dirección de norte a sur.<sup>28</sup>

---

<sup>28</sup> HERRERA, Isaac R. et al. *Estudio hidrogeológico de los acuíferos volcánicos de la República de Guatemala*. p. 22.

## 2.5.2. Parámetros hidrogeológicos

Para poder determinar los perímetros de protección es necesario saber ciertas características físicas y mecánicas del suelo en el que se pueda encontrar un acuífero, por lo que a continuación se definen cada una de ellas.

### 2.5.2.1. Transmisividad

Según Francisco Padilla de la Universidad de A Coruña de España, se define la transmisividad como la capacidad que tiene un medio poroso para transmitir agua.

El acuífero superior en cenizas pómez, tienen distintos tamaños granulométricos, en los que prevalecen las gravas y las arenas. Los espesores de este acuífero pueden variar de pocos metros hasta 250 metros, obteniendo un volumen saturado de un espesor promedio de 200 metros a lo largo de toda la extensión del acuífero. En la parte sur de la ciudad capital se localiza el acuífero superior en los almacenes aluviales de los ríos Pinula y Villalobos. Ocupando una extensión de 57,5 km<sup>2</sup>, donde se encuentran saturadas entre 39 a 110 metros de altura. Los sedimentos almacenados en el delta del río Villalobos, al norte del lago de Amatitlán, ocupan una superficie de 167 km<sup>2</sup> con espesores de 145 metros de altura.<sup>29</sup>

Los valores de transmisividad son medios para las cenizas de pómez, que varían de 50 a 750 m<sup>2</sup>/día y para los sedimentos aluviales del río Villalobos es media a alta con valores de 150 a 2 000 m<sup>2</sup>/día.

El acuífero inferior se presenta en rocas volcánicas fracturadas de dacitas, andesitas y tobas, con un espesor saturado mayor de 300 m. En las partes altas de la cuenca desde San Lucas a Bárcenas, El Trébol a Ciudad Real y Santa Catarina Pinula a Boca del Monte, la transmisividad varía de 500 a 800 m<sup>2</sup>/día. Mientras que, en las partes bajas de Villa Nueva, alrededores de Ojo de Agua, Petapa y Villa Canales, la transmisividad presenta rangos de 500 a 5 000 m<sup>2</sup>/día.<sup>30</sup>

---

<sup>29</sup> HERRERA, Isaac R. et al. *Estudio hidrogeológico de los acuíferos volcánicos de la República de Guatemala*. p. 22

<sup>30</sup> HERRERA, I.; OROZCO, E. *Hidrogeología de Ojo de Agua, cuenca sur de la Ciudad de Guatemala*. p. 85-97.

### 2.5.2.2. Gradiente hidráulico

“Es la energía que tiene el agua en virtud de su altura, presión y movimiento y que le permite desplazarse dentro de un acuífero hacia las posiciones de menor energía.”<sup>31</sup> Este se puede definir en la siguiente ecuación como la pérdida de carga (altura piezométrica) por unidad de longitud:

$$\text{Ecuación (10)} \quad i = \frac{\Delta h}{L}$$

Donde:

i: gradiente hidráulico

$\Delta h$ : pérdida de carga entre dos puntos

L: distancia entre puntos A y B donde se produce la pérdida

### 2.5.2.3. Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica está definida como la capacidad que tiene un cuerpo de dejar pasar un fluido a su través.

Las cenizas de pómez poseen una permeabilidad primaria, la cual se encuentra entre 1,3 a 20 m/d, debido a la gran cantidad de material fino y a su propia compactación. Los sedimentos aluviales están conformados por gravas, cantos rodados, arenas, arcillas y limos, presentando una permeabilidad media entre 3,8 a 14 m/d, clasificándose al acuífero como regular a bueno según la Dirección General de Investigación en una investigación realizada a los acuíferos volcánicos de la República de Guatemala. Las lavas dacíticas y andesíticas conjuntamente con algunas capas de tobas vítricas soldadas, forman el acuífero inferior con permeabilidades medias de 1,7 a 32 m/d. Esta permeabilidad es secundaria y alcanza valores altos en las áreas que poseen fracturación intensa y profunda.<sup>32</sup>

---

<sup>31</sup> VILLARROYA, Fermín. *Tipos de acuíferos y parámetros hidrogeológicos*. <http://chilorg.chil.me/download-doc/86199>. Consulta: 25 de octubre de 2019.

<sup>32</sup> HERRERA, Isaac.; OROZCO, Eugenio. *Hidrogeología de Ojo de Agua, cuenca sur de la Ciudad de Guatemala*. p. 85-97.

#### 2.5.2.4. Coeficiente de almacenamiento

En el acuífero superior, área en el cual se encuentra el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala, el agua subterránea se encuentra en su mayor parte “bajo condiciones libres y presenta valores de coeficiente de almacenamiento de 0,09 a 0,35 para los depósitos piroclásticos y de 0,20 para los depósitos aluviales”<sup>33</sup>.

Considerando que el acuífero tiene un espesor medio de 200 metros, como se muestra en la figura 8, y una extensión de 346 364 km<sup>2</sup>, el volumen del acuífero es de 69 km<sup>3</sup>, como se indica en el mapa elaborado por la Dirección General de Investigación de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

“Suponiendo que, en este volumen la porosidad media por fracturación es de un 25 %, resulta que el agua almacenada en el acuífero sería igual a 17 250x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>. El coeficiente de almacenamiento en lavas es de 8x10<sup>-3</sup>, resultando que al hacer descender en 1 m el nivel estático del agua del acuífero, se dispondría de aproximadamente 138 millones de metros cúbicos de agua”<sup>34</sup>.

“Comparando esta disponibilidad de 138 millones de metros cúbicos de agua con la extracción del agua subterránea en la cuenca del río Villalobos de 191,2 millones de metros cúbicos por año, resulta que en este acuífero existe una sobre-extracción de 53,2 millones de metros cúbicos por año, sin considerar la recarga hídrica”<sup>35</sup>.

---

<sup>33</sup> INSIVUMEH. *Estudio de las aguas subterráneas en el valle de la ciudad de Guatemala*. p. 8.

<sup>34</sup> HERRERA, Isaac R. *Estudio hidrogeológico de los acuíferos volcánicos de la república de Guatemala*. p. 23.

<sup>35</sup> GÁLVEZ, Juventino. *Bases técnicas para la gestión de agua con visión a largo plazo en la zona metropolitana de Guatemala*. p. 69.

Esto se ha comprobado por el descenso de los niveles estáticos del acuífero de aproximadamente 1m/año en los sectores de Ojo de Agua y El Diamante desde el año 1976, según datos de la Dirección General de Investigación de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

### **2.5.3. Mapas hidrogeológicos**

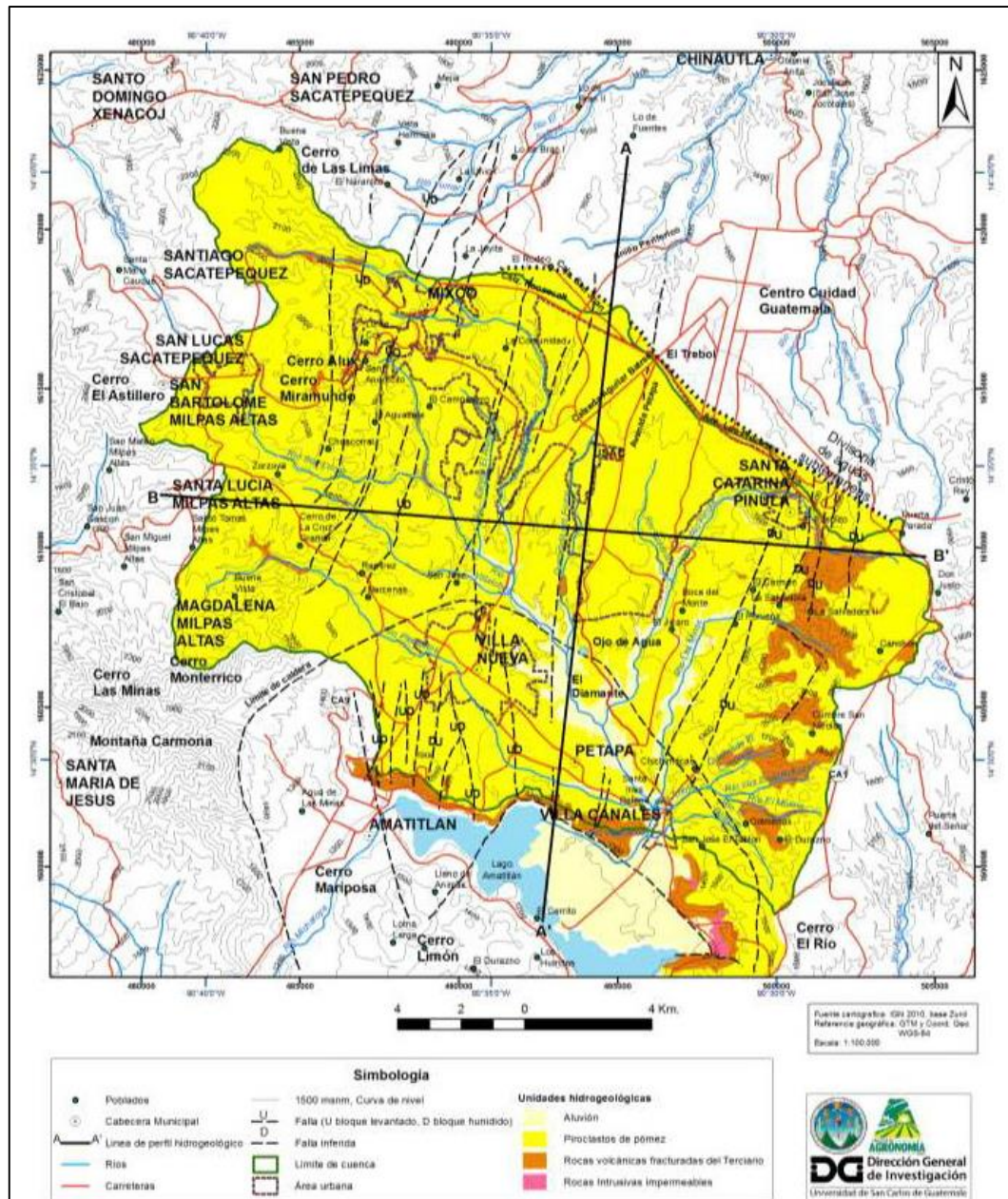
Para poder hacer el estudio del acuífero del valle sur de la ciudad de Guatemala es necesario obtener una serie de mapas hidrogeológicos que puedan detallar el comportamiento del agua subterránea.

#### **2.5.3.1. Unidades hidrogeológicas**

Las unidades hidrogeológicas del acuífero del valle sur de la Ciudad de Guatemala se muestran en la figura 8, donde se agregan a las rocas volcánicas fracturadas, los piroclastos o cenizas de pómez y los aluviones del río Villalobos.

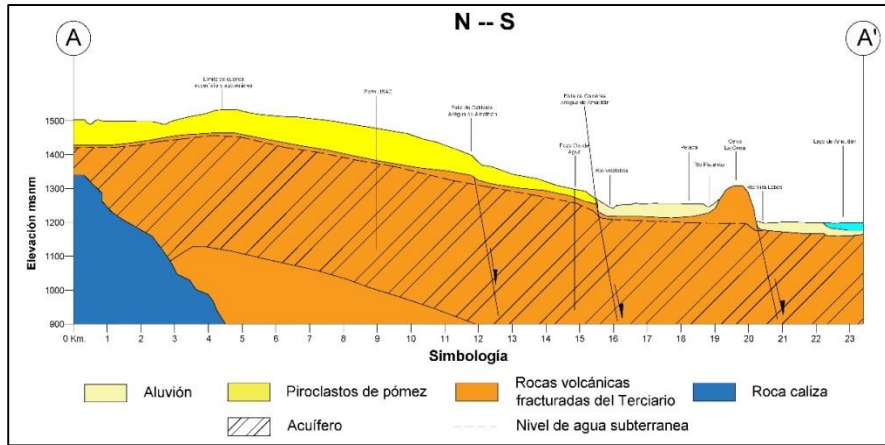
Las rocas volcánicas están formadas por dacitas, andesitas y tobas soldadas del Terciario con espesores por arriba de 500 m, (figura 9), son estos los materiales que forman la zona saturada, incluyen un medio fisurado de rocas con fracturas, las cuales aumentan la conductividad del agua. Mientras, la zona no saturada está constituida principalmente por cenizas de pómez del Cuaternario, como se muestra en los perfiles hidrogeológicos de las figuras 9 y 10.

Figura 8. Mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero del valle sur de la Ciudad de Guatemala



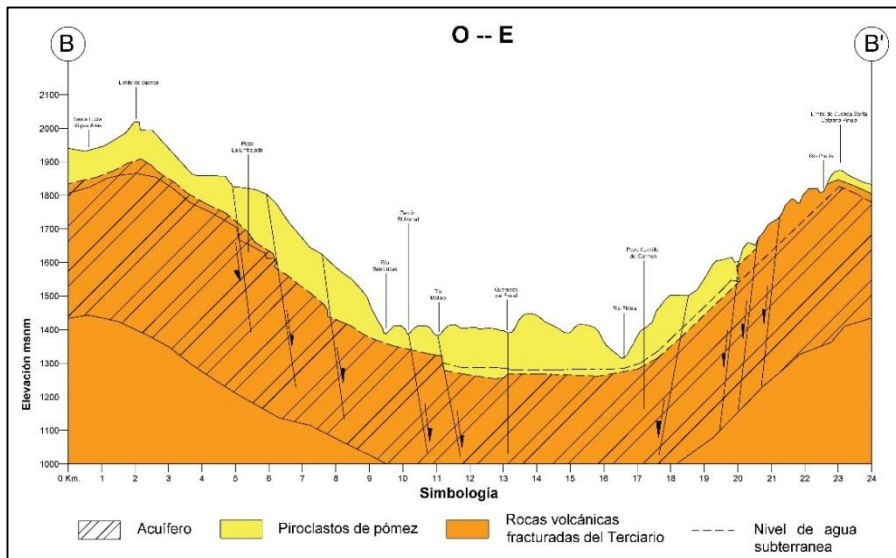
Fuente: *Estudio hidrogeológico de los acuíferos volcánicos de la República de Guatemala*. p. 35

Figura 9. **Perfil hidrogeológico A - A' del acuífero del valle sur de la Ciudad de Guatemala**



Fuente: *Estudio hidrogeológico de los acuíferos volcánicos de la República de Guatemala*. p. 35

Figura 10. **Perfil hidrogeológico B - B' del acuífero del valle sur de la Ciudad de Guatemala**



Fuente: *Estudio hidrogeológico de los acuíferos volcánicos de la República de Guatemala*. p. 35



### **2.5.3.2. Red de flujo de aguas subterráneas**

El valle de Guatemala está sobre una fosa tectónica, por esto se considera que el flujo subterráneo es más controlado desde las partes altas a las partes bajas de la caldera del lago de Amatitlán, que se localiza al sur del área en estudio.

Al norte de la cuenca, los niveles estáticos son de más de 100 m bajo la superficie de los terrenos con altitudes mayores de los 1 500 msnm (figura 9); es decir, los niveles del manto freático están a aproximadamente a 1 440 msnm. En las partes bajas en San Miguel Petapa, con altitud de 1 250 msnm, la isopieza es de 1 225 msnm, como se observa en el mapa de flujo de aguas subterráneas (figura 11).

Los principales flujos de aguas subterráneas provienen del oeste y se tienen las recargas mayores en los alrededores de Mixco, los cerros Alux, El Astillero y Montaña Carmona, con valores de niveles estáticos de 1 600 a 1 700 msnm. El segundo mayor flujo de agua se recarga en las partes montañosas en Santa Catarina Pinula y Cumbres de San Nicolás, donde los niveles estáticos se encuentran desde 1 600 a 1 800 msnm. Ambos flujos se unen en el sector de Ojo de Agua y San Miguel Petapa y representa una zona de descarga de flujo subterráneo hacia la zona del Lago de Amatitlán.

Figura 11. Mapa de flujo de aguas subterráneas del acuífero del valle sur de la Ciudad de Guatemala

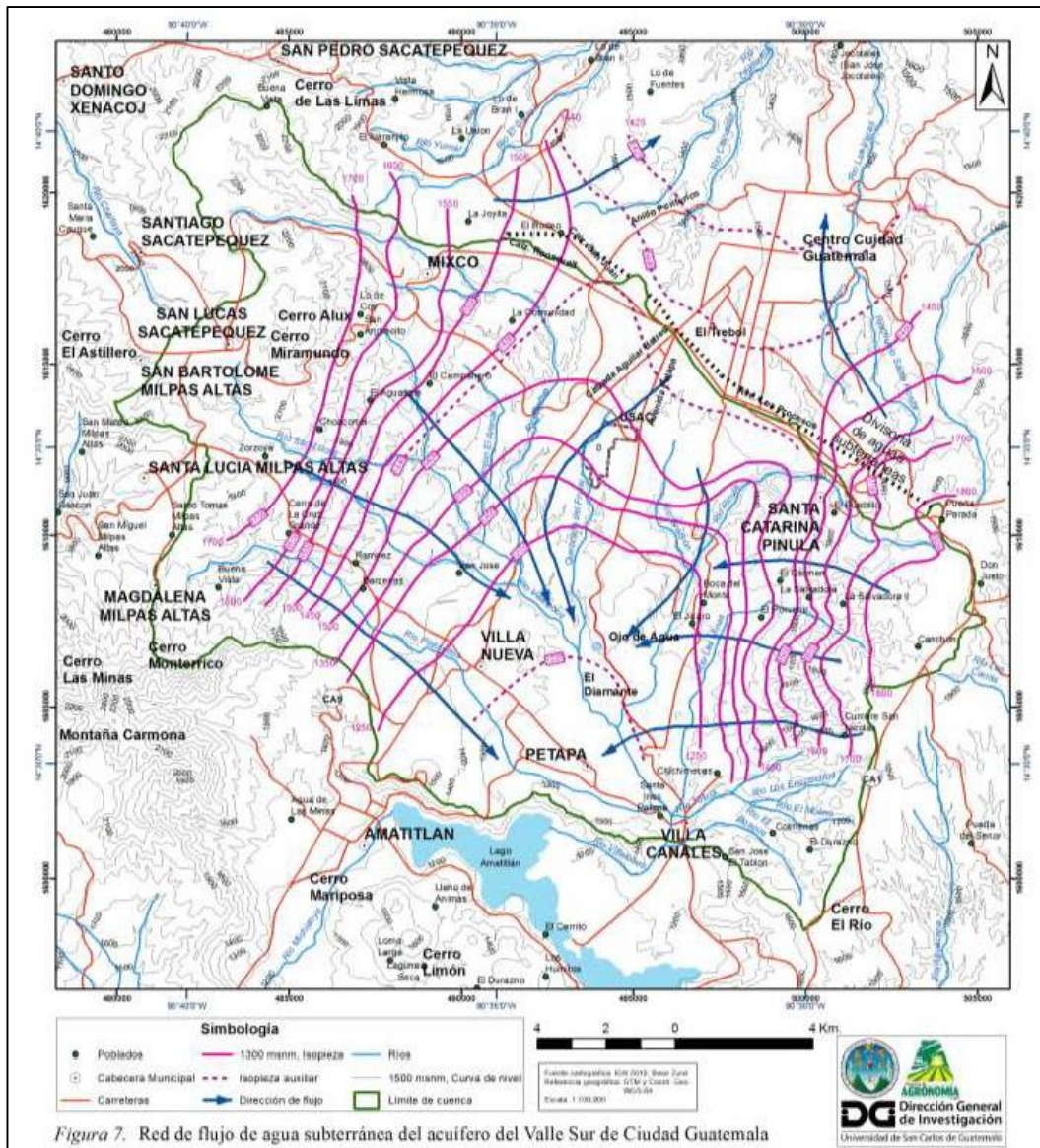


Figura 7. Red de flujo de agua subterránea del acuífero del Valle Sur de Ciudad Guatemala

Fuente: Estudio hidrogeológico de los acuíferos volcánicos de la República de Guatemala. p. 35

## **2.6. Situación actual del abastecimiento de agua potable y otros servicios del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala**

Para obtener resultados confiables en la delimitación de límites de protección en pozos del campus central es necesario realizar varios estudios de la situación actual de los mismos, por lo que a continuación se muestran datos obtenidos de cada una de las instalaciones encargadas de administrar los pozos del campus central.

### **2.6.1. Puntos de abastecimiento**

Actualmente el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala se abastece por medio de cinco pozos mecánicos para extracción de agua potable, proveniente del acuífero del valle sur de la Ciudad de Guatemala. La ubicación y descripción específica de cada uno se muestra a continuación.

#### **2.6.1.1. Pozo 1, División de servicios generales**

La División de Servicios Generales cuenta con dos pozos para el abastecimiento de la mayor demanda de agua en el campus central. El primer pozo está ubicado en latitud 14° 35' 21,2" norte, longitud 90° 33' 11,7" oeste y a una altura de 1 492 metros sobre el nivel del mar (figura 12), en las afueras de la facultad de Arquitectura.

Figura 12. **Localización de pozos mecánicos en el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala**



Fuente: Google Earth Pro, Junio 2019

Este pozo es administrado y operado por la División de Servicios Generales a través del Departamento de Mantenimiento de la Universidad. Según registros, este pozo fue perforado en el año 1988. No hay registro del método de perforación.

A continuación, en la tabla IX se muestran los datos técnicos del pozo 1 de la División de Servicios Generales:

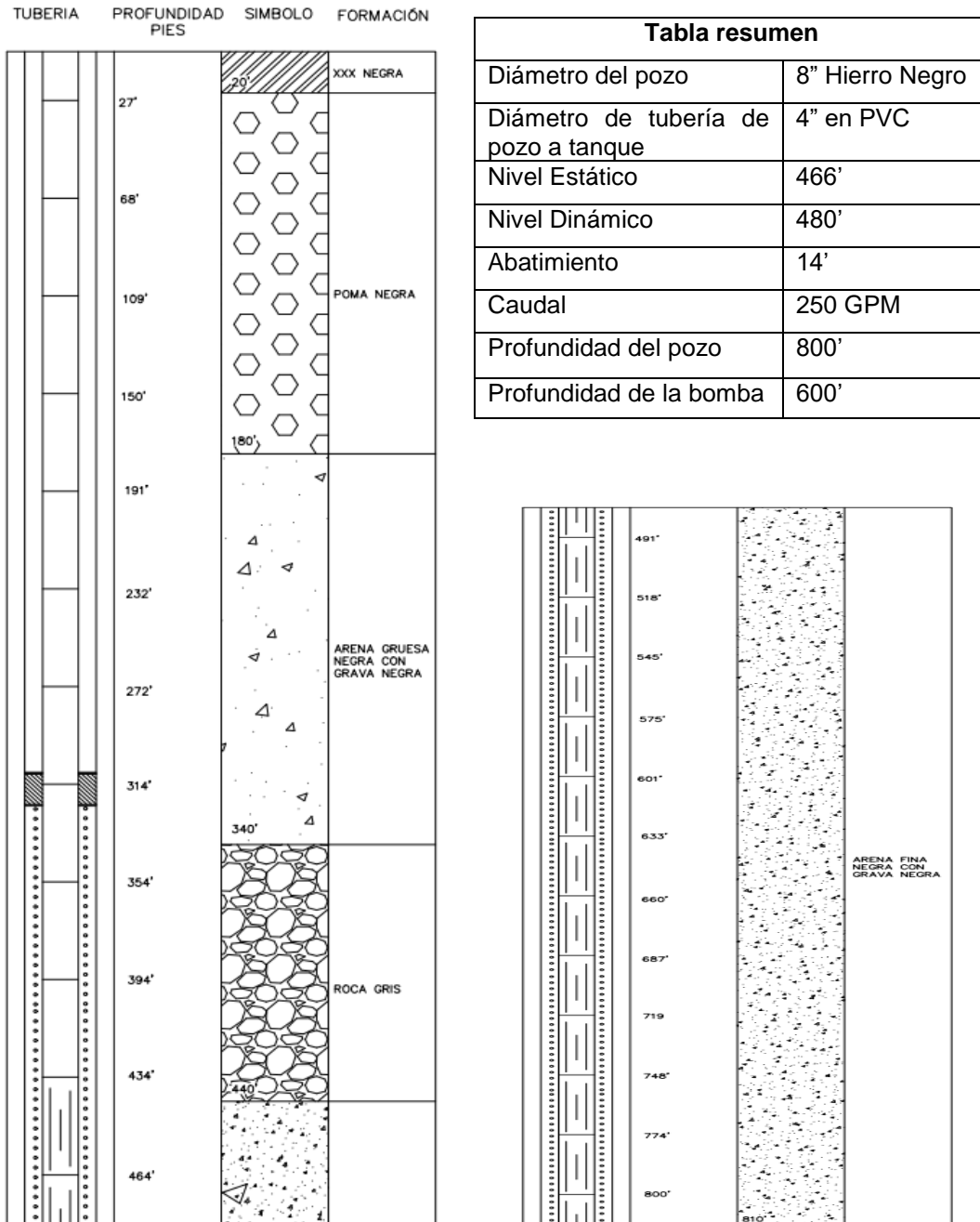
Tabla IX. **Datos técnicos del pozo 1 de División de servicios generales**

Diámetro del pozo	8" Hierro Negro
Profundidad del pozo	800'
Longitud ranurada	366'
Sello sanitario de cemento	315' A 335'
Filtro de grava	335' A 800'
Profundidad de la bomba	600'
Diámetro de tubería de pozo a tanque	4" en PVC
Nivel estático	466'
Nivel dinámico	480'
Abatimiento	14'
Caudal	250 GPM
Caudal específico	17,86 GPM/Pie

Fuente: Consulta con personal administrativo del área de mantenimiento del campus central de la Universidad de San Carlos, abril 2019.

A continuación, se muestra el perfil estratigráfico realizado en el proceso de perforación del pozo en cuestión.

Figura 13. Perfil estratigráfico de pozo 1, División de servicios generales, año de perforación 1988



Fuente: Dirección de Servicios Generales, elaboración propia.

### 2.6.1.2. Pozo 2, División de servicios generales

El segundo pozo con el que cuenta la División de Servicios Generales de la Universidad de San Carlos de Guatemala se encuentra ubicado en las coordenadas latitud 14° 35' 03,5" norte, longitud 90° 33' 22,8" oeste, a una altura de 1 486 metros sobre el nivel del mar (figura 12).

Este pozo, al igual que el anterior, es administrado por la División de servicios generales, a través del departamento de Mantenimiento de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Fue perforado en el año 1988, sin ningún registro de método de perforación, al igual que el pozo anterior.

A continuación, en la tabla VIII se muestran los datos técnicos del segundo pozo.

Tabla X. **Datos técnicos del pozo 2 de División de servicios generales**

Diámetro del pozo	8" Hierro negro
Profundidad del pozo	900'
Longitud ranurada	600'
Sello sanitario de cemento	220' A 240'
Filtro de grava	240' A 900'
Profundidad de la bomba	600'
Diámetro de tubería de pozo a tanque	4" en PVC
Nivel estático	No hay datos
Nivel dinámico	No hay datos
Abatimiento	No hay datos
Caudal	231 GPM
Caudal específico	No hay datos

Fuente: Consulta con personal administrativo del área de mantenimiento del campus central de la Universidad de San Carlos, abril 2 019.

Este último pozo se encuentra conectado a un tanque de almacenamiento de 763 m<sup>3</sup>, el cual se utiliza cuando aumenta la demanda y se activan los dos pozos, que depositan una parte a este tanque.

A continuación, se muestra el perfil estratigráfico realizado en el proceso de perforación del pozo en cuestión.



Figura 14. **Perfil estratigráfico de pozo 2, división de servicios generales, año de perforación 1988**

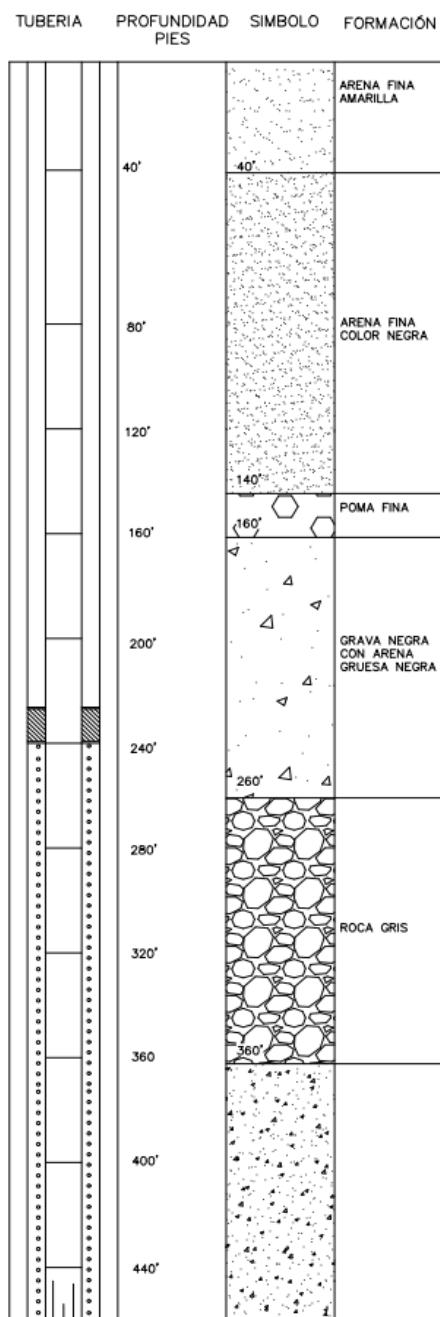
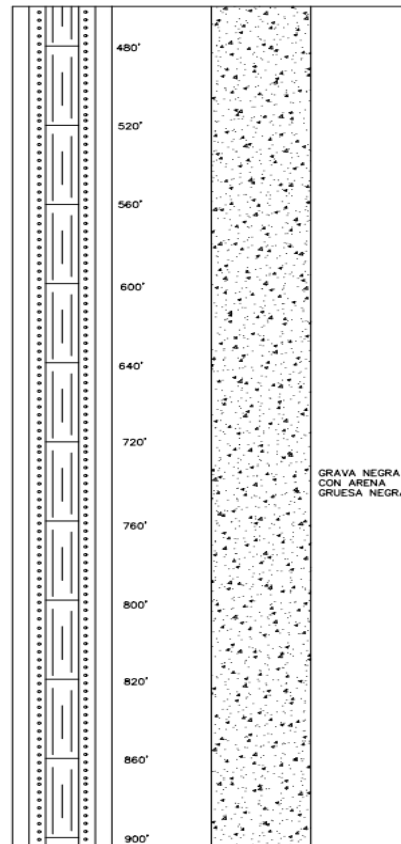


Tabla resumen	
Diámetro del pozo	8" Hierro Negro
Diámetro de tubería de pozo a tanque	4" en PVC
Nivel estático	No hay datos
Nivel dinámico	No hay datos
Abatimiento	No hay datos
Caudal	231 GPM
Profundidad del pozo	900'
Profundidad de la bomba	600'



Fuente: División de servicios generales, elaboración propia.

### 2.6.1.3. Pozo finca experimental de Veterinaria

El tercer pozo en uso que abastece al campus central de la Universidad de San Carlos se encuentra a cargo de la Facultad de Veterinaria, el cual abastece de agua para actividades que se realizan en la finca experimental, pero no suministra a los edificios de aulas y administrativos de su facultad. Este se encuentra localizado en las coordenadas latitud 14° 34' 53,2" norte, y longitud 90° 33' 27,4" oeste y a una altura de 1483 metros sobre el nivel del mar.

Este es un pozo de pequeñas dimensiones en comparación con los otros pozos que se encuentran en el campus central. Tiene un diámetro de bombeo menor y un equipo de bombeo hidráulico de menor capacidad ya que su demanda no es elevada. Este solo abastece a la finca que pertenece a la facultad de veterinaria, la cual sirve como prácticas de laboratorio para los estudiantes de las carreras que en esta unidad académica se imparten.

En la actualidad no se cuenta con la fecha en que el pozo fue realizado, pero por sus características se asume que la perforación fue en los años noventa, hace un poco más de 25 años. Los datos técnicos del pozo se enumerarán en la tabla XI.

Tabla XI. **Datos técnicos del pozo de finca experimental de Veterinaria**

<b>Diámetro del pozo</b>	8" en hierro negro
<b>Diámetro de tubería de pozo a tanque</b>	2" en PVC
<b>Caudal</b>	66 GPM
<b>Diámetro de tubería de pozo a tanque</b>	2" galvanizada tipo mediana

Fuente: Consulta con personal administrativo del área de mantenimiento de la facultad de Veterinaria, abril 2019.

#### 2.6.1.4. Pozo finca experimental de Agronomía (CEDA)

El cuarto pozo en funcionamiento pertenece a la Facultad de Agronomía. Se encuentra ubicado en latitud 14° 34' 53,1" norte y longitud 90° 33' 19,8" oeste. El Centro Experimental de Agronomía (CEDA) es una finca de tipo experimental que sirve de apoyo para los servicios y actividades de docencia de la Facultad de Agronomía, donde se realizan prácticas de cultivo para los alumnos de esta unidad académica. Con este fin es utilizado este pozo, además de brindar apoyo cuando es necesario en casos que incrementa la demanda en el campus central. La perforación del pozo se llevó a cabo en el año 1994. A continuación, se muestra los datos técnicos del pozo mecánico:

Tabla XII. Datos técnicos del pozo de la finca experimental de Agronomía (CEDA).

Diámetro del pozo	8" en hierro negro
Profundidad del pozo mecánico	1 002'
Profundidad de la bomba	728'
Longitud ranurada	600'
Sello sanitario de cemento	282' a 300'
Filtro de grava	300' a 1 002'
Diámetro de tubería de pozo a tanque	4" en PVC
Nivel estático	555'
Nivel dinámico	578'
Abatimiento	23'
Caudal	360 GPM
Caudal específico	15,65 GPM/PIE

Fuente: Consulta con personal administrativo del área de mantenimiento de la Facultad de Agronomía, abril 2 019.

#### **2.6.1.5. Pozo 1, Facultad de Ingeniería**

La Facultad de Ingeniería cuenta con dos pozos mecánicos, de los cuales solo uno de ellos se encuentra en servicio; está localizado en latitud 14° 35' 11,3" norte, y longitud 90° 33' 14,7" oeste, a una altura de 1 491 msnm.

Para la Facultad de Ingeniería fue insuficiente la cantidad de agua que proporcionaba la red municipal y la del campus central de la Universidad en los años setenta, por lo que se perforó el pozo para implementar el servicio propio en el año 1973. Un segundo pozo mecánico se perforó en el año 1978 para complementar el servicio, y fue asignado para el laboratorio de ingeniería química; en la actualidad se encuentra inhabilitado. El primer pozo de la Facultad de Ingeniería es el único que no está a cargo de la División de Servicios Generales en el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

A continuación, se muestran los datos técnicos del pozo mecánico de la Facultad de Ingeniería:

Tabla XIII. **Datos técnicos del pozo 1 de la Facultad de Ingeniería**

Diámetro del pozo	6" en hierro negro
Profundidad del pozo mecánico	600'
Profundidad de la bomba	No hay datos
Longitud ranurada	180'
Sello sanitario de cemento	80' a 100'
Filtro de grava	100' a 600'
Diámetro de tubería de pozo a tanque	4" en tubería galvanizada
Nivel estático	No hay datos
Nivel dinámico	No hay datos
Abatimiento	No hay datos
Caudal	190 GPM
Caudal específico	No hay datos

Fuente: Consulta con personal administrativo del área de mantenimiento de la Facultad de Ingeniería, abril 2019.

#### **2.6.1.6. Pozo 2, Facultad de Ingeniería**

El segundo pozo de la Facultad de Ingeniería fue realizado en el año 1973. Actualmente no se encuentra en funcionamiento. Está localizado en latitud 14° 35' 12,0" norte, y longitud 90° 33' 13,6" oeste a una altura de 1491 msnm.

Debido a que se encuentra fuera de funcionamiento no hay datos exactos sobre el mismo. A continuación, se muestran algunos datos obtenidos:

**Tabla XIV. Datos técnicos del pozo 2 de la Facultad de Ingeniería**

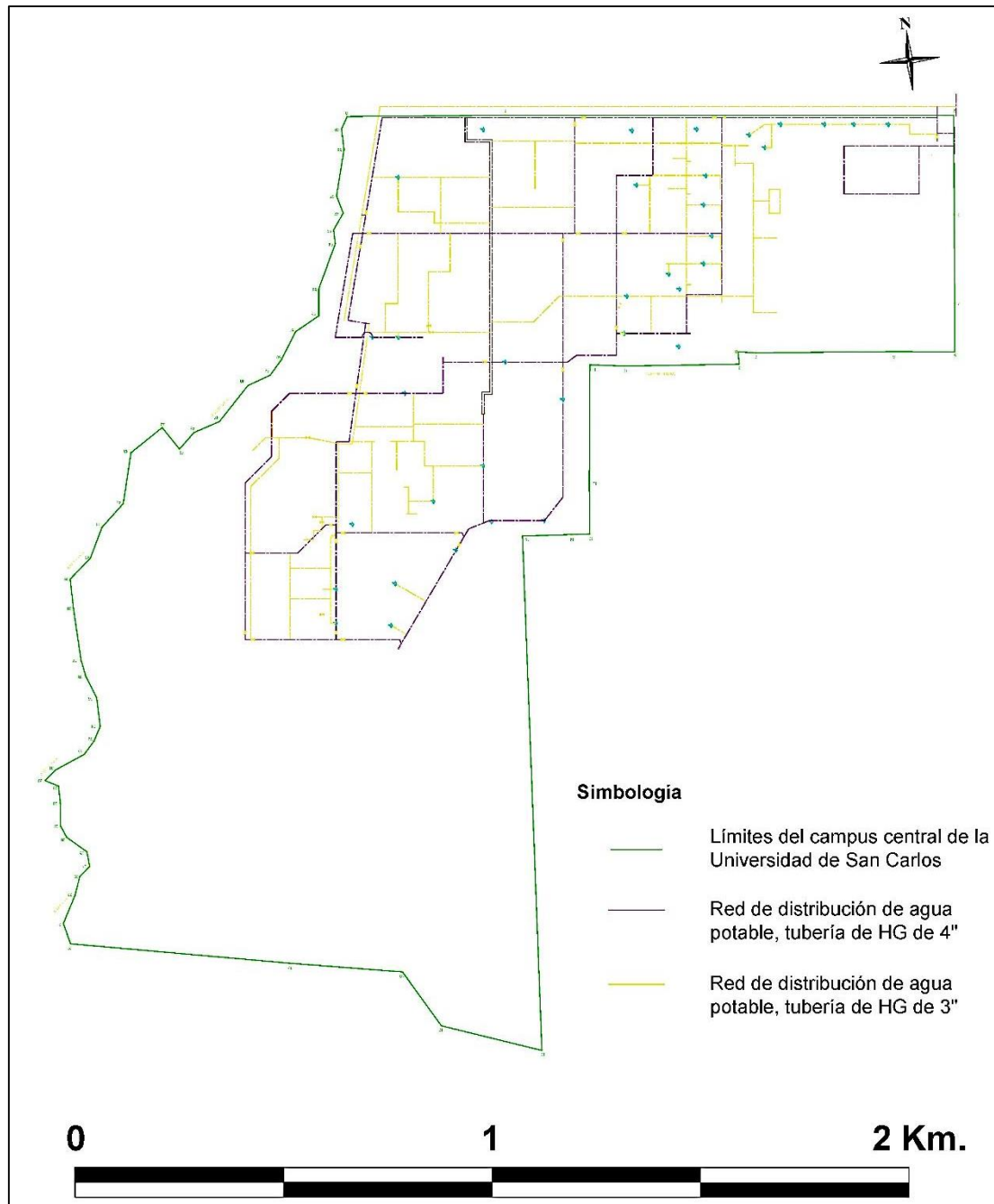
Diámetro del pozo	6" en hierro negro
Profundidad del pozo mecánico	600'
Profundidad de la bomba	No hay datos
Longitud ranurada	180'
Sello sanitario de cemento	80' a 100'
Filtro de grava	100' a 600'
Diámetro de tubería de pozo a tanque	4" en tubería galvanizada
Nivel estático	No hay datos
Nivel dinámico	No hay datos
Abatimiento	No hay datos
Caudal	190 GPM
Caudal específico	No hay datos

Fuente: Consulta con personal administrativo del área de mantenimiento de la facultad de Ingeniería, abril 2019.

### **2.6.2. Red de distribución de agua potable**

La red de distribución de agua potable del campus central está conectada a varias fuentes, por motivo de la cantidad de personas a las que se abastece. Una parte la abastece la Empresa Municipal de Agua Potable y la otra proviene de los pozos mecánicos de agua potable disponibles en el centro universitario. La red principal de distribución cuenta con tubos de hierro galvanizado de cuatro y dos pulgadas según lo que sea necesario para el edificio que será abastecido.

Figura 15. Red de distribución de agua potable en el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala

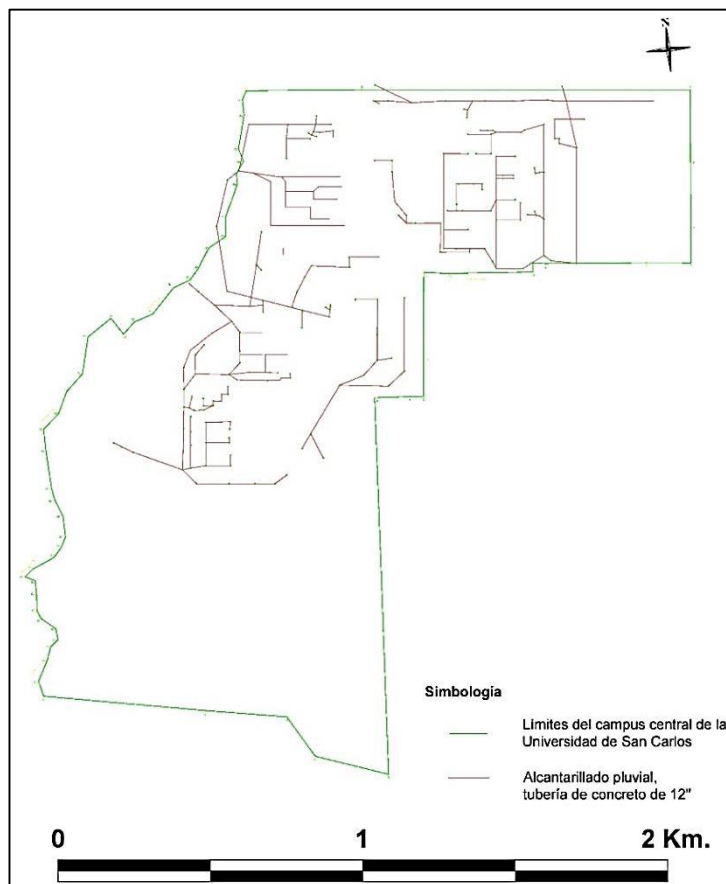


Fuente: Dirección de Servicios Generales, junio de 2018.

### 2.6.3. Red de alcantarillado pluvial

La red de alcantarillado pluvial del campus central se encuentra dividida en tres secciones, dos desembocan al río al oeste y la tercera a una quebrada colindante al Este. Esta red de alcantarillado cuenta con tubería de concreto de 12 pulgadas de diámetro en su mayor parte; también cuenta con tubería PVC para las conexiones provenientes de las instalaciones.

Figura 16. Red de alcantarillado pluvial del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala



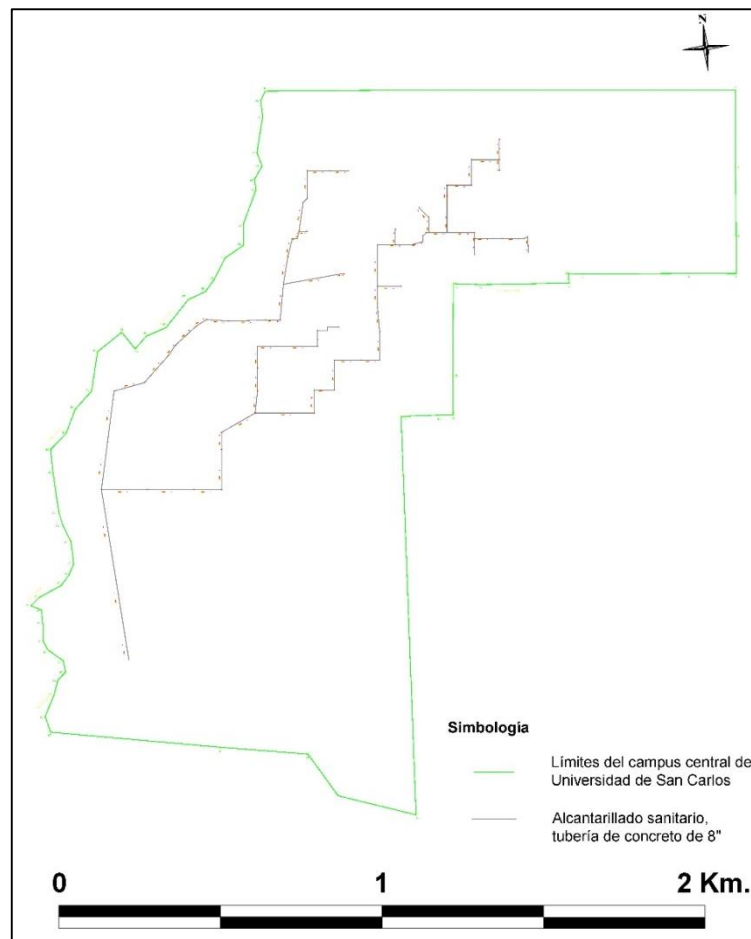
Fuente: Dirección de Servicios Generales, junio de 2019.



#### 2.6.4. Red de alcantarillado sanitario

La red de alcantarillado sanitario cuenta con tubería de PVC con un diámetro de 8 pulgadas. Esta red principal desemboca en la planta de tratamiento del campus central, expulsa los residuos líquidos en el río aledaño al oeste.

Figura 17. **Red de alcantarillado sanitario del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala**



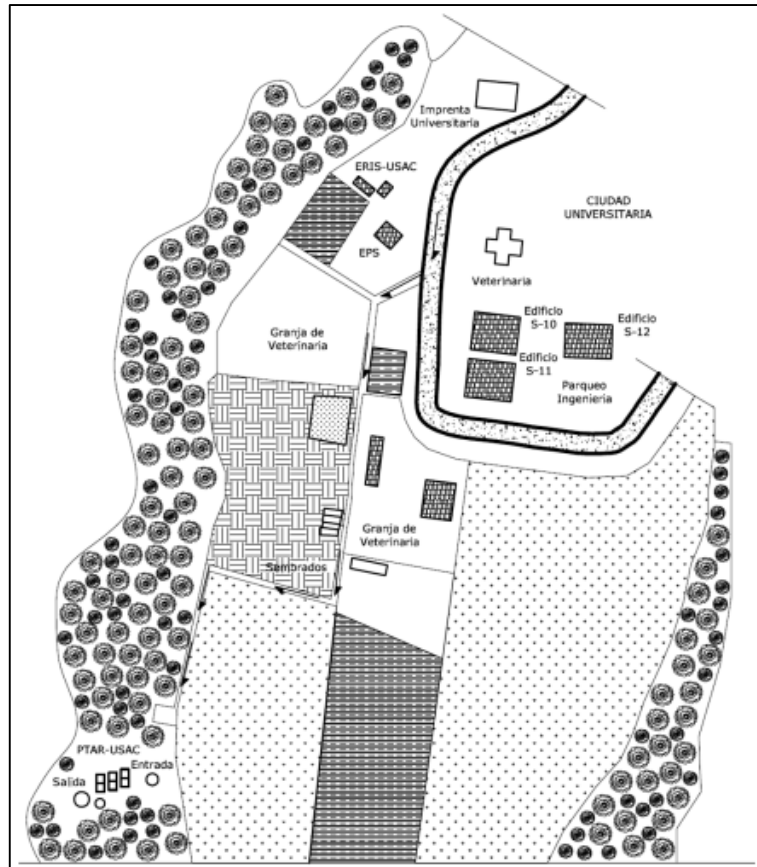
Fuente: Dirección de Servicios Generales, junio de 2018.

### **2.6.5. Planta de tratamiento de aguas residuales del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala**

Una planta de tratamiento consiste en la eliminación de nutrientes del agua residual, por lo que éste sirve para controlar el vertido de nitrógeno y fósforo, debido al impacto que estas sustancias puedan causar en un cuerpo receptor, en el caso de la Universidad de San Carlos, el río Villa Lobos.

La planta de tratamiento de aguas residuales que se encuentra en el campus central de la Universidad de San Carlos está en las siguientes coordenadas: latitud: 14° 34' 43" N, longitud: 90° 33' 34,8" O a 1 456 msnm. La entrada se encuentra después de la Unidad de EPS y la Granja de Veterinaria. El recorrido se encuentra señalizado en la figura 17 hasta la planta de tratamiento. El camino está cercado y solo tiene acceso personal autorizado.

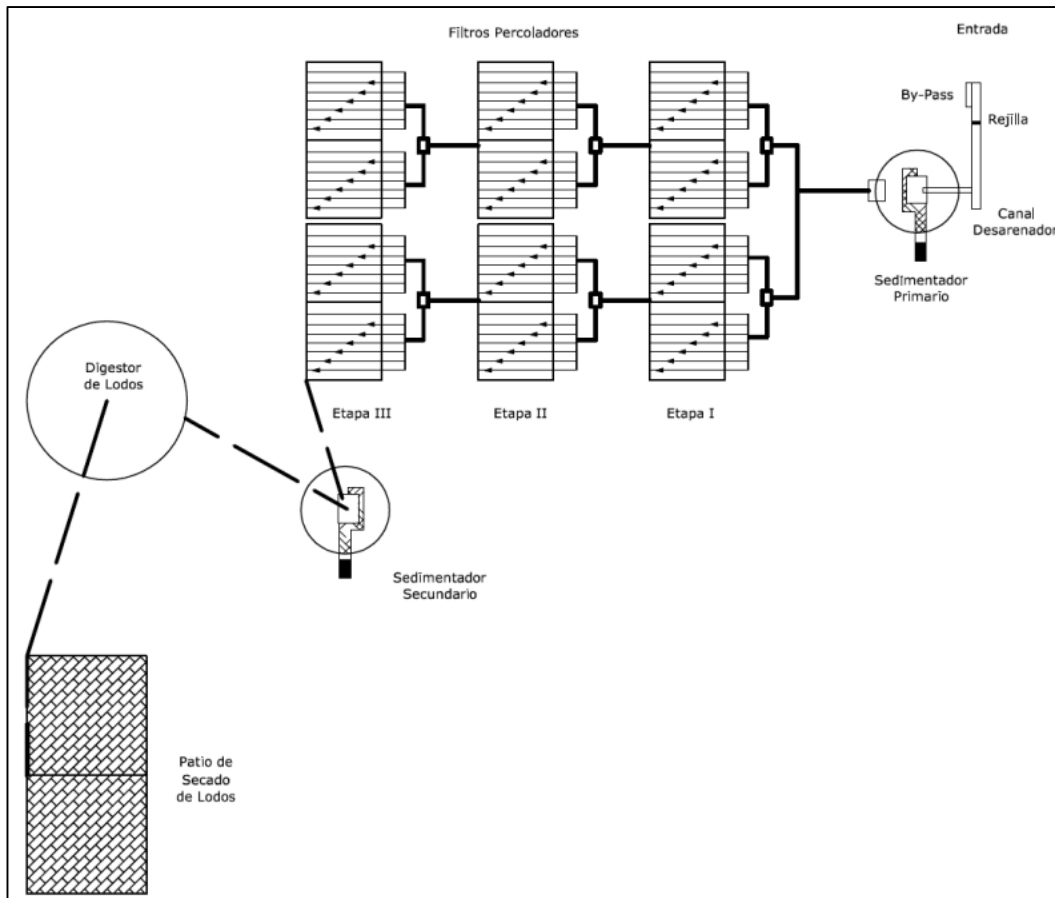
Figura 18. Esquema de recorrido a la entrada de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC



Fuente: PIERRI, Ileana, *Eficiencia en la remoción de nitrógeno y fósforo en los filtros percoladores de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad de San Carlos*. p. 13,

En la siguiente figura se muestra cómo está distribuida la planta de tratamiento por unidades. Muestra desde la entrada de agua residual que pasa por el canal de rejas y desarenador para dirigirse hacia el sedimentador primario y posteriormente a los filtros percoladores; sigue hacia el sedimentador secundario y de este se dirige a descargar el cuerpo receptor, en ese caso el río Villalobos.

Figura 19. **Esquema de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC**



Fuente: PIERRI, Ileana, *Eficiencia en la remoción de nitrógeno y fósforo en los filtros percoladores de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad de San Carlos*. p. 13,

En uno de los estudios de efectividad más recientes de la planta de tratamiento de aguas residuales realizado por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), ejecutado por la Ingeniera Ileana Felicia Pierri, se evaluaron los parámetros representativos de la remoción de nitrógeno y fósforo que se da en los filtros percoladores de la planta de

tratamiento en cuestión. Tomando en cuenta los límites máximos permisibles de descarga de aguas residuales a cuerpos receptores establecidos en el Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos, Acuerdo Gubernativo 236 - 2006, en el artículo 20, se muestran los límites de descarga máximos que debe presentar una planta de tratamiento para ser considerada como efectiva.

A continuación, se muestra una tabla comparativa de los resultados obtenidos por el estudio realizado en ERIS y los límites máximos establecidos en el acuerdo gubernativo:

Tabla XV. **Comparación entre resultados de estudios realizados por ERIS y límites máximos permisibles establecidos en el Acuerdo Gubernativo 236 - 2006**

	<b>Entrada (mg/l)</b>	<b>Salida (mg/l)</b>	<b>Salida máximo permisibles (mg/l)</b>
<b>Nitrógeno total</b>	23,74	18,91	25
<b>Fosforo total</b>	15,13	13,24	15
<b>Demanda bioquímica de oxígeno</b>	91,23	18,43	150

Fuente: PIERRI, Ileana, *Eficiencia en la remoción de nitrógeno y fósforo en los filtros percoladores de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad de San Carlos*. p. 13,

Con base en los datos obtenidos se puede concluir como eficiente la planta de tratamiento del campus central de la Universidad de San Carlos, de acuerdo con la investigación realizada por la Ingeniera Ileana Pierri.



### **3. VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO FRENTE A LA CONTAMINACIÓN**

La mala calidad del agua subterránea puede ser debida a causas naturales o a la actividad humana. Donde en realidad al hablar de contaminación nos referimos a esta última, por ejemplo, es un vertido industrial en un río, que es resultado de actividad humana. Aunque en muchas ocasiones la mala calidad del agua se debe a circunstancias naturales, se utiliza también el término agua contaminada.

La contaminación es algo común en todo el planeta; solo se diferencia en la proveniencia de los contaminantes. En un país como Guatemala, que se encuentra en vías de desarrollo, las aguas llevan agroquímicos por sembradíos, residuos industriales y aguas negras sin tratar. A esto se añade el uso de detergentes que forman algas en cuerpos de agua superficiales, mientras estas bacterias se reproducen, más oxígeno es consumido y menos oxígeno queda en el agua.

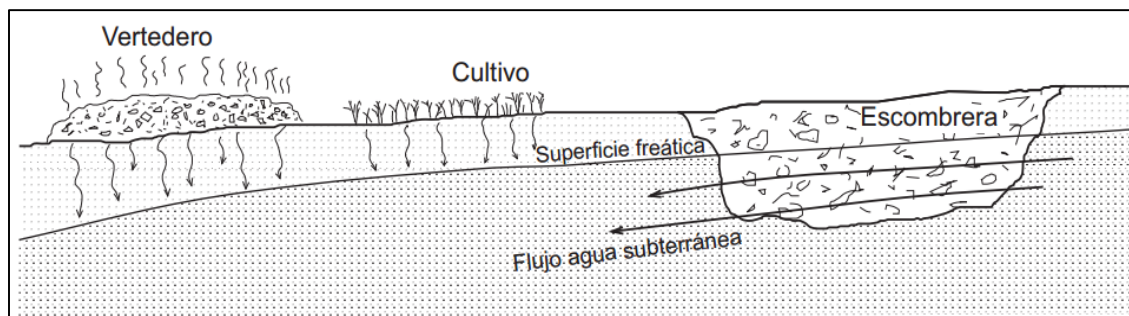
Este problema se da en aguas superficiales, por ejemplo, el lago de Amatitlán, y se extiende a las aguas subterráneas. Este proceso es lento pero los contaminantes siempre llegan a las zonas profundas. El agua subterránea es considerada como la fuente de agua para consumo humano menos contaminada; es muy difícil tratarla de una manera eficiente.

### 3.1. Modos de contaminación de las aguas subterráneas

Las aguas subterráneas no están expuestas directamente a los efectos de las actividades humanas, desarrolladas normalmente en la superficie. Sin embargo, las sustancias contaminantes consiguen la manera de llegar hasta los acuíferos, a continuación, se muestran diversos modos en los que esto sucede:

- Infiltración de sustancias almacenadas en la superficie, o de la lluvia que cayó entre ellas.
- Filtración de sustancias almacenadas bajo tierra o disolución de ellas por el flujo natural del agua subterránea.
- Filtración desde un río.
- Derrames accidentales de depósitos o conducciones superficiales o enterradas.
- Desde la superficie a través de captaciones abandonadas o mal construidas.
- Desde otro acuífero, a través de captaciones que comuniquen entre acuíferos.<sup>36</sup>

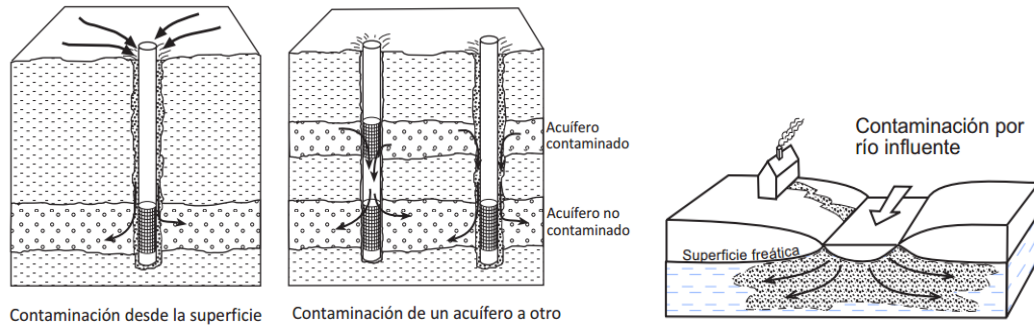
Figura 20. Diversos tipos de contaminación en las aguas subterráneas



<sup>36</sup> SÁNCHEZ, Javier. Contaminación de las aguas subterráneas. <http://hidrologia.usal.es>.



Continuación de la figura 20.



Fuente: Contaminación de las aguas subterráneas. *Modos de contaminación*. p. 1 - 2.

A través de alguna de estas rutas, los contaminantes alcanzan la superficie freática que se encuentra más alta, y en consecuencia se propagan. Son transportadas por el flujo subterráneo.

### 3.2. Clasificación de focos de contaminación en un perímetro de protección

“Se han clasificado los posibles focos contaminantes existentes, a efecto de delimitación de perímetros de protección, en:

- Areales conservativos
- Areales no conservativos
- Puntuales conservativos
- Puntuales no conservativos”<sup>37</sup>

<sup>37</sup> MORENO MERINO, Luis. y MARTÍNEZ NAVARRETE, Carlos. *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas*. p. 33.

Cada una de estas diferentes clasificaciones se basa en el carácter degradable y no degradable de la contaminación y la zona afectada. Por esta razón cabe indicar que la perdurabilidad y las variaciones que se producen en los diferentes tipos de contaminantes serán analizadas con mayor detalle más adelante.

### **3.2.1. Focos contaminantes areales conservativos**

Están constituidos por las prácticas que afectan a amplias zonas y cuyos agentes contaminantes no se destruyen ni se modifican, por lo que su concentración solo disminuye por dilución.

Cuando alcanzan el acuífero se desplazan a la misma velocidad que el agua subterránea y puede permanecer mucho tiempo en ella. El principal foco de contaminación de este tipo es debido al uso abusivo de fertilizantes en las prácticas agrícolas, que produce la incorporación al acuífero de diferentes sustancias, principalmente nitrógeno y también, aunque en menor proporción, fósforo y potasio (...).

Las características físicas del suelo: textura, permeabilidad, humedad; químicas: acidez, composición; biológicas: diversidad y densidad de flora y microfauna, así como las necesidades propias de la planta para su óptimo desarrollo son igualmente de gran importancia.<sup>38</sup>

---

<sup>38</sup> MORENO MERINO, Luis. y MARTÍNEZ NAVARRETE, Carlos. *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas*. p. 38.

Figura 21. **Uso abusivo de fertilizantes**



Fuente: Manual teórico – práctico: los biofertilizantes y su uso en la agricultura. SAGRA – <http://www.biofabrica.com.mx/blog/?p=1228>. Consulta: 1 de mayo de 2018.

### **3.2.2. Focos contaminantes areales no conservativos**

Son aquellos que como en el caso anterior, afectan a amplias zonas, pero en los cuales su composición química varía con el tiempo.

El más importante foco de este tipo lo constituye el uso de pesticidas. Bajo esta denominación se incluyen todos aquellos productos utilizados para prevenir y luchar contra las plagas, animales y vegetales, que afectan a los cultivos: fungicidas, herbicidas, insecticidas, rodenticidas... La gran mayoría son compuestos químicos orgánicos sintéticos de elevada toxicidad.<sup>39</sup>

---

<sup>39</sup> MORENO MERINO, Luis. y MARTÍNEZ NAVARRETE, Carlos. *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas*. p. 38.

Figura 22. **Vertederos en ríos**



Fuente: Google Images. <http://www.cambiodemichoacan.com.mx/fotos/5c6e8c98bab227324c7f099b7d526d04,rioo.JPG>. Consulta: 1 de mayo de 2018.

Es muy interesante valorar la vulnerabilidad del acuífero a estos contaminantes, con el fin de adecuar el diseño del perímetro a dicha circunstancia.

### **3.2.3. Focos contaminantes puntuales conservativos**

Están constituidos por aquellas actividades de ámbito muy localizado y que producen contaminantes que no se destruyen ni se modifican. Su concentración únicamente disminuye mediante dilución.

Un caso muy particular es la posible existencia de ríos o ramblas conectadas al acuífero. Dichos cauces fluviales pueden ser los receptores finales de los vertidos líquidos procedentes de las poblaciones existentes aguas arriba e infiltrarse en esta área (...).

En este grupo cabe destacar los vertidos industriales. Hay que prestar especial atención a las industrias de cerámica, vidrio, galvanotecnia y curtidos, pues pueden producir contaminación por metales pesados. Su presencia supone un importante riesgo, dado su carácter tóxico incluso a bajas concentraciones (...).

Debe realizarse un inventario detallado especificando el tipo y sistemas de vertido (fosas sépticas, inyección en sondeos profundos, alcantarillados, entre otros) (...).

Asimismo, la actividad minera supone en ocasiones un peligro de gran magnitud para la calidad del agua subterránea.<sup>40</sup>

### **3.2.4. Focos contaminantes puntuales no conservativos**

Se engloban en este apartado aquellas actividades que son de ámbito localizado y producen sustancias degradables.

Los residuos urbanos (sólidos y líquidos) son los más frecuentes focos contaminantes de este tipo por lo que es imprescindible estudiar los asentamientos urbanos presentes en la zona, indicando el modo de eliminación de sus vertidos y evaluando el riesgo que suponen respecto a la calidad de las aguas subterráneas.

La composición de los residuos urbanos es muy heterogénea. Además del número de habitantes influyen otros factores, como el clima, la ubicación geográfica, el nivel de vida, los hábitos culturales, entre otros. Cabe destacar que incluso una misma población genera diferentes residuos según la estación del año, especialmente si está en zona turística. Estas variaciones son más significativas en los residuos sólidos.<sup>41</sup>

### **3.3. Vulnerabilidad frente a la contaminación de las diferentes zonas**

Es muy importante analizar la vulnerabilidad de los acuíferos existentes en las proximidades de las captaciones, teniendo en cuenta las actividades potencialmente contaminantes descritas en el apartado anterior.

Aunque la problemática de cada caso puede hacer que sean consideradas áreas diferentes, es muy común la distinción en los cuatro grupos las siguientes circunstancias:

---

<sup>40</sup> MORENO MERINO, Luis. y MARTÍNEZ NAVARRETE, Carlos. *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas*. p. 41.

<sup>41</sup> *Ibíd.* p. 42.

- Terrenos muy vulnerables por presentar alta permeabilidad por porosidad y carecer de protección. Normalmente corresponden a materiales detríticos cuaternarios.
- Terrenos muy vulnerables al tener una alta permeabilidad por fisuración y karstificación, careciendo de protección.
- Terrenos poco vulnerables debido a la baja permeabilidad. Estarían aquí considerados los materiales que presenten una baja permeabilidad por porosidad gracias a la abundancia de materiales arcillosos que contienen. Debido a estas características su interés como acuífero es muy reducido. Aun así, la instalación de a cualquier actividad contaminante sobre ellos requiere un análisis detallado que permita evaluar con rigor el posible riesgo que represente para la calidad de las aguas subterráneas.<sup>42</sup>

Para establecer los perímetros de protección es conveniente realizar un análisis en un mapa inventario de focos potencialmente contaminantes, ordenado por áreas y por situaciones puntuales. Para obtener una mayor visión del problema es necesario localizar cada una de las situaciones potencialmente contaminantes a lo largo de toda el área del campus central de la Universidad de San Carlos, entre estos están:

- Depósitos de basura sin protección contra la escorrentía o expuestos al aire libre.

---

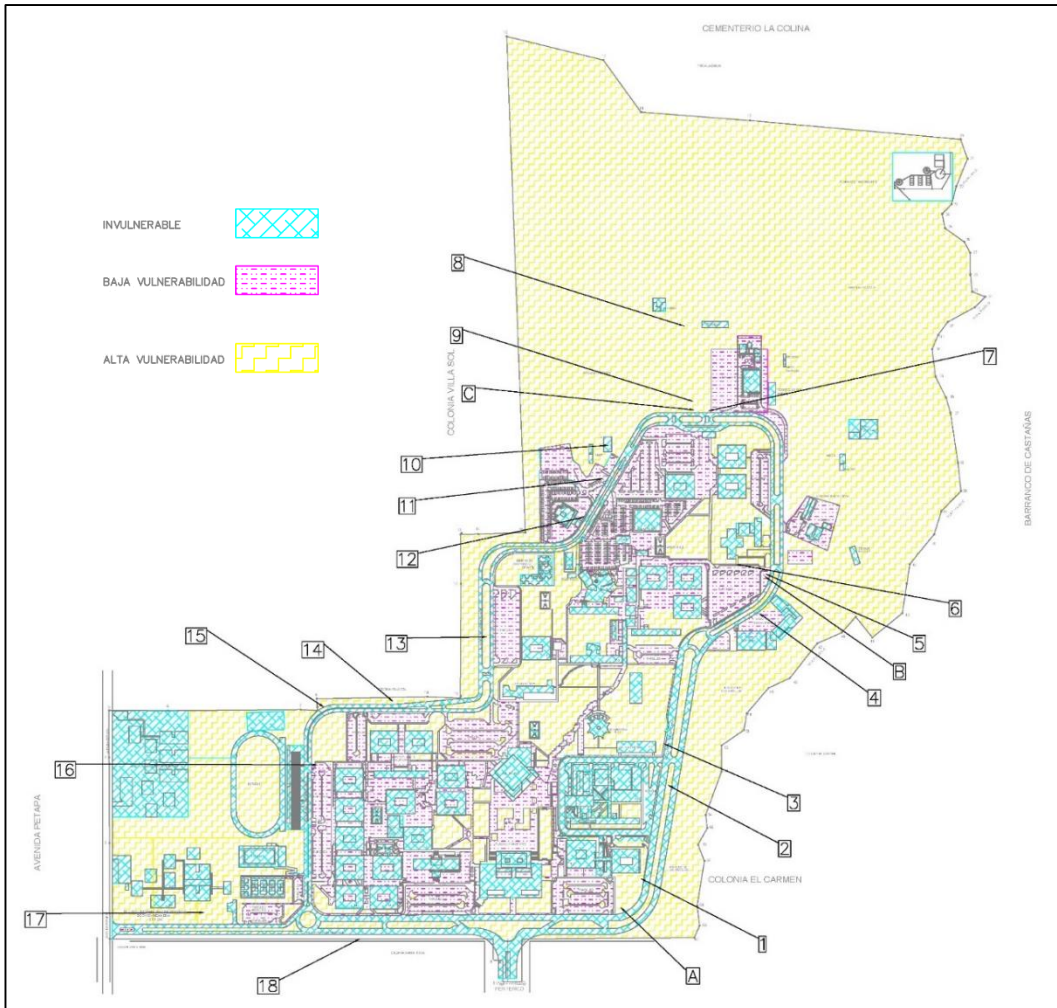
<sup>42</sup> MORENO MERINO, Luis. y MARTÍNEZ NAVARRETE, Carlos. *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas*. p. 43.

- Áreas verdes que necesitan protección gracias a su alta capacidad de infiltración.
- Áreas de pozos que necesitan protección.
- Tratamiento adecuado de los desechos del hospital de veterinaria y clínica odontológica.
- Cultivos en granja experimental.
- Estanque de aguas de uso desconocido en la facultad de Agronomía.

A continuación, se muestra el mapa de vulnerabilidad del campus central según el tipo de superficie, clasificado como:

- Invulnerable: áreas con superficie de concreto o pavimento considerablemente impermeable.
- Poco vulnerable: áreas de jardines dentro de las instalaciones de edificios bajo aire libre.
- Alta vulnerabilidad: áreas verdes en el exterior de las instalaciones que sean superficie de jardín o plantaciones.

Figura 23. **Mapa de vulnerabilidad superficial en el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala**



Fuente: elaboración propia.

Los factores puntuales enumerados que se muestran en la figura 23 se muestran a continuación:



Figura 24. Puntos de contaminación



Continuación de la figura 24.



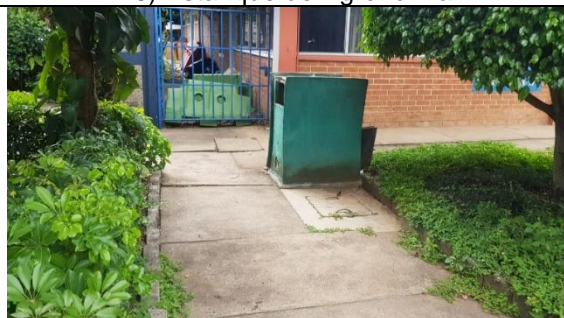
9) Invernadero de Agronomía



10) Estanque de Agronomía



11) Contenedores de basura de Agronomía



12) Basureros al aire libre



13) Áreas verdes



14) Contenedores de basura, Facultad de Humanidades



15) Contenedores de basura, Facultad de Ciencias Políticas



16) Contenedores de basura, Faculta de Ciencias Políticas

Continuación de la figura 24.



17) Área de jardín, EFPEM

18) Área de Infiltración

Fuente: elaboración propia.



## **4. PERÍMETROS DE PROTECCIÓN**

Ya establecidos todos los factores que pueden influir en la delimitación de los perímetros de protección, se realizará el planteamiento de cada uno de los métodos mencionados con los tiempos de tránsito de uno, treinta y trescientos sesenta y cinco días.

### **4.1. Método de radio fijo calculado en función del tiempo de tránsito**

Para el desarrollo del método de radio fijo en función del tiempo de tránsito se requieren las siguientes variables:

#### **4.1.1. Conductividad**

Se toma de referencia figura 6; en esta se muestra el mapa de la geología del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala. En este mapa se especifica que se tiene una cubierta gruesa de cenizas pómez de origen diverso en toda el área del centro de estudio. La conductividad es de 1,3 a 20 m/día debido a la gran cantidad de material fino en el área y a su propia compactación.

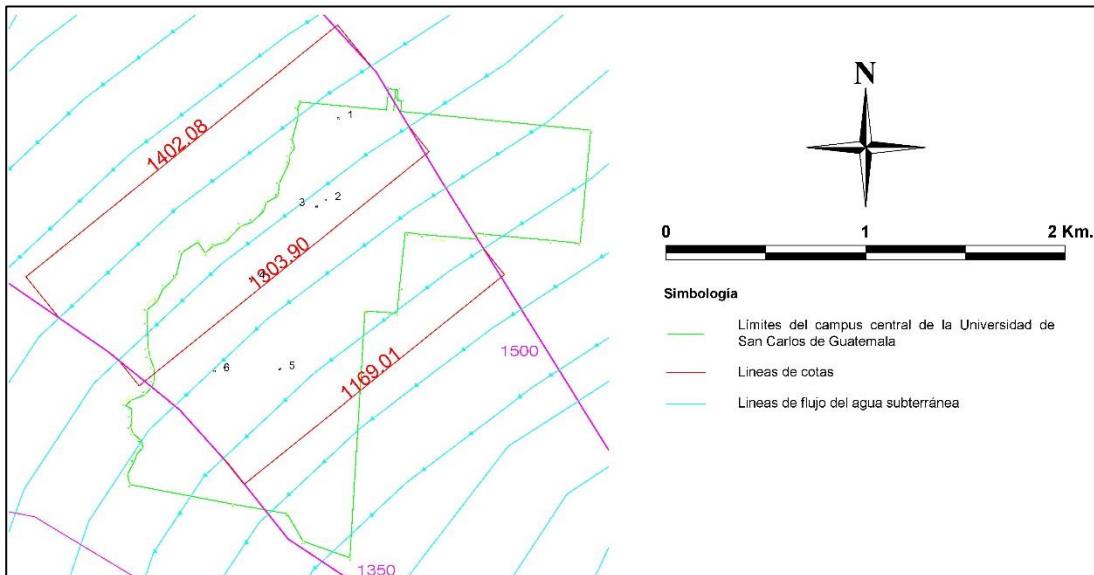
La Dirección General de Investigación no especifica un valor específico para la conductividad hidráulica en el área en cuestión, por lo que se tomará una conductividad crítica por motivos de prevención.

#### 4.1.2. Gradiente hidráulico

Para definir el gradiente hidráulico se dispondrá del mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero del valle sur de la Ciudad de Guatemala (figura 8). De las isopiezas y la distancia entre las mismas se podrá obtener un gradiente hidráulico para el área del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Utilizando la ecuación 10, se tomarán tres muestras de distancia para obtener un gradiente hidráulico representativo del área en que se encuentran los pozos del campus central.

Figura 25. **Determinación de gradiente hidráulico en el área de los pozos del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala**



Fuente: elaboración propia.

Para determinar el gradiente hidráulico del campus central se utilizará la ecuación 10.

$$i = \frac{1\,500 - 1\,350}{1\,402,08} = 0,1069$$

$$i = \frac{1\,500 - 1\,350}{1\,303,90} = 0,1150$$

$$i = \frac{1\,500 - 1\,350}{1\,169,01} = 0,1283$$

De los resultados anteriores se obtiene un gradiente hidráulico promedio de 0,1167.

#### **4.1.3. Porosidad eficaz**

Por definición, en un acuífero libre, el coeficiente de almacenamiento equivale al rendimiento específico del material desecado durante el bombeo; por lo tanto, en este caso coincide con la porosidad eficaz. En este proceso se utilizará el coeficiente de almacenamiento como porosidad eficaz. Para este caso se tiene un valor de  $8 \times 10^{-3}$  como coeficiente de almacenamiento en rocas fracturadas.

#### **4.1.4. Tiempo de tránsito**

Como está definido en la sección de zonas de protección se tomará 1 día, 30 días y 1 años como tiempos de tránsito para delimitación se zonas protección.

#### 4.1.5. Cálculos realizados para el método de radio fijo calculado en función al tiempo de tránsito

Se toma como base para el cálculo del método de radio fijo los datos de la siguiente tabla:

Tabla XVI. Resumen de datos a utilizar para el método de radio fijo calculado en función del tiempo de tránsito

Variable	Variable	Dimensional
Conductividad (K)	1,3	(m/días)
Gradiente Hidráulico (i)	0,1167	Adimensional
Porosidad Eficaz ( $m_e$ )	$8 \times 10^{-3}$	Adimensional
Tiempo de tránsito (t)	1; 30; 365	Días

Fuente: elaboración propia.

Para obtener los radios fijos calculados se utilizará la ecuación 1 en la que se obtiene la velocidad lineal media según la conductividad y porosidad eficaz del acuífero.

$$V_e = \frac{1,3 * 0,1167}{0,008} = 18,96 \text{ m/día}$$

El radio se obtiene según el tiempo de tránsito en estudio, en este se tomarán en cuenta de 1 día, 30 días y 365 días.

$$\begin{aligned} t_1 &= 1 \text{ día} & d_1 &= 18,96 * 1 = 18,96 \text{ metros} \\ t_1 &= 30 \text{ día} & d_1 &= 18,96 * 30 = 568,80 \text{ metros} \\ t_1 &= 365 \text{ día} & d_1 &= 18,96 * 365 = 6\ 825,60 \text{ metros} \end{aligned}$$



En la siguiente tabla se resumen los resultados obtenidos en la sección de cálculos.

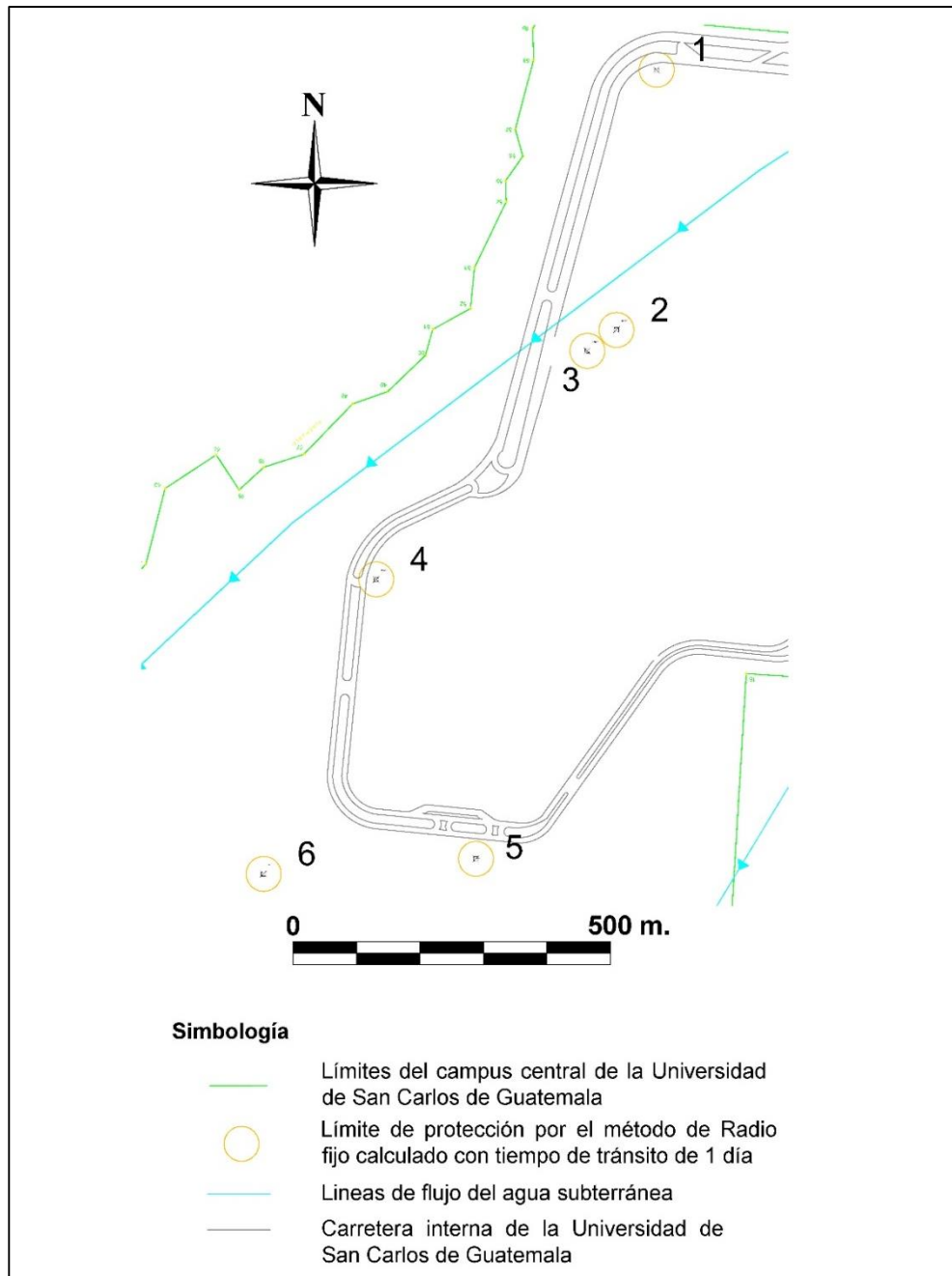
Tabla XVII. **Resumen de resultados por el método del radio fijo calculado, en función del tiempo de tránsito**

<b>Días</b>	<b>Metros</b>
1	18,96
30	568,80
365	6 921,77

Fuente: elaboración propia.

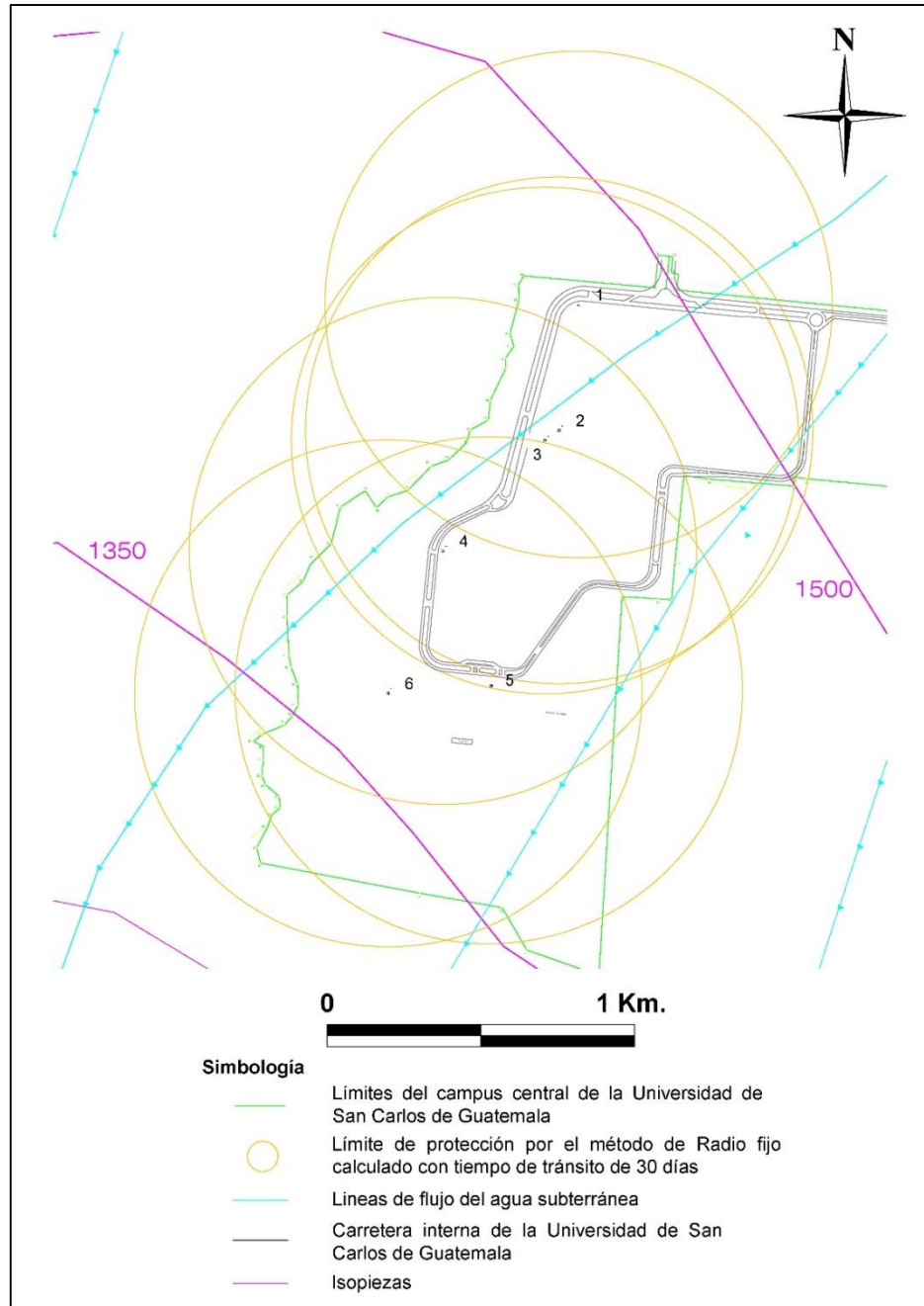
A continuación, se muestran los mapas en donde se delimitan los radios calculados en función del tiempo de tránsito:

Figura 26. **Mapa de radio fijo calculado en función del tiempo de tránsito de un día**



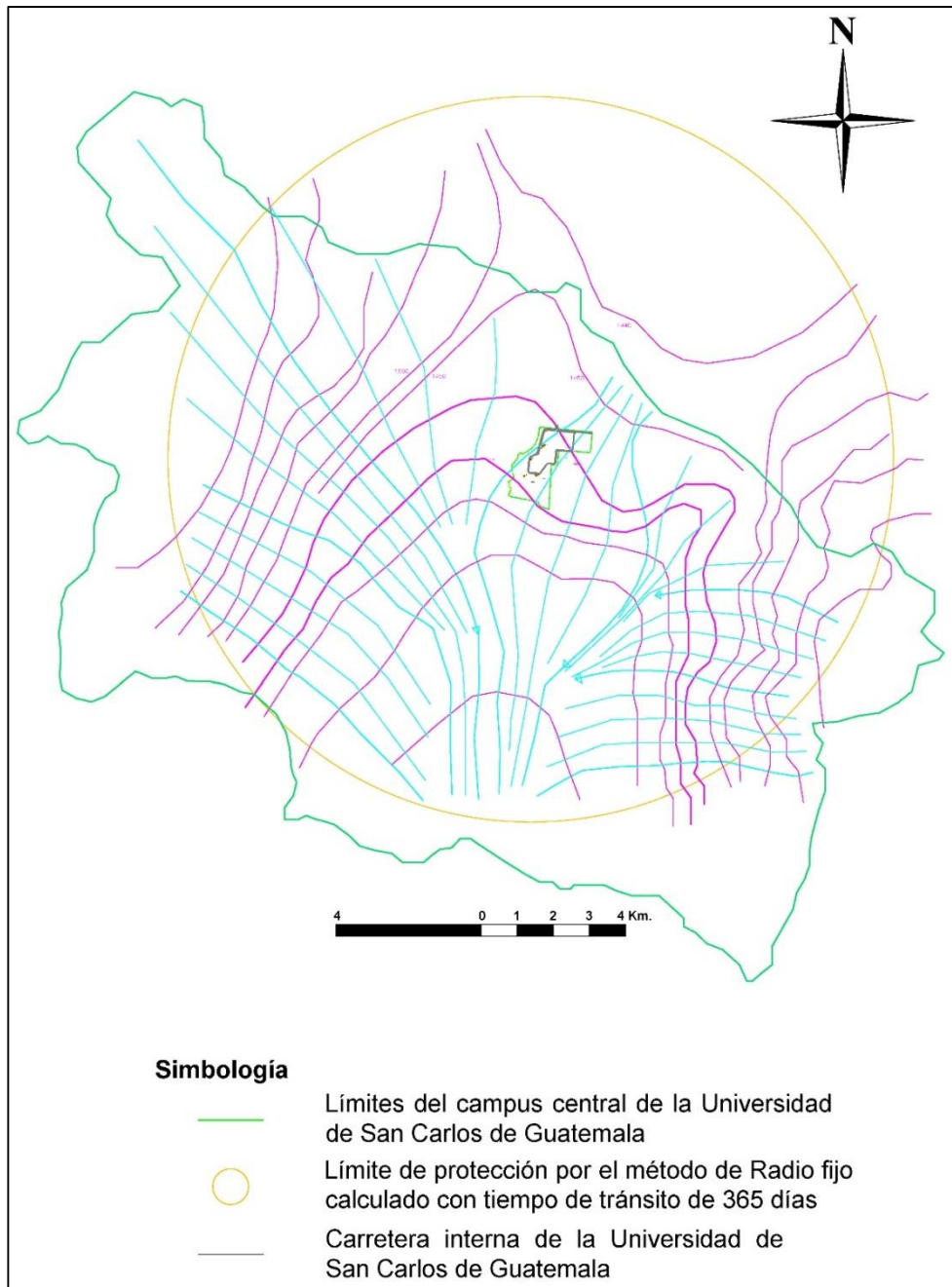
Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Mapa de radio fijo calculado en función del tiempo de tránsito de treinta días**



Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Mapa de radio fijo calculado en función del tiempo de tránsito de trescientos sesenta y cinco días**



Fuente: elaboración propia.

## 4.2. Método de Wyssling

Para obtener los perímetros de protección por el método de Wyssling se necesitan los mismos datos de la tabla 14. Únicamente hay que realizar la conversión de tiempo de días a segundos en donde sea necesario.

Tabla XVIII. **Datos necesarios para la elaboración del método Wyssling**

<b>Variable</b>	<b>Variable</b>	<b>Dimensional</b>
Conductividad (K)	0,000015046	(m/seg)
Gradiente hidráulico (i)	0,1167	Adimensional
Porosidad eficaz ( $m_e$ )	$8 \times 10^{-3}$	Adimensional

Fuente: elaboración propia.

Los datos que se obtuvieron en el método anterior. Además, se necesitan los siguientes datos:

### 4.2.1. Espesor saturado promedio del acuífero

Para determinar el espesor saturado promedio del acuífero del valle sur de la ciudad de Guatemala se toman como referencia los mapas de la sección 2.5.3 de Unidades Hidrogeológicas. En las figuras 9 y 10 se observa el área saturada por secciones de norte a sur y de este a oeste, respectivamente.

A través de una medición gráfica por medio de la herramienta de Autocad se determinó que el acuífero tiene un espesor promedio de 363,92 metros.

#### 4.2.2. Caudal real bombeado

Para obtener el caudal real bombeado se deben tomar en cuenta los datos recaudados en cada uno de los pozos que se encuentran funcionando en la actualidad. Se omite el pozo 2 de Ingeniería porque está fuera de servicio.

Tabla XIX. **Resumen de caudales obtenidos en cada uno de los pozos del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala**

<b>Descripción</b>	<b>Caudal (GPM)</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>
Pozo 1 - DSG 1	250	0,0189
Pozo 2 - DSG 2	231	0,0175
Pozo 3 - FEV	66	0,0050
Pozo 4 - CEDA	360	0,0273
Pozo 5 - Ingeniería 1	190	0,0144
Pozo 6 - Ingeniería 2	0	0
	<b>1 097</b>	<b>0,0831</b>

Fuente: elaboración propia.

Con la ayuda de esta tabla se obtuvo un caudal de bombeo real de 0,0831 m<sup>3</sup>/s.

#### 4.2.3. Cálculos realizados para el método de Wyssling

Para realizar los cálculos se necesitarán los siguientes datos:

Tabla XX. **Resumen de datos a utilizar para el método de Wyssling**

<b>Variables</b>	<b>Variable</b>	<b>Dimensional</b>
Gradiente Hidráulico (i)	0,1167	Adimensional
Conductividad (K)	0,000015046	(m/seg)
Porosidad Eficaz (m <sub>e</sub> )	0,008	Adimensional
Espesor promedio de acuífero (b)	363,92	metros
Caudal de extracción real (Q)	0,0831	m <sup>3</sup> /seg

Fuente: elaboración propia.

Para obtener la zona de llamada se utiliza la ecuación 4, con las variables de caudal de extracción real con una cantidad de 0,0831 m<sup>3</sup>/seg; el espesor promedio del acuífero de 363,92 y el gradiente hidráulico de 0,1167.

$$B = \frac{0,0831}{0,000015046 * 363,92 * 0,1167} = 130,05 \text{ metros}$$

El radio de llamada se obtiene de la ecuación 5.

$$X_0 = \frac{0,0831}{2 * \pi * 0,000015046 * 363,92 * 0,1167} = 20,70 \text{ metros}$$

El ancho de frente de llamada a la altura de la captación:

$$B' = \frac{128,18}{2} = 65,02 \text{ metros}$$

Con el área de llamada se obtiene la velocidad eficaz para establecer una distancia aguas arriba en función del tiempo de tránsito.

$$V_e = \frac{0,000015046 * 0,1167}{0,008} = 0,0002195 \text{ m/seg}$$

A continuación, se utilizarán los tiempos de tránsito de 1 día, 30 días y 1 año en cantidades de segundos para obtener la cantidad de metros aguas arriba, y así establecer las zonas de protección.

$$t_1 = 1 \text{ día} = 86\,400 \text{ seg}$$

$$t_2 = 30 \text{ días} = 2\,592\,000 \text{ seg}$$

$$t_3 = 365 \text{ días} = 31\,536\,000 \text{ seg}$$

$$l_1 = 0,0002195 \text{ m/s} * 86\,400 \text{ s} = 18,96 \text{ metros}$$

$$l_2 = 0,0002195 \text{ m/s} * 2\,592\,000 \text{ s} = 568,91 \text{ metros}$$

$$l_3 = 0,0002195 \text{ m/s} * 31\,536\,000 \text{ s} = 6921,77 \text{ metros}$$

En función a estas distancias obtenidas es la distancia aguas arriba de cada uno de los casos:

Tiempo de tránsito: 1 día

$$S_{01} = \frac{19,24 + \sqrt{19,24 * (19,24 + 8 * 20,40)}}{2} = 39,06 \text{ metros}$$

$$S_{u1} = \frac{-19,24 + \sqrt{19,24 * (19,24 + 8 * 20,40)}}{2} = 20,10 \text{ metros}$$

Tiempo de tránsito: 30 días

$$S_{02} = \frac{577,20 + \sqrt{577,20 * (577,20 + 8 * 20,40)}}{2} = 607,67 \text{ metros}$$

$$S_{u2} = \frac{-577,20 + \sqrt{577,20 * (577,20 + 8 * 20,40)}}{2} = 38,75 \text{ metros}$$



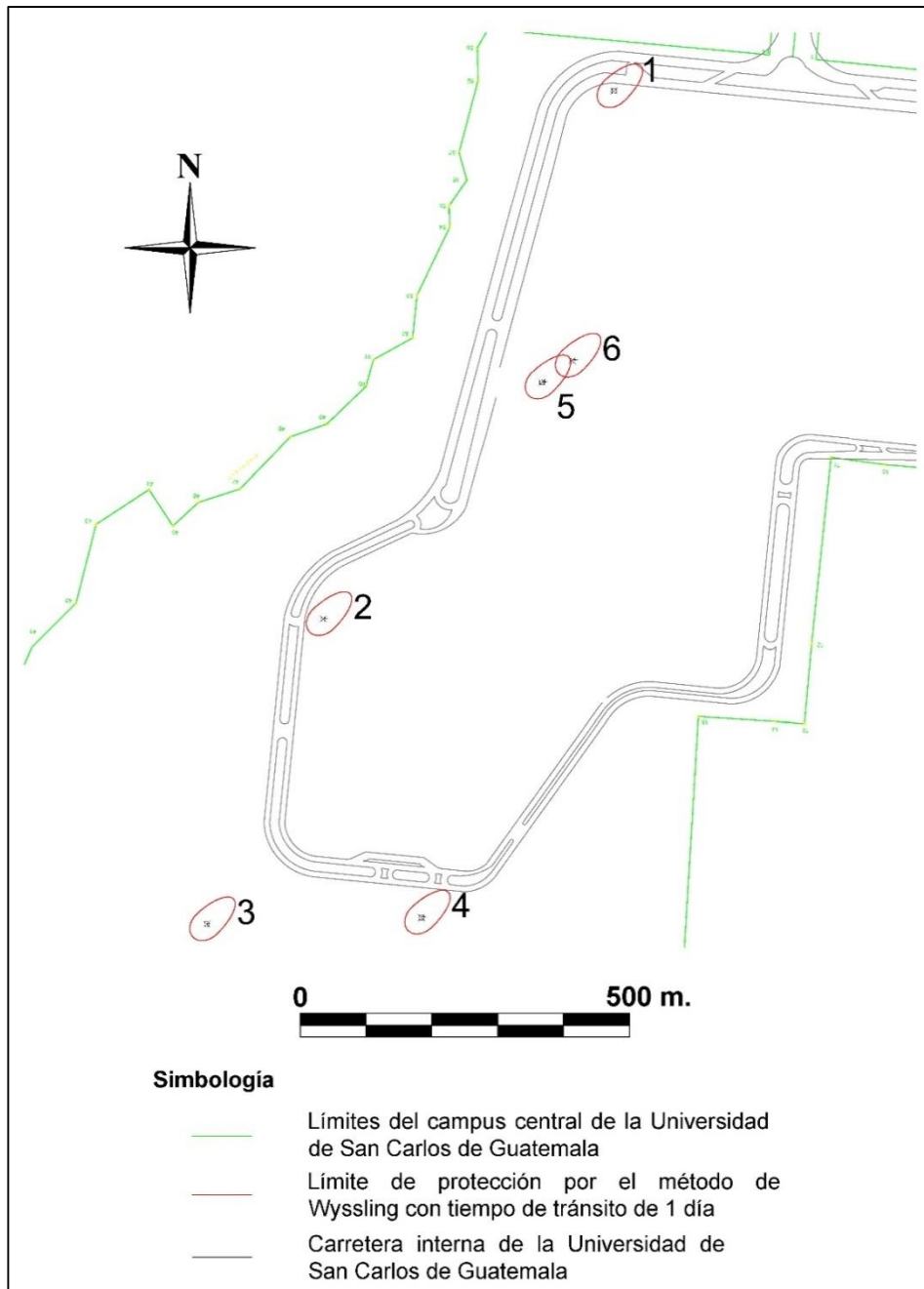
Tiempo de tránsito: 365 días

$$S_{03} = \frac{7\,393,73 + \sqrt{7\,393,73 * (7\,393,73 + 8 * 20,40)}}{2} = 6\,962,92 \text{ metros}$$

$$S_{u3} = \frac{-7\,393,73 + \sqrt{7\,393,73 * (7\,393,73 + 8 * 20,40)}}{2} = 41,15 \text{ metros}$$

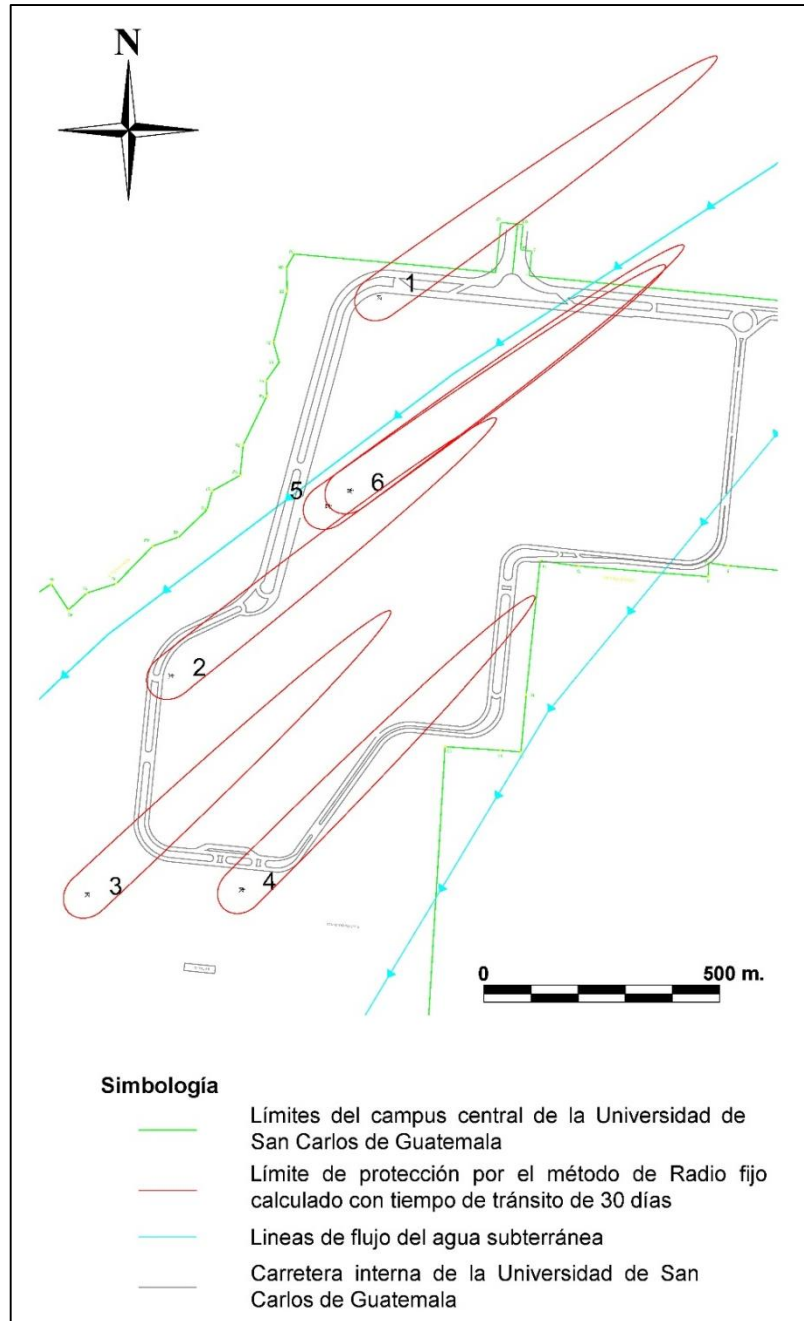
En el caso de la longitud de S01, se extiende más allá del perímetro del acuífero en estudio, por lo que el área llega hasta los límites del acuífero en cuestión. A continuación, se muestran los mapas con las áreas determinadas por el método de Wyssling.

Figura 29. **Mapa de perímetro de protección por el método de Wyssling con un tiempo de tránsito de un día**



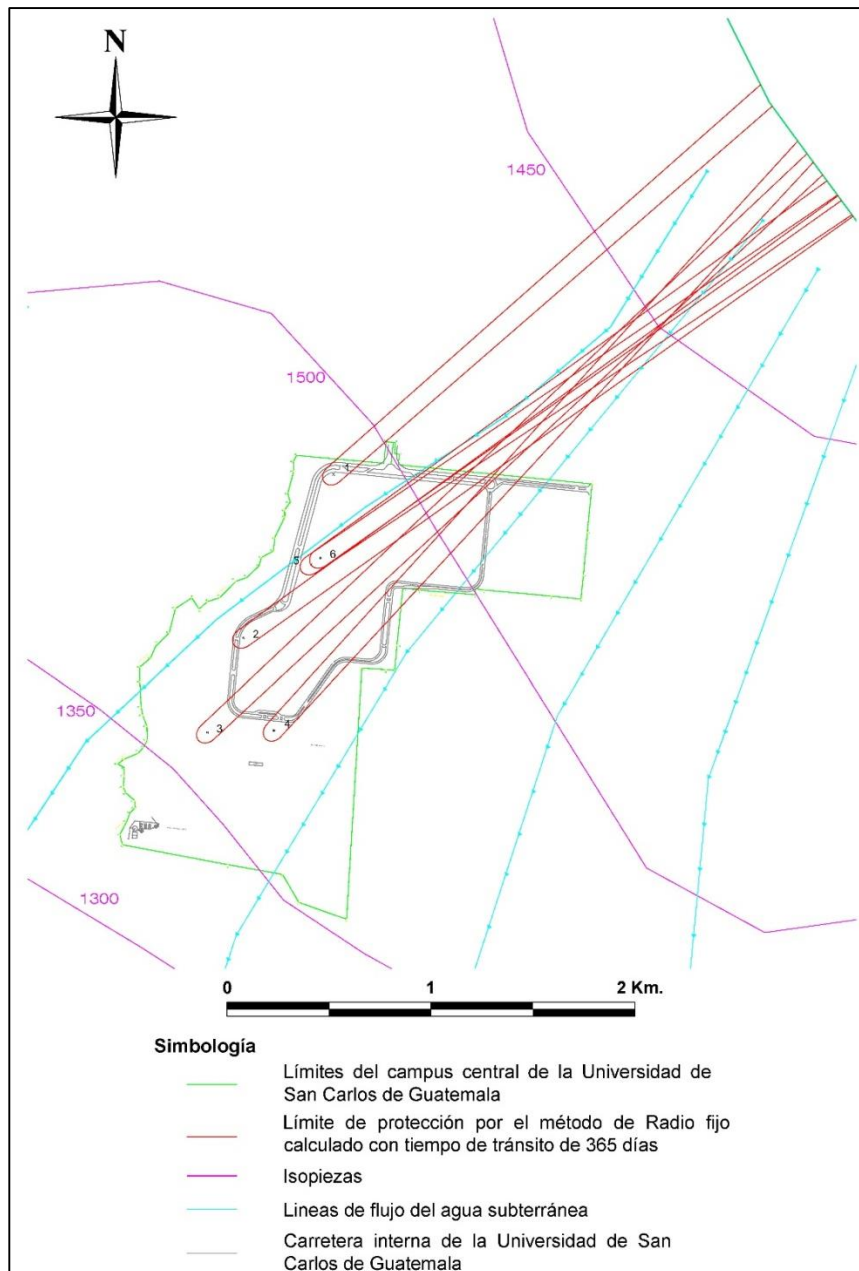
Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Mapa de perímetro de protección por el método de Wyssling con un tiempo de tránsito de treinta días**



Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Mapa de perímetro de protección por el método de Wyssling con un tiempo de tránsito de trescientos sesenta y cinco días**



Fuente: elaboración propia.

### **4.3. Método hidrogeológico por medio de mapas**

Para realizar este estudio se utilizaron los mapas de la sección 2.5.3., en los que se muestra en la figura 8, el mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero del valle sur de la ciudad de Guatemala. Este mapa es muy importante para la realización del estudio de los límites para proteger los pozos mecánicos de la Universidad de San Carlos, ya que indica los límites del acuífero del cual se extrae el agua para consumo humano de toda la comunidad universitaria.

De este mapa se obtiene la ubicación de fallas cercanas al área de estudio, las cuales pueden afectar el área de protección si se encuentran en cercanía con el campus central. Aquí también se muestran las concentraciones de población en la ciudad, las cuales pueden llegar a ser importantes para la implementación de un reglamento para la protección de agua potable en la ciudad de Guatemala.

Otro de los mapas importantes para realizar este estudio es el de la Red de flujo de aguas subterráneas en la figura 11, el cual indica la dirección del flujo del agua subterránea por medio de las isopiezas. Este es uno de los factores importantes tomados en cuenta para establecer los límites de protección, ya que dependiendo de la dirección del flujo del acuífero se determina hasta dónde debe llegar el área límite de protección y la dirección que este debe tomar aguas arriba.

La sección 2.4 del marco geológico del campus central también es de suma importancia ya que muestra la geología en la que se encuentra ubicado el campus central. Esta ayuda a dar una idea de cómo es el terreno y las cualidades que el mismo pueda tener al momento de la infiltración de agua hasta llegar al cuerpo hídrico en estudio. De la misma manera se estudia el

mapa de suelos en la figura 7, el cual ayuda a definir según el tipo de suelo, el coeficiente de infiltración utilizado para determinar la recarga potencial del acuífero en función de la textura del suelo, porcentaje de vegetación y pendiente del terreno en análisis.

Un mapa de igual importancia es el de vulnerabilidad superficial de la figura 23 de la sección 3.3, en el cual se señalan las áreas de alta, baja y nula vulnerabilidad en función del tipo de superficie que se encuentra en todo el territorio del campus central de la Universidad de San Carlos. Este mapa es muy importante ya que da una idea de las áreas de alta vulnerabilidad en el campus central y se necesita tener en cuenta para la protección del recurso hídrico.

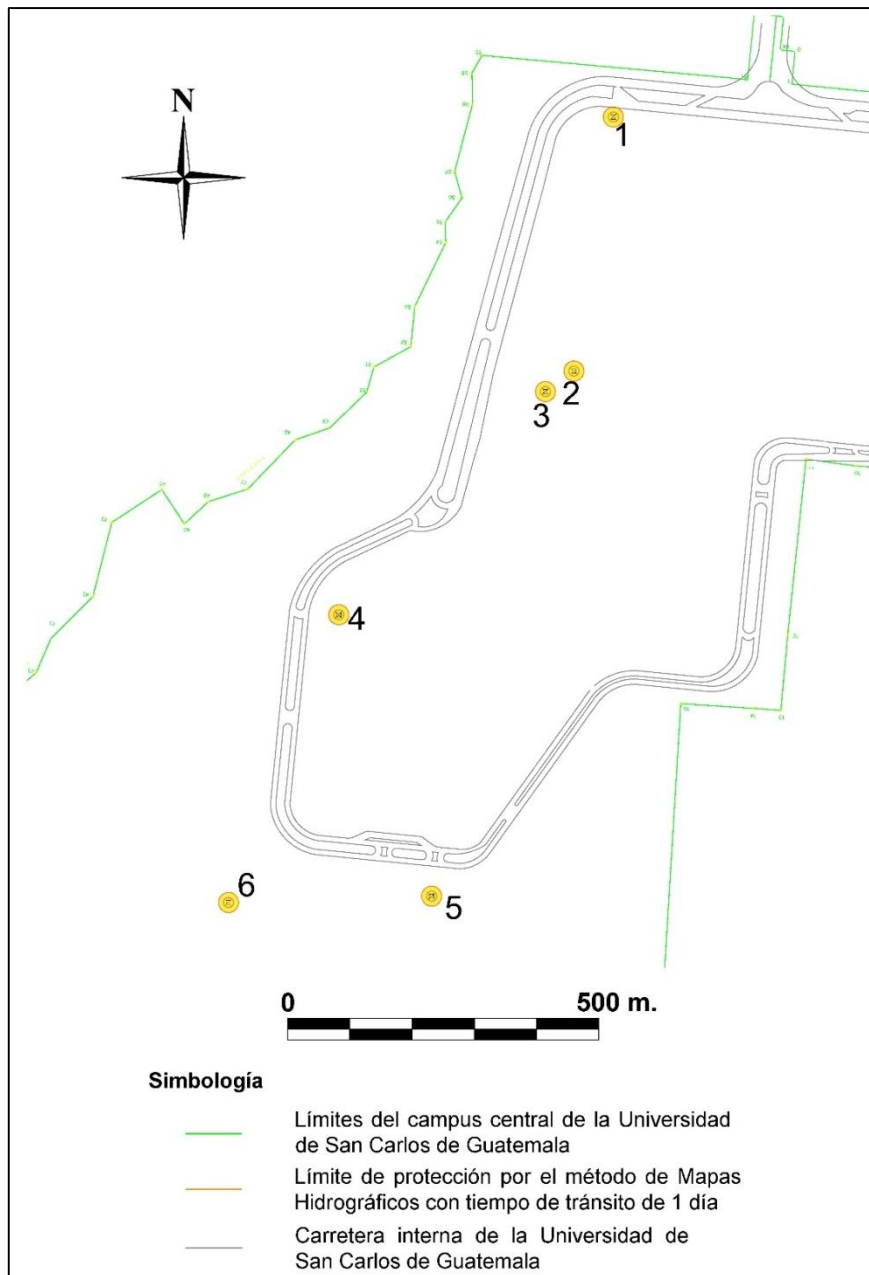
Para determinar la zona inmediata se tomó como objetivo la protección de las instalaciones del pozo siguiendo los lineamientos establecidos anteriormente; se delimitó un área mínima de 100 metros cuadrados y una máxima de 400 metros cuadrados.

Para determinar la zona próxima se tomó como referencia el mapa de vulnerabilidad mostrado en la figura 23 del capítulo 3.3. También se tomó en cuenta la cercanía al río que se encuentra al noroeste del campus central y la dirección del flujo del acuífero.

Para determinar la zona alejada para cada uno de los pozos se tomó en cuenta la dirección del flujo del agua subterránea, la pendiente del terreno en el que se encuentra el acuífero y la proximidad hacia los ríos más cercanos.

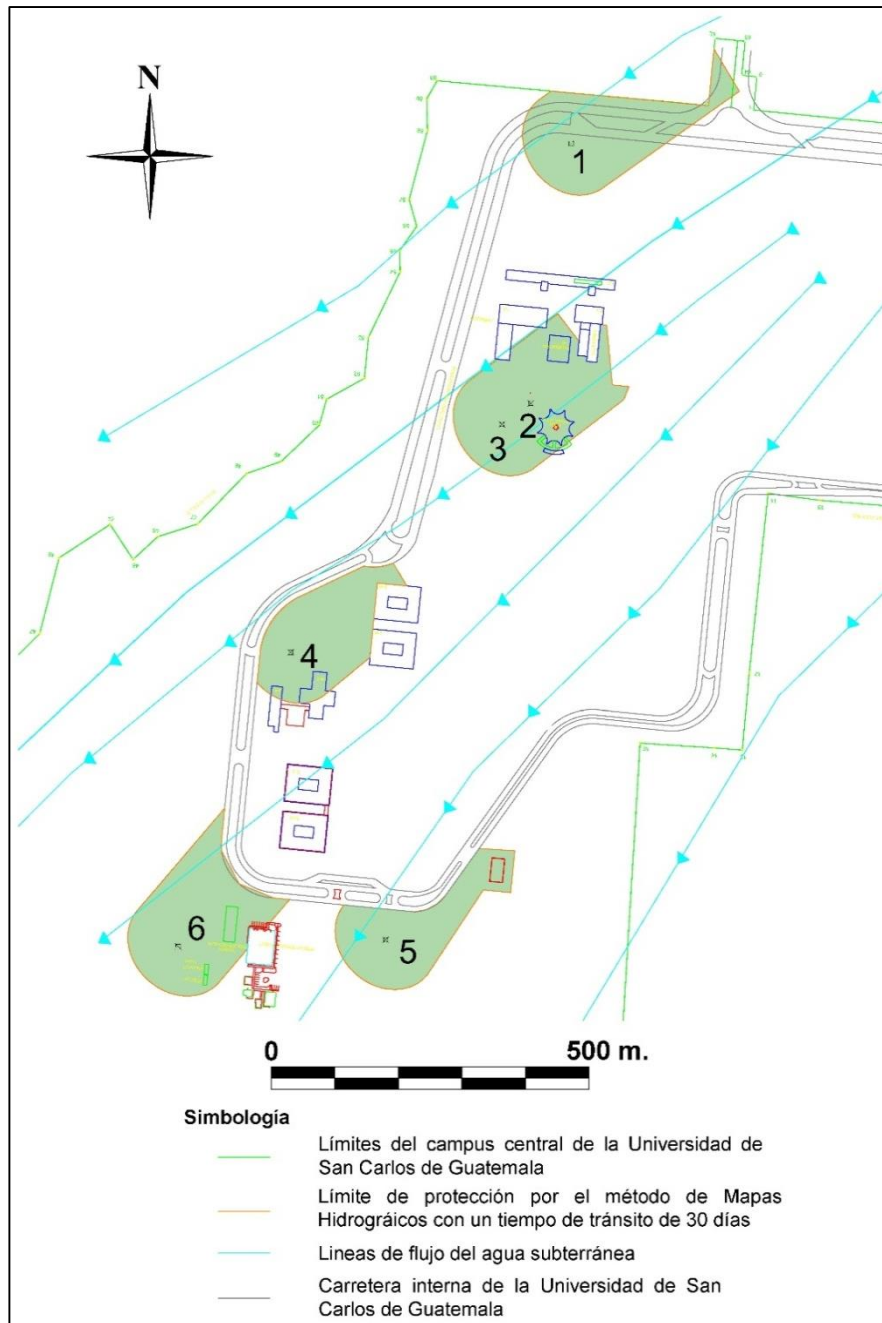
A continuación, se muestran los mapas con las áreas determinadas por medio de mapas hidrogeológicos:

Figura 32. **Mapa de perímetro de protección para la zona inmediata o de restricciones absolutas por medio de mapas hidrogeológicos**



Fuente: elaboración propia.

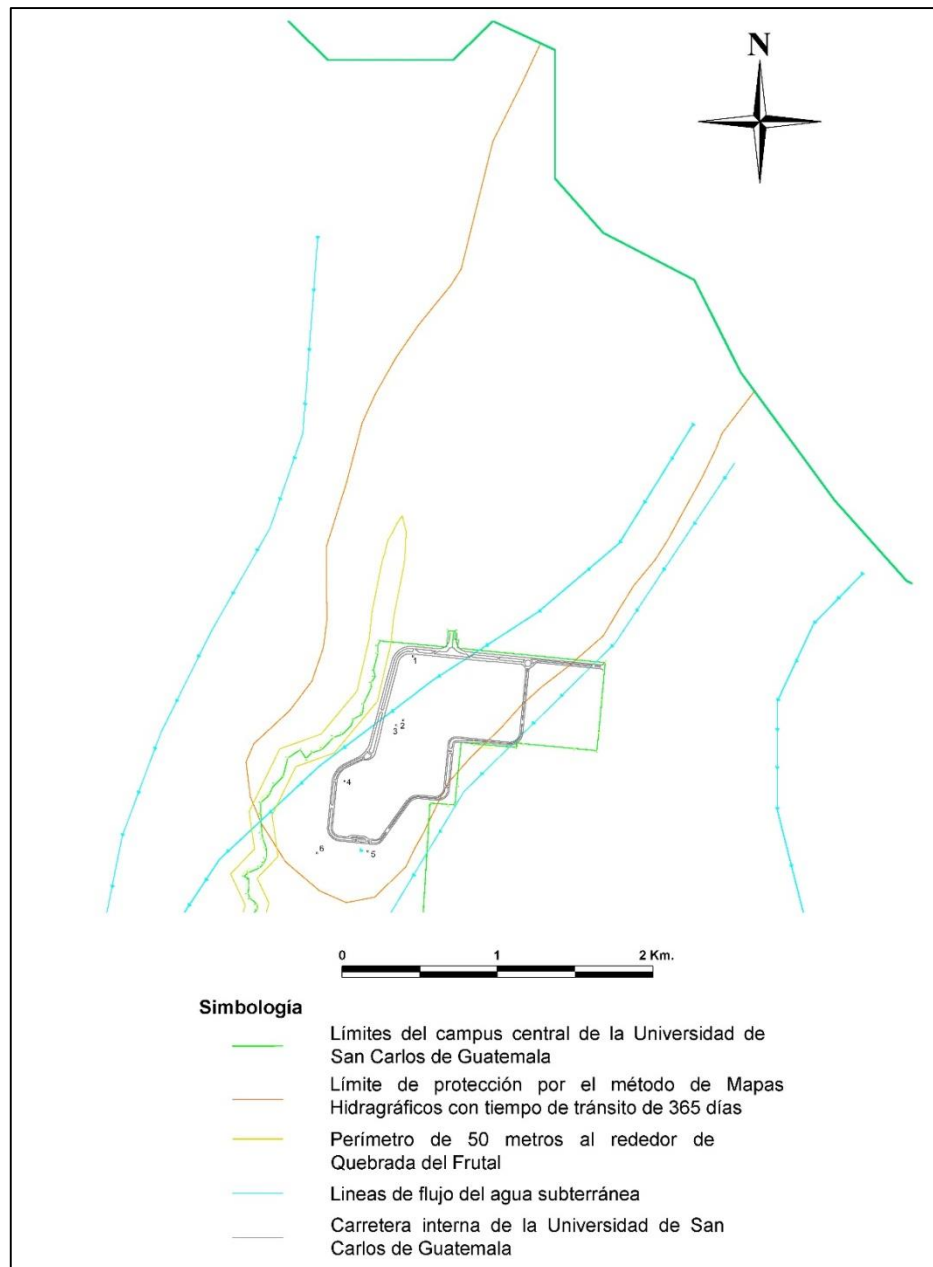
Figura 33. **Mapa de perímetro de protección para la zona próxima o de restricciones máximas por medio de mapas hidrogeológicos**



Fuente: elaboración propia.



Figura 34. **Mapa de perímetro de protección para la zona alejada o de restricciones moderadas por medio de mapas hidrogeológicos**



Fuente: elaboración propia.

#### **4.4. Comparación de los métodos de delimitación de perímetros de protección según el tiempo de tránsito**

Para evaluar los resultados obtenidos para delimitar los perímetros de protección de la calidad de los pozos mecánicos de agua del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en el acuífero del valle sur de la Ciudad de Guatemala se compararán los resultados obtenidos en el apartado 4.1, 4.2 y 4.3, con objetivo de determinar el más adecuado para la protección de los pozos en estudio.

Para comparar los diferentes métodos se utilizará como factor común el tiempo de tránsito, por ser el criterio que sirve como función para determinar cada uno de los perímetros de protección resultantes. La comparación de cada uno de los métodos se hará de manera independiente para los tiempos de tránsito de 1 día, 30 días y 365 días.

##### **4.4.1. Comparación de los perímetros de protección para los pozos mecánicos de agua para consumo humano del campus central de la Universidad de San Carlos obtenidos para tiempo de tránsito de 1 día**

A continuación, se muestra una tabla resumen de los perímetros de protección obtenidos en cada uno de los métodos ya mencionados.

Tabla XXI. **Comparación de los perímetros de protección de los pozos mecánicos de agua para consumo humano en el campus central de la Universidad de San Carlos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 1 día**

Métodos empleados	Pozo 1 - Dirección de Servicios Generales I	Pozo 2 - Facultad de Ingeniería I	Pozo 3 - Facultad de Ingeniería II	Pozo 4 - Dirección de Servicios Generales II	Pozo 5 - Finca Experimental de Veterinaria	Pozo 6 - Finca Experimental de Agronomía
<b>Radio Fijo Calculado</b>	18,96 m	18,96 m	18,96 m	18,96 m	18,96 m	18,96 m
<b>Método de Wyssling</b>	So = 39,06 m (Aguas arriba)	So = 39,06 m (Aguas arriba)	So = 39,06 m (Aguas arriba)	So = 39,06 m (Aguas arriba)	So = 39,06 m (Aguas arriba)	So = 39,06 m (Aguas arriba)
	Su = 20,10 m (Aguas abajo)	Su = 20,10 m (Aguas abajo)	Su = 20,10 m (Aguas abajo)	Su = 20,10 m (Aguas abajo)	Su = 20,10 m (Aguas abajo)	Su = 20,10 m (Aguas abajo)
<b>Método hidrogeológico</b>	11,28 m	11,28 m	11,28 m	11,28 m	11,28 m	11,28 m

Fuente: elaboración propia.

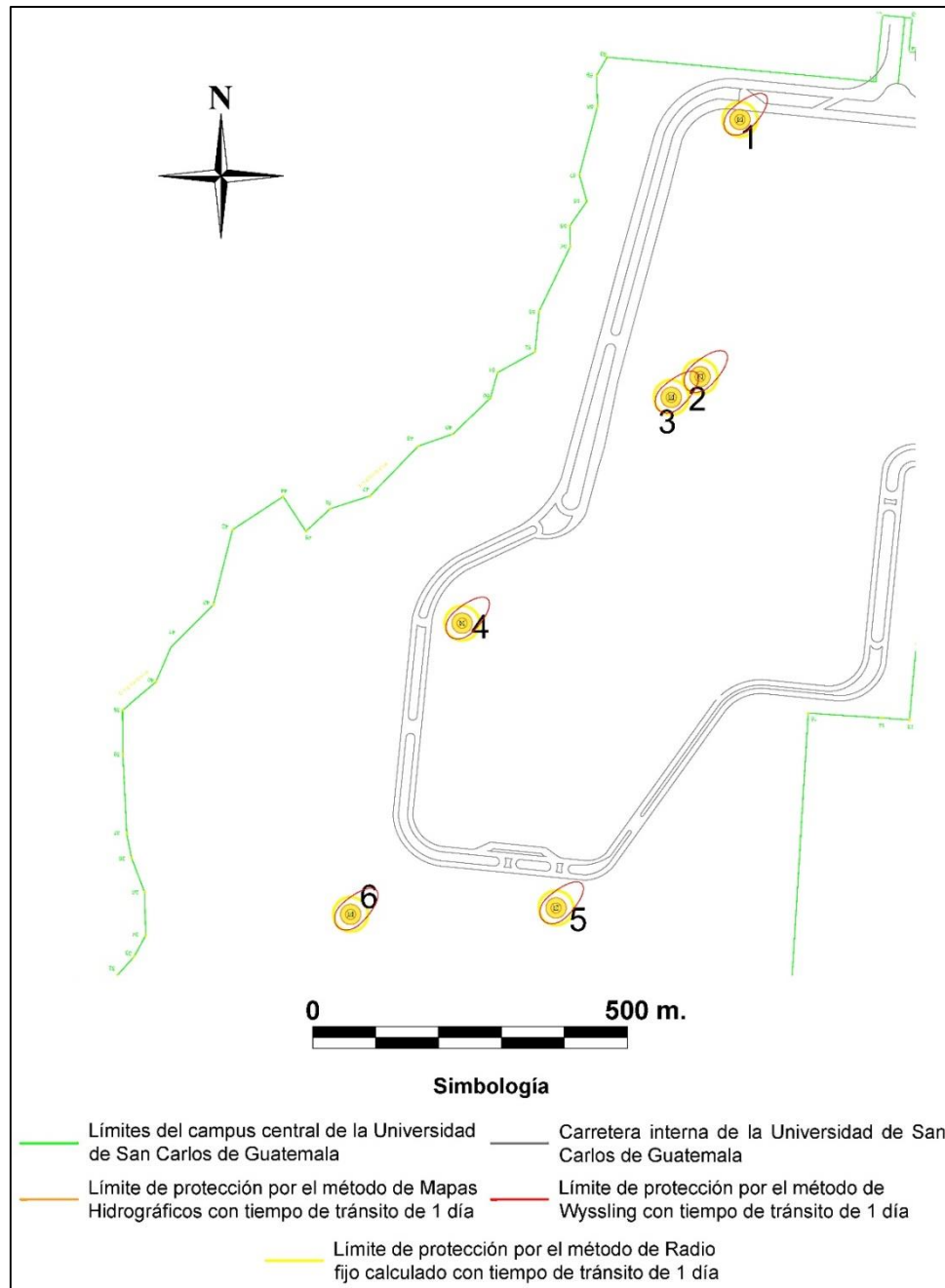
En el método de radio fijo calculado se obtiene un radio para la protección del pozo de 19,24 metros, los cuales se obtiene un área protegida de 1 162,95 metros cuadrados alrededor de cada uno de los pozos en estudio.

El método de Wyssling es un poco más elaborado, ya que toma en cuenta la dirección del flujo del agua subterránea y profundidad saturada del acuífero, con el objetivo de obtener un estudio más específico del comportamiento del agua subterránea. Para este método se obtuvieron dos distancias que se debe tomar en cuenta: distancia aguas arriba y aguas abajo. Para el tiempo de tránsito se obtuvieron 39,06 metros y 20,10 metros respectivamente para cada uno de los pozos, por encontrarse considerablemente cerca. Sin embargo, también se debe tomar en cuenta el radio del cono de descenso, el cual cuenta con 20,70 metros.

Para la elaboración del método por medio de mapas hidrográficos se determinó un área de 100 metros cuadrados de protección mínimo y un máximo de 400 metros cuadrados, para cada uno de los pozos en estudio, ya que el flujo no es determinante en áreas pequeñas.

Con el objetivo de tener una mejor visualización de los resultados obtenidos, a continuación, se muestran los perímetros de protección por todos los métodos estudiados para un tiempo de tránsito de 1 día.

Figura 35. Mapa de los perímetros de protección obtenidos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 1 día



Fuente: elaboración propia.

**4.4.2. Comparación de los perímetros de protección para los pozos mecánicos de agua para consumo humano del campus central de la Universidad de San Carlos obtenidos para tiempo de tránsito de 30 días**

A continuación, se muestra una tabla resumen de los perímetros de protección obtenidos en cada uno de los métodos ya mencionados.

**Tabla XXII. Comparación de los perímetros de protección de los pozos mecánicos de agua para consumo humano en el campus central de la Universidad de San Carlos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 30 días**

Métodos empleados	Pozo 1 - Dirección de Servicios Generales I	Pozo 2 - Facultad de Ingeniería I	Pozo 3 - Facultad de Ingeniería II	Pozo 4 - Dirección de Servicios Generales II	Pozo 5 - Finca Experimental de Veterinaria	Pozo 6 - Finca Experimental de Agronomía
<b>Radio Fijo Calculado</b>	568,91 m	568,91 m	568,91 m	568,91 m	568,91 m	568,91 m
<b>Método de Wyssling</b>	So = 607,67 m (Aguas arriba)	So = 607,67 m (Aguas arriba)	So = 607,67 m (Aguas arriba)	So = 607,67 m (Aguas arriba)	So = 607,67 m (Aguas arriba)	So = 607,67 m (Aguas arriba)
	Su = 38,75 m (Aguas abajo)	Su = 38,75 m (Aguas abajo)	Su = 38,75 m (Aguas abajo)	Su = 38,75 m (Aguas abajo)	Su = 38,75 m (Aguas abajo)	Su = 38,75 m (Aguas abajo)
<b>Método hidrogeológico</b>	3 219,6 m <sup>2</sup>	3 997,35 m <sup>2</sup>		2 808,15 m <sup>2</sup>	2 579,30 m <sup>2</sup>	3 553,00 m <sup>2</sup>

Fuente: elaboración propia.

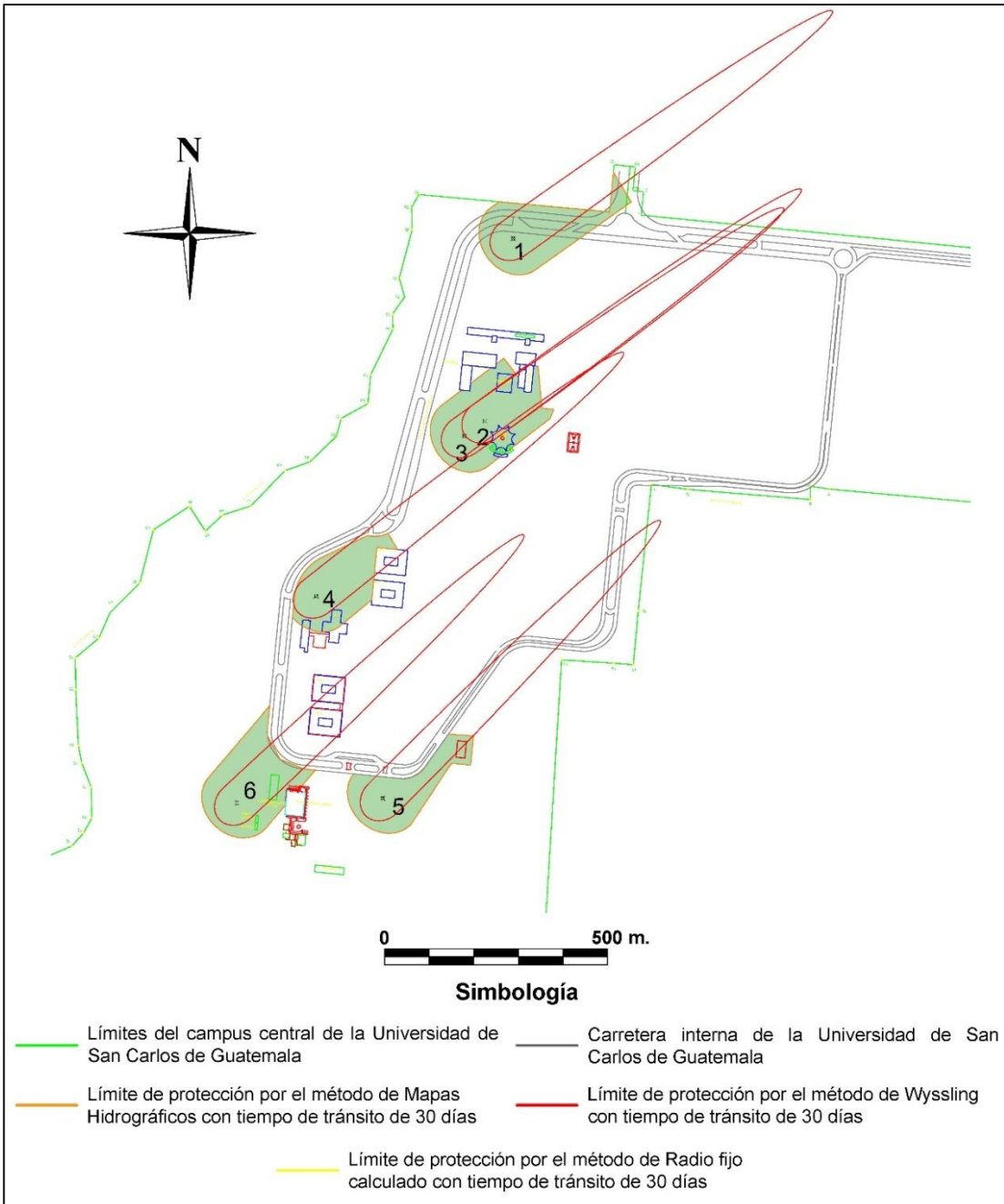
En el método de radio fijo calculado se obtiene un radio para la protección del pozo de 568,91 metros; sin embargo, este se extiende fuera de los límites del territorio del campus central de la Universidad de San Carlos. Por tanto, podría ser considerado innecesario, ya que no se tiene ninguna autoridad afuera de las instalaciones educativas.

Para el método de Wyssling se obtuvo una distancia de protección aguas arriba de 607,67 metros, y una distancia de 38,75 metros aguas abajo. Esta misma distancia debe ser considerada para obtener una escala adecuada de la cual se calcula el ancho del perímetro de protección en estudio.

Para la determinación de los perímetros de protección por el método de mapas hidrogeológicos se toma una distancia aguas abajo de 50 metros; para la distancia aguas arriba se toma en cuenta el tipo de superficie que se encuentra el terreno, ya que se puede encontrar con terreno utilizado por edificios, carreteras, jardines o terrenos sin uso específico. También se tomó en cuenta la vulnerabilidad que pueda presentar cada área.

Para una mejor visualización de lo antes mencionado, a continuación se muestra un mapa en el que se delimita cada uno de los métodos utilizados para un tiempo de tránsito de 30 días.

Figura 36. **Mapa de los perímetros de protección obtenidos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 30 días**



Fuente: elaboración propia.



**4.4.3. Comparación de los perímetros de protección para los pozos mecánicos de agua para consumo humano en el campus central de la Universidad de San Carlos obtenidos para un tiempo de tránsito de 365 días.**

A continuación, se muestra una tabla resumen de los perímetros de protección obtenidos en cada uno de los métodos ya mencionados

**Tabla XXIII. Comparación de los perímetros de protección de los pozos mecánicos de agua para consumo humano en el campus central de la Universidad de San Carlos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 365 días**

Métodos empleados	Pozo 1 - Dirección de Servicios Generales I	Pozo 2 - Facultad de Ingeniería I	Pozo 3 - Facultad de Ingeniería II	Pozo 4 - Dirección de Servicios Generales II	Pozo 5 - Finca Experimental de Veterinaria	Pozo 6 - Finca Experimental de Agronomía
Radio Fijo Calculado	6 921,77 m	6 921,77 m	6 921,77 m	6 921,77 m	6 921,77 m	6 921,77 m
Método de Wyssling	So = 1 983,38 m (Aguas arriba)	So = 1 983,38 m (Aguas arriba)	So = 1 983,38 m (Aguas arriba)	So = 1 983,38 m (Aguas arriba)	So = 1 983,38 m (Aguas arriba)	So = 1 983,38 m (Aguas arriba)
	Su = 41,15 m (Aguas abajo)	Su = 41,15 m (Aguas abajo)	Su = 41,15 m (Aguas abajo)	Su = 41,15 m (Aguas abajo)	Su = 41,15 m (Aguas abajo)	Su = 41,15 m (Aguas abajo)
Método hidrogeológico	765 243,25 m <sup>2</sup>					

Fuente: elaboración propia.

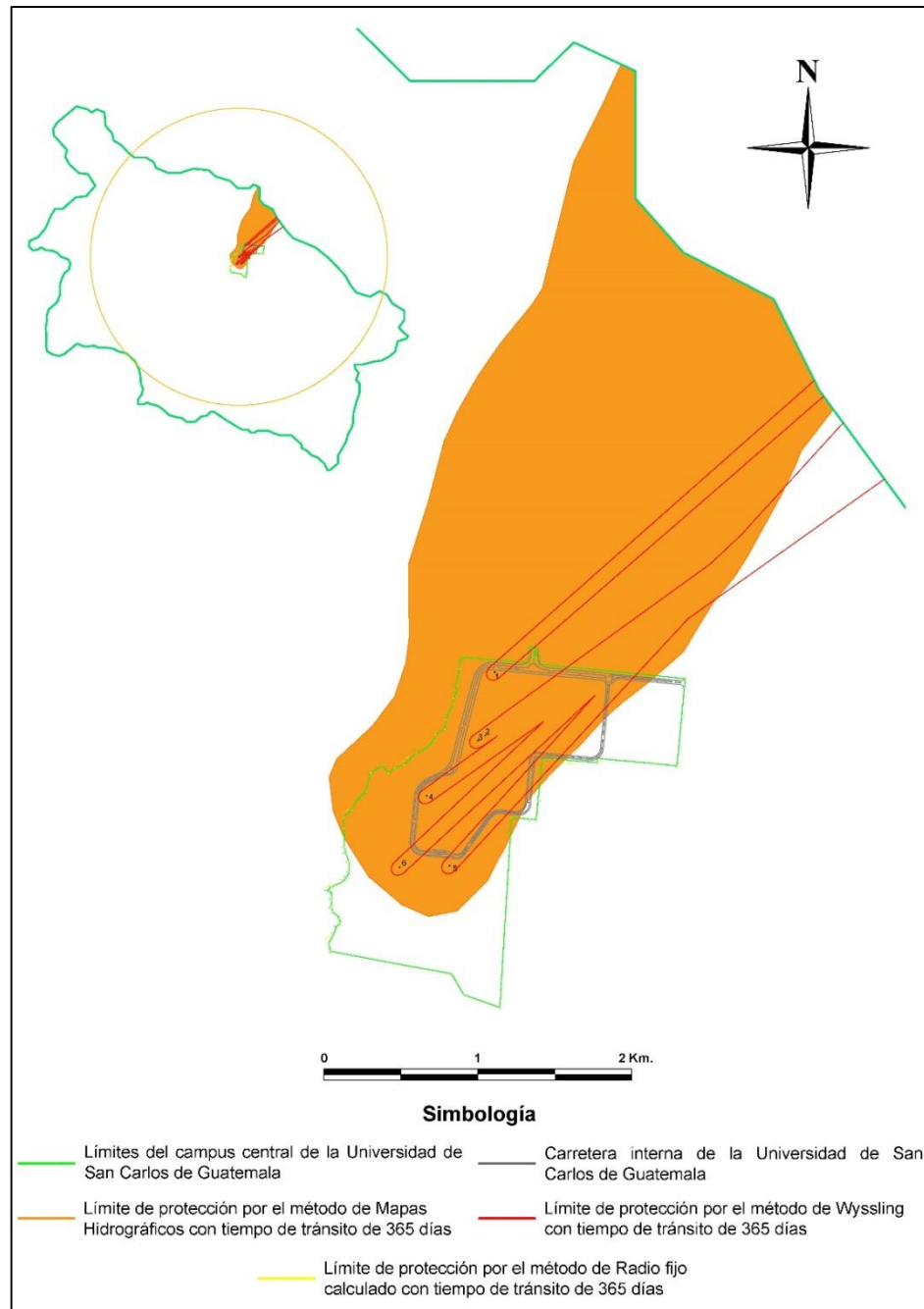
En el perímetro de protección obtenido por el método de radio fijo calculado se obtuvo un radio de 7 022,60 metros. Esta distancia se encuentra fuera de los límites territoriales del campus central de la Universidad de San Carlos, área en la cual no se tiene ninguna jurisdicción para prohibir alguna actividad que perjudique los pozos mecánicos de agua para consumo humano del campus central.

En el método Wyssling se obtuvo un área que sobrepasa el área del acuífero del valle sur de la ciudad, por lo que se limitó hasta las orillas del mismo en cada uno de los pozos. El área aguas abajo para todos los pozos es la misma, 40,53 metros; sin embargo, en aguas arriba varía en cada uno de los pozos en estudio.

Para el método por mapas hidrológicos se utilizó como referencia la línea de flujo de agua subterránea que se dirige hacia el sur oeste; también se tomó como guía el relieve del terreno del campus central y la cercanía que se tiene hacia ríos y quebradas que pueden ser consideradas como una infiltración significativa; esto requiere la protección de un área mayor.

Para una mejor visualización de lo antes mencionado, a continuación, se muestra un mapa en el que se delimita cada uno de los métodos utilizados para un tiempo de tránsito de 1 año.

Figura 37. **Mapa de los perímetros de protección obtenidos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 1 año**



Fuente: elaboración propia.

#### **4.5. Propuesta final de perímetros de protección de la calidad del agua de pozos mecánicos para consumo humano en el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala**

Para definir el método que se utilizará para la delimitación de los perímetros de protección en cada uno de los pozos mecánicos, se basará en el área que abarca según la importancia de la zona que será protegida, la congruencia que cada una de estas muestre y según el tipo de suelo que abarquen conforme la vulnerabilidad que este tenga.

##### **4.5.1. Zona inmediata o de restricciones absolutas**

Para la zona inmediata se tomará como referencia la delimitación por el método hidrogeológico, el cual recomienda un área mínima de 100 metros cuadrados partiendo desde la perforación realizada como se indica en la figura 31.

El objetivo principal de esta zona es proteger las instalaciones conformadas por la caseta del transformador o motor y depósitos de cloro o combustibles, entre otros. Proteger contra vertidos malintencionados que pretendan perjudicar el recurso hídrico, e impedir el ingreso a animales o personas que puedan contaminar de una manera directa, rápida y grave la captación.

También se tomará en cuenta el radio del cono de descenso calculado en el método de Wyssling, el cual es el área inmediata de absorción de agua del pozo mecánico. Este radio cuenta con 20,70 metros de largo.

Por ser el área más cercana a la captación se debe proponer medidas más estrictas y extremas que prohíban la circulación de personas por el área ya delimitada.

#### **4.5.2. Zona próxima o de restricciones máximas**

El objetivo principal de la zona próxima es proteger de la contaminación bacteriológica. Esta comprende el área en la cual la contaminación bacteriológica llegaría a la captación en un tiempo de tránsito de 30 días.

Para delimitar esta zona se tomará en cuenta el perímetro establecido por el método de Wyssling, como se muestra en la figura 29, el cual forma una figura ovalada con dirección aguas arriba de la dirección del flujo subterráneo.

#### **4.5.3. Zona alejada o de restricciones moderadas**

El objetivo principal de esta zona es la protección ante contaminantes de larga persistencia; por este motivo es considerado un tiempo de tránsito de 1 año. Se tomará como referencia el perímetro de protección establecido por el método de mapas hidrológicos mostrado en la figura 33.

El motivo de elegir un año como tiempo de tránsito es evitar extenderse más allá de los límites del acuífero que abastece el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala, ya que no se tiene autoridad fuera de los límites territoriales de la misma. Al realizar el estudio por tiempo de tránsito mayor también se sobrepasan los límites del acuífero en estudio.



## **5. MECANISMOS DE CONTROL DE LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DEL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

Ya establecidos los perímetros de protección para cada uno de los pozos mecánicos de agua potable, es necesario fijar mecanismos de protección posibles de implementar en el área del campus central, con el objetivo de que en el futuro se tomen en cuenta para la protección del recurso hídrico y de la salud de los propios estudiantes de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

### **5.1. Restricción de actividades dentro de los límites de los perímetros de protección de los pozos mecánicos de agua para consumo humano**

El principal objetivo de este trabajo es la implementación de restricciones de diversas actividades en las diferentes zonas en que se subdividen los perímetros de protección de la calidad del agua para consumo humano del campus central. A continuación se muestran las actividades que se identificaron como contaminantes dentro del campus central y las restricciones que se proponen, según la zona que se encuentre.

Tabla XXIV. **Implementación de restricción de actividades que se practican dentro de los perímetros de protección de los pozos mecánicos de agua para consumo humano del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala**

<b>Actividades</b>	<b>Zona inmediata</b>	<b>Zona próxima</b>	<b>Zona alejada</b>
Circulación peatonal	x		
Todo uso agrícola del terreno	x		
Construcción, explotaciones industriales y agrícolas	x	x	
Terrenos y almacenes de construcción	x	x	
Carreteras	x	x	
Terrenos de camping o deportivos	x		
Superficie de agua	x	x	
Pastorajes de animales	x	x	x
Aplicación no controlada de abonos orgánicos y minerales	x	x	x
Transporte de aguas residuales	x	x	x
Zanjas llenas de agua	x	x	x
Estanques	x	x	
Depósitos de hidrocarburos	x	x	x
Estaciones de servicio	x	x	x
Vertederos	x	x	x

Fuente: elaboración propia.

Por ser un establecimiento educativo con estructuras ya establecidas hace más de cincuenta años, no se cumplen con los lineamientos que se mencionan en la tabla XXIII al cien por ciento.

En el caso de la zona alejada se tiene como prohibición el depósito de hidrocarburos dentro de los límites de esa zona; sin embargo, afuera del territorio del campus central se encuentran en la cercanía varias gasolineras, las cuales no se sabe si tienen un control de calidad establecido para el



almacenamiento de combustibles o plan de emergencias si algún accidente sucede. Tampoco se tiene control sobre el transporte de aguas residuales, ya que la planta de tratamiento se encuentra aguas abajo del territorio en estudio y la red de drenaje circula cerca de los pozos mecánicos de agua potable.

En los casos de las zonas próximas e inmediatas hay actividades que fácilmente pueden ser restringidas ya que son zonas pequeñas y más controladas, por ende, las regiones más vulnerables.

Sin embargo, estas restricciones no se tendrán en cuenta por la población estudiantil si no se establecen mecanismos de protección de la calidad del agua extraída por los pozos mecánicos.

## **5.2. Sistema de vigilancia de los perímetros de protección para los pozos mecánicos de agua para consumo humano**

El establecimiento de un perímetro de protección no asegura por completo la calidad del agua que se extraiga de las captaciones, ya que su delimitación es teórica. Además, existe una posibilidad alta de accidentes, más en zonas urbanas donde la actividad humana es mayor; por ejemplo, las plantas industriales y carreteras, los cuales aumentan el riesgo de contaminación.

Una de las maneras más eficientes para que se haga efectiva la protección de las captaciones y se respeten los perímetros de protección es establecer un sistema real de vigilancia, el cual detecte en cualquier momento la intromisión de agentes contaminantes en las zonas protegidas, con suficiente tiempo para detener la extracción de agua y por evitar la entrada del contaminante a la red de distribución.

En el caso del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala se proponen las siguientes opciones:

- Señalización adecuada de las áreas que serán protegidas con las actividades que son prohibidas.
- Asignar la protección de los perímetros a las unidades de seguridad que brindan el servicio en el interior del establecimiento educativo.
- Colocar cámaras de vigilancia en las proximidades de los pozos, en los cuales se abarque toda el área por proteger, con vigilancia en los horarios en que circule personal humano cerca de las instalaciones.
- Concientizar a cada una de las facultades que se encuentren en las cercanías de los pozos mecánicos de agua para consumo humano y asignar análisis simples (pH, Eh, T<sup>a</sup>, conductividad, entre otros.) en períodos semanales o mensuales para el agua extraída y tomar las acciones correspondientes.

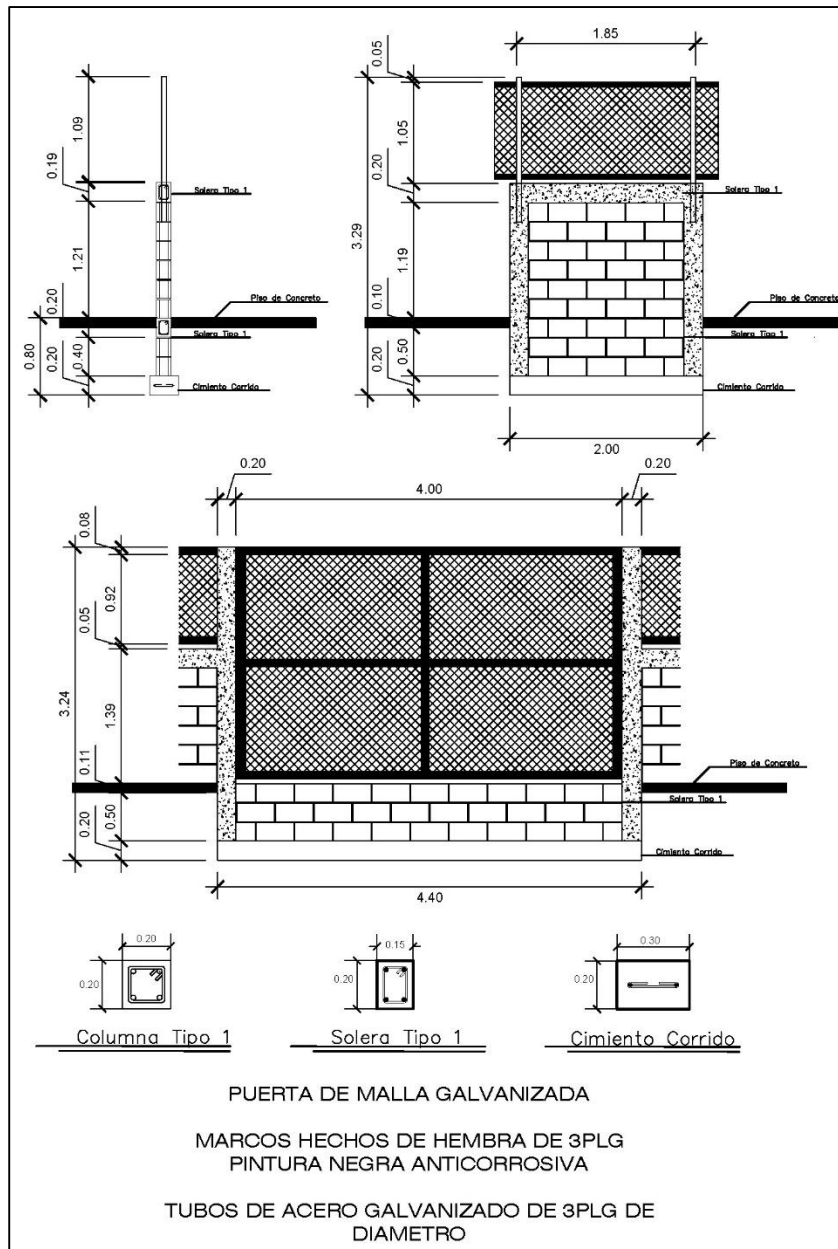
Sin embargo, es necesaria la implementación de protección física para el caso específico de la zona inmediata, ya que por nuestra cultura es muy difícil que se respete una normativa por simple señalización o seguridad.

**5.3. Protección física de la zona inmediata o de restricciones absolutas en los pozos mecánicos de agua para consumo humano en el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.**

Para la protección de la zona inmediata o de restricciones absolutas es necesario bloquear la circulación de población estudiantil dentro de este perímetro, por lo que surge como necesidad la elaboración de un perímetro de protección físico, ya sea por muro de block, malla de acero galvanizado o una combinación de ambas, como se muestra en la figura 37.

Sin embargo, no se puede realizar una protección completa en contra de animales porque elevaría demasiado el costo de la construcción. Por lo que es recomendable la limpieza del área constantemente, para evitar la acumulación de basura, insectos o roedores dentro de las instalaciones del pozo.

Figura 38. **Combinación de muro de block de 39x19x14cm y malla de acero galvanizado con 2.5 metros de altura**



Fuente: elaboración propia.

La elaboración de este perímetro tiene un costo de Q 575,19 por metro lineal de construcción, y Q 504,61 por metro lineal de portón de malla sin incluir mano de obra. Los cálculos se muestran en el apéndice 1.



## CONCLUSIONES

1. En Guatemala no hay una cultura de protección del agua subterránea. Esta es una de las principales fuentes de abastecimiento para toda la ciudad capital y la población guatemalteca en general, la cual no tiene conocimiento de los perímetros de protección para captaciones de agua subterránea. Sin embargo, es muy complicado determinar los perímetros de protección de una captación ya que se necesitan realizar estudios demográficos, socioeconómicos, geográficos e hidrogeológicos de la región para poder establecer zonas eficientes para la protección de cada uno de los pozos en estudio.
2. En el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala hay perforados 6 pozos mecánicos para extracción de agua para consumo humano. Los primeros dos pozos fueron perforados por la Facultad de Ingeniería en el año 1973 y el segundo en 1978, con una profundidad de 600 pies cada uno, debido al alto crecimiento de población estudiantil. Solo uno se encuentra en funcionamiento. Fueron perforados dos pozos de Servicios Generales en el año 1988, con una profundidad de 800 pies y 900 pies, respectivamente, de los cuales ambos funcionan para abastecer a la población estudiantil. Por último, los pozos de los centros de experimentación de Agronomía y Veterinaria, ambos perforados en los años noventa con una profundidad desconocida para el pozo de Veterinaria, y 1 002 pies para el pozo de Agronomía. Funcionan solamente en casos especiales, cuando no se dan abasto los pozos de la Dirección de Servicios Generales.

3. En la Universidad de San Carlos se tiene una mala administración con poca cultura de cuidado del agua subterránea y superficial. Uno de los casos que lo denotan es la presencia de basureros sin protección impermeable en sus bases a pocos metros de los pozos mecánicos de agua para consumo humano. Otro caso igual de importante es la desviación directa del agua pluvial hacia el río que se encuentra al noroeste del campus central, sin ninguna planta de tratamiento previa. Casos que son graves para la contaminación del agua que consumimos como seres humanos.
  
4. Para la delimitación de los perímetros de protección se utilizó el criterio de tiempo de tránsito para cada una de las zonas que se van a establecer. En la zona inmediata se utilizó un tiempo de tránsito de un día, con la restricción de protección mínima de 100 metros cuadrados alrededor de la captación; se añadió a esta protección el radio de llamada de 20,70 metros por el método de Wyssling. Para la zona próxima se utilizó un tiempo de tránsito de 30 días en el método de Wyssling para establecer las zonas a proteger aguas arriba de la captación, siguiendo el flujo del agua subterránea. Por último, en la zona alejada o de restricciones moderadas se utilizó el método de determinación de límites de protección por medio de mapas hidrogeológicos, tomando en cuenta las líneas de flujo, piezométricas y fallas que se presenten dentro del acuífero del valle sur de la Ciudad de Guatemala.



## RECOMENDACIONES

1. Elaborar un programa de concientización dentro del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala que promueva la protección del agua subterránea y superficial.
2. Realizar una inspección de las instalaciones de redes de distribución de agua potable, agua pluvial y sanitaria, para detectar una posible fuga que sea significativa para la contaminación del acuífero del valle sur de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
3. Utilizar este trabajo de investigación para la futura delimitación de los perímetros de protección de los pozos mecánicos de agua para consumo humano, ya que sienta las bases hacer realidad la protección de las captaciones que se encuentran dentro de la ciudad universitaria.
4. Evaluar el estado actual de cada uno de los pozos dentro del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala, por lo menos una vez al año, para tener presente la situación actual en cuanto a la disposición de agua subterránea y la disponibilidad que habrá de la misma en el futuro.
5. Examinar la situación del pozo de Ingeniería que no se encuentra en uso e investigar un método viable para el abandono del mismo, con el fin de sellar y evitar la contaminación en el futuro.

6. En el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala es muy necesario establecer un normativo para la protección del agua subterránea que sirva como ejemplo a la Municipalidad de la ciudad capital para proteger nuestro recurso máspreciado como humanidad. A continuación, se mencionan medidas que se deben tomar en cuenta para hacer realidad la protección del agua subterránea en el área del campus central:

- Remoción de basureros que no cuentan con protección suficiente en contra del escurrimiento de agua contaminada hacia la superficie terrestre.
- Incorporación de casetas de protección de los pozos para prohibir la circulación de personas y animales a los alrededores de la captación.
- Prohibición de actividades altamente contaminantes, cercanas a las captaciones de agua subterránea y señalización apropiada dentro del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

## BIBLIOGRAFÍA

1. GÁLVEZ, Juventino (Coordinador IARNA-URL), *Bases técnicas para la gestión de agua con visión a largo plazo en la zona metropolitana de Guatemala*, Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar & The Nature Conservancy, Ciudad de Guatemala, Guatemala, 2013. 121 p.
2. HERRERA, Isaac R. et al. *Estudio hidrogeológico de los acuíferos volcánicos de la república de Guatemala*. Dirección General de Investigación de la Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. 2016.
3. INSIVUMEH. *Estudio de las aguas subterráneas en el valle de la ciudad de Guatemala*, Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, Ciudad de Guatemala, Guatemala, 1978.
4. MAGA. *Suelos a nivel de Orden, Departamento de Guatemala*. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Alimentación de Guatemala. [en línea] <<http://ideg.segeplan.gob.gt/geoportal/>> [Consulta: noviembre de 2019].
5. MARTÍNEZ NAVARRETE, Carlos y GARCÍA GARCÍA, Álvaro. *Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al*

*territorio*. 1a edición. España: Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 2003. ISBN 84-7840-496-1. 51 p.

6. MORENO MERINO, Luis. y MARTÍNEZ NAVARRETE, Carlos. *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas*. 1a edición. España: Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1991. ISBN 84-7840-091-1. 11 p.
7. PIERRI, Ileana. *Eficiencia en la remoción de nitrógeno y fósforo en los filtros percoladores de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad de San Carlos, Guatemala*. Tesis de postgrado inédita. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2013.
8. SÁNCHEZ, Javier. *Contaminación de las aguas subterráneas*. Departamento de Geología de la Universidad de Salamanca. [en línea]. <<http://hidrologia.usal.es>> [Consulta: 20 de abril de 2019].
9. SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO. *¿Qué es Geología?* [en línea]. <<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/157537/Que-es-la-Geologia.pdf>> [Consulta: 14 de octubre de 2019].
10. U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Guidelines for delineation of wellhead protection areas*. Offices of water, office of ground-water protection. [en línea]. <<https://nepis.epa.gov>> [Consulta: 20 de noviembre de 2019].

11. VILLARROYA, Fermín. *Tipos de acuíferos y parámetros hidrogeológicos*. Centro Nacional de Tecnología de Regadíos, Ministerio de Medio ambiente y medio rural marino, España, 2009. [en línea] <<http://chilorg.chil.me/download-doc/86199>> [Consulta: 25 de octubre de 2019]



## APÉNDICE

### Apéndice 1. **Cuantificación de perímetro de protección físico para pozos mecánicos de agua potable en la intemperie para la zona inmediata o de restricciones absolutas**

- Cuantificación de materiales de construcción para un muro con malla galvanizada para protección

METROS  
1.8 LINEALES

**CONSTRUCCIÓN DE MURO CON MALLA**

NO.	MATERIALES	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	SUB TOTAL
1	BLOCK 14x19x39cm	UNIDAD	36,225	Q 4,00	Q 144,90
2	CEMENTO	SACO	4,26	Q 75,00	Q 319,50
3	ARENA	M3	2	Q 100,00	Q 200,00
4	PIEDRIN	M3	1,5	Q 195,00	Q 292,50
5	HIERRO 3/8"	VARILLA	4,10	Q 26,00	Q 106,60
6	HIERRO 1/4"	VARILLA	3,20	Q 11,00	Q 35,22
7	ALAMBRE DE AMARRE	LIBRA	10	Q 0,89	Q 8,93
8	TUBO ACERO GALVANIZADO	METRO	1,5	Q 11,67	Q 17,50
9	MALLA ACERO GALVANIZADO	M2	1,94	Q 27,60	Q 53,61
10	ELECTRODO	LIBRA	1	Q 13,50	Q 13,50
11	HEMBRA 2"	VARILLA	5,8	Q 55,00	Q 319,00
<b>TOTAL</b>					Q 1 511,27

4 METROS LINEALES

**CONSTRUCCIÓN DE PUERTA DE MALLA**

NO.	MATERIALES	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	SUB TOTAL
11	HEMBRA 3"	VARILLA	21,6	Q 55,00	Q 1 188,00
9	MALLA ACERO GALVANIZADO	M2	12,64	Q 27,60	Q 348,86
6	HIERRO 1/4"	VARILLA	21,60	Q 11,00	Q 237,60
10	ELECTRODO	LIBRA	4	Q 13,50	Q 54,00
<b>TOTAL</b>					Q 1 828,46

Continuación de apéndice 1.

Se obtiene como resultado el metro lineal de construcción de muro perimetral combinado con malla de acero galvanizado, Q839,59. Y el metro lineal de construcción de portón de malla de acero galvanizado con marco de hembra de acero de 2 pulgadas, Q 457,12.

Fuente: elaboración propia.