



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

**EFFECTOS DEL CRECIMIENTO POBLACIONAL E IMPERMEABILIZACIÓN DEL SUELO,  
SOBRE LA ESCORRENTÍA E INFILTRACIÓN EN EL NORTE DE LA CIUDAD DE  
GUATEMALA**

**Karla Lisbeth Jul Corzantes**

Asesorado por el Ing. José Gabriel Ordoñez Morales

Guatemala, septiembre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EFFECTOS DEL CRECIMIENTO POBLACIONAL E IMPERMEABILIZACIÓN DEL SUELO,  
SOBRE LA ESCORRENTÍA E INFILTRACIÓN EN EL NORTE DE LA CIUDAD DE  
GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**KARLA LISBETH JUL CORZANTES**

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ GABREL ORDOÑEZ MORALES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA CIVIL**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2021

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. Kevin Vladimir Armando Cruz
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Linares Cruz
EXAMINADOR	Ing. Nicolás de Jesús Guzmán Sáenz
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Portillo España
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **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:

### **EFFECTOS DEL CRECIMIENTO POBLACIONAL E IMPERMEABILIZACIÓN DEL SUELO, SOBRE LA ESCORRENTÍA E INFILTRACIÓN EN EL NORTE DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil con fecha 12 de mayo del 2019.

**Karla Lisbeth Jul Corzantes**

Ciudad de Guatemala, 16 julio de 2021

Ingeniero civil

Pedro Antonio Aguilar Polanco

Coordinador del Área de Hidráulica

Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de ingeniería

Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Aguilar:

Por ese medio me dirijo a usted para informarle que, he revisado el informe final del Trabajo de Graduación “Efectos del crecimiento poblacional e impermeabilización del suelo, sobre la escorrentía e infiltración en el norte de la Ciudad de Guatemala”; elaborado por la estudiante de Ingeniería Civil, Karla Lisbeth Jul Corzantes quien se identifica con Registro Académico número 2013 25515 y Documento Personal de Identificación 2516 21863 1603, considerando que dicho trabajo cumple los requisitos establecidos por la Escuela de Ingeniería Civil. Por lo anterior, doy mi aprobación y recomiendo para su publicación.

Atentamente,



Ing. Civil José Gabriel Ordoñez Morales  
Asesor de Trabajo de Graduación

Guatemala, 25 de julio de 2021  
EIC-AH-001-2021/pap

Ingeniero  
Armando Fuentes Roca  
Director de la Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos

Ingeniero Fuentes:

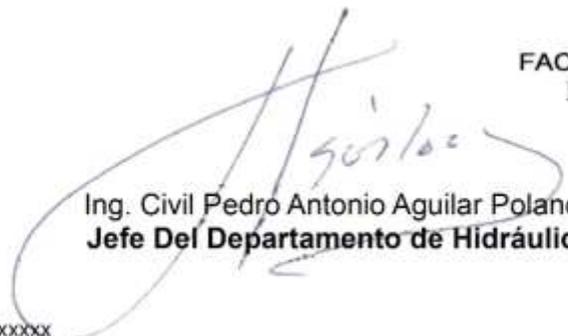
Le informo que he revisado el trabajo de Graduación, **“EFECTOS DEL CRECIMIENTO POBLACIONAL E IMPERMEABILIZACIÓN DEL SUELO, SOBRE LA ESCORRENTÍA E INFILTRACIÓN EN EL NORTE DE LA CIUDAD DE GUATEMALA”**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil, **KARLA LISBETH JUL CORZANTES**, **Registro Académico: 201325515**, quien contó con la asesoría de el **ING. JOSÉ GABREL ORDOÑEZ MORALES**.

Considero el Trabajo bien desarrollado y representará un aporte Académico para la comunidad y esta Casa de Estudios, habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo, por lo que solicito su aprobación al mismo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A

TODOS



FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO  
DE  
HIDRAULICA  
U S A C  
Ing. Civil Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Jefe Del Departamento de Hidráulica

Cc: Estudiante xxxxxxxxxx  
Archivo



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. José Gabriel Ordóñez Morales y del Coordinador del Departamento de Hidráulica Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco, al trabajo de graduación de la estudiante Karla Lisbeth Jul Corzantes EFECTOS DEL CRECIMIENTO POBLACIONAL E IMPERMEABILIZACIÓN DEL SUELO, SOBRE LA ESCORRENTÍA E INFILTRACIÓN EN EL NORTE DE LA CIUDAD DE GUATEMALA da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Sin otro particular, le saludo muy atentamente.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Armando Fuentes Roca

**Director Escuela Ingeniería Civil**



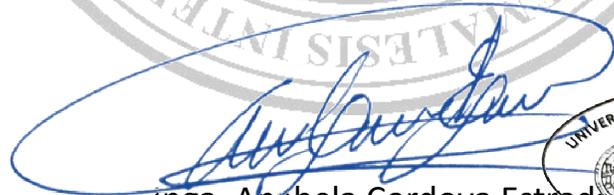
Mrrm/ septiembre 20201



DTG.445.2021

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: **EFFECTOS DEL CRECIMIENTO POBLACIONAL E IMPERMEABILIZACIÓN DEL SUELO, SOBRE LA ESCORRENTÍA E INFILTRACIÓN EN EL NORTE DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**, presentado por la estudiante universitaria: **Karla Lisbeth Jul Corzantes**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Anabela Cordova Estrada  
Decana



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
DECANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
★

Guatemala, septiembre de 2021

AACE/cc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por acompañarme y guiarme en todo momento.
<b>Mis padres</b>	José Jul y Carmen Corzantes por su tiempo, su apoyo y comprensión a lo largo de mi carrera.
<b>Familia</b>	A cada uno de ustedes por formar parte de mi vida y contribuir en mi formación.
<b>Murphy Paiz</b>	Por animarme y motivarme a culminar mis estudios.
<b>Guatemala</b>	Por darme la oportunidad de cumplir uno de mis sueños y metas.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser el lugar donde me forme como profesional al servicio de Guatemala.
<b>Municipalidad de Guatemala</b>	Por ser la institución en darme la oportunidad de culminar mis estudios superiores e iniciar una nueva etapa en mi vida.
<b>Mi asesor</b>	Por su amistad, paciencia, apoyo y guía durante mi investigación y etapa estudiantil.
<b>Maynor López</b>	Por darme la oportunidad de formar parte de su equipo de trabajo.
<b>Jorge Hernández</b>	Por su ayuda y compañía durante esta investigación.
<b>Amigos</b>	A mis amigos y compañeros de estudio por brindarme su apoyo y compartir recuerdos juntos.
<b>Catedráticos</b>	Por darme las herramientas y conocimientos para afrontar y resolver problemas.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1.    CONCEPTOS BÁSICOS.....	1
1.1.    Ciclo del agua en la naturaleza .....	1
1.2.    Recarga hídrica natural .....	3
1.3.    Acuífero .....	3
1.4.    Nivel freático .....	5
1.5.    Zonas de recarga hídrica.....	6
1.6.    Cuenca .....	6
1.7.    Balance hidrológico de cuencas .....	8
2.    SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA .....	13
2.1.    ¿Qué es QGIS? .....	13
2.2.    Algunos elementos que lo componen.....	13
2.2.1.    Interfaz QGIS.....	13
2.2.2.    Shapefile .....	14
2.2.3.    Tabla de atributos .....	15
2.2.4.    Proyección .....	15
2.2.5.    Funciones del SIG .....	15

3.	MARCO REFERENCIAL.....	17
3.1.	Áreas críticas de recarga hídrica natural.....	17
3.2.	Comportamiento de precipitación.....	18
3.3.	Efectos de cobertura superficial sobre el agua subterránea .....	19
3.4.	Crisis de extracción y sobreexplotación del agua subterránea..	20
3.5.	Características de una superficie impermeable.....	21
3.6.	Reconocimiento de superficies impermeables .....	23
3.7.	Impactos ambientales relacionados con las superficies impermeables.....	24
3.8.	Escurrimiento superficial .....	26
3.9.	Impermeabilidad y calidad de aguas .....	27
3.10.	Indicadores de impermeabilidad.....	28
3.11.	Efecto de las estrategias de mitigación .....	29
3.12.	La evolución de la Ciudad de Guatemala de 1976 hasta 2019 .....	30
3.13.	Comportamiento poblacional de la Ciudad de Guatemala .....	37
3.14.	Ordenamiento territorial de la Ciudad de Guatemala .....	39
4.	INFORMACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	43
4.1.	Descripción geográfica.....	43
4.2.	Resumen del balance hídrico del proyecto Emergencia I .....	44
4.3.	Resumen estudio hidrológico del proyecto Emergencia I.....	46
4.4.	Pozos de explotación, proyecto Emergencia I.....	49
4.5.	Resumen del estudio hidrológico .....	50
4.5.1.	Área de estudio .....	50
4.6.	Parámetros meteorológicos e hidrológicos, proyecto Emergencia I.....	52
4.7.	Estudio evapotranspiración del proyecto Emergencia I.....	53

4.8.	Aspectos físicos de las aguas superficiales del proyecto	
	Emergencia I.....	54
4.8.1.	Infiltración de la cuenca río Los Ocotes .....	56
4.8.2.	Infiltración de la cuenca río Los Vados .....	57
4.8.3.	Infiltración de la cuenca río Las Vacas .....	58
4.9.	Características de los pozos del proyecto Emergencia I .....	59
5.	METODOLOGÍA DEL ESTUDIO .....	65
5.1.	Variables.....	65
5.2.	Delimitación de campo de estudio .....	65
5.3.	Evaluar el comportamiento de los pozos .....	66
5.4.	Pruebas velocidad de infiltración actual.....	71
5.5.	Precipitación efectiva.....	72
5.6.	Estudio del porcentaje de cubierta permeable e impermeable año 2010, de las zonas 6, 10, 15, 16 y 18 por la Municipalidad de Guatemala .....	75
5.7.	Cálculo del porcentaje de cubierta permeable e impermeable del año 2000, de las zonas 6, 10, 15, 16 y 18 usando QGIS.....	85
5.8.	Cálculo del porcentaje de cubierta permeable e impermeable del año 2019, de las zonas 6, 10, 15, 16 y 18 usando QGIS.....	89
6.	RESULTADOS .....	95
6.1.	Prueba de Porchet y muestras de suelo.....	95
6.2.	Comportamiento de elementos que intervienen en la escorrentía e infiltración.....	98
6.3.	Comportamiento de la producción de los pozos entre el año 2000 al 2010 .....	100
6.4.	Determinación de porcentaje de impermeabilidad en km2 .....	101
6.5.	Uso del suelo según el POT en el año 2010 .....	103

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	109
CONCLUSIONES.....	115
RECOMENDACIONES.....	119
BIBLIOGRAFÍA.....	121
APÉNDICES.....	125
ANEXOS.....	153

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Ciclo del agua en la naturaleza .....	2
2.	Acuífero confinado .....	4
3.	Descripción del nivel freático.....	5
4.	Cuenca hidrológica.....	7
5.	Cuenca de drenaje como sistema hidrológico.....	9
6.	La Zona del corredor seco y altiplano occidental (menos recursos hídricos) y la zona central y sur-occidente siguen siendo las áreas con mayor excedente de recursos hídricos por unidad de superficie .....	11
7.	Diferencia entre vector y <i>raster</i> .....	14
8.	Ejemplo de organización de datos en SIG, que posibilita la integración espacial o temporal de información multidisciplinaria representada en mapas temáticos o <i>layers</i> .....	16
9.	Caracterización de densidad poblacional .....	18
10.	Comportamiento poblacional en la Ciudad de Guatemala .....	39
11.	Reglamentos del POT .....	40
12.	Clasificación de criterios constructivos .....	41
13.	Descripción de zonas de la Ciudad de Guatemala.....	43
14.	Delimitación de sub cuencas del estudio .....	48
15.	Pozos del proyecto Emergencia I, de Empagua.....	66
16.	Comportamiento de la producción de agua en zona 6 .....	67
17.	Comportamiento de la producción de agua en zona 10 .....	67
18.	Comportamiento de la producción de agua en zona 15 .....	68
19.	Comportamiento de la producción de agua en zona 16 .....	68

20.	Comportamiento de la producción de agua en zona 18.....	69
21.	Comportamiento producción anual del año más reciente .....	69
22.	Descripción de la ubicación de los pozos del proyecto Emergencia I.....	70
23.	Visualización de cubierta vegetal de zona 6 .....	75
24.	Visualización de cubierta vegetal de zona 10 .....	77
25.	Visualización de cubierta vegetal de zona 15 .....	79
26.	Visualización de cubierta vegetal de zona 16 .....	81
27.	Figura Visualización de cubierta vegetal zona 18 .....	
28.	Área impermeable y permeable de la zona 6.....	85
29.	Área impermeable y permeable de la zona 10.....	86
30.	Área impermeable y permeable de la zona 15.....	87
31.	Área impermeable y permeable de la zona 16.....	88
32.	Área impermeable y permeable de la zona 18.....	89
33.	Área impermeable y permeable de la zona 6.....	90
34.	Área impermeable y permeable de la zona 10.....	91
35.	Área impermeable y permeable de la zona 15.....	92
36.	Área impermeable y permeable de la zona 16.....	93
37.	Área impermeable y permeable de la zona 18.....	94
38.	Velocidad de infiltración inicial vs final .....	96
39.	Ensayo de permeabilidad (cm/seg).....	97
40.	Pozos del año 2000 al 2010.....	100
41.	Uso del suelo en zona 6.....	103
42.	Uso del suelo en zona 10.....	104
43.	Uso del suelo en zona 15.....	105
44.	Uso del suelo en zona 16.....	106
45.	Uso del suelo en zona 18.....	107

## TABLAS

I.	Resumen del balance hídrico del río Los Ocotes realizado durante el estudio de prefactibilidad del proyecto Emergencia I .....	44
II.	Resumen del balance hídrico del río Los Vados realizado durante el estudio de prefactibilidad del proyecto Emergencia I .....	45
III.	Resumen del balance hídrico del río las Vacas realizado durante el estudio de prefactibilidad del proyecto Emergencia I .....	45
IV.	Características generales de los pozos de explotación propuestos en las zonas del estudio .....	49
V.	Precipitación media anual sub-cuenca: río Los Ocotes.....	52
VI.	Precipitación media anual sub-cuenca: río Los Vados (El Chato).....	52
VII.	Precipitación media anual sub-cuenca: río Las Vacas .....	53
VIII.	Descripción de ríos que drenan las subcuencas .....	55
IX.	Características del caudal de pozos en explotación zona 6.....	60
X.	Características del caudal de pozos en explotación zona 10.....	60
XI.	Características del caudal de pozos en explotación zona 15.....	61
XII.	Características del caudal de pozos en explotación zona 16.....	61
XIII.	Características del caudal de pozos en explotación zona 18.....	62
XIV.	Comparación mensual de producción del caudal año 2019.....	64
XV.	Variables del proyecto.....	65
XVI.	Valores de infiltración por efecto de pendiente (Kp).....	73
XVII.	Valores de infiltración por efecto de la vegetación (Kv).....	74
XVIII.	Clasificación y ponderación de velocidad de infiltración.....	74
XIX.	Velocidad de infiltración de muestras tomadas en 2019 .....	95
XX.	Posibilidad de infiltración y precipitación efectiva del mes de septiembre de 2019.....	95
XXI.	Comparación ensayo permeabilidad del suelo con la Norma ASTM 2434-68 .....	97

XXII.	Comportamiento de la precipitación media .....	98
XXIII.	Comportamiento de evapotranspiración .....	99
XXIV.	Distribución de los pozos, proyecto Emergencia I .....	101
XXV.	Pozos con operaciones suspendidas.....	101
XXVI.	Zonas impermeable y permeable del año 2000 .....	102
XXVII.	Zonas impermeable y permeable del año 2010.....	102
XXVIII.	Zonas impermeable y permeable del año 2019 .....	102

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>°C</b>	Grados centígrados
<b>km<sup>2</sup></b>	Kilómetros cuadrados
<b>Lts/seg</b>	Litros por segundo
<b>m</b>	Metro
<b>m<sup>2</sup></b>	Metros cuadrados
<b>m.s.n.m</b>	Metros sobre nivel del mar
<b>mm</b>	Milímetro
<b>mm/año</b>	Milímetros por año
<b>mm/día</b>	Milímetros por día
<b>mm/mes</b>	Milímetros por mes
<b>plg</b>	Pulgada



## GLOSARIO

<b>Acuífero</b>	Estrato de rocas permeable que almacena agua en su interior, la cual fluye de forma subterránea en función de la porosidad y permeabilidad de la roca. Se recargan por infiltración y percolación y se descargan a través de los ríos y manantiales, o en el mar.
<b>Agua subterránea</b>	Agua que ocupa todo el espacio vacío dentro del estrato geológico conocido como subsuelo. Comprende toda el agua que se encuentra por debajo del nivel freático, la que se encuentra en la zona de saturación y la que alimenta pozos, manantiales y escorrentía subterránea.
<b>Balance hídrico</b>	Relación que se establece entre los valores de precipitación y evapotranspiración en un área determinada. Puede arrojar un déficit o equilibrio de humedad.
<b>Balance hidrológico</b>	Entrada, salida y contenido de agua en una unidad hidrológica. Tales como: una cuenca, un lago, un embalse, un sistema de regadío o una zona determinada del suelo.

<b>Caudal base</b>	Parte del caudal que proviene de las reservas de una cuenca, tales como las aguas subterráneas, y que se mantienen en periodos sin precipitación.
<b>Cuenca hidrológica</b>	Área circunscrita por una divisoria de aguas que drena hacia un cauce principal.
<b>Degradación del suelo</b>	Proceso que afecta negativamente la capa superficial del suelo e impacta el almacenaje y recirculación del agua y los nutrientes presentes en él.
<b>Escorrentía superficial</b>	Acción del agua al escurrir sobre la superficie del suelo, siendo la parte de la precipitación que no se filtra ni se evapora.
<b>Estuario</b>	Área costera semicerrada donde el agua dulce de los ríos se mezcla con la salada proveniente del mar.
<b>Evapotranspiración</b>	Perdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación.
<b>Gestión forestal</b>	Proceso de planeación y ejecución de prácticas para la administración y uso de los bosques y otros terrenos arbolados, con el fin de cumplir con objetivos ambientales, económicos, sociales y culturales específicos.

<b>Infiltración</b>	Proceso de filtración del agua desde la superficie del suelo hacia el interior de la tierra. Está relacionado al concepto de percolación, que es el movimiento de agua dentro del suelo, porque la infiltración no puede continuar hasta que la percolación haya removido el agua de las capas superiores del suelo.
<b>Nivel freático</b>	Nivel superior de una capa freática o de un acuífero.
<b>Oferta hídrica</b>	Volumen de agua disponible para satisfacer la demanda generada por las actividades sociales y económicas humanas.
<b>Percolación</b>	Proceso en el que fluidos pasan lentamente a través de materiales porosos.
<b>Permeabilidad</b>	Capacidad que tiene un material de permitir que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna.
<b>QGIS</b>	Sistema que permite tabular, recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica.
<b>Vertiente</b>	Suele tratarse de una superficie topográfica inclinada, que se encuentra entre puntos altos y bajos.



## RESUMEN

El abastecimiento de agua en la Ciudad de Guatemala depende en igual medida de la captación de agua superficial y de aguas subterráneas. Ambas formas de abastecimiento dependen del ciclo del agua en la naturaleza. Dicho ciclo, en términos de escorrentía e infiltración, ha sido afectado por el crecimiento poblacional y por la impermeabilización del suelo. Esto ha provocado efectos negativos sobre el sistema de abastecimiento de agua, especialmente en su seguridad sanitaria.

El presente trabajo trata de determinar la disminución de la cubierta vegetal del área de la Ciudad de Guatemala mediante el análisis de imágenes satelitales, y cómo este fenómeno ha provocado el decaimiento de la permeabilidad del suelo y de los niveles de extracción de agua potable.

Se analizaron los datos de caudales de extracción de agua de los pozos de EMPAGUA e imágenes satelitales. A su vez, se hizo un ensayo de Porchet para conocer la velocidad de infiltración en las zonas 6, 10, 15, 16 y 18 de la Ciudad de Guatemala. El trabajo está estructurado en siete capítulos, de los cuales el uno, dos y tres tratan los conceptos y referencias pertinentes, y el cuatro, cinco, seis y siete describen la metodología y los resultados.

En el estudio se tomaron en cuenta variables climáticas y parámetros del suelo para conocer el desempeño que tienen las zonas en cuanto a la infiltración de agua y el crecimiento poblacional.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Evaluar los efectos de crecimiento poblacional e impermeabilización del suelo sobre la infiltración y escorrentía.

### **Específicos**

1. Mostrar el porcentaje de pérdida de cubierta vegetal en el norte, noreste y sur de la Ciudad de Guatemala, en el periodo del año 2000 al año 2019.
2. Mostrar la variabilidad de precipitación, en el periodo del año 2000 al año 2019.
3. Muestrear la capacidad de infiltración actual en los pozos en las zonas 6, 10, 15, 16 y 18 de la Ciudad de Guatemala.
4. Analizar la variabilidad y decaimiento de los 32 pozos del proyecto Emergencia 1.
5. Analizar los factores que han influido en el aumento de la impermeabilidad en el norte, noreste y sur de la Ciudad de Guatemala.



## INTRODUCCIÓN

La impermeabilidad es un indicador que relaciona los cambios hidrológicos con la capacidad de infiltración y escorrentía superficial de una cuenca hídrica. Las superficies impermeables son características de las zonas urbanizadas. Estas evitan que se produzca el proceso de percolación en el suelo. Esto ha provocado el descenso de la recarga hídrica de la Ciudad de Guatemala.

En la Ciudad de Guatemala existen zonas de aprovechamiento intenso de extracción de agua potable. Esta se extrae por medio de los pozos de la Empresa Municipal de Agua EMPAGUA y de pozos privados. Por esta razón han ido disminuyendo las reservas acuíferas, provocando variaciones del nivel de agua en el manto freático en diferentes zonas de la Ciudad.

En la mayor parte de las microcuencas se da una extracción de agua superior a la recarga local estimada, sobre todo en las cuencas más urbanas. Esto quiere decir que el uso del suelo para la extracción de agua que supla los servicios básicos está provocando el agotamiento de esta. Aunque los acuíferos locales pueden beneficiarse de una recarga adicional proveniente del exterior de las microcuencas estudiadas, se puede concluir que el uso de las aguas subterráneas tiene una tendencia insostenible en la zona metropolitana.

A pesar de que la captación de agua superficial ofrece posibilidades para satisfacer las necesidades básicas de la población durante la época lluviosa, actualmente existe poco aprovechamiento de la captación de agua superficial. A su vez, el tratamiento de aguas residuales es insuficiente. Por ello, estas son

opciones que deben ser investigadas y adaptadas para la densidad de la población urbana, donde serían implementadas para obtener mayor beneficio.

Estos son los trabajos consultados para establecer el estado de la investigación en este tema:

En la Ciudad de Guatemala se han realizado los siguientes estudios del recurso hídrico subterráneo. Se encuentran en ellos documentos de fuentes que aportan variables cuantitativas y cualitativas. A continuación, se detallan algunos de los documentos:

- El estudio de Factibilidad de Desarrollo de las Aguas Subterráneas en el Valle de la Ciudad de Guatemala, Emergencia I, JICA, 1986.

En él se desarrollan tres áreas: Norte, Noreste y Sur. Determina que las áreas más propicias para el desarrollo de las aguas subterráneas son Norte y Noreste. Por ello el estudio de Ckc Chuo Kaihatsu Corporation desarrolló el estudio hidrogeológico para esas zonas.

- Estudio Hidrogeológico en el Valle de la Ciudad de Guatemala, proyecto Emergencia I, Ckc Chuo Kaihatsu Corporation, 1995.

El objetivo básico de este estudio era obtener un mejor conocimiento de las condiciones hidrogeológicas de los acuíferos localizados en las áreas que fueron propuestas en el estudio de factibilidad de 1986 para extraer 1m<sup>3</sup>/s. Esta era la meta del proyecto Emergencia 1, a través de 32 pozos nuevos de explotación. El estudio determinó los sitios de perforación de los pozos de explotación y estimó su caudal en los resultados.

- Estudio de los niveles freáticos del área norte y este de la Ciudad Capital, del año 2014, realizados por Gabino René Coló López

En 1982, cuando fue concluido el Plan Maestro de Abastecimiento de Agua para la ciudad de Guatemala (PLAMABAG), se estimó que el acuífero subterráneo localizado en el valle de la ciudad de Guatemala poseía una recarga de entre 100 y 120 millones de metros cúbicos por año. También se definió que una explotación de 1 metro cúbico por segundo durante un período de 10 a 15 años sería recomendable desde el punto de vista hidrológico y técnico.

La investigación muestra el promedio de descenso hasta el año 2011 de los siguientes sectores: sector Norte, 4,44 metros por año (14,55 pies por año); sector Lavarreda, 6,78 metros por año (22,23 pies por año); sector Rodeo, 5,38 metros por año (17,64 pies por año). El sistema Emergencia 1 presenta un descenso promedio del nivel estático del orden de 5,29 metros por año (17,35 pies por año).

- Bases técnicas para la gestión del agua con visión de largo plazo en la zona metropolitana de Guatemala. Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente. Universidad Rafael Landívar. Guatemala, julio de 2013.

El objetivo es analizar la oferta hídrica y soluciones para mejorar el manejo del recurso hídrico. Para introducir las bases conceptuales del modelo hidrológico, se creó la iniciativa del Fondo para la Conservación del agua de la zona Metropolitana de Guatemala, FONCAGUA. Se determinó que la disponibilidad anual de agua superficial para el presente año es del 85 %, mientras que el 15 % es agua subterránea. Los flujos de agua superficial viajan cuenca abajo, por lo que no están disponibles para consumo humano y su calidad

está amenazada por la contaminación. Es necesario proporcionar una visión integral de la demanda y consumo de agua en la zona metropolitana, y establecer el valor económico que poseen los bosques por su contribución al ciclo hidrológico.

# 1. CONCEPTOS BÁSICOS

## 1.1. Ciclo del agua en la naturaleza

El agua tiene un ciclo perfectamente equilibrado, y funciona en armonía con el planeta, comenta en la actualidad Mejía. Sin la intervención humana, este ciclo permite que el agua pase del estado gaseoso, a través de la evaporación, hacia el estado líquido, por medio de la lluvia, una y otra vez. Alterar este ciclo produce cambios y variaciones de todos los elementos que dependen de él. A continuación, se describe el proceso del ciclo del agua.

La precipitación: comúnmente se la ve en forma de lluvia.

- La evapotranspiración: es el agua que se “evapora” tanto de los mares, lagos y ríos, como de la superficie de la tierra, sobre las copas de los árboles y sobre las plantas.
- Escorrentía subsuperficial: corresponde a los flujos horizontales de agua que ocurren debajo de la superficie del suelo.
- Percolación: es el proceso de filtración del agua a las capas profundas del suelo.

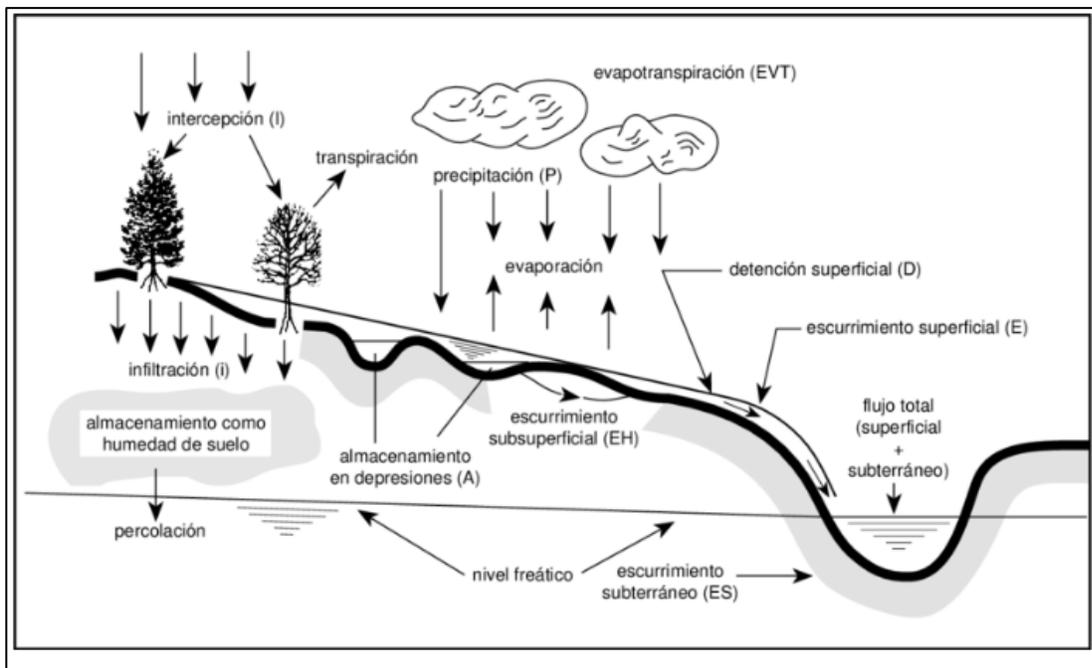
El crecimiento desordenado y acelerado de las ciudades ha interrumpido el ciclo de recarga del agua. Uno de los principales problemas es que se ha cubierto de asfalto y concreto lo que antes eran bosques y terrenos abiertos, es decir, zonas de recarga hídrica. El cambio climático también amenaza con severas sequías o lluvias torrenciales que caen sobre las ciudades. Entonces, debido al

asfalto y concreto, estas lluvias escurren lejos de las ciudades rápidamente sin permitir la filtración a las capas del subsuelo.

Otro problema es que cualquiera que tenga los recursos económicos puede perforar un pozo en su propiedad sin mayor trámite. No existe un registro de pozos activos en el departamento de Guatemala, por lo tanto, es imposible saber cuánta agua se está extrayendo o cuánta más queda.

Las cuencas hidrográficas conforman la base que permite que el ciclo del agua ocurra. Cuando una cuenca es mal utilizada o dañada, Mejía indica que el ciclo se interrumpe y por lo tanto todos los elementos que interactúan en él.

Figura 1. **Ciclo del agua en la naturaleza**



Fuente: VICH, Alberto I. J. *Agua continental: formas y procesos*. p 7.

## **1.2. Recarga hídrica natural**

El agua proveniente de las precipitaciones que alcanza la superficie de la cuenca, indicó Muños en 1998, después de saturar los espacios vacíos, poros y fisuras de las superficies, y de llenar las pequeñas depresiones superficiales, da inicio a dos tipos de movimiento: uno superficial, siguiendo las líneas de máximo gradiente de energía, y otro perpendicular, de acuerdo con el gradiente piezométrico y con la permeabilidad del medio indica.

El agua que se infiltra en la superficie terrestre y no es retenida por la humedad, comentaron Custodio y Llamas en el 2001, esta se mueve hacia las corrientes subsuperficiales o se infiltra hacia el manto freático. Otra de las fuentes que alimenta la recarga hídrica son los volúmenes de agua que se almacenan sobre la superficie de una cuenca, concentrándose las corrientes de agua.

## **1.3. Acuífero**

Los estratos que contienen el agua se llaman acuíferos. Estos están conformados por suelos no consolidados, tales como arenas o gravas, o de material consolidado, como roca arenisca o roca calcárea. Las rocas calcáreas son relativamente impermeables, pero son solubles en el agua y frecuentemente tienen juntas y pasajes en su interior. Estos las hacen similares a una roca porosa y su capacidad de retención las hace actuar como un acuífero.

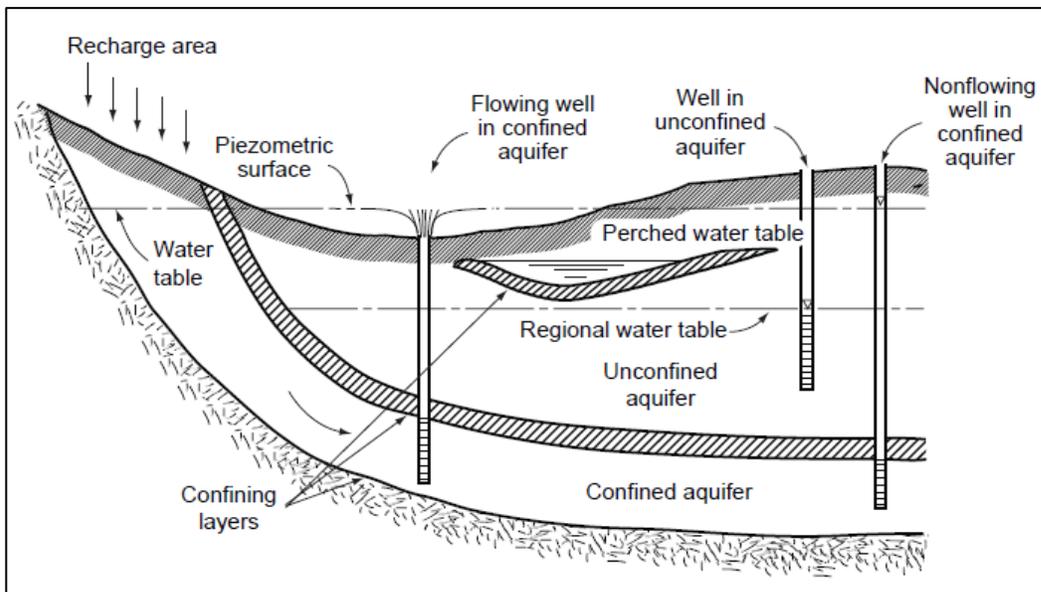
El agua en los poros de un acuífero está sujeta a fuerzas gravitacionales, así que tiende a fluir hacia abajo a través de estos. La resistencia al flujo subterráneo varía dependiendo de la permeabilidad del material. Esto es una medida de su resistencia. Conforme las aguas subterráneas se percolan los

acuíferos se convierten en zonas saturadas. La superficie de esta zona saturada es conocida como nivel freático.

Existen básicamente dos tipos de acuíferos, los confinados y los no confinados. En los acuíferos no confinados la parte superior del cuerpo de aguas subterráneas está expuesto a la presión atmosférica o existe un nivel freático.

En los acuíferos confinados, conocidos también como acuíferos artesianos, las aguas subterráneas se encuentran bajo una presión mayor a la presión atmosférica debido a una capa superior confinante constituida por un material relativamente impermeable (acuitardo).

Figura 2. **Acuífero confinado**



Fuente: ORDOÑEZ, Juan. *Aguas subterráneas-acuíferos*.

[www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam\\_files/publicaciones/variados/aguas\\_subterranas.pdf](http://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/variados/aguas_subterranas.pdf).

Consulta: 7 de marzo de 2021.

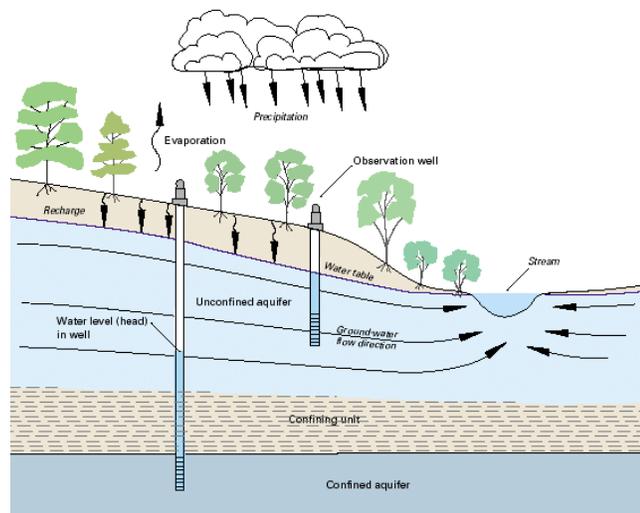
## 1.4. Nivel freático

El nivel freático es la superficie libre de agua en un acuífero no confinado. El nivel estático de un pozo perforado en un acuífero no confinado indica la profundidad del nivel freático en ese punto.

El nivel freático está en constante movimiento, ajustando su superficie para alcanzar un balance entre la recarga y el caudal de salida desde la superficie de almacenamiento.

La posición relativa del nivel freático en ríos determina si el río contribuye a las aguas subterráneas o viceversa. Los ríos que reciben aportes de las aguas subterráneas se llaman perennes o permanentes mientras que los que aportan hacia las aguas subterráneas se llaman ríos intermitentes.

Figura 3. Descripción del nivel freático



Fuente: ORDOÑEZ, Juan. *Aguas subterráneas-acuíferos*.  
[www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam\\_files/publicaciones/varios/aguas\\_subterranas.pdf](http://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/aguas_subterranas.pdf).  
Consulta: 7 de marzo de 2021.

## **1.5. Zonas de recarga hídrica**

Las zonas de recarga hídrica son los sitios que permiten la infiltración de las aguas de lluvia, y por lo tanto el abastecimiento natural de las aguas subterráneas. Estos se conforman de acuerdo, principalmente, a su geología y cobertura, entre otros factores.

Existen diferentes metodologías para la identificación de zonas de recarga hídrica, la que se describe a continuación utiliza parámetros geomorfológicos y de cobertura para establecer qué zonas dentro de una cuenca son propicias para la infiltración, y para la recarga de acuíferos.

Entre los factores utilizados por la metodología se encuentran.

- Pendientes del terreno
- Tipos de suelo
- Clasificación de la velocidad de infiltración
- Geología de la zona
- Clasificación de la cobertura vegetal
- Clasificación de uso del suelo

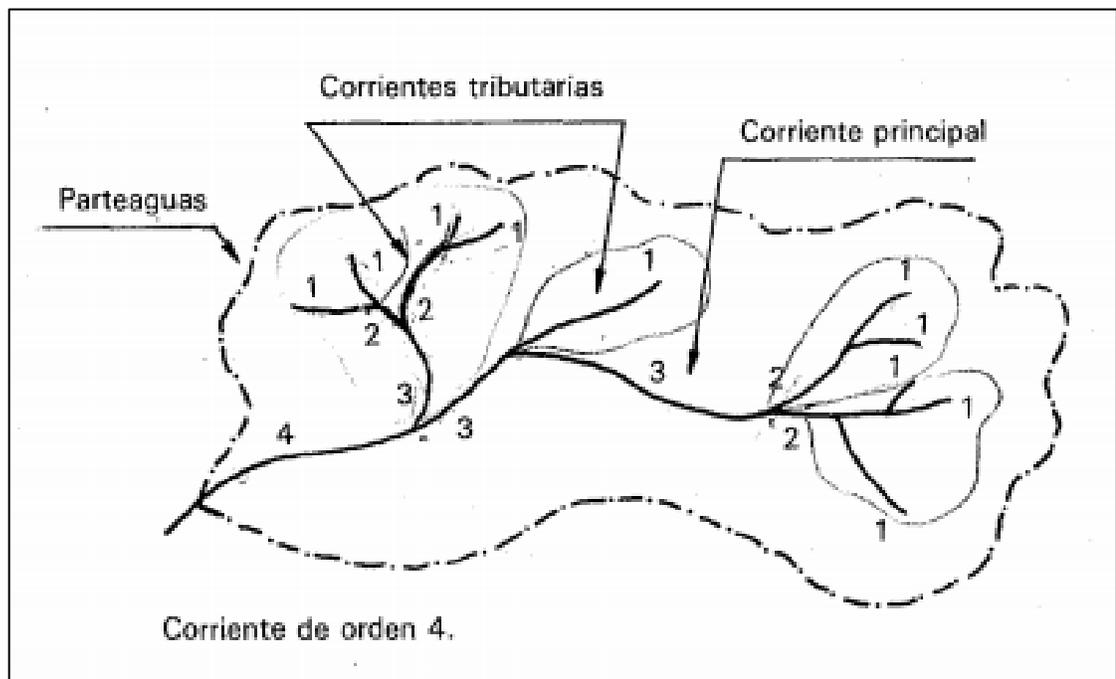
## **1.6. Cuenca**

Una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde, si el suelo fuera impermeable, las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida. La definición anterior se refiere a una cuenca superficial.

Por otra parte, la cuenca subterránea se suele entender como una unidad para la gestión que se realiza dentro de la cuenca superficial.

Desde el punto de vista de su salida, comenta Aparicio que existen fundamentalmente dos tipos de cuencas: endorreicas y exorreicas. En las primeras, el punto de salida está dentro de los límites de la cuenca y generalmente es un lago; en las segundas, el punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca y está en otra corriente o en el mar.

Figura 4. **Cuenca hidrológica**



Fuente: APARICIO, Francisco Javier. *Fundamentos de hidrología de superficie*. p. 21.

## 1.7. Balance hidrológico de cuencas

El balance hidrológico describe el movimiento de los flujos de agua dentro del ciclo hidrológico; es decir, sin tomar en cuenta los aspectos relacionados con el manejo y la extracción del recurso por la sociedad.

El balance hidrológico se formula a través de una ecuación, en su forma más básica:

$$\Delta A = E - S \text{ (Ec. 1)}$$

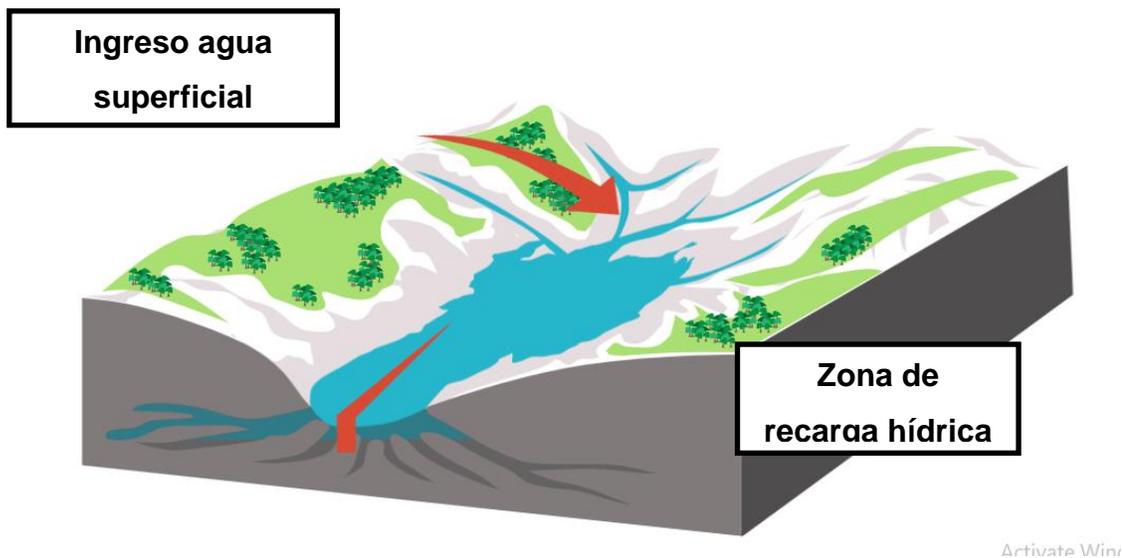
Dónde:

- $\Delta A$  es la variación en el almacenamiento, en el suelo o en el acuífero
- E son las entradas al sistema
  - Precipitación
  - Importaciones de agua
  - Recarga lateral (aguas subterráneas provenientes de otras cuencas).
- S son las salidas del sistema
  - Evaporación
  - Transpiración
  - Escorrentía
  - Infiltración
  - Descarga (aguas subterráneas hacia otras cuencas)
  - Exportación de agua

El cálculo del balance hidrológico se realiza a nivel de las subcuencas de la República de Guatemala, con el objetivo de estimar la cantidad de agua potencialmente disponible para extracción de servicios. Se basa en la estimación

de la variación del almacenamiento de agua en el suelo, ya sea esta positiva o negativa. Toma en cuenta como única entrada las precipitaciones; y como salidas la evapotranspiración, la escorrentía superficial y subsuperficial, y la percolación hacia los acuíferos (recarga).

Figura 5. **Cuenca de drenaje como sistema hidrológico**



Fuente: MEJÍA, Dénnys. *Plaza Pública. ¿Nos estamos quedando sin agua en el área metropolitana?* [www.plazapublica.com.gt/multimedia/agua\\_area\\_metropolitana/index.html](http://www.plazapublica.com.gt/multimedia/agua_area_metropolitana/index.html).

Consulta: 7 de marzo de 2021.

Con base en el balance hidrológico se define la disponibilidad hídrica, que es la oferta hidrológica anual. La oferta hidrológica es el volumen de agua que el subsistema ambiental deja disponible anualmente, es decir, después de los procesos de evapotranspiración realizados.

Según Saubes, la mayoría de las cuencas que muestran los niveles de oferta hidrológica más importantes están ubicadas en el suroccidente del país. Estas son las cuencas de los ríos Ocosito, Naranjo y Suchiate, en la parte central

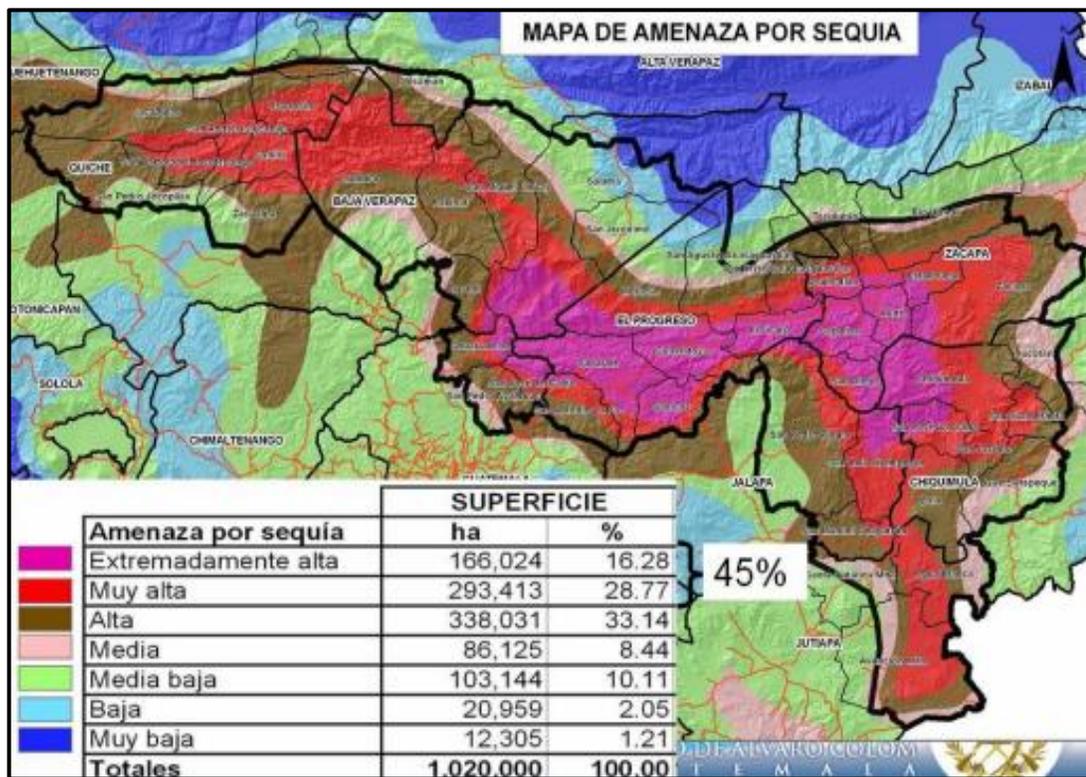
y en la Franja Transversal del Norte, las cuencas de los ríos Cahabón, Chixoy, Ixcán, Xaclbal, Tzea, Icbolay, Sebol, Sarstún, río Dulce, y Livingston. En estas cuencas la oferta hidrológica anual es superior a 1,5 millones de metros cúbicos por kilómetro cuadrado por año.

En la actualidad, tres subcuencas, Pixcayá, Las Vacas y Atitlán, presentan una disponibilidad por debajo de los 1 700 metros cúbicos per cápita, lo cual ha sido determinado como el umbral mínimo para cubrir las necesidades mínimas de cada individuo. Entre estas tres subcuencas, la subcuenca Las Vacas presenta una situación de escasez, pues tiene una disponibilidad per cápita inferior a 1 000 metros cúbicos.

El estudio del balance hídrico de Guatemala muestra que las subcuencas con el mayor excedente de recursos hídricos están principalmente ubicadas en la parte central del país y en el área del Caribe, así como en la parte sur occidente del país, en la vertiente del Pacífico.

Por otra parte, las cuencas con menor excedente en recursos hídricos están ubicadas en el área del corredor seco. Estas son la cabecera de la cuenca del río Motagua, en el sur de Quiché; alrededor del área metropolitana en subcuencas de los ríos Las Vacas, María Linda y Pixcayá y de las áreas urbanas mayores del altiplano central y occidental; finalmente, en la parte norte del departamento de Petén, explica Saubes.

Figura 6. La Zona del corredor seco y altiplano occidental (menos recursos hídricos) y la zona central y sur-occidente siguen siendo las áreas con mayor excedente de recursos hídricos por unidad de superficie



Fuente: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, MAGA. Unidad de planificación geográfica y gestión de riesgo upggr. *Diagnostico a nivel macro y micro del corredor seco y definición de las líneas estratégicas de acción del MAGA.* [maga.gob.gt/download/macro-micro.pdf](http://maga.gob.gt/download/macro-micro.pdf). Consulta: 7 de marzo de 2021.



## **2. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

### **2.1. ¿Qué es QGIS?**

Es un software que se utiliza para construir un sistema de información geográfico (SIG). Consta de un conjunto de aplicaciones con las cuales se pueden crear datos, mapas, modelos, aplicaciones y consultar datos geoespaciales. Los datos geoespaciales son la información geográfica de una entidad.

El Sistema de Información Geográfica tiene un código libre para plataformas GNU/Linux, Unix, Mac OS, Microsoft Windows y Android. Permite manejar formatos *raster* y vectoriales a través de las bibliotecas GDAL, OGR, y bases de datos.

### **2.2. Algunos elementos que lo componen**

A continuación, se describen algunos elementos que constituyen el sistema QGIS.

#### **2.2.1. Interfaz QGIS**

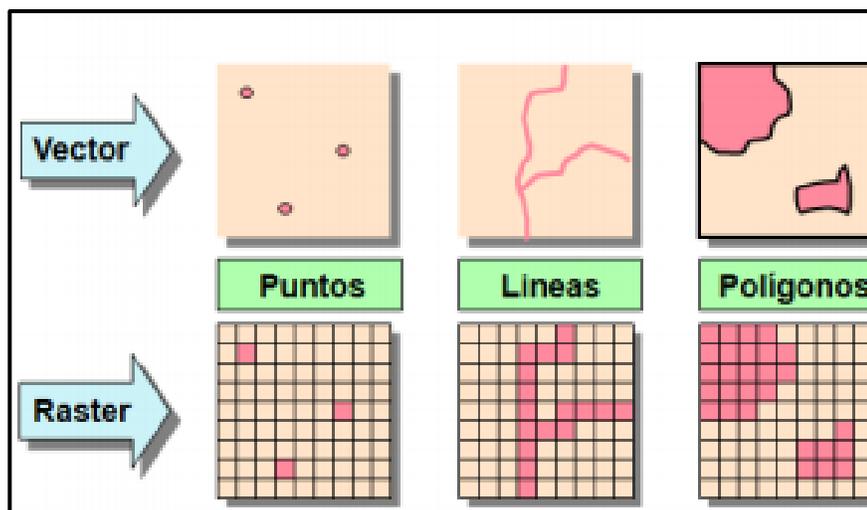
Quantm GIS Desktop, es la aplicación central utilizada en Quantum GIS. En esta se visualizan y exploran los *dataset* SIG de su área de estudio. En ella se asignan símbolos y se crean los diseños de mapa para imprimir o publicar. Es también la aplicación que se utiliza para crear y editar los *datasets*.

### 2.2.2. Shapefile

Es un formato vectorial de almacenamiento digital donde se guarda la localización de los elementos geográficos y los atributos asociados a ellos. El formato carece de capacidad para almacenar información topológica. También tiene la característica de ser multiarchivo, generado por varios ficheros informáticos. El número requerido es de tres extensiones.

- *Shp*: es el archivo que almacena las entidades geométricas de los objetos
- *Shx*: es el archivo que almacena el índice de las entidades geométricas
- *Dbf*: es la base de datos, en formato DBASE, donde se almacena la información de los atributos de los objetos. Entre los que existen están: punto, línea, polígono en vector y *raster*.

Figura 7. Diferencia entre vector y *raster*



Fuente: GÓMEZ, Isis. *Ecascript, vector vs raster*. <https://ecascript.org/vectorvsraster/>.

Consulta: 8 de marzo de 2021.

### **2.2.3. Tabla de atributos**

Es un documento para el despliegue tabular de información, está conformada por registros (fila), campos (columna), y contiene información específica de cada *layer* (capa).

### **2.2.4. Proyección**

Puede suceder que, por tener una proyección diferente, las capas con las que se está trabajando no coincidan. Por lo que la solución es cambiar la proyección de las capas por otra proyección que convenga más.

Para realizar la conversión del sistema de proyección en un *shape* determinado se utiliza un componente llamado *ffoos*. Este permite realizar cambios de proyección geográficos a un *shape* de forma muy simple.

Es posible que este complemento no se encuentre cargado en el programa de Quantum GIS y haya que agregarlo de manera manual.

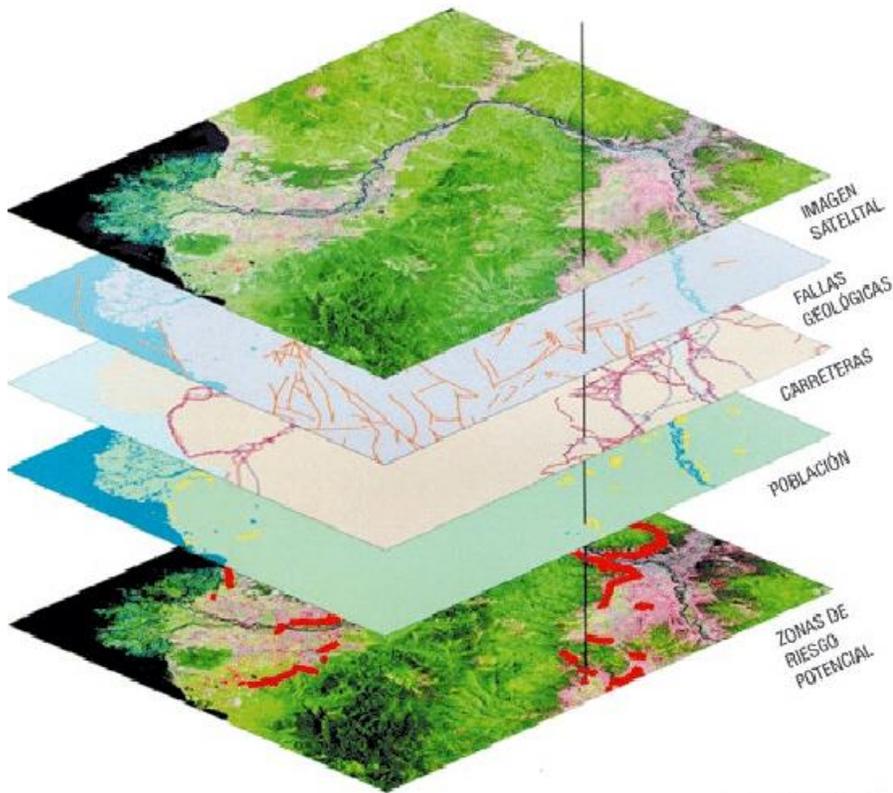
### **2.2.5. Funciones del SIG**

Un sistema de información geográfica posee diversas funciones, para las cuales se usan herramientas como: la entrada de datos, imágenes de sensores espaciales y fotografías aéreas.

El SIG introduce la información espacial recopilada de distintas maneras: barrido óptico (*scanner*), mapas en formato vectorial, digitalización de datos e información de fotografías aéreas o satelitales.

La información dentro del SIG se gestiona por medio de operaciones de almacenamiento y recuperación de datos espaciales y temáticos mediante las tablas de atributos.

Figura 8. **Ejemplo de organización de datos en SIG, que posibilita la integración espacial o temporal de información multidisciplinaria representada en mapas temáticos o *layers***



Fuente: ESRI, ArcGIS. *Environmental Systems Research Institute*.

[https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Ejemplo-de-organizacion-de-datos-en-SIG-que-posibilita-la-integracion-espacial\\_fig4\\_280098376](https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Ejemplo-de-organizacion-de-datos-en-SIG-que-posibilita-la-integracion-espacial_fig4_280098376). Consulta: 9 de marzo de 2021.

### 3. MARCO REFERENCIAL

#### 3.1. Áreas críticas de recarga hídrica natural

Se les denomina de esta manera a aquellas áreas que, por sus características específicas, se consideran susceptibles a disminuir su recarga potencial al ser sometidas a un manejo inadecuado. Orozco, Padilla y Salguero, indican que éstas se determinan a partir de las áreas principales de recarga hídrica natural.

Las áreas críticas deben ser objeto de un manejo especial que permita mantener y manejar sus características.

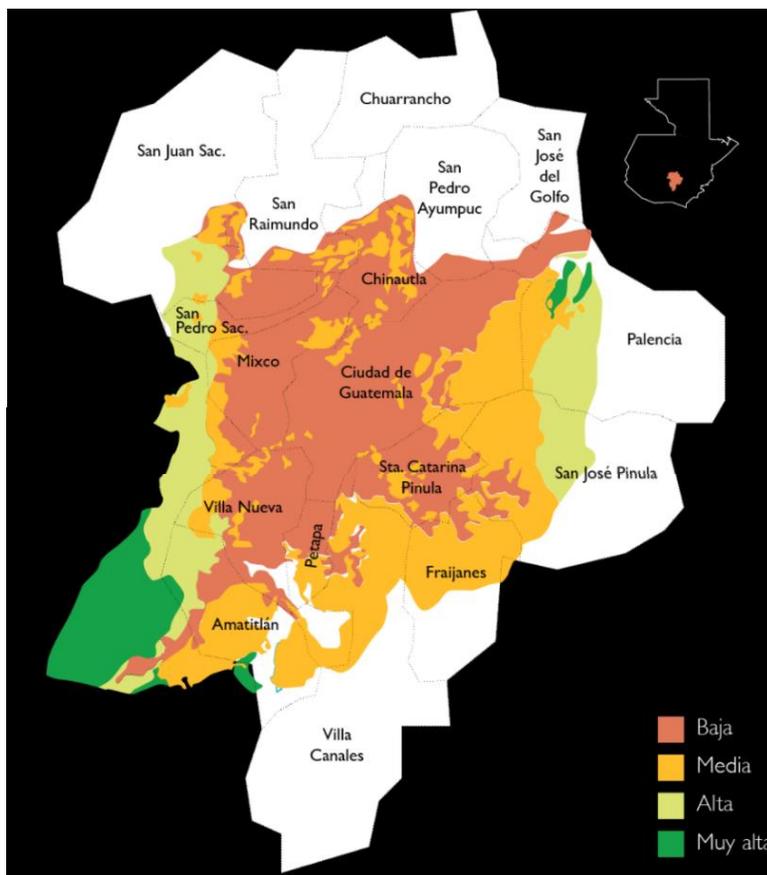
Las áreas críticas se podrán reconocer mediante la consideración de los siguientes aspectos: geología, infiltración básica, recarga anual y pendiente. Para cada uno de estos aspectos se utilizan criterios o categorías a las cuales se les asigna un valor específico.

El mapa de la figura 9 muestra las áreas donde se concentran las zonas densamente pobladas: Ciudad de Guatemala, Villa Nueva y Mixco. Estas zonas son las que reportan menos recarga hídrica, debido a la impermeabilización del suelo y a la pérdida de lugares que permiten la filtración del líquido hacia el subsuelo.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> MEJÍA, Dénnys. *Plaza Pública. ¿Nos estamos quedando sin agua en el área metropolitana?* [www.plazapublica.com.gt/multimedia/agua\\_area\\_metropolitana/index.html](http://www.plazapublica.com.gt/multimedia/agua_area_metropolitana/index.html).

Figura 9. **Caracterización de densidad poblacional**



Fuente: MEJÍA, Dénnys. *Plaza Pública. ¿Nos estamos quedando sin agua en el área metropolitana?* [www.plazapublica.com.gt/multimedia/agua\\_area\\_metropolitana/index.html](http://www.plazapublica.com.gt/multimedia/agua_area_metropolitana/index.html).

Consulta: 9 de marzo de 2021.

### 3.2. **Comportamiento de precipitación**

Guatemala se encuentra ubicada en el istmo centroamericano, entre los paralelos 14° 37' 15" N de latitud norte y los meridianos 90° 31' 36" O de longitud oeste explica Melgar, dentro de la zona tropical del hemisferio norte y altitudinal (desde 0 a 4 220 metros sobre el nivel del mar). La geografía ejerce una influencia

determinante en el clima del país, creando así ambientes diversos donde se tiene presencia de aproximadamente 360 microclimas.

En Guatemala existen dos estaciones climáticas, la estación seca, que se presenta de noviembre a abril; y la estación lluviosa, de mayo a octubre. Cada estación tiene una duración aproximada de seis meses.

En la Zona de Convergencia Intertropical (ZCI), se producen lluvias donde convergen los vientos alisos. Estos vientos se desplazan hacia el sur durante el invierno del hemisferio norte, lo que coincide con la época seca en el país. En la época de verano del hemisferio norte, los alisios se desplazan hacia el norte, lo que produce el mayor desplazamiento de vientos húmedos hacia Guatemala.

Este fenómeno abre paso a las lluvias, y por tanto a la época lluviosa, según el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) y The Netherlands Climate Assistance Programme (NCAP), 2007.

La geografía tiene un efecto significativo sobre el clima en las diferentes regiones del país. La distancia del océano y las barreras montañosas determinan zonas de precipitación intensa en las laderas de las montañas, donde la temperatura es templada, mientras que en las áreas que se encuentran protegidas por barreras montañosas el clima es caliente y la precipitación se da en menor cantidad, indican MARN y NCAP.

### **3.3. Efectos de cobertura superficial sobre el agua subterránea**

La población de la región de Guatemala cada año se hace más densa, debido a migraciones, oportunidades de empleo, acceso a la educación, entre otros. Paralelamente, esto provoca el desarrollo industrial, dando lugar a una

urbanización acelerada que demanda la utilización de servicios de energía eléctrica, de abastecimientos de agua, de alcantarillado, de telefonía, entre otros. Estos fenómenos provocan modificaciones en el uso del suelo, afectando el proceso fundamental del ciclo del agua y ocasionando agotamiento en los acuíferos.

La cobertura del suelo es de una importancia básica para el mantenimiento de los caudales de los ríos y como amortiguador de los efectos de sequías, como para la recarga del manto freático.

Los factores que afectan el ciclo hidrológico son, principalmente, el clima, la geología y el uso de la tierra. El factor más llamativo es la gestión del uso de la tierra, ya que es el único sobre el cual la sociedad puede tener un impacto directo y a corto plazo. Los principales temas que conciernen a la cobertura del suelo son:

- La disponibilidad anual de agua superficial
- Los caudales pico y caudales base
- La erosión

### **3.4. Crisis de extracción y sobreexplotación del agua subterránea**

La solución de la crisis del agua es uno de los grandes retos que enfrentan los seres humanos hoy en día. El agua subterránea es un recurso oculto, y su importancia cuantitativa es mucho mayor que la de las aguas superficiales. Debido a su inaccesibilidad, realizar monitoreos, restaurar su estado, y prevenir su contaminación, resultan tareas más difíciles en ella, que en las aguas superficiales.

Su carácter oculto de las aguas subterráneas dificulta la adecuada localización, caracterización y comprensión de los impactos naturales y causados por la actividad humana, sobre su uso y calidad. Por lo que adquiere un papel relevante la investigación en este tema. La falta de caracterización cuantitativa se traduce en falta de sensibilización acerca del alcance de los riesgos y de las presiones a que se encuentra vulnerable, muchas veces debido a la falta de pruebas visibles.

La sobreexplotación ocurre cuando la extracción del agua subterránea excede la recarga infiltrada, proporcionada por la precipitación o por el agua superficial. Ninguna entidad es responsable del control del uso de las aguas subterráneas nacionales. La Empresa Municipal de Guatemala (Empagua), tiene una escasa base de datos y no se dispone de información precisa y continua de los niveles freáticos.

No se realizan monitoreos del impacto ambiental, ni se controla la perforación de pozos particulares circunvecinos a los pozos en estudio. La extracción es descontrolada, y esto origina el agotamiento del acuífero metropolitano del valle de Guatemala.

Es importante considerar que la extracción excesiva en un acuífero resulta peligrosa. Esta provoca cavernas que pueden producir movimientos telúricos, se debe estar consciente de las fallas geológicas.

### **3.5. Características de una superficie impermeable**

El aumento de las superficies impermeables se debe al aumento de la urbanización. Esta se refiere a las superficies construidas, como techos, veredas, caminos y estacionamientos cubiertos por materiales impenetrables como el

asfalto, el concreto y la piedra. Los procesos constructivos sellan superficies, ya que el material repele el agua e impide que las precipitaciones se infiltren en los suelos.

Las superficies cubiertas por este tipo de materiales son hidrológicamente activas, entendiendo por ello que generan escurrimiento superficial. Además, los suelos urbanos también modifican su profundidad durante el proceso de la construcción. La compactación de los suelos y el retiro de la tierra vegetal pueden disminuir la capacidad de infiltración.

La resultante alteración de la tierra puede dar lugar a cambios en la hidrología o en la forma en que el agua es transportada y almacenada. La interrupción del ciclo natural del agua realizada por las superficies impermeables conduce a una serie de cambios, entre ellos:

- Aumento del volumen y la velocidad de la escorrentía
- Aumento de la frecuencia y gravedad de las inundaciones
- Presencia de caudal máximo muchas veces mayor que en cuencas naturales.
- Pérdida de capacidad de almacenamiento de la escorrentía natural por la vegetación, los humedales y el suelo.
- Reducción de la recarga de aguas subterráneas.
- Disminución del caudal base que contribuye a la recarga de aguas subterráneas.

Las superficies impermeables se dividen en: áreas totales impermeables (ATI) y áreas impermeables efectivas (AIE). Las ATI incluyen a las AIE y a las superficies impermeables no efectivas. Estas son superficies impermeables que drenan hacia sectores permeables. Las superficies impermeables no efectivas

pueden infiltrar todo o una parte de la precipitación de tormenta. Esto depende del tipo de suelo, de la pendiente del terreno y de las características de la cobertura del suelo.

Las áreas impermeables efectivas se encuentran principalmente en las áreas residenciales, en donde los patios y antejardines actúan como áreas de infiltración de los escurrimientos provenientes de los techos y otras áreas impermeables.

### **3.6. Reconocimiento de superficies impermeables**

Algunos métodos para delimitar las superficies impermeables son parecidos a los utilizados para medir la cobertura del uso del suelo o la cobertura vegetal de este. Los métodos pueden incluir una o más de las siguientes técnicas:

- **Medición óptica y sistemas de posicionamiento global (GPS):** este método implica la medición en el terreno de todas las superficies impermeables. Es la técnica más exacta. Sin embargo, requiere de un trabajo extenso que conlleva mucho tiempo y personal, pues hay que registrar la localización geográfica de todos los caminos, edificios, estacionamientos, entre otros. Por esta razón, es considerada poco rentable, especialmente para medir grandes superficies.
- **Interpretación fotográfica:** este método utiliza la fotointerpretación para estimar las superficies impermeables. Es considerado por algunos investigadores como uno de los métodos más exactos. Sin embargo, sus costos son altos, y se requiere bastante tiempo y experiencia en la interpretación. Se recomienda este método para superficies pequeñas.

- Mapas detallados: se utilizan mapas detallados del área para estimar las superficies impermeables. Este método ha sido utilizado por algunos investigadores. En este caso, la precisión de la estimación de las superficies impermeables es un proceso altamente dependiente de la información representada y de la escala en la cual se exhibe.
- Detección remota satelital: este proceso generalmente consiste en la recolección de la radiación electromagnética que refleja la superficie de la tierra por un satélite que cuenta con sensores adecuados. Dependiendo del satélite existen diferencias en: el número de bandas, el ancho de banda individual y la resolución espacial que los sensores en los satélites pueden detectar y recoger. Una vez obtenidos los datos de los satélites, pueden ser rectificadas, procesados y geo referenciados para el análisis en un ambiente digital. El objetivo de la detección remota satelital es sustituir un proceso subjetivo de análisis visual por una técnica más objetiva y cuantitativa que permite automatizar la identificación de características en una imagen.

### **3.7. Impactos ambientales relacionados con las superficies impermeables**

Los mayores impactos ambientales provocados por la impermeabilización, que afectan el equilibrio natural y la salud de las cuencas urbanizadas son los siguientes:

- Alteración del ciclo hidrológico y pérdida de la calidad del agua. El reemplazo significativo de la vegetación por superficies impermeables reduce los coeficientes de intercepción de las lluvias por parte de los follajes, así como el promedio anual de evapotranspiración, y provoca

alteraciones en los tiempos, tasas y volúmenes de recarga y descarga de los acuíferos subterráneos. El aumento del escurrimiento superficial ocurre como consecuencia de la disminución de la infiltración superficial y subsuperficial de los flujos de agua. Esto facilita las inundaciones y el desplazamiento de aguas contaminadas y aguas servidas hacia lagos, arroyos y estuarios.

- Degradación, pérdida y fragmentación de hábitats acuáticos y terrestres, que se degradan y destruyen al impermeabilizar sus superficies. Algunas especies muestran disminución en su población en presencia de un 10 % de superficies impermeabilizadas.
- Degradación de los arroyos. La impermeabilización de los cauces naturales y su reemplazo por alcantarillados, cursos de agua canalizados y obstruidos, además de la simplificación de la red de drenaje, aumentan la velocidad de los flujos de agua, y esto provoca el aumento de la potencia erosiva y mayor producción de sedimentos.
- Efectos sobre los hábitats terrestres. La impermeabilización causa la destrucción y fragmentación de los hábitats terrestres, daña las plantas y la vida silvestre, provocando la pérdida de biodiversidad a través de impactos acumulativos que se manifiestan en forma lenta.
- Cambios en el paisaje. La vegetación es un componente ambiental que ayuda significativamente a mejorar el medio ambiente. Entre sus beneficios se encuentran: mitigación de las islas de calor y generación de islas frías, filtro y reciclaje de los contaminantes atmosféricos, incremento de la infiltración de las aguas de lluvia, control del escurrimiento y las inundaciones, áreas de refugio y hábitats para más vegetación, depuración

de las aguas y sedimentos que convergen a los cauces, sitios de recreación y turismo, entre otros. Todo esto se pierde al deforestar para urbanizar.

### **3.8. Escurrimiento superficial**

El suelo cambia en una cuenca hidrológica debido al desarrollo residencial, comercial, industrial y de transporte. Esto provoca que los ciclos hidrológicos locales sean alterados sustancialmente. Cambios drásticos en el tiempo de concentración y en los volúmenes de las lluvias que se distribuyen a los cauces naturales han sido detectados en las zonas que han sido urbanizadas.

Cuando la impermeabilidad de una cuenca aumenta, se observan cambios en los niveles de los cauces, en la altura de los niveles y en el volumen freático. Adicionalmente, el reemplazo de la vegetación por superficies impermeables reduce el promedio anual de evapotranspiración de la cuenca.

Una característica notable de las superficies impermeables es que producen escurrimiento con montos muy bajos de precipitación, dado que además de ser impermeables estas superficies tiene una escasa capacidad de retención de agua. Por ello, las tasas de evaporación son menores que en áreas con vegetación. A su vez, la reducción de la infiltración produce grandes volúmenes de escurrimiento superficial, y un máximo de descarga más rápido hacia la red de cauces.

Las superficies impermeables alteran fundamentalmente la hidrología de las cuencas urbanas porque aumentan la escorrentía y reducen la cantidad de precipitación que infiltra en el suelo.

Las áreas de cubierta forestal tienen los siguientes beneficios en la cuenca:

- Los árboles interceptan la lluvia con sus copas reduciendo la lluvia que alcanza el suelo. Una porción de esta lluvia interceptada se evapora desde la superficie del árbol.
- Los árboles toman el agua del suelo a través de sus raíces, esto aumenta el potencial de almacenaje de agua en el suelo. También incrementa el tiempo necesario para que la precipitación sature el suelo y se convierta en escorrentía superficial.
- Los árboles promueven la infiltración, atenuando la escorrentía y aumentando el drenaje del suelo. La adición de la materia orgánica también aumenta la capacidad almacenamiento de agua del suelo, y esto también reduce la escorrentía.
- La reducida escorrentía que provocan las tierras forestadas reduce la frecuencia y el volumen de las inundaciones.

### **3.9. Impermeabilidad y calidad de aguas**

La urbanización de las cuencas hidrográficas plantea amenazas para la calidad del agua, debido al surgimiento de fuentes de contaminación.

Durante los eventos de precipitación, la contaminación acumulada en la superficie durante el tiempo seco es lavada y arrastrada hacia la red de colectores. Si la red es única, a lo anterior hay que añadir el efecto del lavado de los sedimentos que durante el tiempo seco se han ido depositando en la red como consecuencia del tránsito de las aguas residuales.

Los agentes contaminadores de la escorrentía que tienen impacto en la calidad del agua pueden también influenciar directamente las actividades humanas. Los agentes contaminadores de mayor preocupación son los asociados con la salud pública, tales como bacterias y patógenos. Estos agentes contaminadores pueden afectar la disponibilidad del agua potable y limitar actividades recreacionales asociadas a esta, tales como natación, pesca y canotaje.

### **3.10. Indicadores de impermeabilidad**

Los principales indicadores para definir la calidad del cauce urbano son hidrológicos, físicos y biológicos. Últimamente, las superficies impermeables han emergido como un indicador dominante para explicar y a veces para predecir cómo la calidad de los cauces cambia seriamente en respuesta a diversos niveles de desarrollo de la cuenca.

Si el porcentaje de superficies impermeables aumenta la degradación, en consecuencia, tiende a aumentar. Si la superficie impermeable supera el 25 %, es esperable una degradación severa. El resultado final es un sistema que cambia de forma negativa.

La cobertura del bosque es claramente el principal rival de las superficies impermeables. Esto implica que para mantener un cauce en buen estado hay que reducir al mínimo las superficies impermeables y maximizar la preservación de la cobertura de bosque nativo de la cuenca.

### **3.11. Efecto de las estrategias de mitigación**

Las áreas de protección forestal frecuentemente se utilizan para mitigar el impacto de las superficies impermeables. Las buenas prácticas de manejo en general incluyen controles de ingeniería, procedimientos operacionales y prácticas para reducir la escorrentía, los derrames y filtraciones, la disposición de desperdicios y el drenaje de materiales crudos como el cemento.

Por esto, se recomienda adoptar prácticas que protejan el agua de lluvia para que no se contamine al formar escorrentía y evitar que los desperdicios lleguen a integrarse en los cuerpos de agua. El manejo se divide en dos categorías:

- **Estructurales:** construcciones que constituyen instalaciones permanentes, tales como:
  - Cobertura vegetal
  - Canales de desagüe protegidos
  - Puntos de descarga con filtros de piedra
  - Barreras vegetales
  - Estanques de sedimentación
  - Conservación de áreas naturales y permeables
  - Empedrado
  
- **No estructurales (de operación):** prácticas de trabajo diario para proteger las aguas de escorrentía.

### **3.12. La evolución de la Ciudad de Guatemala de 1976 hasta 2019**

La Ciudad de Guatemala ha ido desarrollándose, naturalmente, a lo largo de la historia. Esto ha provocado cambios significativos en el uso del suelo y en la cubierta vegetal de la región. Los cambios se han producido por efectos naturales, el incremento poblacional y el desarrollo urbano. A continuación, se describe el crecimiento por infraestructura:

- 1917 – 1918: Los terremotos ocasionaron destrucción masiva de viviendas. Los habitantes de estas se trasladaron a diversos campamentos: Gerona, La Palma, Recolección, La Urbana, Cervantes y otros en parques y plazas públicas.
- 1919: El gobierno planificó, en el área del Guarda Viejo (actualmente zona 8), el primer proyecto de vivienda popular. Fue llamado “Ciudad Estrada Cabrera”.
- 1920: El tren Decauville recorrió de nuevo la ruta de la Penitenciaría a la Avenida de la Reforma.
- 1921: Luego de realizar tala de árboles y relleno de zanjas para una pista de grama, quedó listo el Aeropuerto Internacional “La Aurora”, trasladado desde el Campo Marte.
- 1924: Se creó el Zoológico “La Aurora” en la finca La Aurora.
- 1925: Nuevas rutas de transporte a la Villa de Guadalupe y al Guarda Viejo mediante tranvías que la Municipalidad modificó. Pasaron de utilizar fuerza animal a energía eléctrica.
- 1926: El campamento en terrenos del Convento de la Recolección, que había alojado a 400 familias, se lotificó como barrio de obreros (hoy barrio recoleto al norte y poniente del templo de la Recolección).

- 1926: La administración Chacón creó el barrio “La Concordia” y compró la finca “El Gallito” para reasentar al asentamiento “Campamento Cervantes”, localizado en calles y avenidas del cantón.
- 1927: Los campamentos “Gerona” y “Tuerto” se consolidaron como barrios.
- 1928: La finca “La Palma” se convirtió en estatal, se parceló y surgió el barrio “La Palmita”.
- 1928: Se iniciaron las rutas de la Empresa Guatemalteca de Autobuses (EGA) de La Estación a la Plaza Mayor y de esta última al Hipódromo del Norte.
- 1930: La antigua Calle Real del Guarda Viejo cambió de nombre a Avenida Bolívar en el centenario de la muerte de Simón Bolívar.
- 1930: La Avenida Hincapié fue urbanizada utilizando el viejo camino colonial hacia las alcaldías de San Miguel Petapa, Villa Canales y la Alcaldía Mayor de Amatitlán.
- 1935: Por ordenanza de Ubico no se repartieron más lotes en terrenos estatales y surgió el primer proyecto de vivienda tipo hilera en pequeños lotes con jardín y banquetas con árboles: la colonia “Presidente Ubico”, también llamada 25 de junio (zona 5 actualmente).
- 1935: El gobierno de Ubico remodeló el Cerro del Carmen con fines recreativos.
- 1935: Fue inaugurada la Torre del Reformador en conmemoración del centenario del nacimiento del General Justo Rufino Barrios.
- 1936: Se construyeron los salones de la “Feria de Noviembre” (zona 13) que se convertirían luego en los museos de Arqueología y Arte Moderno y la Dirección General de Caminos. También se construyó el Palacio de Sanidad Pública en la 9ª Avenida Zona 1.
- 1936: El Barrio Moderno (Actualmente zona 2) surgió en los viejos potreros de Corona.

- 1936: Ampliación de la Colonia Progreso, La Chácara, Arrivillaga, Saravia, Castañas, Colonia Abril y Barrio San Antonio.
- 1936: Se construyó la terminal aérea del Aeropuerto Internacional “La Aurora” en la Avenida Hincapié.
- 1940: El Palacio de Comunicaciones (Palacio de Correos y telégrafos) abrió su primera fase.
- 1942: Se inauguró el nuevo Palacio de la Policía Nacional.
- 1943: Se inauguraron el Palacio Nacional y la Casa Presidencial.
- 1976: Damnificados del terremoto provenientes del campo y la ciudad se instalaron en los siguientes asentamientos precarios: Sakertí, Madre Dormida, Tecún Umán, El Amparo, aledaños a la colonia Bethania; como Los Granizos, Kjell Lauguerud, El Incienso, Santa Rita, Santa Isabel y 4 de febrero, aledaños al Anillo Periférico; y otros muchos en el área metropolitana.
- 1976 – 1983: El gobierno adjudicó lotes con servicios en urbanizaciones populares en la zona 18 para enfrentar la emergencia. Surgieron las colonias San Rafael I y II, Santa Elena I, II y III, El Limón y El Paraíso. A partir de 1979 se desarrollaron las colonias Bello Horizonte, Justo Rufino Barrios, Venezuela y Nimajuyú, en la zona 21.
- 1979 – 1980: Se construyó el mercado cantonal Bethania en zona 7, se reconstruyó el mercado de la Terminal en zona 4 (se agregaron las cubiertas de los patios y se pavimentaron vías de acceso) y se construyó la Central de Mayoreo CENMA, ubicada en el límite entre los municipios de Villa Nueva y Guatemala.
- 1981: El Hospital General San Juan de Dios (proyecto iniciado en 1978) se trasladó a su edificio actual en la zona 1.
- 1984: Inició la remodelación de la Plaza Mayor y se eliminaron los jardines para recuperar la vista monumental de la Catedral y del Palacio Nacional. Esta recibió el nombre de Plaza de la Constitución.

- 1985: Se inauguró el Centro de Atención Médica Integral para Pensionados (CAMIP) en Pamplona, zona 12.
- 1986: Hubo crecimiento de áreas precarias en diferentes zonas: Padre Ambrosio (zona 1), Piedra Santa (zona 3), Plaza de Toros y La Forestal (zona 13), La Candelaria, San Juan de Dios y Jesús de La Buena Esperanza (zona 6).
- 1986: Inició el plan de reconstrucción de la red vial municipal. Se intervinieron 225 km de vías. Se ampliaron la Calzada San Juan, la Calzada Aguilar Batres, la Avenida Petapa, y el Bulevar Austríaco. Se iniciaron trabajos para interconectar las colonias Atlántida, Maya, Las Ilusiones, San Rafael y Kennedy, ubicadas en la zona 18.
- 1986: Se expropiaron áreas para comenzar el proyecto del Bulevar Los Próceres.
- 1986: Se planificó la Diagonal 3 (actualmente Calzada Atanasio Tzul), que se comenzó a construir años después.
- 1987: Comenzó a funcionar el Hospital Juan José Arévalo Bermejo en la zona 6.
- 1987 – 1990: En 1987 se construyó el Jardín Infantil Santa Isabel en la zona 1, en 1989 se construyó el de Santa Ana y en 1990 el de Santa Clara, ambos en la zona 7. Estos y otros 4 centros posteriores han sido atendidos por la Secretaría de Asuntos Sociales de la Municipalidad de Guatemala, creada en 1987.
- 1991: Inauguración del Estadio Cementos Progreso como instalación recreativa y multiusos.
- 1991: Construcción de los pasos a desnivel del Bulevar Liberación (Tecún Umán), Villa Linda, Las Charcas, Trébol de Vista Hermosa y viaducto de la 13 calle Mariscal.
- 1994: Se inauguraron las instalaciones de la Unidad Periférica del IGSS, en Jardines de la Asunción en la zona 5.

- 1995 – 1999: La Universidad Rural comenzó a funcionar en 1995; la Universidad del Istmo se fundó en 1998 en terrenos de La Aurora en zona 13; en 1999 la Universidad Panamericana abre sus puertas en la zona 16.
- 1996: Se construyó el paso a desnivel del Obelisco y se revitalizó la Plaza Obelisco.
- 1996: Inauguración de la Calzada La Paz.
- 2000: Se construyó el Puente El Naranjo para unir el Anillo Periférico con sectores de Mixco.
- 2000 – 2006: En el año 2000 comenzaron a funcionar la Universidad Mesoamericana en la zona 8 y la Universidad Galileo en zona 10; en el 2006 iniciaron las Universidades San Pablo en zona 14, Internacionales en zona 16, Da Vinci en zona 4 y Regional en zona 13.
- 2000: Se construyó el domo polideportivo en la zona 13 sobre la antigua Plaza de Toros, habilitado principalmente para actividades deportivas. Se fundó también en La Aurora el Museo de Los Niños.
- 2001: Fundación del Centro Cultural Metropolitano en el Palacio de Correos en la zona 1 (hoy Centro Cultural Metropolitano Álvaro Arzú) y rehabilitación de la “Casa Ibarquén” como anexo.
- 2004 – 2006: Inauguración del “Museo del Ferrocarril” en el 2004, en la antigua Estación Central ubicada en la 18 calle, zona 1. En el 2006 se inauguró el Museo Numismático del Banco de Guatemala en el Centro Cívico.
- 2006 – 2007: Se remodeló la terminal aérea del Aeropuerto Internacional “La Aurora” y se incrementó su capacidad con la terminal norte, construida sobre 12 manzanas de terreno desmembradas de la finca La Aurora y del hipódromo del Sur. Este desapareció. En el área de la antigua finca La Aurora también se construye el edificio de la Contraloría General de Cuentas. En 2007 la sede del Ministerio Público se traslada a Gerona, zona 1.

- 2007 – 2012: Arrancó la fase inicial del proyecto Transmetro. En 2007 se implementó a Línea 12 como primer eje del sistema BRT (siglas en inglés para Buses de Transporte Rápido). En 2010 se desarrolló la Línea 13 y en el año 2012 se implementó la Línea 1, complementando los ejes de las Líneas 12 y 13.
- 2008: Se Inauguró el Centro de Atención Médica Integral para pensionados CAMIP en La Barranquilla, zona 5.
- 2008: Se dio el primer paso en la recuperación urbana del Cantón Exposición con la restitución del espacio público de lo que un día fue la Plazuela 11 de marzo. En su lugar se construyó el Monumento a la República, recuperando el diseño de la rotonda.
- 2010 – 2018: Se construyeron más de 20 pasos a desnivel. Entre ellos se encuentran: “Manuel Colom Argueta” y “Albert Fuentes Mohr” en la calle Martí zona 6 (2010); “Jorge Ubico”, conectando la 7ma. avenida, la Liberación y la 15 avenida en la zona 13; “Rafael Carrera”, conectando zona 15 y 16; el de Portales y San Rafael, sobre un viaducto en zona 17 (2011); el ‘Papa Benedicto XVI”, en la zona 10 (2014); y el “Santa Madre Teresa de Calcuta” en la zona 16, el de la Guardia de Honor en la zona 10 y el ubicado en el Obelisco, en la 20 calle de la zona 10 (2016).
- 2010 – 2011: En el 2010 se inauguró el Paseo La Sexta. Esta es una intervención a gran escala del espacio público entre la 8 calle y la 18 calle en la 6 avenida en la zona 1 del Centro Histórico. Derivado del éxito de esta revitalización, en el 2011 se prolongó su intervención abarcando el tramo que va desde la 6 calle hasta el Paseo Jocotenango.
- 2011: La Municipalidad de Guatemala construyó el Hospital de Nefrología, anexo del Hospital Roosevelt en la zona 11.
- 2012: Se inauguró la Central de Transferencia Norte (Centra Norte), en la que se pueden realizar transferencias de transporte urbano a extraurbano,

y se construyó el paso a desnivel “Erick Barrondo” en zona 17, que conecta con la Carretera al Atlántico.

- 2012: Se organizó la llamada Regencia Norte. Esto es un nombramiento, desde el año 2011, de un Regente Municipal para atender las zonas 17, 18, 24 y 25.
- 2013: Construcción del “puente gemelo” en el Trébol y ampliación de carriles para el Transmetro.
- 2013 – 2015: La Línea 18 de Transmetro comenzó a funcionar en el 2013 y en el 2015 iniciaron las Líneas 2 y 6.
- 2013: Entró en vigor el Plan Maestro y el Plan Local de Ordenamiento Territorial municipal (PLOT) para transformar el área de “Cantón Exposición” en la zona 4.
- 2014: Se construyó el Centro de Desarrollo Infantil (CEDI) en la zona 2, que comprende tres centros de atención para el programa municipal Niños en Riesgo de Calle.
- 2014: Comenzó a funcionar la Unidad de Modernización del Comercio Popular. Se habilitó la Plaza “El Amate” y la Plaza del Comercio Popular en Plaza Barrios. El objetivo era trasladar a ellas a los comerciantes que ocupan el espacio público.
- 2015: Se construyó la conexión Monjitas – Acatán en la zona 16.
- 2016: Se construyó la infraestructura para el funcionamiento de 8 ciclovías con los siguientes tramos: Américas, Reforma, zona 4, zona 1, zona 5, USAC, CUM Y Petapa.
- 2016: Ampliación de los puentes del Anillo Periférico a su paso por las Calzadas Roosevelt y San Juan.
- 2017: Revitalización de la Plaza España en la zona 9; restauración de la Puente de Carlos III situada al centro de esta; mejoras al espacio público de la Calle Montufar en el tramo de la Avenida de la Reforma a la 7ma. avenida.

- 2005 – 2018: En el 2005 inició la recuperación del espacio público del Cerro del Carmen. Hasta la fecha se han hecho diferentes intervenciones en él y la transformación de los barrios aledaños, fortaleciendo su tejido social y la actividad económica. Esta es una iniciativa conjunta entre el sector privado y la Municipalidad de Guatemala
- 2018: Construcción de la Plaza “Divina Providencia” en la zona 8 y de la Plaza “Jesús de La Montaña” en la zona 18.
- 2018: Rehabilitación de la Plaza Berlín en la Avenida de las Américas en la zona 13.
- 2019: Se inicia construcción de pasos a desnivel en 4 caminos (zona 16) y en la Calle Martí y 13 avenida (zona 6).
- 2019: Se inicia la construcción de los MuniTEC (Centros de Capacitación Tecnológica) en zona 3 y 21.

### **3.13. Comportamiento poblacional de la Ciudad de Guatemala**

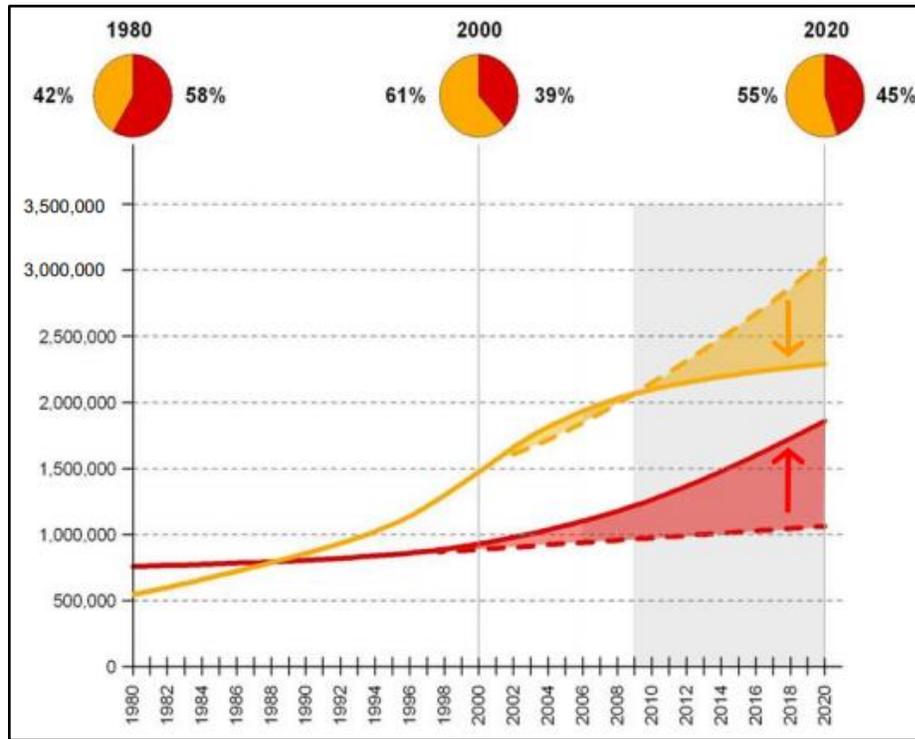
El crecimiento espacial y poblacional de la Ciudad de Guatemala ha sido documentado, y en el año 2003 AVANCSO comentó que se han encontrado coincidencias en el aumento en la escala del desarrollo urbano en los últimos años y los efectos negativos que un crecimiento desordenado produce.

Para el año 2000, el área metropolitana de Guatemala tenía una extensión de entre 22 500 y 35 000 dependiendo de la forma de medición que se utilizara. AVANCSO en el 2003 indicó que en los últimos doce años se ha producido más suelo urbano que en los 218 años de ocupación urbana desde la fundación de la ciudad. El crecimiento espacial se ha producido a un ritmo proyectado del 4,4 % anual.

El ritmo del crecimiento poblacional es muy parecido al de la expansión urbana (4,3 % anual), lo cual indica que no se ha producido una redensificación del área metropolitana, sino que las densidades promedio existentes en la ciudad se están manteniendo. Esto quiere decir que la ciudad está desarrollándose de manera horizontal, más que vertical.

De igual manera, la distribución de la población no es homogénea a lo largo de las distintas zonas postales del municipio de Guatemala. Existen fuertes diferencias entre ellas: tan sólo en las zonas 6, 17 y 18 se encuentra el 31,6 % del total de la población del municipio. En contraste, las zonas 4, 9 y 10 albergan únicamente al 1,7 % de la población, aunque son las mejor servidas por todos los servicios municipales. Estos datos fueron calculados con base en datos del INE de los censos de 1994 y 2002 para el departamento de Guatemala.

Figura 10. **Comportamiento poblacional en la Ciudad de Guatemala**

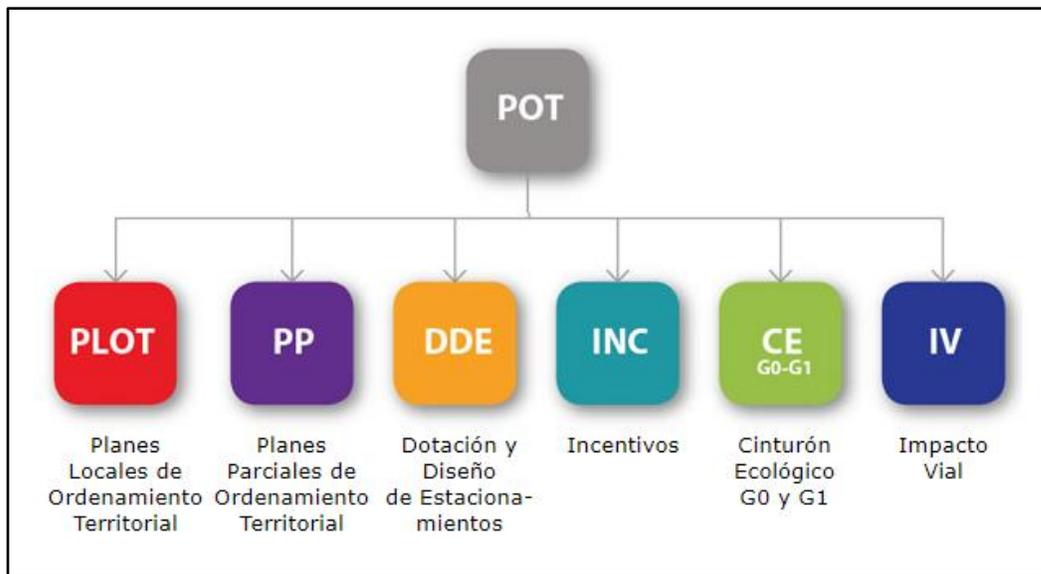


Fuente: Dirección de Planificación Urbana, Municipalidad de Guatemala. *Plan de ordenamiento territorial*. [http://pot.muniguate.com/PDFs/POT\\_taller\\_1\\_video.pdf](http://pot.muniguate.com/PDFs/POT_taller_1_video.pdf). Consulta: 9 de marzo de 2021.

### 3.14. Ordenamiento territorial de la Ciudad de Guatemala

El Plan de Ordenamiento territorial de la ciudad de Guatemala (POT), se divide en distintas ramificaciones. Estas definen un equilibrio de densidad poblacional en cada zona o región. La ciudad ha ido expandiéndose horizontalmente. Se han creado condominios residenciales, al tiempo que se abandona el área central. El 43 % de la Ciudad es ambientalmente valiosa, pero que se ha ido consumiendo la cubierta boscosa por la construcción de viviendas unifamiliares.

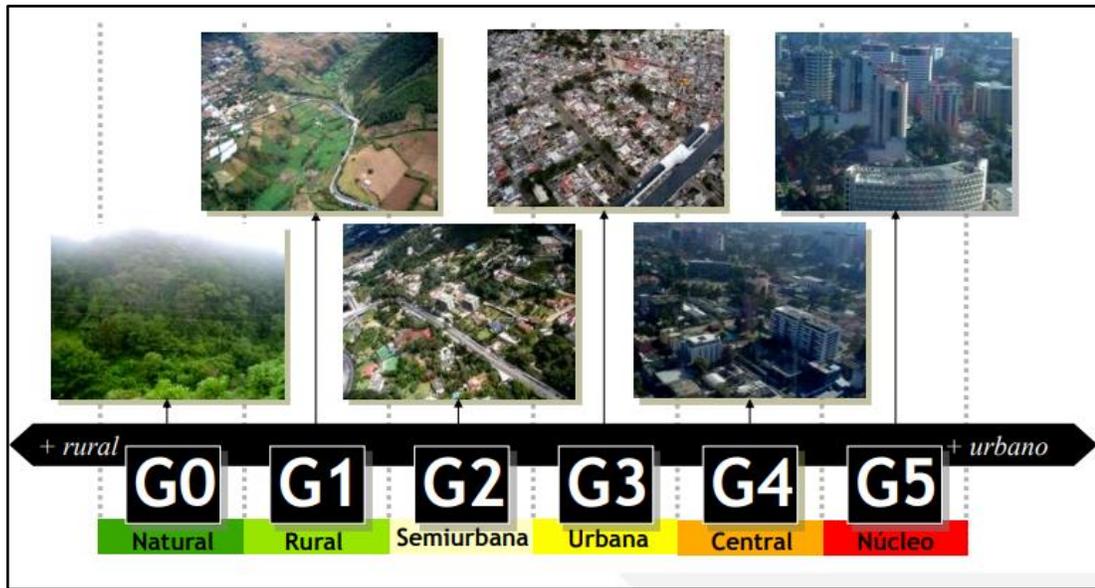
Figura 11. **Reglamentos del POT**



Fuente: Dirección de Planificación urbana, Municipalidad de Guatemala. *Plan de ordenamiento territorial*. [http://pot.muniguate.com/PDFs/POT\\_taller\\_1\\_video.pdf](http://pot.muniguate.com/PDFs/POT_taller_1_video.pdf). Consulta: 9 de marzo de 2021.

Por ello se han creado criterios de ordenamiento acordes con las características que prevalecen en cada región de la ciudad de Guatemala. Clasificándolas en área rural [natural (G0), rural (G1)], área urbana [semiurbana (G2), urbana (G3), central (G4), núcleo (G5)].

Figura 12. Clasificación de criterios constructivos



Fuente: Dirección de Planificación Urbana, municipalidad de Guatemala. *Plan de ordenamiento territorial*. [http://pot.muniguate.com/PDFs/POT\\_taller\\_1\\_video.pdf](http://pot.muniguate.com/PDFs/POT_taller_1_video.pdf). Consulta: 9 de marzo de 2021.

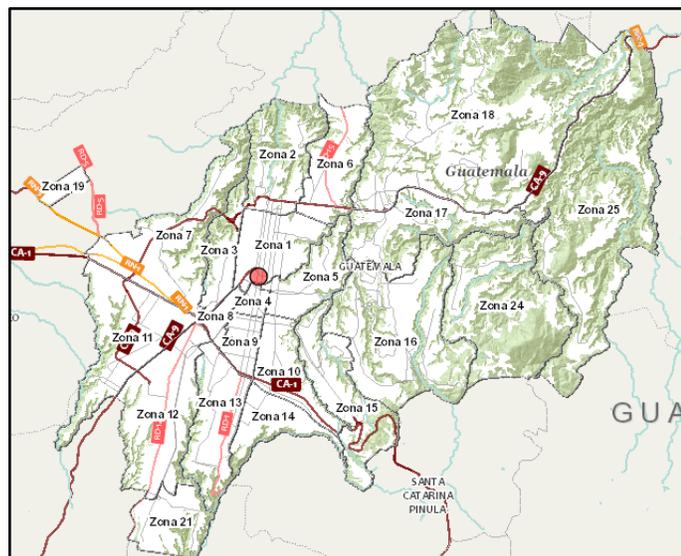


## 4. INFORMACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

### 4.1. Descripción geográfica

El estudio de Factibilidad de Desarrollo de las Aguas Subterráneas en el Valle de la Ciudad de Guatemala, llamado Proyecto Emergencia I determinó las áreas más apropiadas para el desarrollo de aguas subterráneas. Estas son el norte, noreste y sur. En específico, abarcan las siguientes zonas: en el sector Sur, Zona 10 y Vista Hermosa (Zona 15); en el sector Norte, Zona 6, “Canalitos” (Zona 16 y 17), Lavarreda y El Rodeo (Zona 18). Se tomó como punto de referencia el Palacio Municipal de la Ciudad de Guatemala, 21 Calle 6-77 zona1.

Figura 13. Descripción de zonas de la Ciudad de Guatemala



Fuente: Dirección de Información Geográfica Municipal. *Municipalidad de Guatemala*.

<https://sig.muniguate.com/home/?mod=mapa>. Consulta: 12 de marzo de 2021.

La topografía del área es muy variable, sin embargo, en la parte oeste del área se presentan mayores planicies, las cuales tienen un alto desarrollo urbanístico. Las partes norte y este del área constan de varios cerros, formando un relieve pronunciado que crea drenajes profundos. Debido a la topografía no hay un desarrollo urbanístico grande en esta área, a excepción de las colonias que se han desarrollado en las mesetas. La parte sur del área está formada por cerros, constituyendo el relieve más abrupto de las zonas de estudio.

#### 4.2. Resumen del balance hídrico del proyecto Emergencia I

Los principales ríos en el área de estudio son Las Vacas, Los Ocotes y Los Vados. Por lo que se conforman tres subcuencas del mismo nombre.

El balance hidrológico fue evaluado a través del esquema general del balance hidrológico de aguas:

$$P - E_{tr} - Q_{ES} = I_C = R_N \quad (\text{Ec.2})$$

Tabla I. **Resumen del balance hídrico del río Los Ocotes realizado durante el estudio de prefactibilidad del proyecto Emergencia I**

SUB-CUENCA DEL RIO LOS OCOTES				
DIMENSIONALES	PRECIPITACIÓN	EVAPOTRANSPIRACIÓN	ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL	INFILTRACIÓN O RECARGA NATURAL
mm/año	1,287	650	367	270
m3/seg	2,734	1,381	0,78	0,574
mm3/año	86,23	43,55	24,59	18,09

Fuente: Ckc Chuo Kaihatsu Corporation. *Estudio hidrogeológico en el Valle de la Ciudad de Guatemala, proyecto Emergencia I*. p.10.

**Tabla II. Resumen del balance hídrico del río Los Vados realizado durante el estudio de prefactibilidad del proyecto Emergencia I**

<b>SUB-CUENCA DEL RIO LOS VADOS</b>				
DIMENSIONALES	PRECIPITACIÓN	EVAPOTRANSPIRACIÓN	ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL	INFILTRACIÓN O RECARGA NATURAL
mm/año	1,042	650	192	200
m3/seg	1,487	1,381	0,274	0,285
mm3/año	46,89	43,55	8,64	9,00

Fuente: Ckc Chuo Kaihatsu Corporation. *Estudio hidrogeológico en el Valle de la Ciudad de Guatemala, proyecto Emergencia I.* p.10.

**Tabla III. Resumen del balance hídrico del río las Vacas realizado durante el estudio de prefactibilidad del proyecto Emergencia I**

<b>SUB-CUENCA DEL RIO LOS VACAS</b>				
DIMENSIONALES	PRECIPITACIÓN	EVAPOTRANSPIRACIÓN	ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL	INFILTRACIÓN O RECARGA NATURAL
mm/año	1,295	500	715	80
m3/seg	2,341	0,904	1,292	0,145
mm3/año	73,82	28,5	40,76	4,56

Fuente: Ckc Chuo Kaihatsu Corporation. *Estudio hidrogeológico en el Valle de la Ciudad de Guatemala, proyecto Emergencia I.* p.10.

A continuación, se comentan brevemente estas tablas:

- La recarga natural obtenida en las cuentas de los ríos Ocotes y Los Vados son las más favorables, debido a que éstas cuentan con áreas verdes que funcionan como zonas de recarga hídrica. Sin embargo, en función del desarrollo urbanístico creciente que presentan estas cuencas, la impermeabilización de las zonas de recarga aumenta, y este podría ser un factor importante para el desarrollo de las aguas subterráneas en dichas cuencas.
- En la cuenca del río Las Vacas se estima poca recarga natural, precisamente por la impermeabilización creciente de las zonas de recarga. En consecuencia, es de suma importancia la implementación de programas de recarga artificial de acuíferos, con el objetivo de balancear la explotación de los recursos hídricos subterráneos en esta zona.
- Así mismo, es conveniente la implementación de redes de control para la medición sistemática de los componentes del ciclo hidrológico en estas zonas. Esto coadyuvará al desarrollo, planificación, protección, conservación y uso racional de los recursos hídricos de las cuencas que conforman la Ciudad de Guatemala y sus áreas de influencia.

#### **4.3. Resumen estudio hidrológico del proyecto Emergencia I**

Los acuíferos en las áreas de estudio se dividirán en cuatro grupos:

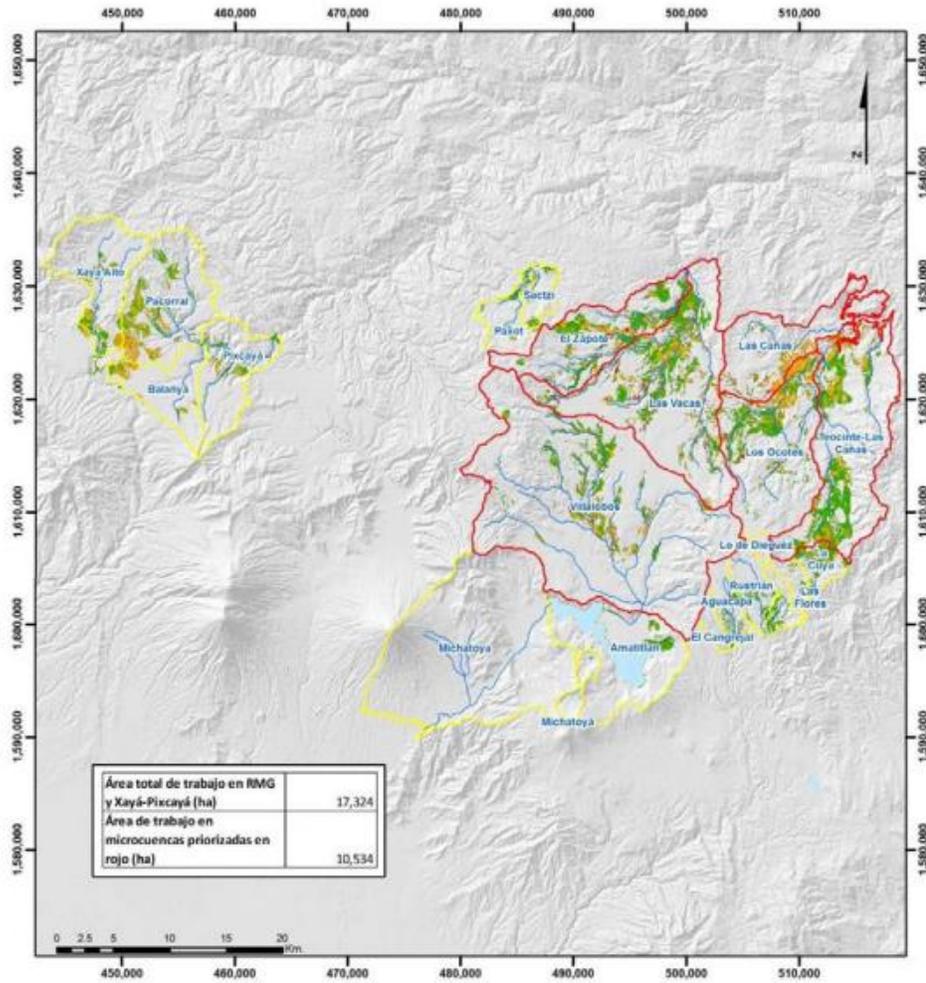
- Los rellenos volcánicos
- Andesitas y dacitas fracturadas
- Sedimentos del terciario
- Calizas.

La cuenca del río los Ocotes está constituida, de manera general, por dos acuíferos. Estos se denominan acuífero del relleno volcánico y acuífero de sedimentos fluviales y lavas. El acuífero de relleno volcánico es de gran extensión superficial y sirve como embalse regulador de recarga de los sedimentos fluviales y lavas.

La cuenca del río Los Vados está constituida, en forma general, por tres acuíferos, los cuales se identifican como acuífero de relleno volcánico, acuífero de sedimentos y acuífero de caliza.

La cuenca del río Las Vacas está formada por tres acuíferos, con materiales identificados como de relleno volcánico, de sedimentos fluviales, lavas y calizas. Las rocas metamórficas del norte constituyen una barrera impermeable para la circulación del agua subterránea.

Figura 14. Delimitación de sub cuencas del estudio



Fuente: Base cartográfica del Instituto Geográfico Nacional, IGN. Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota, UVG. *Áreas de acción del plan de conservación en la RMG y Xayá-Pixcayá*. Consulta: 10 de marzo de 2021.

#### 4.4. Pozos de explotación, proyecto Emergencia I

Se realizaron 32 pozos de explotación con caudal estimado de 1049,4 L/S.

Tabla IV. **Características generales de los pozos de explotación propuestos en las zonas del estudio**

ZONA NORTE								
No. Pozo	Ubicación en GTM		Elevación (m.s.n.m.)	Diámetro interno (Plg)	Profundidad propuesta (m.)	Nivel Estático Estimado (m.s.n.m.)	Abatimiento Estimado (m.)	Caudal Estimado (L/S)
	Este	Norte						
N-1	14°40 14,1	90°29 16,6	1 450,58	12	350	1 255	3	30
N-2	14°39 50,9	90°29 08,9	1 450	12	350	1 255	3	30
N-3	14°40 00,5	90°29 32,5	1 445	12	350	1 255	5	30
N-4	14°39 50,8	90°29 31,1	1 435	12	350	1 350	20	30
N-5	14°40 14,8	90°29 11,4	1 430	12	350	1 350	20	30
N-6	14°40 52,7	90°29 20,5	1 425	12	350	1 300	20	30
6,00	SUB TOTALES				2100,00			
ZONA DE LAVARREDA								
L-1	14°39 40,8	90°28 36,7	1465	12	400	1 250	5	30
L-2	14°39 59,7	90°28 04,9	1520	12	400	1 250	5	30
L-3	14°39 40,2	90°27 51,7	1500	12	400	1 250	5	30
3,00	SUB TOTALES				1200,00			90,00
ZONA EL RODEO								
R-1	14°39 35,4	90°27 27,7	1 490,00	12	400	1 260,00	6	30
R-2	14°35 52,1	90°28 49,7	1 535,00	12	400	1 260,00	6	30
R-3	14°39 41,9	90°26 31,5	1 475,00	12	320	1 255,00	6	30
R-4	14°40 05,5	90°26 42,8	1 450,00	12	300	1 255,00	6	30
R-5	14°39 55,3	90°26 29,1	1 470,00	12	320	1 255,00	6	30
R-6	14°39 51,4	90°25 52,5	1 340,00	12	300	1 255,00	6	30
6	SUB TOTALES					2 040,00		
ZONA CANALITOS								
C-1	14°36 33,0	90°30 30,9	1 440,00	12,00	260,00	1 430,00	7,35	71,40
C-2	14°37 56,3	90°25 57,6	1 460,00	12,00	300,00	1 420,00	7,37	75,60
C-3	14°39 48,2	90°26 55,4	1 515,00	12,00	330,00	1 455,00	7,37	65,60
C-4	14°37 49,7	90°26 55,1	1 495,00	12,00	330,00	1 435,00	7,37	56,30
C-5	14°38 11,5	90°25 46,9	1 360,00	12,00	250,00	1 350,00	7,37	67,30
C-6	14°37 03,9	90°27 32,3	1 540,00	12,00	320,00	1 500,00	7,37	37,60
C-7	14°36 53,2	90°27 32,6	1 565,00	12,00	350,00	1 505,00	7,37	28,50
C-8	14°37 20,6	90°27 32,8	1 525,00	12,00	300,00	1 470,00	7,37	28,50
C-9	14°37 40,3	90°27 25,7	1 505,00	12,00	300,00	1 450,00	7,37	37,60
C-10	14°35 50,7	90°27 47,8	1 535,00	12,00	300,00	1 440,00	7,37	42,00
10	SUB TOTALES				3040,00			510,40

Continuación de la tabla IV.

ZONA DE VISTA HERMOSA								
No. Pozo	Ubicación en GTM		Elevación (m.s.n.m.)	Diámetro interno (Plg)	Profundidad propuesta (m.)	Nivel Estático Estimado (m.s.n.m.)	Abatimiento Estimado (m.)	Caudal Estimado (L/S)
	Este	Norte						
H-1	14°37 02,1	90°25 54,5	1 460	12	300	1 440	20	30
H-2	14°36 33,7	90°28 48,2	1 560	12	350	1 465	20	30
H-3	14°36 07,1	90°28 43,6	1 590	12	360	1 480	20	30
H-4	14°35 35,3	90°28 28,2	1 550	12	350	1 500	20	30
H-5	14°36 12,6	90°29 36,2	1 500	12	350	1 460	20	30
H-6	14°34 22,8	90°30 03,9	1 485	12	300	1 450	20	30
H-7	14°36 27,3	90°29 13,4	1 500	12	300	1 455	20	30
10	SUB TOTALES					2310		210
32	TOTALES					10,69		1 170,40

Fuente: Ckc Chuo Kaihatsu Corporation. *Estudio hidrogeológico en el Valle de la Ciudad de Guatemala, proyecto Emergencia I.* p.18.

#### 4.5. Resumen del estudio hidrológico

Se muestra la evaluación inicial de los componentes del ciclo hidrológico, a través de los cuales se puede establecer el balance hidrológico de las diferentes cuencas en cuestión. En este estudio, estas comprenden las tres cuencas mencionadas anteriormente.

##### 4.5.1. Área de estudio

El área del estudio sobre impermeabilidad abarca tres subcuencas pertenecientes a la cuenca del río Motagua, en la vertiente del Atlántico. Estas son las subcuencas de los ríos Los Ocotes, Los Vados y Las Vacas. El área de estudio es de aproximadamente 169 km<sup>2</sup> (ver anexo 1).

La subcuenca del río Los Ocotes está ubicada entre las coordenadas UTM Y: 1608N -1622N y X: 772E -780 E, cubriendo un área aproximada de 67 km<sup>2</sup>.

La elevación máxima, media y mínima de la cuenca son 2 000, 1 571 y 1 200 m.s.n.m., respectivamente. El límite del área de los Ocotes fue fijado a la altura de la población “El Buen Pastor”, antes de la confluencia del río los Ocotes y Bijagüe.

Fisiográficamente, esta cuenca presenta un patrón de drenaje tipo dicotómico, controlado por grandes pendientes en la cabecera de la cuenca (al sur). Posteriormente forma pequeñas mesetas al centro de la cuenca, a través de las cuales circulan los flujos de agua superficial. Luego forma barrancos profundos (más de los 80 metros) que drenan hacia una zona estrecha, localizada a la altura de “El Buen Pastor”.

La subcuenca del río Los Vados está ubicada entre las coordenadas UTM Y: 1622 N -1628 N y X: 772 E -780 E, cubriendo un área aproximada de 45 km<sup>2</sup>. El límite de la cuenca se fija en las aguas debajo de la población El Chato. Fisiológicamente, esta cuenca presenta un patrón de drenaje tipo sub-céntrico, controlado particularmente por el sistema de fallas preferentemente N-S y E-W.

La subcuenca del río Las Vacas está ubicada entre las coordenadas UTM Y: 1612N – 1628N y X: 766E – 773E, cubriendo un área aproximada de 57 km<sup>2</sup>. El límite de la cuenca fue fijado antes de la confluencia de los ríos Las Vacas y Chinautla. Fisiográficamente, esta cuenca presenta un patrón de drenaje tipo paralelo, controlado particularmente por la falla del mismo nombre de orientación N-S.

#### 4.6. Parámetros meteorológicos e hidrológicos, proyecto Emergencia I

Correspondiente a las tres subcuencas, siendo ellas: río Las Vacas, río los Vados (El Chato) y río los Ocotes. Estos son afluentes del río Motagua en la vertiente del Mar Caribe.

Tabla V. **Precipitación media anual sub-cuenca: río Los Ocotes**

Isoyeta (mm)	Isoyeta media (mm)	Área (km <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> x 10 <sup>6</sup> )
1,100 - 1,200	1 150	11,43	13,14
1,200 - 1,300	1 250	19,28	24,1
1,300 - 1,400	1 350	36,34	49,06
Totales		67,05	86,3

Fuente: Ckc Chuo Kaihatsu Corporation. *Estudio hidrogeológico en el Valle de la Ciudad de Guatemala, proyecto Emergencia I.* p.114.

La precipitación media de la Cuenca es de: 1 287 mm/año. El área aproximada de la cuenca es de 67 km<sup>2</sup>.

Tabla VI. **Precipitación media anual sub-cuenca: río Los Vados (El Chato)**

Isoyeta (mm)	Isoyeta media (mm)	Área(km <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> x 10 <sup>6</sup> )
1,000 -	1 000	16,25	16,25
1,000 - 1,100	1 050	22,87	24,01
1,100 - 1,200	1 150	4,75	5,46
Totales		44,87	45,72

Fuente: Ckc Chuo Kaihatsu Corporation. *Estudio hidrogeológico en el Valle de la Ciudad de Guatemala, proyecto Emergencia I.* p.114.

La precipitación media de la Cuenca es de: 1 042 mm/año

Área aproximada de la cuenca 45  $km^2$ .

Tabla VII. **Precipitación media anual sub-cuenca: río Las Vacas**

Isoyeta (mm)	Isoyeta Media (mm)	Área (Km2)	Volumen (m3 x 10 <sup>6</sup> )
1,00 - 1,100	1 050	4,22	4,43
1,100 -1,200	1 150	7,93	9,12
1,200 - 1,300	1 250	5,56	6,95
1,300 - 1,400	1 350	32,66	44,09
1,400 -	1 400	6,2	8,68
Totales		56,57	73,27

Fuente: Ckc Chuo Kaihatsu Corporation. *Estudio hidrogeológico en el Valle de la Ciudad de Guatemala, proyecto Emergencia I.* p.114.

La precipitación media de la Cuenca es de: 1 295 mm/año. El área aproximada de la cuenca es de 57  $km^2$ .

- Comentario: los valores de la precipitación disminuyen hacia el norte y noreste de la ciudad, siendo la relación lineal con respecto a la altura, tal y como se muestra en el anexo 2.

#### 4.7. Estudio evapotranspiración del proyecto Emergencia I

Consiste en la presentación de los cálculos de evapotranspiración del proyecto Emergencia I.

Cálculo de evapotranspiración potencial por el método de Thorntwaite.

$$ETp = k[16 (10 t/l)^a]$$

[EC.3]

Donde:

t temperatura media mensual

i módulo mensual de temperatura

a  $6,75 \times 10^{-7}i - 7,71 \times 10^{-5}i + 0,01792i + 0,49239$

k factor de corrección por horas de sol al mes, según latitud.

- Comentario: el resultado de ETP= 845 mm/año, dato usado en el estudio de factibilidad del proyecto Emergencia I.

Cálculo de evapotranspiración real por el método de TURC

$$ETR = \frac{P}{[0,9 + \frac{P^2}{L^2}]^{1/2}}$$

[EC. 4]

Donde:

P precipitación media anual = 1 110 mm/año

T temperatura media anual = 18,7 °C

L  $300 + 35t + 0,05t^3$

- Comentario: el resultado de ETP= 800 mm/año, dato usado en estudio de factibilidad del proyecto Emergencia I.

#### **4.8. Aspectos físicos de las aguas superficiales del proyecto Emergencia I**

A continuación, se muestra la ubicación de los ríos que drenan las subcuencas estudiadas.

Tabla VIII. Descripción de ríos que drenan las subcuencas

SUB- CUENCA: RIO OCOTES				
	IDENTIFICACIÓN	COORDENADAS		ELEVACIÓ N
No.	NOMBRE	Y	X	(m.s.n.m.)
1	RIO MONJITAS	14°53 35,75	90°23 57,67	1 420,00
2	RIO CANALITOS	14° 38 53,96	90° 25 53,68	1 420,00
3	RIO CANALITOS (BEBEDERO)	14° 37 16,72	90° 26 04,93	1 300,00
4	RIO AGUA TIBIA	14° 38 18,28	90° 26 49,50	1 360,00
5	RIO LOS OCOTES(BEBEDERO)	14° 38 58,86	90° 26 13,28	1 320,00
6	RIO LOS OCOTES (EL TESORO)	14° 38 58,86	90° 26 13,28	1 140,00
7	RIO BIJAGUE	14° 39 59,43	90° 24 02,20	1 140,00
8	OCOTES(ATLANTICO)	14° 39 28,17	90° 28 26,53	1 140,00
9	RIO TEOCINTE	14° 40 59,61	90° 23 00,83	1 050,00
10	RIO SAN JUAN	14°47 56,21	90° 19 01,77	1 000,00
11	RIO LAS CAÑAS	14° 48 59,53	90° 20 00,47	1 000,00
11 a	RIO LAS CAÑAS (SAN JUAN)	14°47 56,21	90° 19 01,77	980
12	RIO EL TORO	14° 37 17,71	90° 30 40,50	1 220,00
13	QUEBRADA EL JUTE	14° 27 31,83	90° 03 56,50	1 200,00
14	RIO LOS VADOS	14° 27 07,24	90° 11 08,97	1 200,00
15	RIO PURGATORIO	14° 41 23,33	90° 25 14,04	1 140,00
16	RIO EL CHATO	14° 46 03,59	90° 35 13,46	1 140,00
17	RIO PURGATORIO (CHATO)	14° 41 23,33	90° 25 14,04	1 110,00
M1	MANANTIAL LA CHORRERA	14° 35 52,24	90° 34 41,45	1 240,00
18	RIO CHINAUTLA	14° 43 00,07	90° 31 12,96	1 200,00
19	RIO LAS VACAS	14° 50 40,38	90° 40 39,08	1 200,00
20	RIO TZALJA	14° 48 58,77	90° 31 00,14	1 180,00

Fuente: Ckc Chuo Kaihatsu Corporation. *Estudio hidrogeológico en el Valle de la Ciudad de Guatemala, proyecto Emergencia I.* p.129-130.

#### 4.8.1. Infiltración de la cuenca río Los Ocotes

Se considera para el cálculo de infiltración media, con base en el porcentaje de la precipitación, al deducir funciones representativas de la relación entre el porcentaje de infiltración y la altura media de la cuenca.

La elevación media de la subcuenca del río los Ocotes fue calculada a través de la curva hipsométrica de la cuenca, la cual aporta una elevación media de 1 571 m.s.n.m. (anexo 2). La precipitación media de la cuenca fue calculada mediante el promedio del método isoyetas (tabla IV), obteniendo un valor de 1 278 mm/año.

Aplicando la ecuación, se obtiene el valor del porcentaje de la precipitación, para estimar la infiltración de la cuenca.

$$I = 0,011H + 3.6$$

[EC. 5]

Donde:

I = % de la precipitación

H= elevación media de la cuenca

- Comentario: El resultado de la infiltración media de la cuenca del río Los Ocotes es de 20,88 %. Sin embargo, la infiltración puede oscilar en un rango del 15 al 25 % de la precipitación.

Ahora, para el cálculo de la infiltración se aplica la siguiente ecuación:

$$I_c = (I/100) * P$$

[EC. 6]

Donde:

Ic= Infiltración en la cuenca, mm/año

P= Precipitación media de la cuenca, mm/año

- Comentario: Entonces, la infiltración en la cuenca es de aproximadamente 270 mm/año, lo cual es equivalente a un caudal de 0,57 m<sup>3</sup>/seg, o 18 Mm<sup>3</sup>/año.

#### **4.8.2. Infiltración de la cuenca río Los Vados**

La elevación media de la subcuenca del río Los Vados fue calculada a través de la curva hipsométrica de la cuenca. Se estimó una elevación media de 1 438.17 m.s.n.m. (anexo 3), la precipitación media de la cuenca fue calculada promedio del método isoyetas (tabla VI), obteniendo un valor de 1 042 mm/año.

Aplicando la ecuación, se obtiene el valor del porcentaje de la precipitación, utilizado para estimar la infiltración de la cuenca.

$$I = 0,011H + 3,6$$

[EC. 7]

Donde:

I = % de la precipitación

H= elevación media de la cuenca

- Comentario: El resultado de infiltración media de la cuenca del río Los Vados es de 19,42 %, sin embargo, la infiltración puede oscilar en un rango del 15 al 25 % de la precipitación.

Ahora, para el cálculo de la infiltración se aplica la siguiente ecuación:

$$I_c = (I/100) * P$$

[EC. 8]

Donde:

$I_c$  = Infiltración en la cuenca, mm/año

$P$  = Precipitación media de la cuenca, mm/año (1995, estudio).

- Comentario: la infiltración en la cuenca es de aproximadamente 200 mm/año, lo cual es equivalente a un caudal de 0,285 m<sup>3</sup>/seg., ó 9 mm<sup>3</sup>/año.

#### **4.8.3. Infiltración de la cuenca río Las Vacas**

La elevación media de la subcuenca del río Los Vados fue calculada a través de la curva hipsométrica de la cuenca, la cual aporta una elevación media de 1 559,09 m.s.n.m. (anexo 4), la precipitación media de la cuenca fue calculada promedio del método isoyetas (tabla VII), obteniendo un valor de 1 295 mm/año.

Aplicando la ecuación se obtiene el valor del porcentaje de la precipitación, para estimar la infiltración de la cuenca.

$$I = 0,011H - 128$$

[EC. 9]

Donde:

$I$  = % de la precipitación

$H$  = elevación media de la cuenca

- Comentario: El resultado de infiltración media de la cuenca del río Las Vacas es de 6,08 %, sin embargo, la infiltración puede oscilar en un rango del 15 al 25 % de la precipitación.

Ahora, para el cálculo de la infiltración se aplica la siguiente ecuación:

$$I_c = (I/100) * P$$

[EC.10]

Donde:

$I_c$  = Infiltración en la cuenca, mm/año

$P$  = Precipitación media de la cuenca, mm/año (1995, estudio).

- Comentario: La infiltración en la cuenca es de aproximadamente 80 mm/año, lo cual es equivalente a un caudal de 0,14 m<sup>3</sup>/seg, ó 4,6 mm<sup>3</sup>/año.

#### **4.9. Características de los pozos del proyecto Emergencia I**

A continuación, se muestran los datos recopilados de los centros de monitoreo de los 32 pozos de extracción que forman parte del proyecto Emergencia I. Estos datos fueron proporcionados por la Municipalidad de Guatemala para este estudio, siendo ahora información pública.

Tabla IX. **Características del caudal de pozos en explotación zona 6**

No.	Nombre del pozo	Descripción Pozo		Nivel estático del agua (pies)			Diámetro del tubo	
		Longitud (pies)	Diámetro (pulgadas)	2000	2010	2019	Pulgadas	
1	Pozo N-1	1 300,00	12	873,00	1 080,00	920,01	6	
2	Pozo N-2	1 200,00	12	1 140,00	1 100,00		8	
3	Pozo N-3	1 300,00	12	896,00	1 100,00	947,92	8	
4	Pozo N-4	1 200,00	12	920,00	1 040,00	918,66	6	
5	Pozo N-5	1 300,00	12	1 100,00	1 200,00	926,75	6	
6	Pozo N-6	1 479,00	12	920,00	1 000,00	913,27	6	
Nombre del pozo	Fecha de construcción del pozo	Nivel dinámico del agua (pies)			Diámetro del tubo Pulgadas	Producción		
		2000	2010	2019		2000 LP/S	2010 LP/S	2019 LP/S
Pozo N-1	19/01/1999	738,00	895,00	944,00	6	50	40	27
Pozo N-2	16/04/1999	919,00	1 001,00		8	28	10	
Pozo N-3	19/02/1999	712,00	993,00	1.075,00	8	60	26	8
Pozo N-4	17/03/1999	771,00	1 047,00	933,00	6	20	19	10
Pozo N-5	27/02/1999	935,00	1 021,00	958,00	6	35	32	22
Pozo N-6	10/09/1999	705,00	660,00	917,00	6	10	6	4

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por el Sistema de pozos de agua, Subunidad de Empresa Municipal de Agua, Municipalidad de Guatemala.

Tabla X. **Características del caudal de pozos en explotación zona 10**

No.	Nombre del pozo	Fecha de construcción del pozo	Descripción Pozo		Nivel estático del agua (pies)			Diámetro del tubo
			Longitud (pies)	Diámetro (pulgadas)	2000	2010	2019	Pulgadas
1	POZO C-1	27/05/2000	1 706,00	12	580,00	780,00	842,50	8
Nombre del pozo	Fecha de construcción del pozo	Nivel dinámico del agua (pies)			Diámetro del tubo Pulgadas	Producción (L P/S)		
		2000	2010	2019		2000	2010	2019
POZO C-1	27/05/2000	377,00	167,00	882,00	8	50	41	27

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por el Sistema de pozos de agua, Subunidad de Empresa Municipal de Agua, Municipalidad de Guatemala.

Tabla XI. **Características del caudal de pozos en explotación zona 15**

No.	Nombre del pozo	Fecha de construcción del pozo	Descripción Pozo		Nivel estático del agua (pies)			Diámetro del tubo
			Longitud (pies)	Diámetro (pulgadas)	2000	2010	2019	Pulgadas
1	POZO H-4	17/03/1999	1.510,00	12	790,00	960,00	521,00	6
2	POZO H-5	27/02/1999	1.300,00	12	574,00		67,40	6
Nombre del pozo	Fecha de construcción del pozo	Nivel dinámico del agua (pies)			Diámetro del tubo	Producción (L P/S)		
		2000	2010	2019	Pulgadas	2000	2010	2019
POZO H-4	17/03/1999	259,00	156,00	155,00	6	20	12	8
POZO H-5	27/02/1999	171,00	192,00	95,00	6	26	20	12

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por el Sistema de pozos de agua, Subunidad de Empresa Municipal de Agua, Municipalidad de Guatemala.

Tabla XII. **Características del caudal de pozos en explotación zona 16**

Nombre del pozo	Fecha de construcción del pozo	Descripción Pozo		Nivel estático del agua (pies)			Diámetro del tubo
		Longitud (pies)	Diámetro (pulgadas)	2000	2010	2019	Pulgadas
POZO H-1	19/01/1999	1 300,00	12	660,00	740,00	121,00	6
POZO H-2	16/04/1999	1 210,00	12	590,00	860,00	640,00	8
POZO H-3	19/02/1999	1 300,00	12	590,00	840,00	708,00	8
POZO C-6	30/11/1998	1 150,00	12	700,00	790,00	394,00	8
POZO C-7	11/12/1998	1 300,00	12	700,00	840,00	623,00	8
POZO C-8	26/04/1999	1 300,00	12	680,00	800,00	644,00	8
POZO C-9	28/01/1999	1 112,00	12	500,00	740,00	711,00	8
POZO C-10	21/10/1998	1 214,00	12	620,00	620,00	754,00	8
POZO H-7	28/07/1999	1 200,00	12	750,00	890,00	711,00	8
Pozo R-2	4/09/2000	1 270,00	12	1 010,00	900,00	709,00	4
IPM	25/08/2000	1 300,00	12	640,00	940,00	809,00	6
Santa Luisa	13/09/2000	1 500,00	12	860,00	1 000,00	980,00	6

Continuación de la tabla XII.

Nombre del pozo	Fecha de construcción del pozo	Nivel dinámico del agua (pies)			Diámetro del tubo Pulgada	Producción (L P/S)		
		2000	2,010	2,019		2000	2010	2019
POZO H-1	19/01/1999	492,00	514,00		6	25	11	0
POZO H-2	16/04/1999	240,00	653,00	644,00	8	63	23	12
POZO H-3	19/02/1999	387,00	802,00	795,00	8	50	20	20
POZO C-6	30/11/1998	361,00	627,00		8	76	56	0
POZO C-7	11/12/1998	377,00	638,00	684,00	8	76	26	24
POZO C-8	26/04/1999	515,00	574,00	704,00	8	50	20	0
POZO C-9	28/01/1999	361,00	564,00	596,00	8	63	20	27
POZO C-10	21/10/1998	515,00	592,00	809,00	8	51	25	22
POZO H-7	28/07/1999	551,00	815,00	725,00	8	45	26	12
Pozo R-2	4/09/2000	676,00	135,00	863,00	4	10	8	6
IPM	25/08/2000	377,00	785,00	829,00	6	45	25	27
Santa Luisa	13/09/2000	650,00	633,00	1 156,00	6	20	10	10

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por el Sistema de pozos de agua, Subunidad de Empresa Municipal de Agua, Municipalidad de Guatemala.

Tabla XIII. **Características del caudal de pozos en explotación zona 18**

No.	Nombre del pozo	Descripción Pozo		Nivel estático del agua (pies)			Diámetro del tubo
		Longitud (pies)	Diámetro (pulgadas)	2000	2010	2019	Pulgadas
1	Pozo R-1	1 360,00	12	1 113,00	1 160,00	1 082,40	6
2	Pozo C-3	1 300,00	12	1 115,00	1 120,00	3 247,20	8
3	Pozo R-3	1 350,00	12	1 180,00	1 180,00	1 115,20	4
4	Pozo R-4	1 300,00	12	938,00	1 140,00		6
5	Pozo R-5	1 300,00	12	1 033,00	1 099,00		6
6	L-1	1 360,00	12	740,00	1 040,00	1 033,20	6
7	L-2	1 312,00	12	1 200,00	1 220,00	1 230,00	6
8	L-3	1 312,00	12	1.050,00	1 140,00	1 115,20	6
9	MAYA III	1 300,00	12	960,00	1 220,00	1 036,48	8

Continuación de la tabla XIII.

Nombre del pozo	Fecha de construcción del pozo	Nivel dinámico del agua (pies)			Diámetro del tubo	Producción ( L P/S)		
		2000	2,010	2,019	Pulgadas	2000	2010	2019
Pozo R-1	11/06/1999	883,00	1.037,00	1 167,68	6	38	14	12
POZO C-3	30/09/2000	278,00	304,00	3 346,00	8	50	40	24
Pozo R-3	8/12/1999	984,00	1.044,00	1 184,00	4	10	8	8
Pozo R-4	25/02/1999	804,00	264,000	245,00	6	38	26	20
Pozo R-5	23/12/1999	755,00	801,00	269,00	6	40	26	21
L-1	20/02/1999	643,00	897,00	1 066,00	6	40	18	0
L-2	6/01/1999	1 007,00	1 200,00	1 243,00	6	35	23	26
L-3	26/11/1998	977,00	1 114,00	1 181,00	6	37	18	14
MAYA III	15/12/2000	830,00	310,00	1 066,00	8	50	28	27

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por el Sistema de pozos de agua, Subunidad de Empresa Municipal de Agua, Municipalidad de Guatemala.

Tabla XIV. Comparación mensual de producción del caudal año 2019

No.	Nombre del pozo	PRODUCCIÓN MENSUAL DE LOS POZOS PROYECTO EMERGENCIA I (M3/DIA)												Producción mensual anual de pozos
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre		
1	Pozo N-1	1382.40	1458.00	1376.06	2367.00	2369.41	2380.32	0.00	2376.00	2181.96	2380.32	2380.32	20651.79	
2	Pozo N-2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
3	Pozo N-3	1728.00	1469.00	1462.07	1469.00	1290.06	1296.00	0.00	1272.00	1188.00	864.00	864.00	12902.13	
4	Pozo N-4	691.20	389.00	774.04	389.00	774.04	388.80	388.00	768.00	388.80	388.80	388.80	5728.37	
5	Pozo N-5	1871.20	1814.00	1806.08	1814.00	1806.08	1814.00	0.00	1824.00	1663.20	1814.40	1814.40	17639.37	
6	Pozo N-6	475.20	650.00	258.01	650.00	473.02	188.80	118.80	480.00	118.80	71.28	71.28	3555.19	
7	POZOC-1	2592.00	0.00	2322.11	2333.00	1978.09	1987.20	1987.20	1992.00	828.00	1821.60	1987.20	19828.40	
8	POZOH-4	432.00	270.00	430.02	167.00	860.04	216.00	345.60	528.00	96.12	410.40	112.32	3867.50	
9	POZOH-5	950.40	0.00	880.04	663.00	774.04	0.00	0.00	0.00	170.10	510.30	170.10	4097.98	
10	POZOH-1	950.40	0.00	946.04	0.00	946.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2842.49	
11	POZOH-2	2505.60	0.00	2494.12	0.00	2494.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7493.83	
12	POZOH-3	1728.00	1023.00	1720.08	1876.00	1720.08	1728.00	1533.60	1752.00	1450.80	1728.00	1728.00	17987.56	
13	POZOC-6	3715.20	0.00	1720.08	0.00	1720.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7155.36	
14	POZOC-7	2073.60	1987.00	1978.09	1987.00	2064.10	2073.60	2073.60	2064.00	1758.24	2073.60	2073.60	22206.43	
15	POZOC-8	1209.60	0.00	1204.06	0.00	1204.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3617.71	
16	POZOC-9	2505.60	2246.00	2236.10	0.00	2408.11	2419.20	2419.20	2424.00	2016.00	2419.20	2419.20	23512.62	
17	POZOC-10	1900.80	1642.00	1290.06	1573.00	2150.10	2160.00	2160.00	2160.00	1555.20	2160.00	2160.00	20911.16	
18	POZOH-7	1296.00	0.00	1634.08	0.00	1290.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4220.14	
19	Pozo R-2	518.40	163.00	516.02	106.00	516.02	194.40	194.40	528.00	151.20	194.40	194.40	3276.25	
20	IPM	2246.40	2246.00	2236.10	2059.00	2236.10	2592.00	2592.00	2616.00	2592.00	2592.00	2592.00	26599.61	
21	Santa Luisa	864.00	864.00	860.04	864.00	602.03	604.80	604.80	600.00	604.80	604.80	604.80	7678.07	
22	Pozo R-1	0.00	0.00	0.00	1037.00	1032.05	1036.80	1036.80	1032.00	475.20	1036.80	950.40	7637.05	
23	POZOC-3	1935.36	1935.00	1926.49	1935.00	1978.09	1987.20	1987.20	1992.00	1821.60	1728.00	1656.00	20881.94	
24	Pozo R-3	710.21	580.00	602.03	605.00	765.44	768.96	768.96	768.00	672.84	570.24	570.24	7381.91	
25	Pozo R-4	1641.60	1728.00	1720.08	1728.00	1806.08	1814.40	1814.40	1824.00	1663.20	1814.40	1814.40	19368.56	
26	Pozo R-5	1900.80	1426.00	1548.07	1555.00	1537.75	1416.10	1544.83	1560.00	984.83	1468.80	1460.80	16402.98	
27	L-1	518.40	0.00	516.02	0.00	516.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1550.45	
28	L-2	2246.40	2078.00	2236.10	1546.00	2236.10	1872.00	1166.40	2256.00	1808.48	1811.16	2246.40	21501.05	
29	L-3	1382.40	1.30	1290.06	0.00	1204.06	0.00	1209.60	0.00	691.20	1209.60	856.80	7845.01	
30	IMAYA III	2246.40	1134.00	1290.06	1296.00	2236.10	2246.40	2246.40	2256.00	2246.40	2246.40	2246.40	21690.56	
31	San Martín	388.80	0.00	387.02	0.00	946.04	594.00	594.00	960.00	435.60	594.00	594.00	5493.46	
32	Cerro Del Car	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
33	Chorrera	1728.00	1728.00	1720.08	0.00	2752.13	2073.60	2188.80	2760.00	1728.00	2073.60	2073.60	18752.21	
	Promedio	46450.37	26831.30	41359.32	28019.00	46685.55	33334.58	28974.59	36792.00	29288.57	32512.50	34029.46		

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por el Sistema de pozos de agua, Subunidad de Empresa Municipal de Agua, Municipalidad de Guatemala.

## 5. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

### 5.1. Variables

A continuación, se enlistan las variables del proyecto, desglosadas en nombre, tipo de variable y unidad de medida.

Tabla XV. **Variables del proyecto**

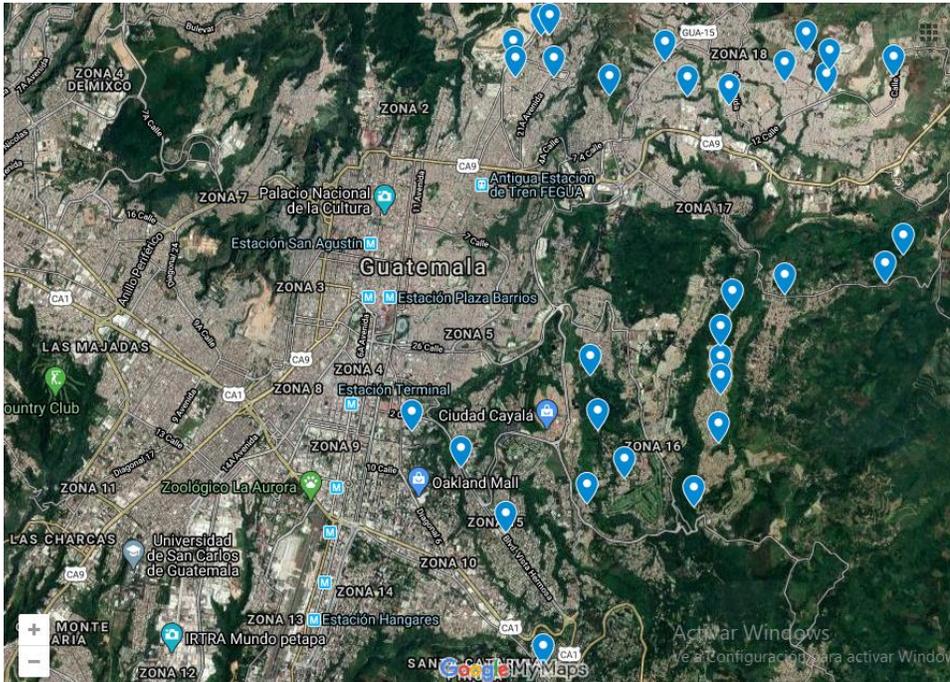
Variables	Tipo	Unidad
Impermeabilidad	Independiente	Km <sup>2</sup>
Escorrentía	Dependiente	mm/día
Infiltración	Dependiente	mm/día

Fuente: elaboración propia.

### 5.2. Delimitación de campo de estudio

El campo de estudio son los pozos del Proyecto Emergencia I, de Empagua. La ubicación de dichos pozos se puede observar en la siguiente figura.

Figura 15. Pozos del proyecto Emergencia I, de Empagua

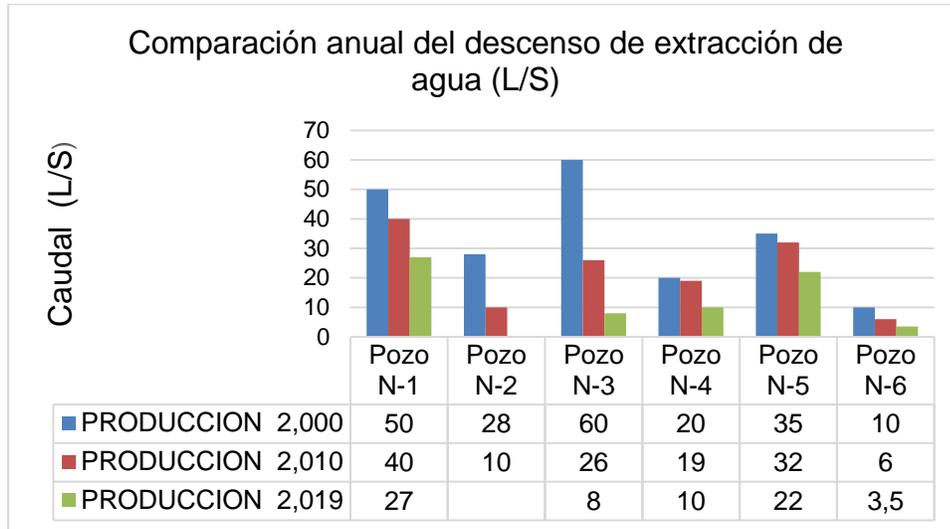


Fuente: elaboración propia, empleando Google Earth. 2021.

### 5.3. Evaluar el comportamiento de los pozos

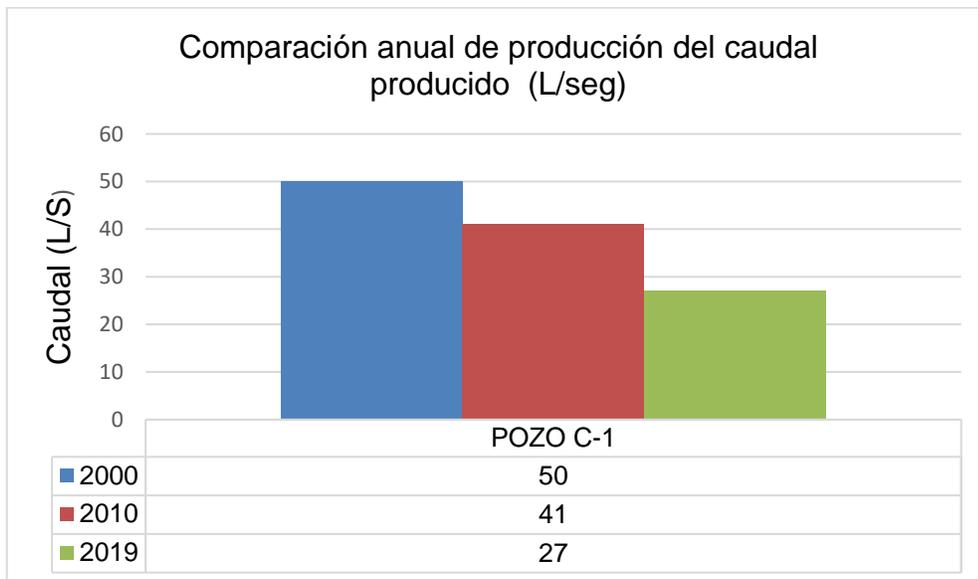
Se tabularon datos del año 2000, cuando inició la operación para evaluar la producción de cada uno de los pozos construidos. Como dato intermedio se tomó el año 2010, cuando se implementó el ordenamiento territorial en la ciudad de Guatemala (POT). Por último, se tabularon los datos del año 2019 como dato más reciente, para determinar la variabilidad entre el rango de los años 2000 al 2010 y 2010 al 2019.

Figura 16. **Comportamiento de la producción de agua en zona 6**



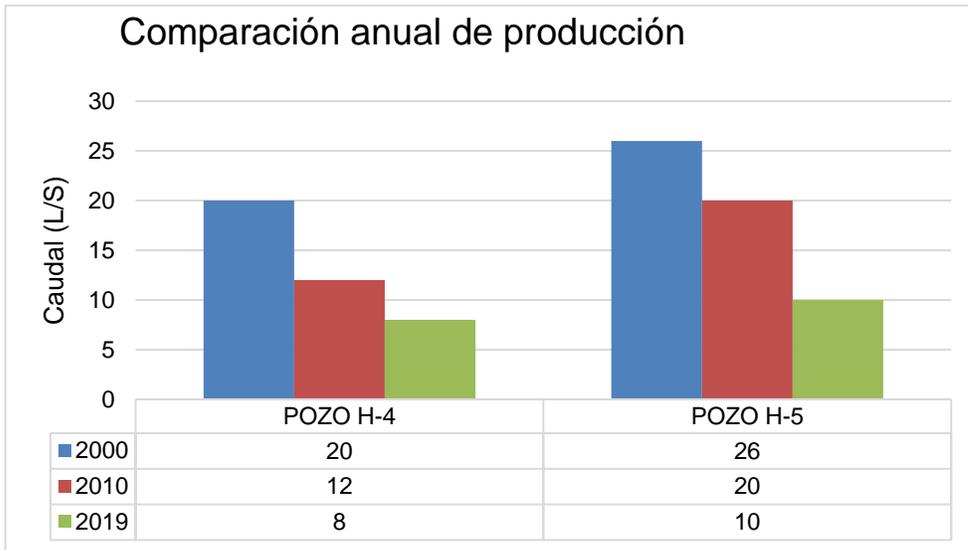
Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Comportamiento de la producción de agua en zona 10**



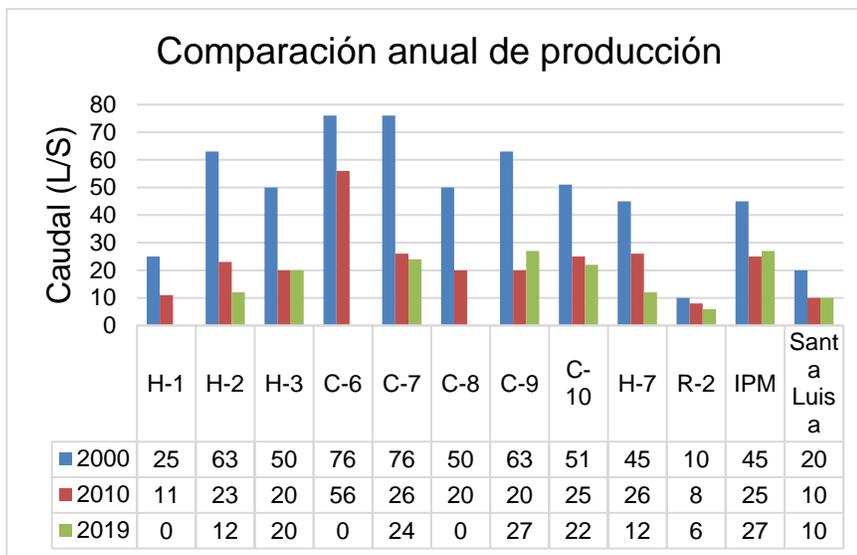
Fuente: elaboración propia.

Figura 18. Comportamiento de la producción de agua en zona 15



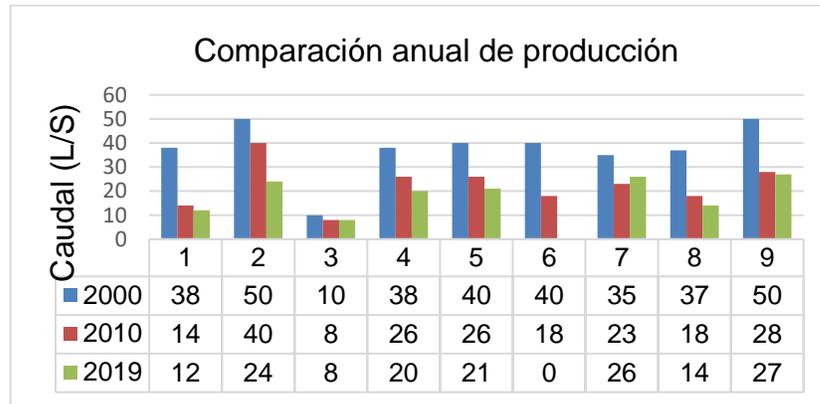
Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Comportamiento de la producción de agua en zona 16



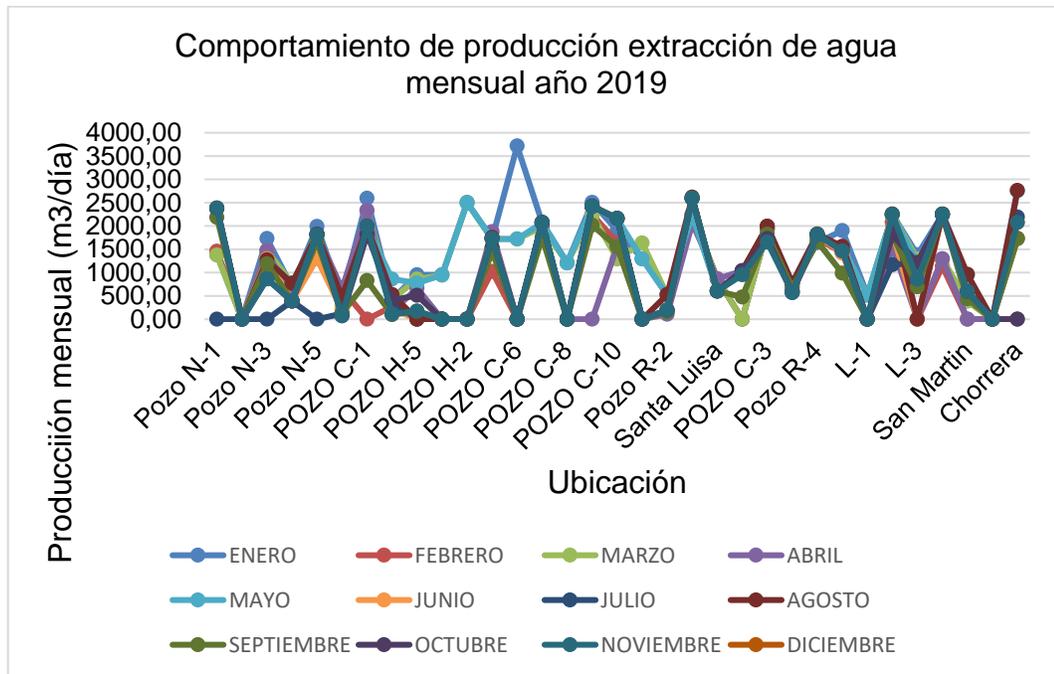
Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Comportamiento de la producción de agua en zona 18**



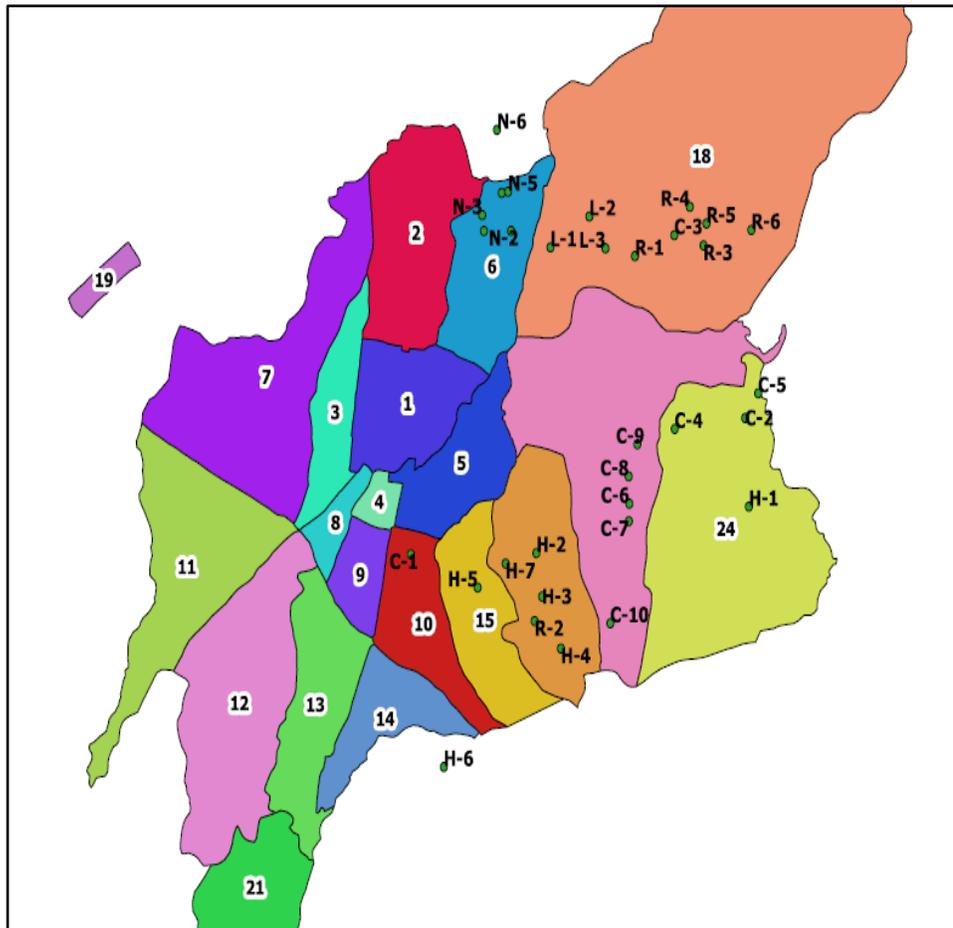
Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Comportamiento producción anual del año más reciente**



Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por Sistema de pozos de agua, Subunidad de Empresa Municipal de Agua, Municipalidad de Guatemala

Figura 22. Descripción de la ubicación de los pozos del proyecto  
Emergencia I



Fuente: elaboración propia, empleando Qgis. Palmas 2.18.20.

Nota: La dirección de los pozos del proyecto Emergencia 1 se encuentran en los anexos.

#### 5.4. Pruebas velocidad de infiltración actual

Se utilizó el método de Porchet, el cual consiste en la excavación de un agujero de radio "R" a una altura conocida "h", y luego medir un cambio en el tiempo muy pequeño (dt), para suponer la capacidad de infiltración (Fc) como constante. Para determinar Fc, se miden los pares de valores  $(h_1, t_1)$   $(h_2, t_2)$ , tomando en cuenta que  $t_2$  y  $t_1$ , no difieran demasiado, utilizando la siguiente ecuación:

$$Fc = \frac{R}{2(t_2 - t_1)} * \ln \frac{(2h_1 + R)}{(2h_2 + R)}$$

[Ecu. 11]

EL ajuste de la ecuación de infiltración Horton es el estudio de la capacidad de infiltración, en este estudio se determinó que la capacidad de infiltración tiene la siguiente forma.

$$fp = fc + (fo - fc) * e^{-kt}$$

[Ecu. 12]

Donde:

Fp capacidad de infiltración (mm/día)

Fc capacidad final o equilibrio (mm/día)

Fo capacidad inicial (mm/día)

K coeficiente de decrecimiento de la capacidad de infiltración en el tiempo.

## 5.5. Precipitación efectiva

Es la parte de la precipitación que aporta a la escorrentía, es decir, es parte de la lluvia que permanece en el suelo y contribuye a las aguas subterráneas.

$$P_i = C_i(P - RET)$$

Donde:

- P la precipitación efectiva que se infiltra [mm/mes]
- Ci el coeficiente de infiltración [adimensional]
- P la precipitación mensual [mm/mes] (dato meteorológico)
- Ret la retención de lluvia mensual por follaje [mm/mes]

El coeficiente de infiltración se base en tres aspectos:

- Kfc: es la fracción de infiltración por efecto del suelo

$$Kfc = 0,267 \ln(fc) - 0,000154fc - 0,723$$

[Ec. 3]

Donde

fc de la infiltración básica del suelo.

Si fc se encuentra entre 16 y 1 568 mm/día se utiliza la ecuación 3.

Si fc es menor a 16 mm/día Kfc = 0,0148/16

Si fc es mayor de 1 568 mm/día, Kfc = 1

- Kp: es la fracción que infiltra por efecto de la pendiente (tabla 16)
- Kv: es la fracción que infiltra por efecto de la vegetación vegetal (tabla 17).

Si  $Kp+Kv+Kfc$  es mayor de 1,  $Ci = 1$

Si  $Kp+Kv+Kfc$  es menor o igual a 1, entonces  $Ci = Kp+Kv+Kfc$

En la retención de lluvia mensual se toman en cuenta los aspectos de precipitación y el coeficiente del follaje de 12 % y de 20 % para bosques densos.

Si la precipitación mensual es menor o igual a 5mm/mes,  $Ret = P$

Si el producto (P) (Cfo) es mayor o igual de 5 mm/mes,  $Ret = P (Cfo)$ .

Si la precipitación mensual es mayor o igual de 5mm/mes y el producto (P) (Cfo) menor,  $Ret = 5$ .

Tabla XVI. **Valores de infiltración por efecto de pendiente (Kp)**

Pendiente	Porcentaje (%)	Coeficiente
Muy plana	0,02 - 0,06	0,30
Plana	0,3 - 0,4	0,20
Algo Plana	1 a 2	0,15
Promedio	2 a 7	0,10
Fuerte	mayor a 7	0,06

Fuente: SILVA, Matus. *Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa, Nicaragua*. p. 48.

Tabla XVII. **Valores de infiltración por efecto de la vegetación (Kv)**

Tipo de cobertura vegetal	Coefficiente propuesto
Zacate (menor que 50%)	0,09
Terrenos cultivados	0,10
Con pastizales	0,18
Bosques	0,20
Zacate (mayor que 75%)	0,21

Fuente: SILVA, Matus. *Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa, Nicaragua.* p. 48.

Tabla XVIII. **Clasificación y ponderación de velocidad de infiltración**

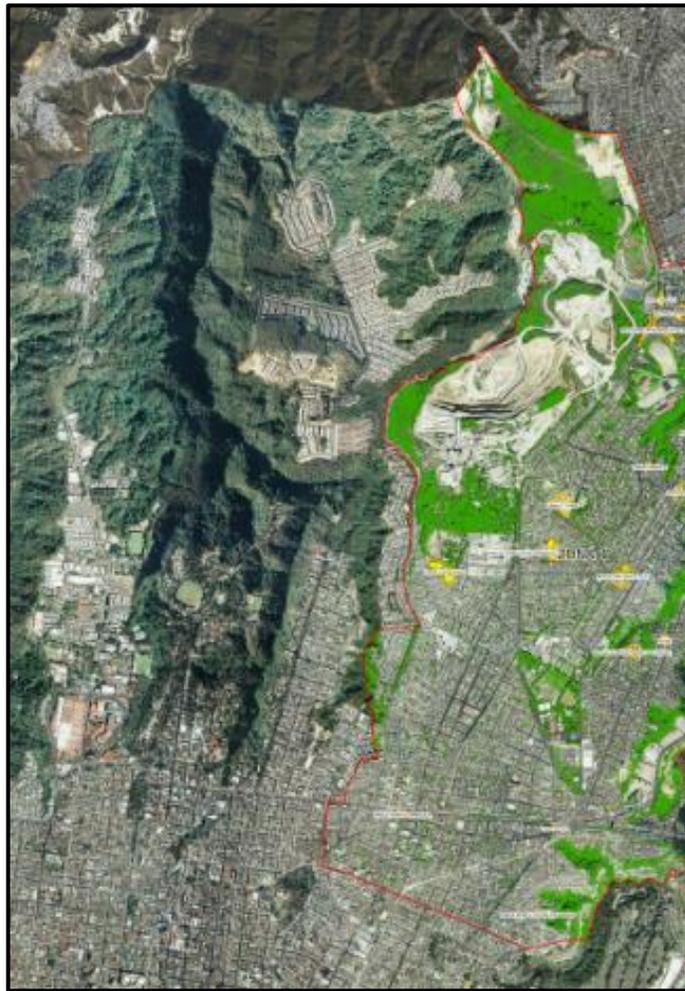
Infiltración básica [cm/h]	Posibilidad de recarga	Ponderación
Mayor que 25	Muy alta	5
12.7 - 25.5	Alta	4
2.0 - 12.7	Moderada	3
0.13 - 2.0	Baja	2
Menor que 0.13	Muy baja	1

Fuente: SILVA, Matus. *Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa, Nicaragua.* p. 48.

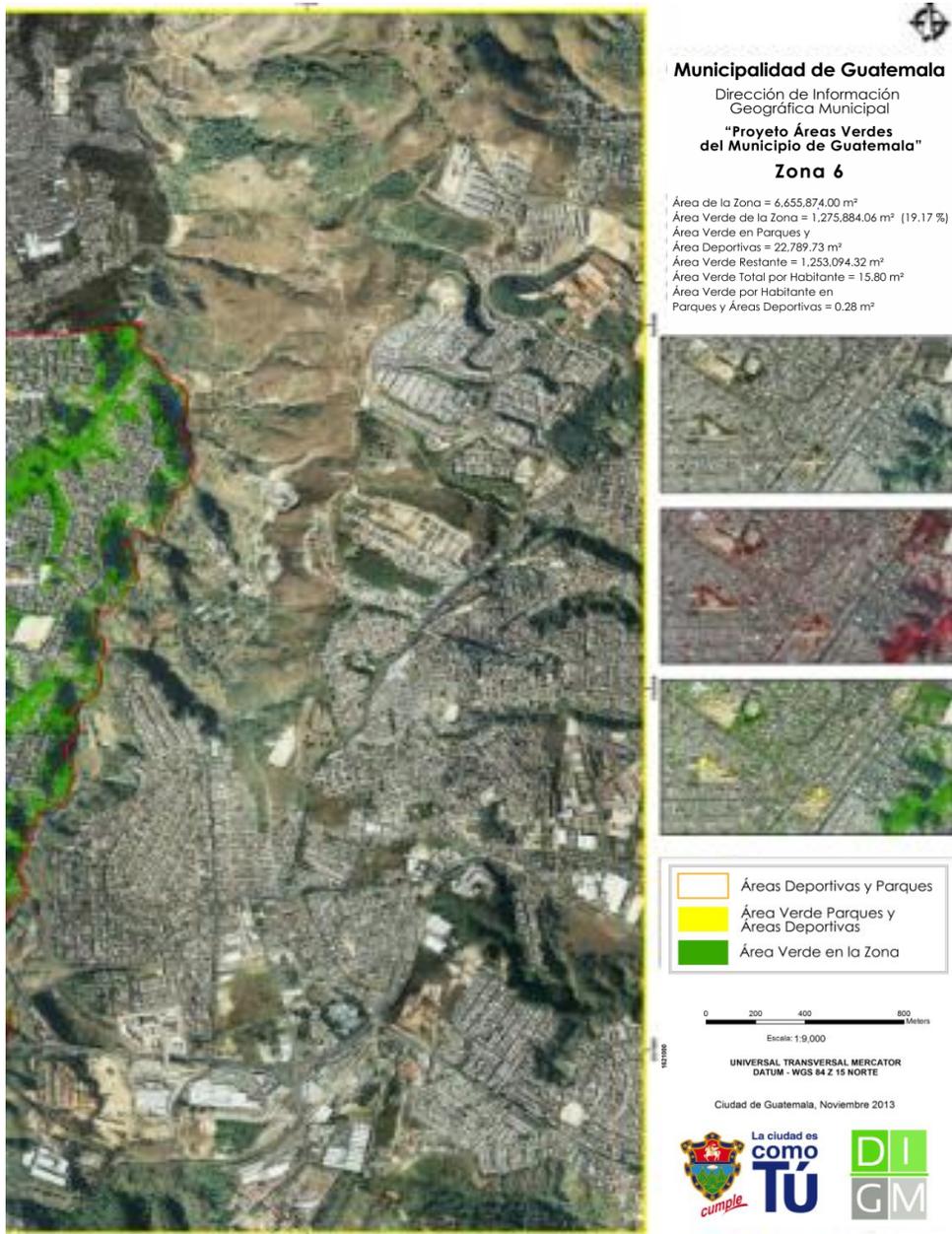
**5.6. Estudio del porcentaje de cubierta permeable e impermeable año 2010, de las zonas 6, 10, 15, 16 y 18 por la Municipalidad de Guatemala**

A continuación, se muestra el resultado del estudio de cubierta vegetal de la Municipalidad de Guatemala, son imágenes obtenidas del 2010. Este estudio no ha sido replicado en años posteriores.

Figura 23. **Visualización de cubierta vegetal de zona 6**

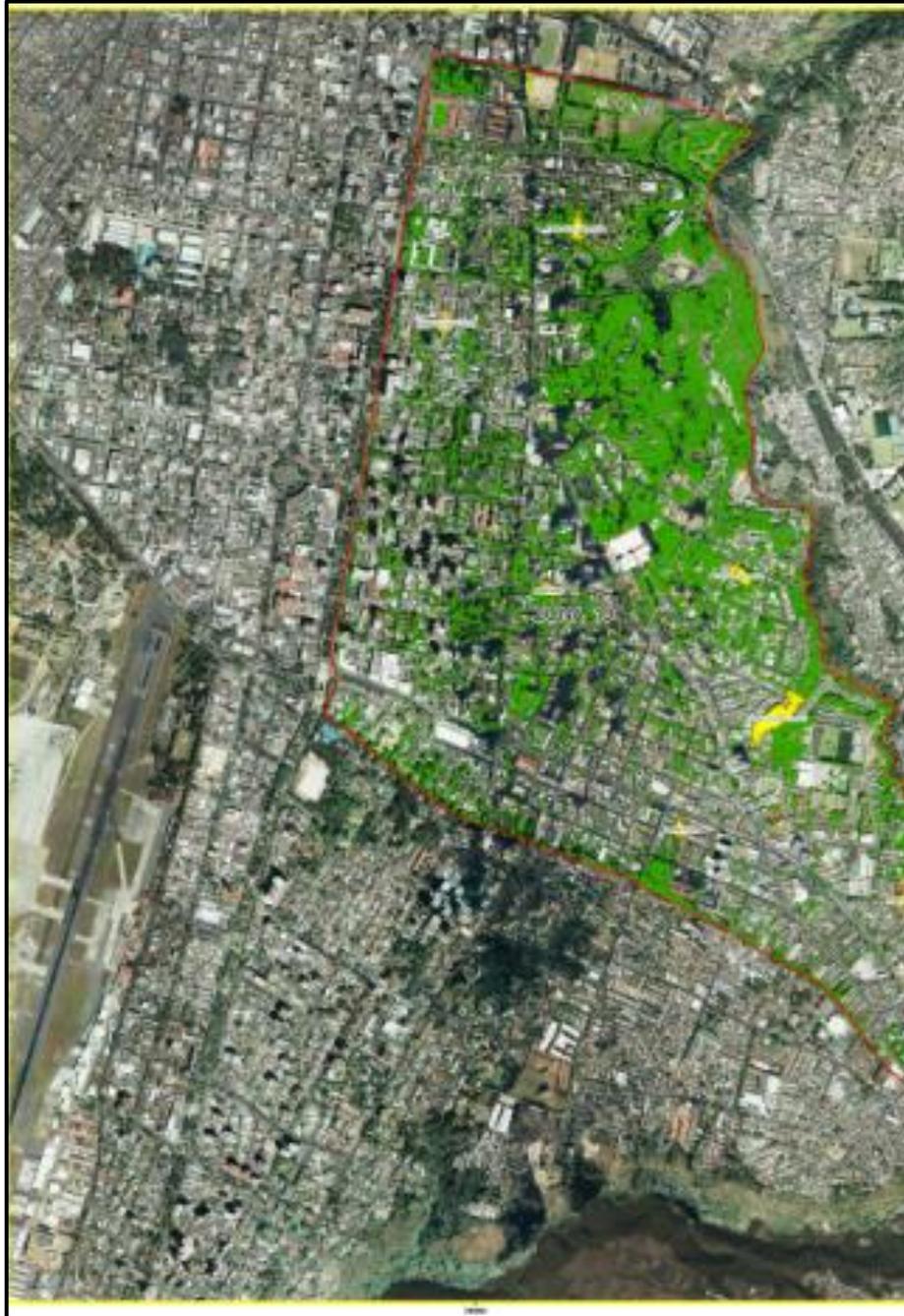


Continuación de la figura 23.

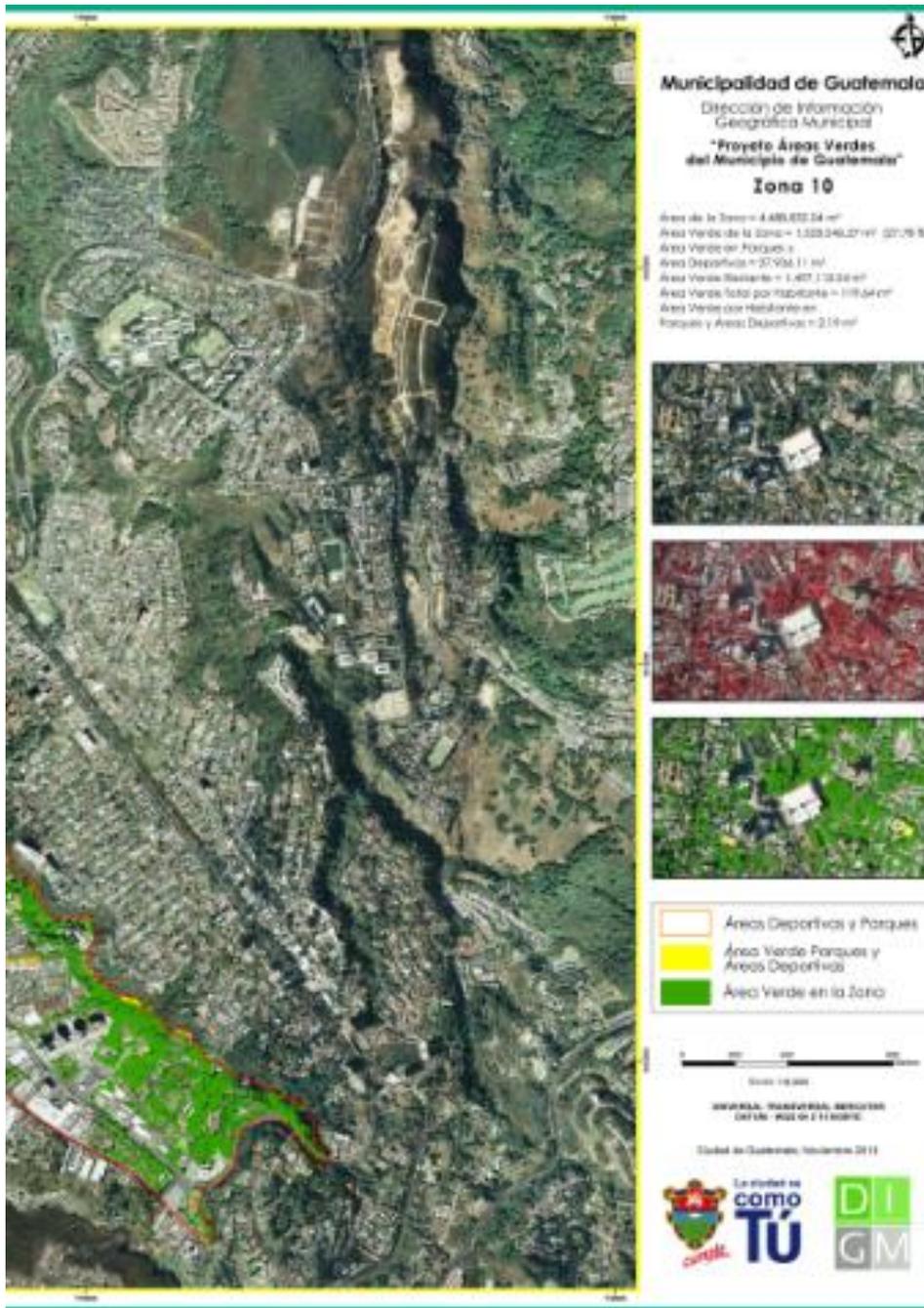


Fuente: Dirección de Información Geográfica Municipal, Municipalidad de Guatemala, 2010.

Figura 24. Visualización de cubierta vegetal de zona 10

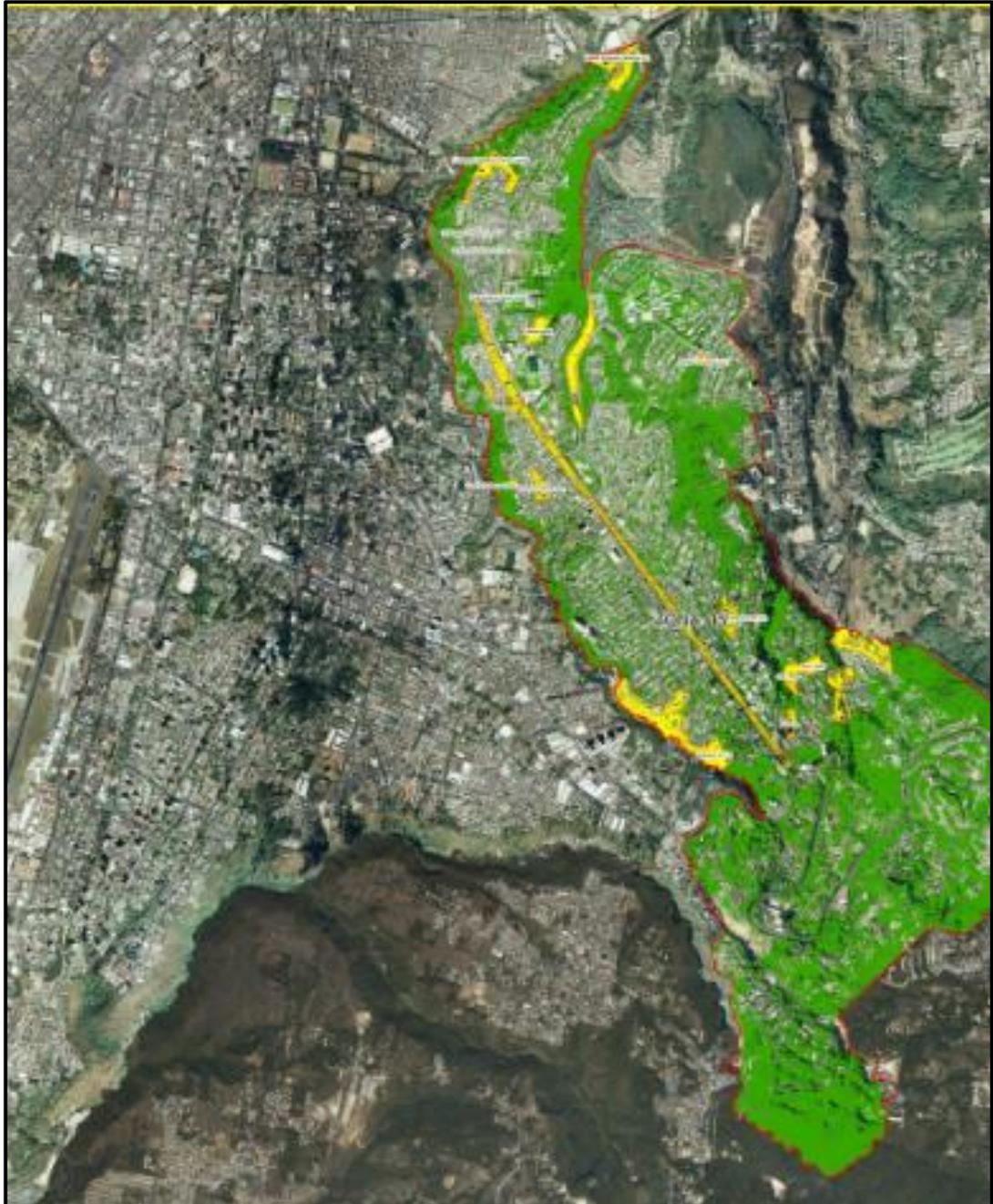


Continuación de la figura 24.

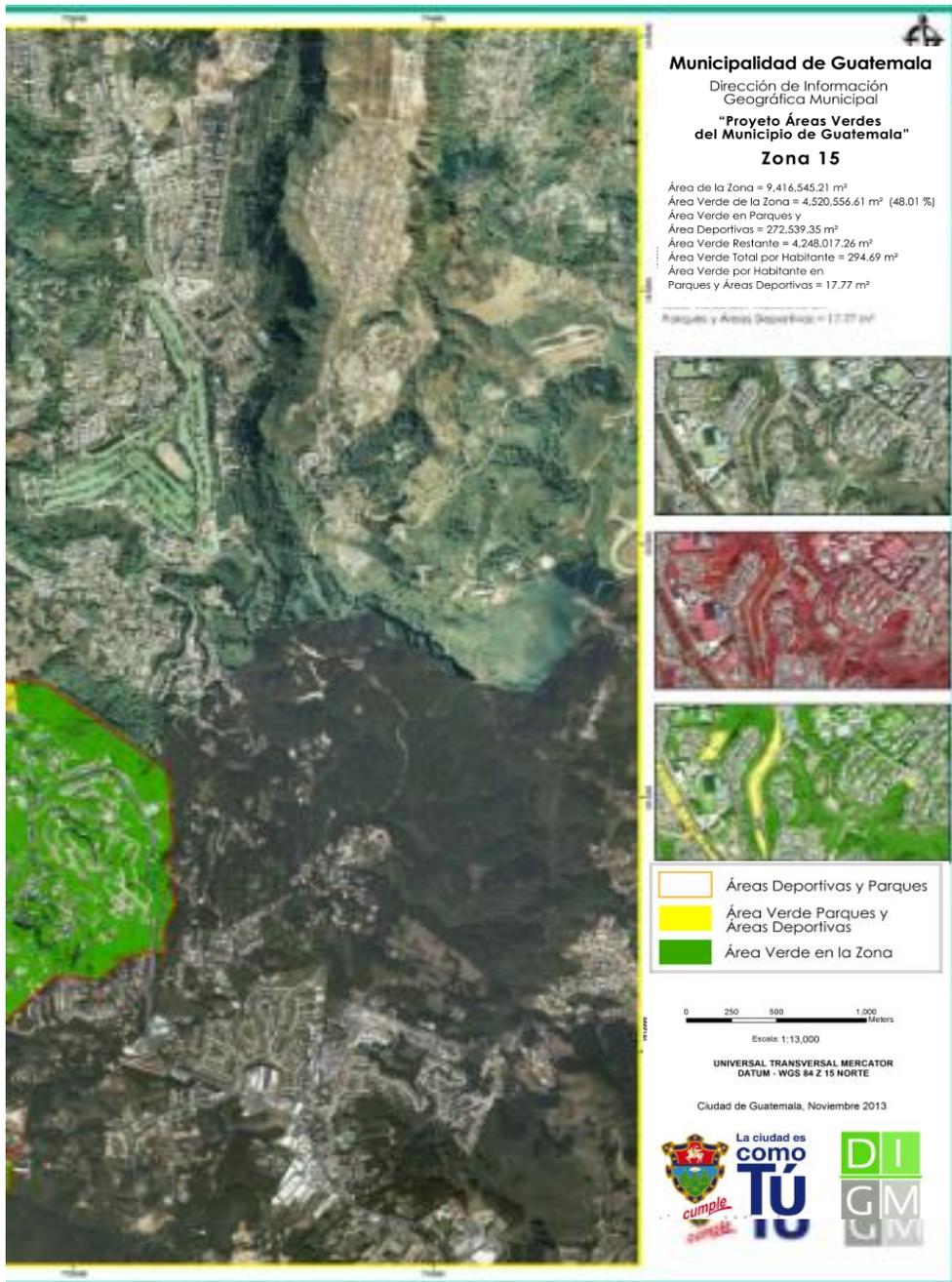


Fuente: Dirección de Información Geográfica Municipal, Municipalidad de Guatemala, 2010.

Figura 25. Visualización de cubierta vegetal de zona 15



Continuación de la figura 25.



Fuente: Dirección de Información Geográfica Municipal, Municipalidad de Guatemala, 2010.

Figura 26. Visualización de cubierta vegetal de zona 16



Continuación de la figura 26.



Fuente: Dirección de Información Geográfica Municipal, Municipalidad de Guatemala, 2010.

Figura 27. **Figura Visualización de cubierta vegetal zona 18**



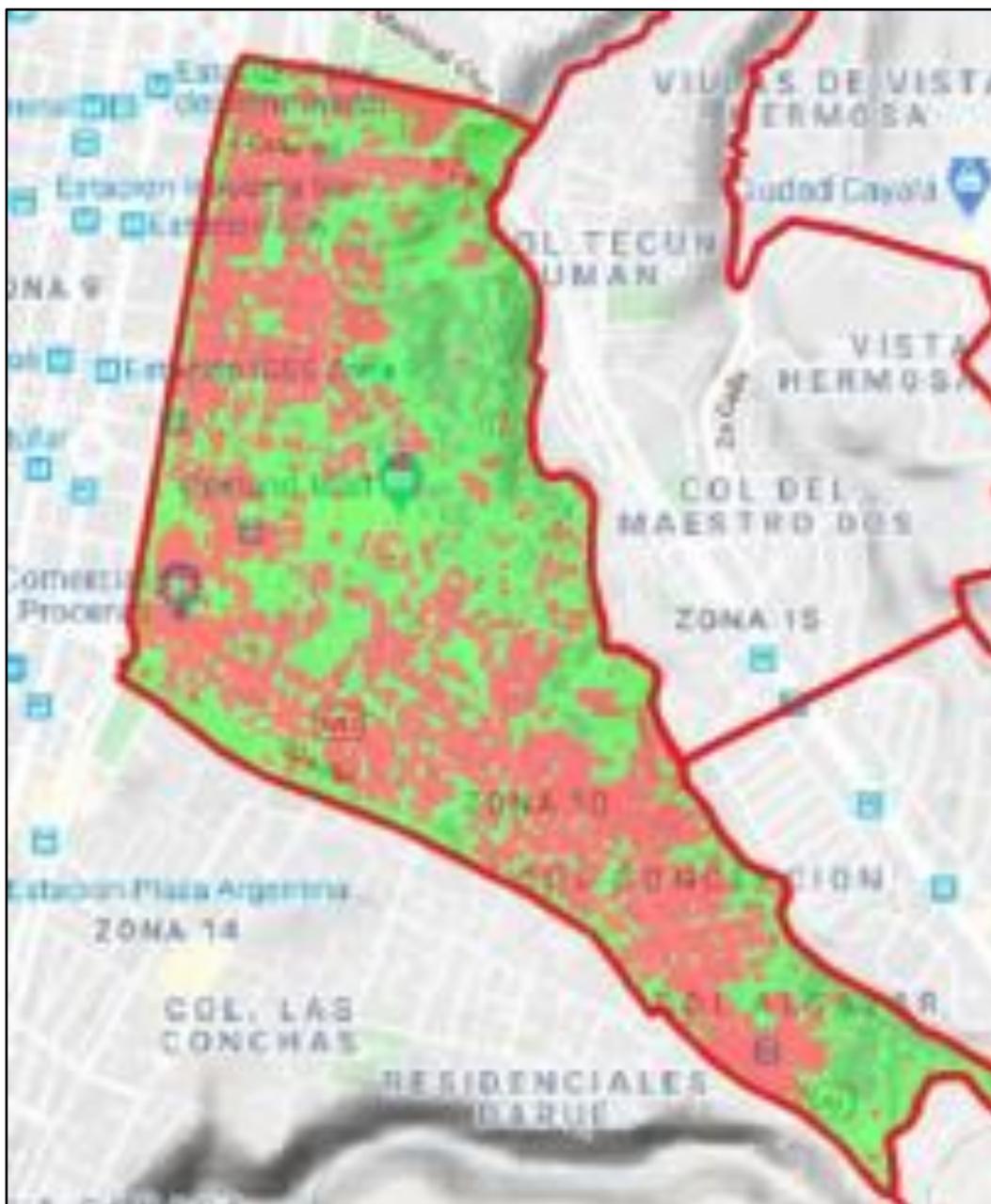
Continuación de la figura 27.



Fuente: Dirección de Información Geográfica Municipal, Municipalidad de Guatemala, 2010.

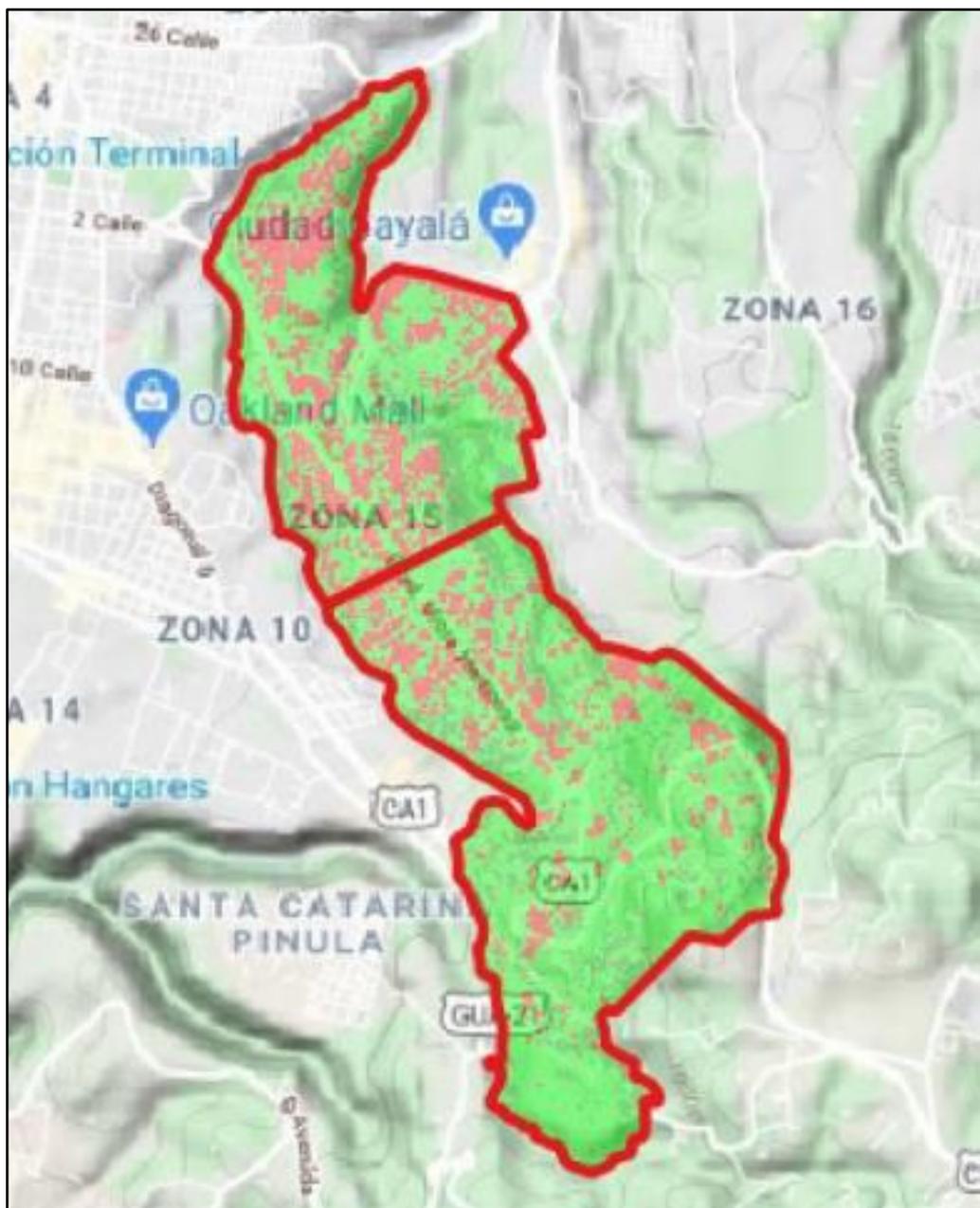


Figura 29. Área impermeable y permeable de la zona 10



Fuente: elaboración propia, empleando Qgis Palmas 2.18.20.

Figura 30. Área impermeable y permeable de la zona 15



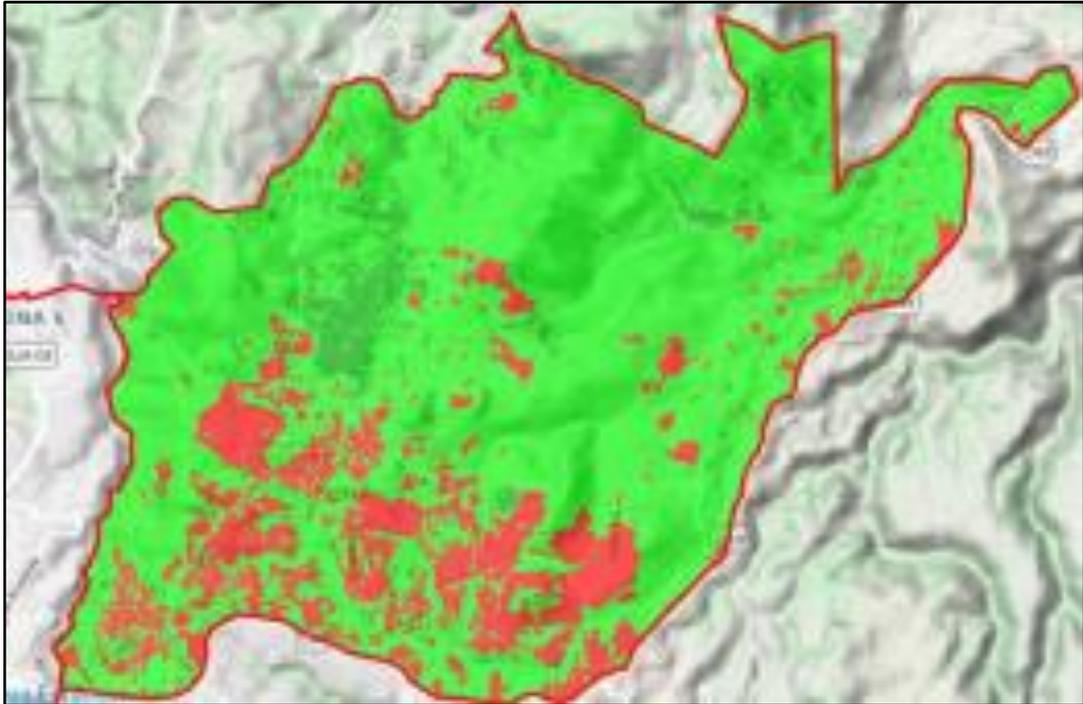
Fuente: elaboración propia, empleando Qgis Palmas 2.18.20.

Figura 31. Área impermeable y permeable de la zona 16



Fuente: elaboración propia, empleando Qgis Palmas 2.18.20.

Figura 32. **Área impermeable y permeable de la zona 18**



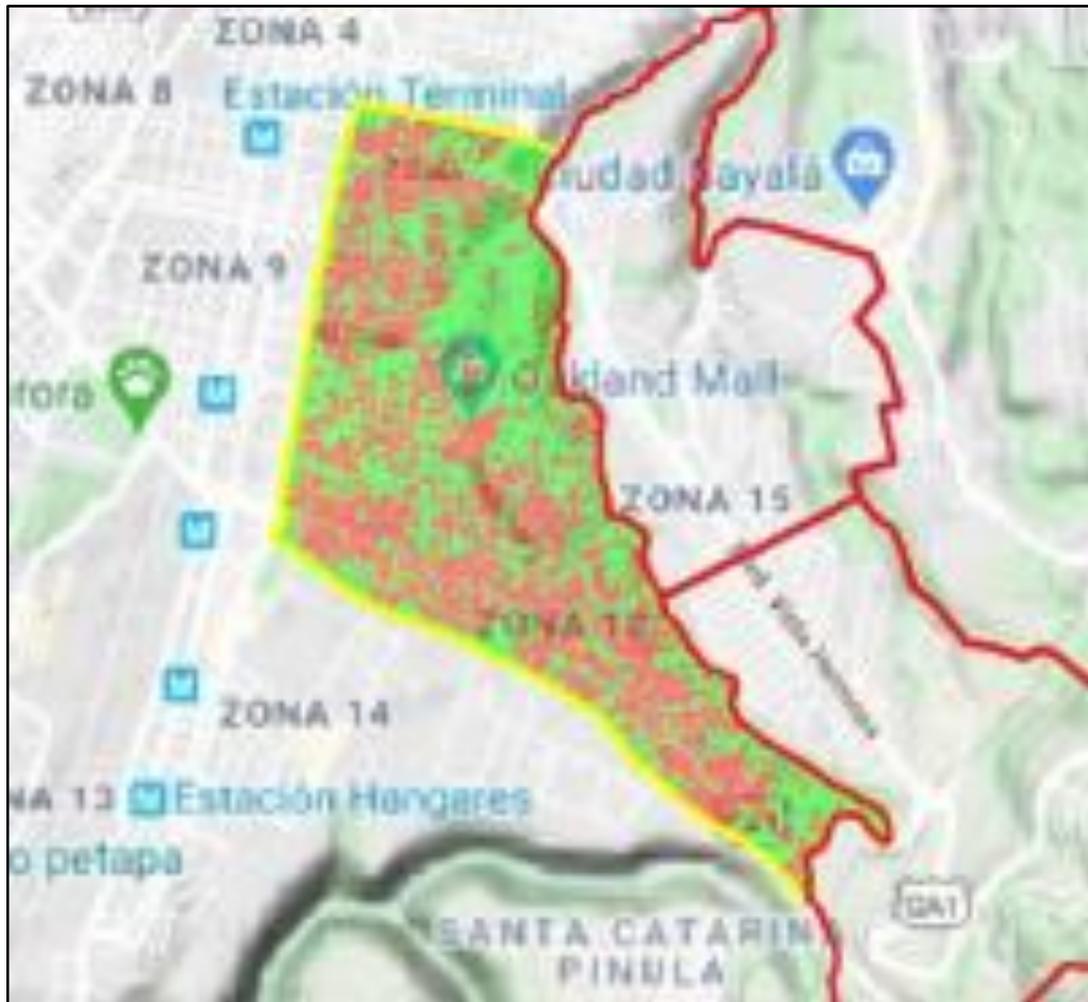
Fuente: elaboración propia, empleando Qgis Palmas 2.18.20.

#### **5.8. Cálculo del porcentaje de cubierta permeable e impermeable del año 2019, de las zonas 6, 10, 15, 16 y 18 usando QGIS**

A continuación, se muestran las gráficas del cálculo del porcentaje de cubierta impermeable para el año 2019.



Figura 34. Área impermeable y permeable de la zona 10



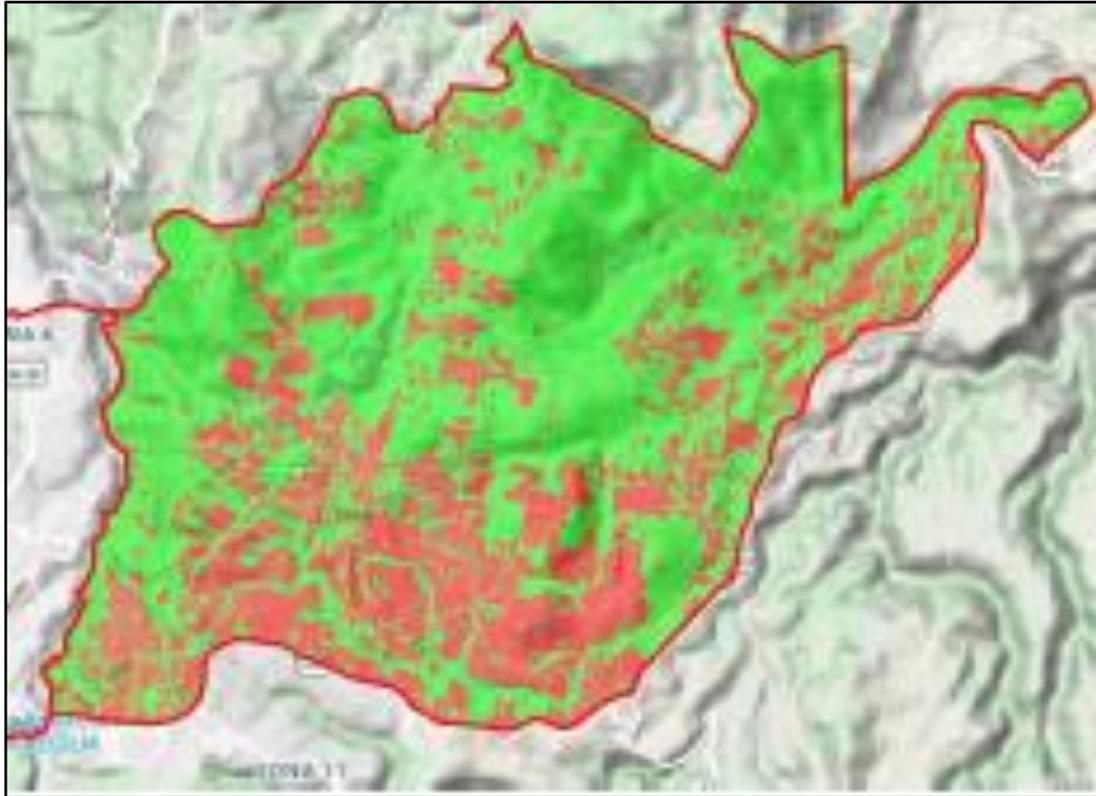
Fuente: elaboración propia, empleando Qgis Palmas 2.18.20.

Figura 35. Área impermeable y permeable de la zona 15



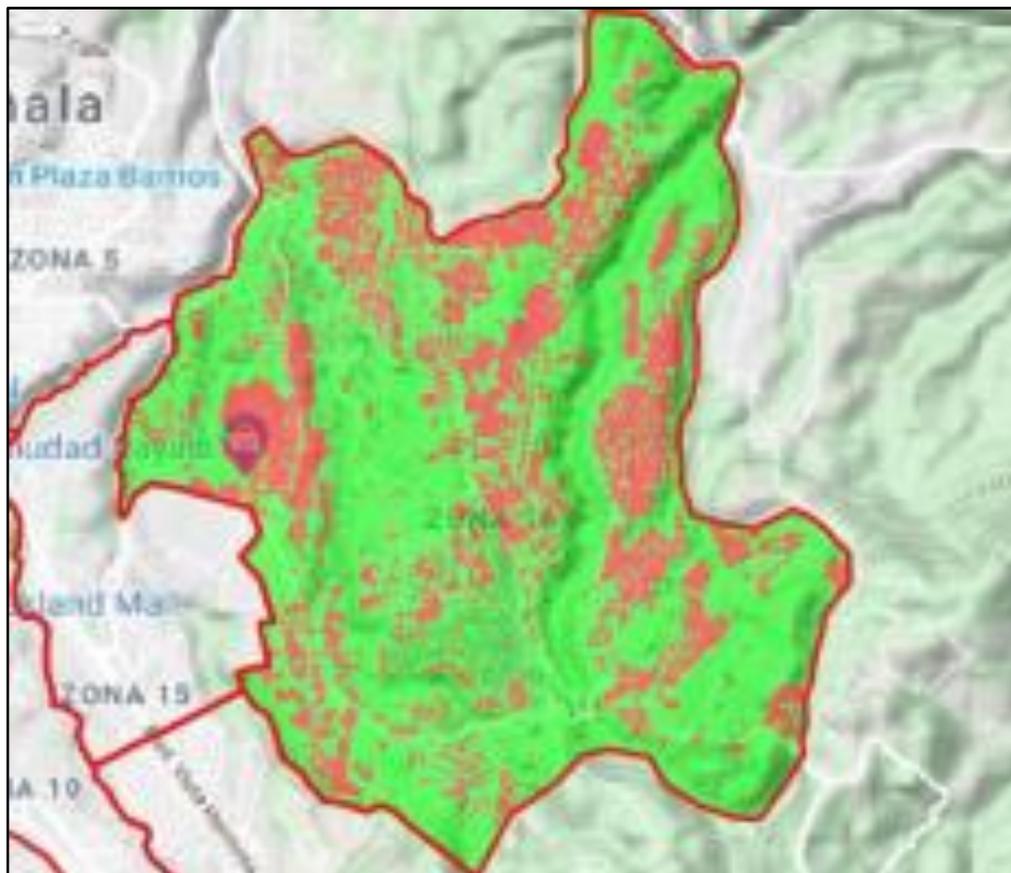
Fuente: elaboración propia, empleando Qgis Palmas 2.18.20.

Figura 36. **Área impermeable y permeable de la zona 16**



Fuente: elaboración propia, empleando Qgis Palmas 2.18.20.

Figura 37. Área impermeable y permeable de la zona 18



Fuente: elaboración propia, empleando Qgis Palmas 2.18.20.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Prueba de Porchet y muestras de suelo

Existe mayor velocidad de infiltración en el pozo C-1 de zona 10, siendo este parte de la subcuenca los Ocotes, que es la que posee mayor capacidad de infiltración de acuerdo con el estudio de prefactibilidad realizado en 1995. También se añade que la composición en infraestructura de esta zona no es cambiante, ya que tiende a ser elevada, en lugar de horizontal.

Tabla XIX. **Velocidad de infiltración de muestras tomadas en 2019**

Ubicación	Zona 6	Zona 10	Zona 15	Zona 16	Zona 18
	N-6	C-1	H-5	C-10	L-2
Fc (cm/hr)	4,910	8,639	5,377	2,608	5,973
Fp (cm/hr)	4,105	8,554	6,779	3,335	6,115
Fc (mm/día)	1.178,400	2 073,360	1 290,480	625,920	1 433,520
Fp (mm/día)	985,200	2 052,960	1 626,960	800,400	1 467,600

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Posibilidad de infiltración y precipitación efectiva del mes de septiembre de 2019**

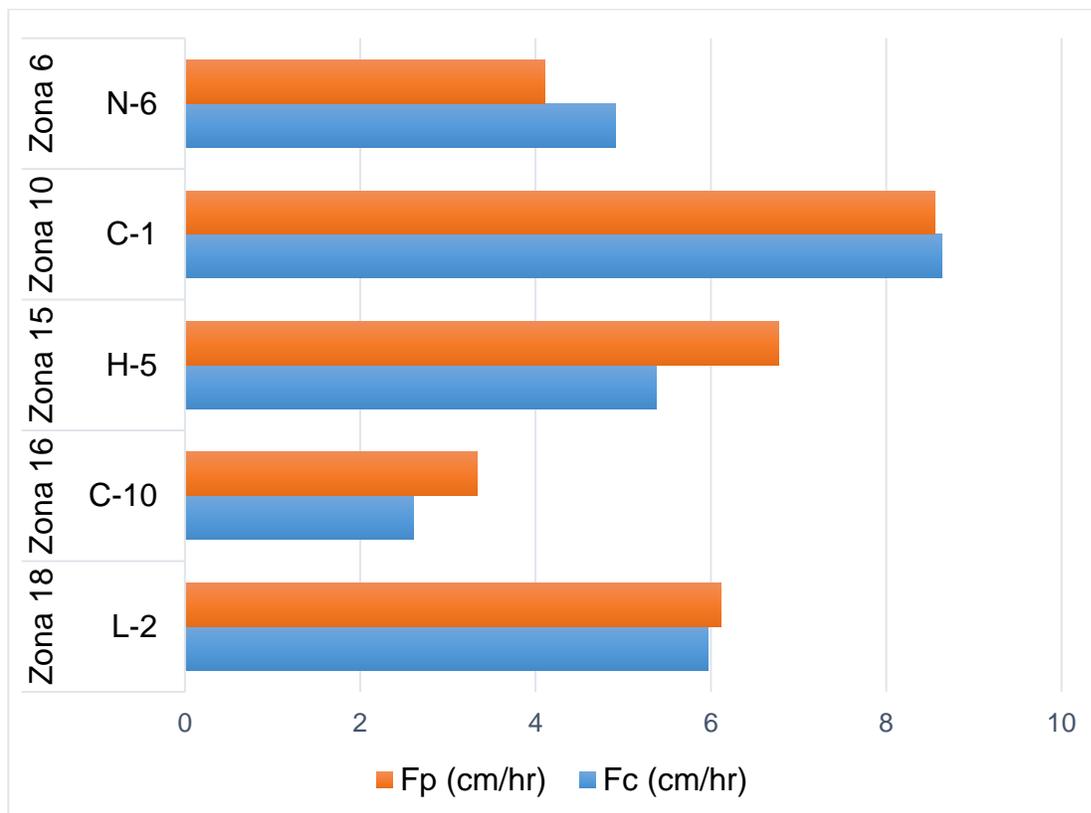
Zona	Posibilidad de infiltración	Ponderación de infiltración	Precipitación efectiva
6	Moderada	3	2,897
10	Moderada	3	2,897

Continuación de la tabla XX.

15	Baja	2	4,245
16	Baja	2	2,897
18	Baja	2	2,897

Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **Velocidad de infiltración inicial vs final**



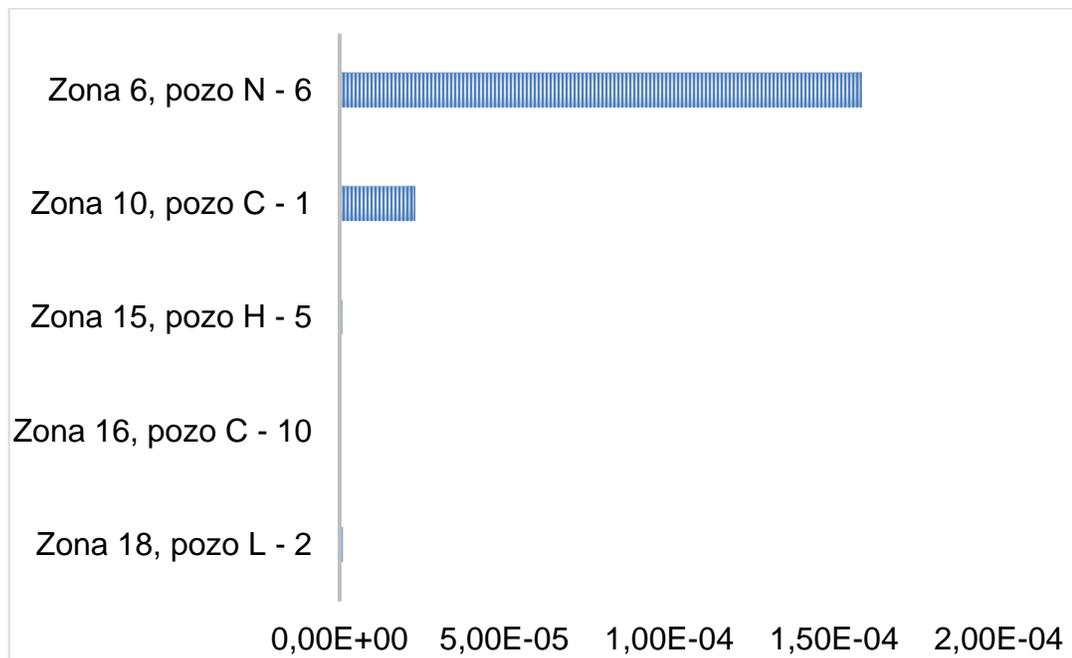
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Comparación ensayo permeabilidad del suelo con la Norma ASTM 2434-68**

Ubicación	Ensayo de permeabilidad (cm/seg)
Zona 18, pozo L - 2	9,93E-07
Zona 16, pozo C - 10	2,13E-07
Zona 15, pozo H - 5	9,90E-07
Zona 10, pozo C - 1	2,30E-05
Zona 6, pozo N - 6	1,58E-04

Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Ensayo de permeabilidad (cm/seg)**



Fuente: elaboración propia.

Se tomó una muestra aleatoria de uno de los pozos que componen cada una de las siguientes zonas: 6, 10, 15, 16 y 18, durante el mes de septiembre. Determinando que la zona 6 posee el coeficiente de permeabilidad más alto, seguido de la zona 10; siendo la que posee una velocidad de infiltración aceptable. Es necesario realizar pruebas con muestras en distintos puntos de una zona y durante los 12 meses del año para obtener un dato más concreto.

De acuerdo con los resultados de la velocidad de infiltración, se determina que las zonas 6 y 10 tienen una velocidad de infiltración moderada. Por otra parte, las zonas 15, 16 y 18 tienen una velocidad de infiltración baja. Este resultado depende de los tipos de suelo de las respectivas zonas

## 6.2. Comportamiento de elementos que intervienen en la escorrentía e infiltración

A continuación, se muestran las comparaciones del comportamiento de precipitación media y evapotranspiración usando como muestra los años seleccionados para este estudio, siendo 2000, 2010 y 2019.

Tabla XXII. **Comportamiento de la precipitación media**

Mes	Precipitación media (mm)		
	2000	2010	2019
Enero	0,0484	0,0000	0,1032
Febrero	0,0000	0,0464	0,1179
Marzo	0,4613	0,0000	0,2032
Abril	1,3633	3,6067	0,8333
Mayo	7,4645	13,8520	1,8742
Junio	10,0370	12,5630	4,0762
Julio	2,0032	10,2390	2,3194

Continuación de la tabla XXII.

Agosto	4,2065	15,1870	7,1226
Septiembre	7,3400	11,4530	7,8967
Octubre	1,3387	0,8645	9,2452
Noviembre	0,4833	0,2133	0,7033
Diciembre	0,0516	0,0000	0,1710

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por el Instituto Nacional de Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH.

Tabla XXIII. **Comportamiento de evapotranspiración**

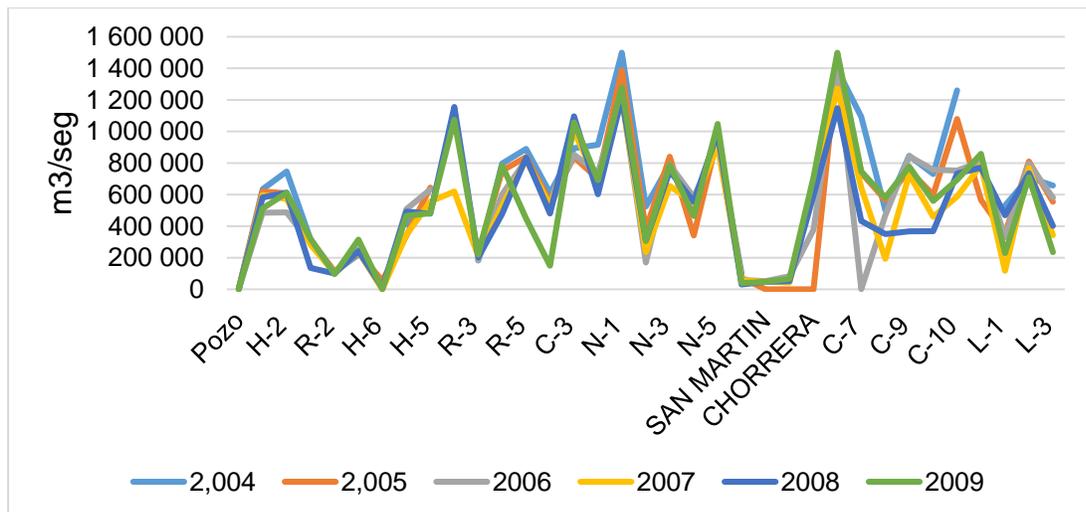
Mes	Evapotranspiración (ETP)		
	Año 2000	Año 2010	Año 2019
Enero	0,051	0,000	0,109
Febrero	0,000	0,049	0,124
Marzo	0,486	0,000	0,214
Abril	1,437	3,802	0,878
Mayo	7,868	14,600	1,976
Junio	10,579	13,242	4,297
Julio	2,112	10,792	2,445
Agosto	4,434	16,008	7,508
Septiembre	7,737	12,072	8,324
Octubre	1,411	0,911	9,745
Noviembre	0,510	0,225	0,741
Diciembre	0,054	0,000	0,180
Promedio	3,057	5,975	3,045

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por el Instituto Nacional de Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH.

### 6.3. Comportamiento de la producción de los pozos entre el año 2000 al 2010

A continuación, se muestra gráficamente el comportamiento de extracción de agua de los pozos del Proyecto Emergencia I brindados por Empagua, del período 2000 al 2010.

Figura 40. Pozos del año 2000 al 2010



Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por el Instituto Nacional de Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH.

Nota: No fue posible graficar todos los datos ya que no se obtuvo la información completa del rango entre el 2010 al 2019.

Tabla XXIV. **Distribución de los pozos, proyecto Emergencia I**

<b>Zona</b>	<b>Pozos activos</b>	<b>Pozos inactivos</b>
<b>6</b>	5	1
<b>10</b>	1	0
<b>15</b>	2	0
<b>16</b>	12	0
<b>18</b>	9	1
<b>Total</b>	29	2

Fuente: elaboración propia.

Actualmente se mantienen suspendida la operación de los pozos N2 en zona 6 y L1 en zona 18.

Tabla XXV. **Pozos con operaciones suspendidas**

<b>Pozo</b>	<b>Ubicación</b>
N2	20 Calle 21-12, Colonia 30 de Junio zona 6
L1	Camino asfaltado al Preventivo Z. 18 (curva antes de llegar al Hospital Neuropsiquiátrico)

Fuente: elaboración propia.

#### **6.4. Determinación de porcentaje de impermeabilidad en km<sup>2</sup>**

A continuación, se muestran los valores del comportamiento de la impermeabilidad durante los años tomados como muestras.

Tabla XXVI. **Zonas impermeable y permeable del año 2000**

<b>Mapeo de áreas impermeables y permeables año 2000</b>					
Área	Zona 6	Zona 10	Zona 15	Zona 16	Zona 18
Impermeable (Km2)	5,81	2,58	2,07	2,96	7,83
Permeable (Km2)	1,45	2,91	7,35	16,79	35,65
Total (Km2)	7,26	5,49	9,42	19,75	43,48
Impermeable (%)	80 %	47 %	22 %	15 %	18 %
Permeable (%)	20 %	53 %	78 %	85%	82 %

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Qgis Palmas 2.18.20.

Tabla XXVII. **Zonas impermeable y permeable del año 2010**

<b>Mapeo de áreas impermeables y permeables año 2010</b>					
Área	Zona 6	Zona 10	Zona 15	Zona 16	Zona 18
Impermeable (Km2)	5,38	2,97	4,90	9,6	26,86
Permeable (Km2)	1,28	1,53	4,52	10,59	16,78
Total (Km2)	6,66	4,49	9,42	19,75	43,64
Impermeable (%)	81 %	66 %	52 %	46 %	62 %
Permeable (%)	19 %	34 %	48 %	54 %	38 %

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Qgis Palmas 2.18.20.

Tabla XXVIII. **Zonas impermeable y permeable del año 2019**

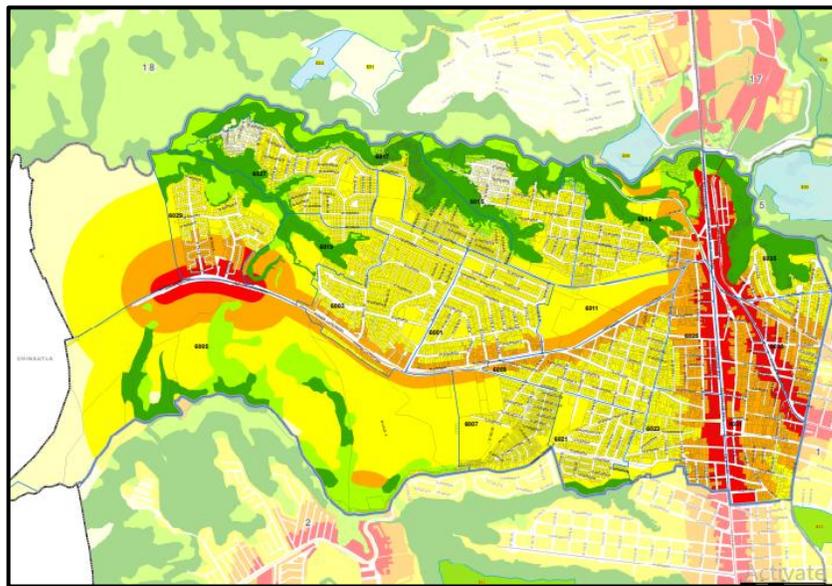
<b>Mapeo de áreas impermeables y permeables año 2019</b>					
Área	Zona 6	Zona 10	Zona 15	Zona 16	Zona 18
Impermeable (Km2)	6,61	2,58	2,45	5,33	26,86
Permeable (Km2)	0,65	2,91	6,97	14,42	16,78
Total (Km2)	7,26	5,49	9,42	19,75	43,64
Impermeable (%)	91 %	47 %	26 %	27 %	32 %
Permeable (%)	9 %	53 %	74 %	73 %	68 %

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Qgis Palmas 2.18.20.

## 6.5. Uso del suelo según el POT en el año 2010

Es necesario conocer la distribución territorial en las zonas estudiadas que fueron planteadas por el Plan de Ordenamiento Territorial, POT.

Figura 41. **Uso del suelo en zona 6**



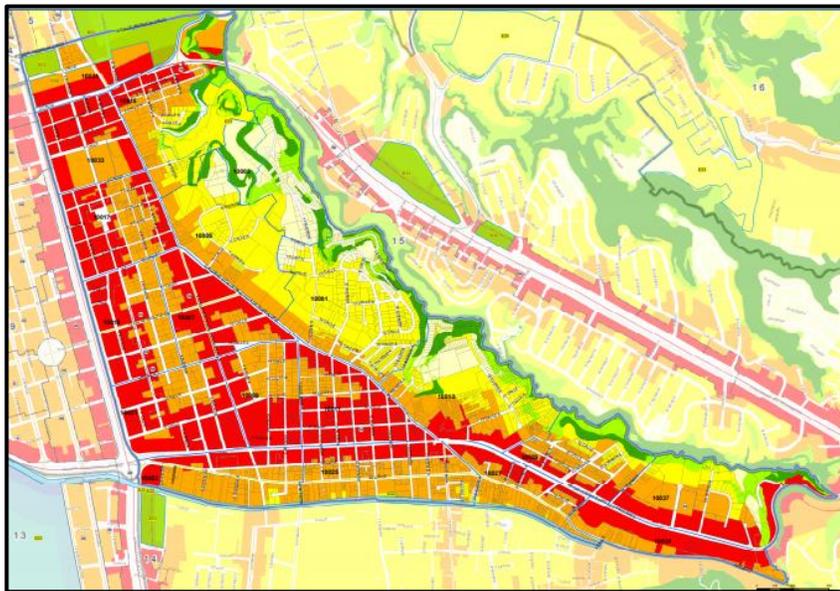
Fuente: Municipalidad de Guatemala, 2010. *Sistema de información geográfica*.  
[http://especiales.muniguate.com/pot2010/mapas/z\\_6.php](http://especiales.muniguate.com/pot2010/mapas/z_6.php). Consulta: 12 de mayo de 2021.

La zona 6 se localiza en el Norte de la Ciudad de Guatemala. Es un sector exclusivamente residencial (ZG3), con pocas áreas recreativas y algunas áreas verdes, Debido a las condiciones topográficas. Sin embargo, los constantes cambios han dado lugar a nuevas necesidades. Se da el fenómeno del aumento en el índice de construcción y la ocupación de los lotes.

Esto ha disminuido las áreas verdes y altera la imagen del paisaje. La mala planificación residencial reduce las necesidades a corto plazo, pero a largo plazo ejerce un impacto ambiental reduciendo los servicios básicos como agua potable.

De acuerdo con la caracterización del tipo de suelo, se determinó que tiene mayor potencial para ser Producción Forestal, seguido de huerto urbano y área de conservación. Siendo estas actividades viables para promover y preservar áreas verdes en zona 6.

Figura 42. **Uso del suelo en zona 10**



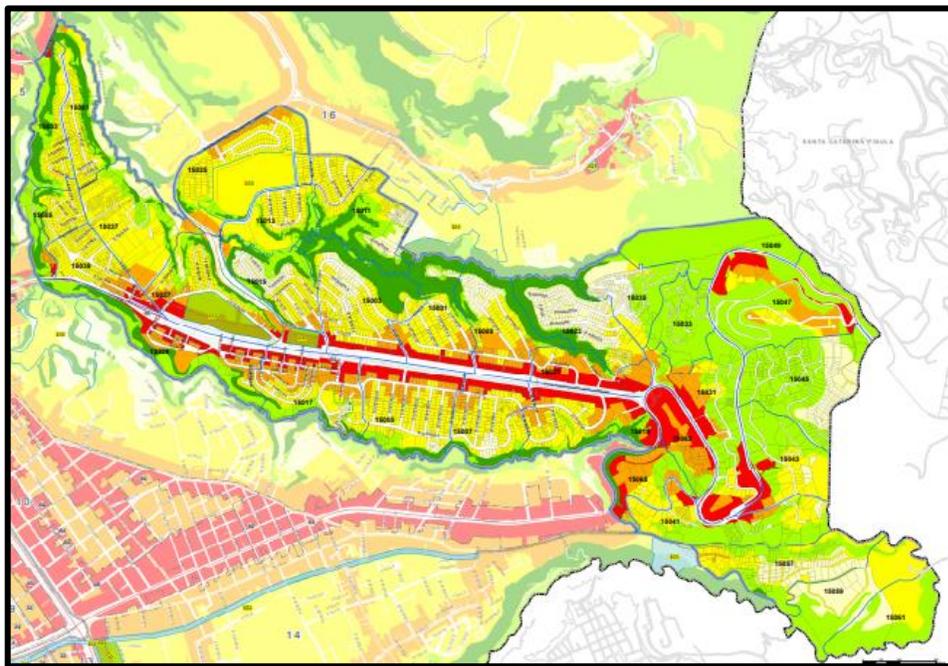
Fuente: Municipalidad de Guatemala, 2010. *Sistema de información geográfica*.  
[http://especiales.muniguate.com/pot2010/mapas/z\\_10.php](http://especiales.muniguate.com/pot2010/mapas/z_10.php). Consulta: 12 de mayo de 2021.

Anteriormente la zona 10 era un área residencial, actualmente es un área mixta, tanto residencial como comercial. La simbología del POT la clasifica en su mayoría como ZG5 y ZG4 siendo en un mayor porcentaje Núcleo y Central

Urbanizado. Debido a la creciente densidad de población los habitantes fueron migrando a regiones lejanas de la centralización urbana.

Las características del terreno de la zona 10 indican un mayor porcentaje de aprovechamiento para área de conservación, luego cultivo perenne y parque natural. Siendo actividades que no se realizan debido a que el terreno se usa exclusivamente para uso residencial y comercial.

Figura 43. **Uso del suelo en zona 15**



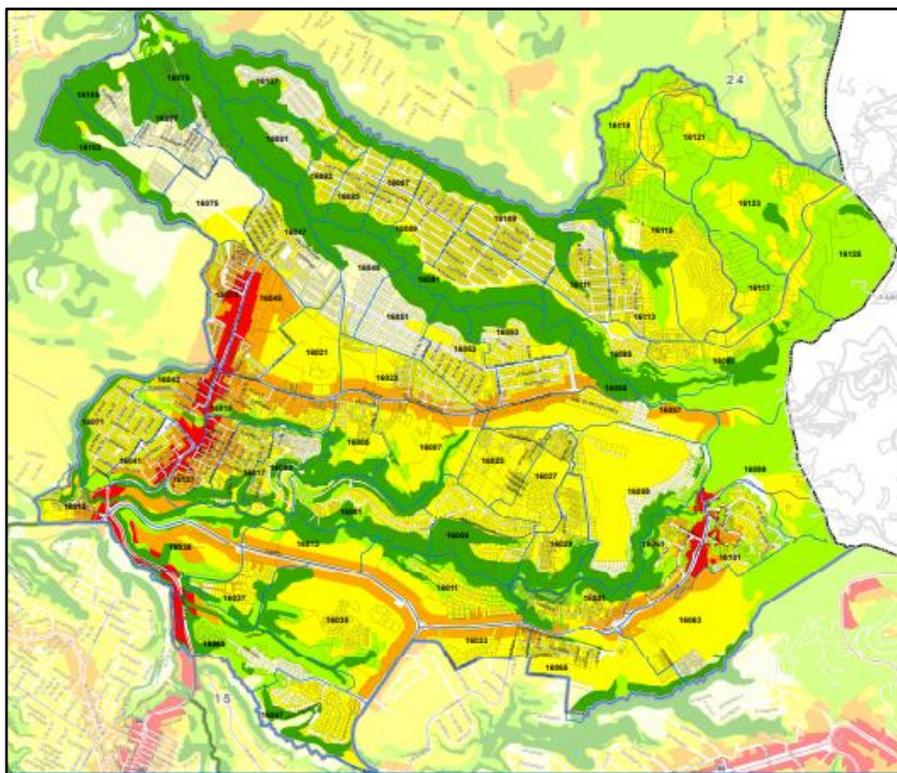
Fuente: Municipalidad de Guatemala, 2010. *Sistema de información geográfica*.  
[http://especiales.muniguate.com/pot2010/mapas/z\\_15.php](http://especiales.muniguate.com/pot2010/mapas/z_15.php). Consulta: 12 de mayo de 2021.

Las zonas 15 y 16 se caracterizan por ser de uso mixto, con una alta cantidad de condominios residenciales, edificios para residencia o comercio.

Ambas zonas se caracterizan por tener una topografía montañosa y boscosa, poseyendo un clima fresco por el porcentaje de área verde que poseen.

La zona 15 posee una caracterización de tipo ZG1 seguida de un tipo ZG2, mostrando un mayor porcentaje de área rural y semiurbana, por lo tanto, posee un mayor potencial para ser área de conservación.

Figura 44. **Uso del suelo en zona 16**



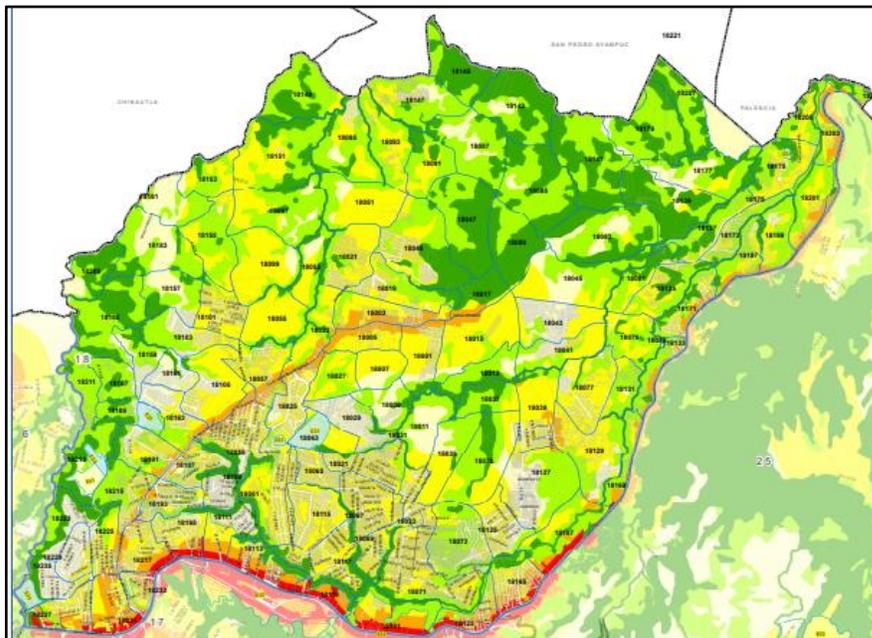
Fuente: Municipalidad de Guatemala, 2010. *Sistema de información geográfica*.

[http://especiales.muniguate.com/pot2010/mapas/z\\_16.php](http://especiales.muniguate.com/pot2010/mapas/z_16.php). Consulta: 12 de mayo de 2021.

Se determinó que la zona 16 en su mayoría es ZG0 seguido de ZG1 y ZG2. Indicando que el mayor porcentaje es área natural, rural y semiurbana. El

territorio posee un alto potencial como área de conservación, producción forestal y de reforestación, al igual que zona 15.

Figura 45. **Uso del suelo en zona 18**



Fuente: Municipalidad de Guatemala, 2010. *Sistema de información geográfica*.  
[http://especiales.muniguate.com/pot2010/mapas/z\\_18.php](http://especiales.muniguate.com/pot2010/mapas/z_18.php). Consulta: 12 de mayo de 2021.

En zona 18 prevalece el uso de suelo para residencia, comercio, industria y en menor medida áreas de reforestación. Esta zona poseía gran variedad de especies arbóreas, pero no en la actualidad, ya que diversas especies fueron extirpadas. Esta zona posee un mayor porcentaje de uso de suelo como área natural (ZG0), seguido de área semiurbana y rural (ZG2 y ZG1).

El potencial del territorio es de cultivo perenne por las características topográficas que presenta, asimismo posee potencial forestal y para ser un área de conservación.



## 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se realiza el análisis de la variación del nivel freático de los pozos en explotación del proyecto Emergencia I, y la relación que existe entre este y la creciente densidad de población, como los requerimientos de servicios relacionados al agua potable, en la Ciudad de Guatemala.

De acuerdo con la caracterización de los sistemas actuales de abastecimiento por agua subterránea mediante pozos de extracción del Proyecto Emergencia I, ubicados en las zonas 6, 10, 15, 16 y 18, se define lo siguiente:

En la subcuenca del río Los Vados (El Chato), Sector Lavarreda-Rodeo, abarca la zona 18 se construyeron 9 pozos. Esta está constituida por un relleno de piroclásticos, calizas blancas, andesitas y riolitas, por lo que es un acuífero favorable. En la zona 18, el 56,9 % de las pendientes son menores al 20 %. Es, pues, un terreno irregular y de extensión mayor. Por ello, el sistema de Empagua distribuyó los pozos construidos en tres áreas distintas, siendo estas:

La distribución El Rodeo, sistema integrado por los siguientes pozos: R3, R4 y R5. Este sistema beneficia a la Colonia Alameda I, las Colonias Paraíso I y II y los asentamientos cercanos.

La distribución Lavarreda, integrada por los siguientes pozos: C3 y Colombia. Este sistema de pozos beneficia a Alameda Norte, Alameda Dos, Alameda Tres y asentamientos cercanos.

La tercera distribución corresponde al pozo R-1. Abarca la Colonia Kennedy, permitiendo abastecer a la Colonia Kennedy y los sectores aledaños. En ella también se encuentran los pozos L-2 y L-3 como complemento.

Por último, del pozo Maya III fue agregado posteriormente a la distribución en zonas establecida por EMPAGUA. Este abastece el área de la Colonia Maya y zonas cercanas.

En los últimos años ha aumentado el crecimiento de asentamiento, debidos a la necesidad de vivienda en la Regencia Norte, disminuyendo el porcentaje de cubierta vegetal en la zona 18 y generando una crisis de agua potable.

Durante el año 2000 el 18 % de esta zona era área impermeable y el 82 % área permeable. Según la municipalidad de Guatemala, en 2010 incrementó al 78 % el área impermeable, y el área permeable era del 22 %.

En la actualidad, sin embargo, según los datos calculados en esta investigación, en la zona 18 sigue creciendo la población y la vivienda. Con el cálculo de imágenes satelitales del año 2019 se determinó un incremento al 32 % y decaimiento al 68 % de área permeable. Con el análisis de las imágenes satelitales de la zona 18 se determinó que posee potencial para promover el cultivo perenne y el área forestal. Está cubierta vegetal puede producirse debido a la topografía del terreno, siendo una respuesta para el mantenimiento de cubierta vegetal.

De acuerdo al estudio de pre-inversión de los pozos, proporcionado por la Corporación Ckc Chuo Kaihatsu, la subcuenca Los Vados poseía una infiltración de 9 Mm<sup>3</sup>/año. Durante el año 2019 en época de lluvia se realizó un ensayo en el pozo L-2 y se determinó una velocidad de infiltración de 5,973 cm/hr

y una capacidad de permeabilidad de  $9,93E-07$  cm/seg. Clasificando, así, como una velocidad moderada en este sector de la zona 18. En el mismo año el pozo más afectado por esta creciente sobreexplotación que genera el aumento de población fue el pozo R-3 del sector El Rodeo.

La subcuenca del río Las Vacas, Sector Norte-Vista Hermosa, abarca las zonas 6 y 15. En zona 6 se construyeron 6 pozos: N-1, N2, N-3, N-4, N-5 y N-6. La zona Norte ésta formada por dos tipos de acuíferos; uno de relleno piroclástico y otro de calizas. La distribución de los pozos es la siguiente: dos pozos en la parte de relleno piroclástico (N1, N2), y cuatro pozos en la parte de relleno con calizas, los cual produce un caudal mayor (N3, N4, N5, N6).

El estudio de pre-inversión muestra que el río Las Vacas tiene una infiltración de  $4,56$  Mm<sup>3</sup>/año, la más baja de las 3 cuencas estudiadas. Con el ensayo de infiltración Porchet del año 2019 se obtuvo un  $4.91$  cm/hr, y una permeabilidad del  $1,58E-04$  cm/hr, siendo una velocidad modera. Durante el mismo año el pozo más afectado por el impacto de impermeabilidad fue el N-3, el cual decayó a una producción de  $8$  L P/S, afectando la parte superior de zona 6.

La zona 6 es una región que ha tenido un comportamiento lineal entre el crecimiento y la necesidad de vivienda. En el año 2000 la zona 6 poseía un  $80$  % de impermeabilidad y un  $20$  % de permeabilidad. Durante el año 2010 aumentó al  $81$  % y  $19$  %, y para el año 2019 avanzo al  $91$  % y  $9$  %, respectivamente. En la parte norte se definió que el  $78,70$  % de las pendientes son menores al  $20$  %, esto indica que en su mayoría es un terreno irregular. Por estas características, la zona 6 tiene un potencial de producción forestal alto, que puede implementarse para el mantenimiento de cubierta boscosa, reduciendo el impacto ambiental.

El sistema de distribución de zona 15 cuenta con 2 pozos de extracción de agua potable, el H4 y H5. En esta zona el 65,12 % de las pendientes son menores al 20 %. El terreno se caracteriza por tener potencial como área de conservación. Al iniciar la extracción de agua potable tenía un 22 % de impermeabilidad y un 78 % de permeabilidad; para el año 2010, existía un 52 % de impermeabilidad y durante el año 2019 incrementó al 26 %.

La zona 15 forma parte de la subcuenca Las Vacas, siendo esta la que posee menor capacidad de infiltración según el dato de pre-inversión del estudio de Empagua. Con el ensayo de Porchet se obtuvo una velocidad de infiltración de 5,377 cm/hr y una capacidad de permeabilidad de 9,90E-07 cm/seg, siendo esta una velocidad moderada. Durante el año 2019 el pozo más afectado por la creciente impermeabilidad fue el H4, con una producción de 8 L P/S.

La subcuenca del Río Los Ocotes, Sector Canalitos, abarca las zonas 16 y 17. En la parte superior del río las Vacas ubica siete pozos de explotación, tres pozos se encuentran en el Norte. El sistema de tres pozos (H1, H2 y H3) es llamado San Gaspar, localizado en el área de Kamajuyú.

El sistema San Gaspar beneficia a los tanques de Acatan, que abarcan las zonas 5 y 16 completas, parcialmente las zonas 1, 4 y 9. En el año 2000 la zona 16 tenía un 18 % de impermeabilidad, para el año 2010 incrementó al 46 % y en 2019 llegó a alcanzar un 27 % de impermeabilidad.

El estudio de pre-inversión de los pozos muestra que la subcuenca Los Ocotes posee la mayor capacidad de infiltración, con un 18 Mm<sup>3</sup>/año. El ensayo de Porchet realizado en el año 2019 determinó 3,335 cm/hr y una capacidad de permeabilidad de 2,13E-07 cm/seg, siendo una velocidad de infiltración moderada.

Con el análisis satelital se observa que la zona 16 es un terreno con mayor porcentaje de área de conservación, al igual que zona 15. Por la viabilidad de la zona se construyeron 12 pozos que también aportan a las zonas aledañas. Para el año 2019 se observa que el pozo más afectado por la creciente impermeabilidad es el R2, con 6 L P/S. Está ubicado en el paso a desnivel Rafael Landívar.

El pozo C1 está ubicado en Ciudad Vieja, zona 10, y forma parte de un sistema independiente que también forma parte de la subcuenca Los Vados. Su producción logra satisfacer la demanda en la red media de esta zona.

La impermeabilización en zona 10 se mantiene constante según los datos obtenidos. En el año 2000 existía un 47 % de impermeabilidad y un 53 % permeabilidad, y durante el año 2019 no hubo variación significativa en los porcentajes de impermeabilidad. Esto se debe a que en zona 10 la tendencia constructiva se ha vuelto vertical



## CONCLUSIONES

1. La Ciudad de Guatemala ha ido sustituyendo el terreno natural, que infiltraba la lluvia gradualmente a los acuíferos, por cubiertas de edificaciones, viviendas y calles. Esto ha provocado que el núcleo urbano posea un suelo impermeable, donde es imposible filtrar el agua. El principal efecto negativo de la impermeabilidad en el suelo es que, al sellar las superficies verdes, se pierde la humedad natural, interrumpiendo el ciclo del agua. Otros efectos adversos son que incrementa la escorrentía en las ciudades, arrastrando grandes cantidades de agua que colapsan el deficiente sistema de alcantarillado, y reduce la infiltración de agua en los acuíferos.
2. Utilizando el sistema de información geográfica GIS, se determinó el porcentaje de incremento de la impermeabilidad. En el año 2000 las zonas 18, 16 y 15 poseían un 18 %, 15 % y 22 % de reducción de terreno natural, respectivamente; las zonas 10 y 6, un 47% y 80 % de impermeabilidad, respectivamente. Esto último, debido a que estas son regiones que tenían alta demanda habitacional para el año 2000. Tras la implementación del reglamento de Plan de Ordenamiento Territorial en la Ciudad Capital, en el año 2019 se incrementó la impermeabilidad en la zona 18, llegando al 32 %. Esto se debe a la constante migración poblacional y al crecimiento desordenado de los asentamientos ilegales. Esto ha causado el colapso de la dotación de agua domiciliar. A lo que se suma la mala planificación de los sistemas de abastecimiento de agua. Por otro lado, las zonas 16 y 15 aumentaron a un 27 % y 26 % de impermeabilidad, respectivamente. Las zonas 15 y 16 de acuerdo con sus características fisiográficas y

presencia de áreas verdes son sectores adecuados que todavía mantienen ciertos niveles de infiltración. Esto ha amortiguado el impacto de la escasez de agua subterránea. Además, poseen 12 pozos construidos por la Municipalidad de Guatemala, y una cantidad no determinada de pozos privados que han costado los habitantes de esta región. La zona 6 es una región que aumentó el área de impermeabilidad al 91 %, siendo una zona casi impermeable y con alto índice poblacional. Esto ha provocado el colapso del sistema de dotación poblacional de agua domiciliar. Por otro lado, la zona 10 no ha variado el porcentaje de 47 % de impermeabilidad, debido a que su tipo de urbanización es con tendencia vertical.

3. Según la representación gráfica de los datos de precipitación del año 2000 al 2010 se mantuvo un ascenso en la precipitación, durante el año 2010 en el mes de agosto se registró la mayor precipitación mensual de 15,19 mm, del año 2010 al 2019 hubo un descenso en la precipitación, siendo de 4,21 mm en el mes de agosto. Durante la época del mes de enero y mayo se generó una mayor producción de extracción de agua de los pozos.
4. Con los datos recopilados se determinó que la zona 16 tiene más potencial para proyectos de infiltración y captación de agua de lluvia. Debido a que posee una velocidad de infiltración moderada y una permeabilidad aceptable por la cantidad de cubierta vegetal con que aún cuenta.
5. El proyecto Emergencia I, de la Empresa Municipal de Agua de la municipalidad de Guatemala ha operado durante 20 años los pozos construidos. Estos han ido disminuyendo su producción al pasar los años, incluso llegando a inhabilitar 2 de los 32 pozos existentes. Las zonas 6 y

15 de la ciudad muestran los pozos con los niveles de producción de agua potable más bajos.

6. El incremento de población y la necesidad de vivienda en la ciudad de Guatemala han sido los factores que han incrementado la urbanización y creación de infraestructura, generando mayor impermeabilidad. Es necesario crear un tratamiento sostenible de áreas verdes mediante infiltración, captación y reutilización de aguas residuales. Aplicando diseños y gestión de la ejecución urbanística sin perjudicar el ciclo del agua. Esto debe garantizar que la mayor cantidad posible de agua de lluvia se recoja, mediante zonas verdes y mejores los sistemas de captación.



## RECOMENDACIONES

1. Proponer un reglamento para la construcción de los pozos privados, dentro del Plan de Ordenamiento Territorial, POT.
2. Proponer proyectos de captación alternativos a la construcción de pozos, como la captación de lluvia.
3. Implementar monitoreos mensuales del nivel de descenso de agua de los acuíferos, para registro histórico y uso en investigaciones. También para planificar futuras perforaciones de pozos privados.
4. Incentivar los estudios y programas preventivos de recarga natural y artificial.
5. Seleccionar correctamente áreas de extracción de agua subterránea, para garantizar un potencial de recarga hídrico de forma equitativa en la ciudad de Guatemala.
6. Colocar puntos de monitoreo meteorológicos en las distintas zonas de la ciudad de Guatemala, ya que el comportamiento es variable en distintos puntos de las zonas.



## BIBLIOGRAFÍA

1. APARICIO MIJARES, Francisco J. *Fundamentos de hidrología de superficie*. 1a ed. México: Limusa, S. A., 1989. 303 p.
2. CHUO, Kaihatsu. *Proyecto de desarrollo del agua subterránea del Valle de la Ciudad de Guatemala. Emergencia I*. Guatemala: Cheo Kaihatsu Corporation, Ingenieros Consultores, 2000. 145 p.
3. Dirección de Planificación Urbana. Municipalidad de Guatemala. *Plan de Ordenamiento Territorial*. [en línea]. <[http://consultas.muniguate.com/consultas/dir\\_servicios](http://consultas.muniguate.com/consultas/dir_servicios)>. Consulta: 9 de marzo de 2021].
4. HERRERA I, Isaac. *Manual de hidrología*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía, 1995. 223 p.
5. JICA - Emergencia I. *Estudio de factibilidad de desarrollo de las aguas subterráneas en el Valle de la Ciudad de Guatemala*. Guatemala: 1986. 86 p.
6. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, MAGA. Unidad de planificación geográfica y gestión de riesgo upggr. *Diagnostico a nivel macro y micro del corredor seco y definición de las líneas estratégicas de acción del MAGA*, 2010. 37 p.

7. MATUS, Silva. *Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa, Nicaragua*. Tesis de Mag. Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas, Escuela de Posgrado. Turrialba. 2007. 186 p.
8. MEJÍA, Dénny. *Plaza Pública. ¿Nos estamos quedando sin agua en el área metropolitana?* [en línea]. <[www.plazapublica.com.gt/multimedia/agua\\_area\\_metropolitana/index.html](http://www.plazapublica.com.gt/multimedia/agua_area_metropolitana/index.html)>. [Consulta: 9 de marzo de 2021].
9. OROZCO, Eugenio Oliverio; PADILLA Tomás; SALGUERO, Marvin. *Metodología para la determinación de áreas de recarga hídrica natural*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía e Instituto Nacional de Bosques, 2003. 106 p.
10. PADILLA, Tomás. *Evaluación del potencial hídrico en la microcuenca del río Cantil, para el aprovechamiento de las aguas subterráneas en la finca Sabana Grande, El Rodeo, Escuintla, Guatemala. Costa Rica*. Tesis MSc. Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas Escuela de Postgrado, Universidad de Costa Rica, 2003. 102 p.
11. SAUBES, Nils. *Balance hidrológico de las subcuencas de la República de Guatemala*. Guatemala: Universidad Rafael Landívar, 2015. 65 p.

12. SCHOSINSKY, Gunther. *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos*. Costa Rica: Escuela Centroamericana de geología / Universidad de Costa Rica, 2007. 18 p.



## APÉNDICES

### Apéndice 1. Capacidad de infiltración de la muestra en zona 18

Prueba lunes 23 de septiembre del 2019

Datos:

Zona 18

Pozo L-2

Tiempo (min)	Tiempo acumulado (min)	Altura (cm)	f (cm/min)	f(cm/hr)	f(estimado)	Error	e <sup>2</sup>
9:40	0	30,00					
9:42	2	20,00	0,15986	9,59144	8,98309	0,60835	0,37009
9:45	7	18,00	0,07195	4,31722	6,02210	-1,70488	2,90662
9:47	14	16,50	0,07896	4,73765	3,54552	1,19213	1,42117
9:50	17	15,00	0,05209	3,12525	2,86750	0,25776	0,06644
9:52	19	14,00	0,04517	2,70991	2,50451	0,20540	0,04219
9:55	22	13,00	0,02225	1,33506	2,06590	-0,73084	0,53413
9:57	24	12,50	0,03955	2,37311	1,83109	0,54202	0,29379
10:00	27	11,50	0,03722	2,23308	1,54735	0,68574	0,47024
10:03	30	10,50	0,01855	1,11291	1,32886	-0,21595	0,04663
10:05	32	10,00	0,01690	1,01403	1,21189	-0,19786	0,03915
10:08	35	9,50	0,01677	1,00650	1,07055	-0,06405	0,00410
10:10	37	9,00	0,01550	0,93026	0,99488	-0,06462	0,00418
10:13	40	8,50	0,01545	0,92677	0,90345	0,02332	0,00054
10:15	42	8,00	0,00574	0,34449	0,85450	-0,51001	0,26011
10:18	45	7,80	0,00852	0,51122	0,79535	-0,28413	0,08073
10:20	47	7,50	0,01334	0,80048	0,76369	0,03680	0,00135
10:23	50	7,00	0,00531	0,31876	0,72542	-0,40666	0,16537
10:25	52	6,80	0,00701	0,42076	0,70494	-0,28418	0,08076
10:30	57	6,50	0,01170	0,70178	0,66694	0,03484	0,00121

Continuación del apéndice 1.

10:33	60	6,00	0,01176	0,70567	0,65092	0,05475	0,00300
10:35	62	5,50	0,01131	0,67876	0,64235	0,03641	0,00133
10:38	65	5,00	0,00453	0,27174	0,63199	-0,36025	0,12978
10:40	67	4,80	0,00649	0,38963	0,62645	-0,23682	0,05608
10:43	70	4,50	0,01087	0,65241	0,61975	0,03266	0,00107
10:45	72	4,00	0,01056	0,63351	0,61616	0,01736	0,00030
10:48	75	3,50	0,01068	0,64057	0,61182	0,02874	0,00083
10:50	77	3,00	0,01041	0,62475	0,60950	0,01525	0,00023
10:53	80	2,50	0,01055	0,63295	0,60670	0,02625	0,00069
10:55	82	2,00	0,04117	2,47009	0,60520	1,86490	3,47784
11:00	87	0,00	0,00000	0,00000	0,60241	-0,60241	0,36290
					46,21078	0,00000	10,82285

Fuente: elaboración propia, empleando datos experimentales.

## Apéndice 2. Capacidad de infiltración de la muestra en zona 16

Prueba martes 24 de septiembre del 2019

Datos:

Zona 16

Pozo C-10

Tiempo (min)	Tiempo acumulado (min)	Altura (cm)	f (cm/min)	f(cm/hr)	f(estimado)	Error	e <sup>2</sup>
4:13	0	30,00					
4:15	2	29,00	0,10364	6,21812	6,28109	-0,06297	0,00397
4:20	7	27,50	0,08575	5,14526	4,63435	0,51092	0,26104
4:25	12	25,80	0,05235	3,14126	3,43804	-0,29678	0,08808

Continuación del apéndice 2.

4:30	17	24,50	0,03367	2,02029	2,56898	-0,54869	0,30106
4:35	22	23,50	0,02907	1,74426	1,93763	-0,19336	0,03739
4:40	27	22,50	0,02574	1,54447	1,47898	0,06550	0,00429
4:45	32	21,50	0,02323	1,39380	1,14579	0,24801	0,06151
4:50	37	20,50	0,02128	1,27666	0,90373	0,37293	0,13908
4:55	42	19,50	0,01375	0,82525	0,72789	0,09736	0,00948
5:00	47	18,80	0,01462	0,87722	0,60015	0,27708	0,07677
5:05	52	18,00	0,00340	0,20427	0,50735	-0,30307	0,09185
5:10	57	17,80	0,01116	0,66957	0,43993	0,22964	0,05273
5:15	62	17,10	0,00906	0,54349	0,39095	0,15254	0,02327
5:20	67	16,50	0,00717	0,42992	0,35538	0,07455	0,00556
5:25	72	16,00	0,00682	0,40935	0,32953	0,07983	0,00637
5:30	77	15,50	0,00260	0,15585	0,31075	-0,15490	0,02399
5:35	82	15,30	0,00620	0,37215	0,29711	0,07503	0,00563
5:40	87	14,80	0,00838	0,50276	0,28720	0,21556	0,04647
5:45	92	14,10	0,00579	0,34756	0,28000	0,06756	0,00456
5:50	97	13,60	0,00448	0,26862	0,27477	-0,00615	0,00004
5:55	102	13,20	0,00433	0,25974	0,27097	-0,01123	0,00013
6:00	107	12,80	0,00419	0,25169	0,26821	-0,01652	0,00027
6:05	112	12,40	0,00407	0,24438	0,26621	-0,02183	0,00048
6:10	117	12,00	0,00396	0,23771	0,26475	-0,02704	0,00073
6:15	122	11,60	0,00386	0,23162	0,26369	-0,03208	0,00103
6:20	127	11,20	0,00377	0,22605	0,26293	-0,03688	0,00136
6:25	132	10,80	0,00648	0,38856	0,26237	0,2619	0,01592
6:30	137	10,10	0,00364	0,21842	0,26196	-0,04354	0,00190
6:35	142	9,70	0,00447	0,26808	0,26167	0,00641	0,00004
6:40	147	9,20	0,00351	0,21085	0,26145	-0,05060	0,00256
6:45	152	8,80	0,00345	0,20720	0,26130	-0,05409	0,00293
6:50	157	8,40	0,00340	0,20385	0,26118	-0,05733	0,00329
6:55	162	8,00	0,00251	0,15031	0,26110	-0,11079	0,01228
7:00	167	7,70	0,00329	0,19723	0,26104	-0,06381	0,00407
7:05	172	7,30	0,00406	0,24376	0,26100	-0,01724	0,00030
7:10	177	6,80	0,00484	0,29060	0,26097	0,02963	0,00088
7:15	182	6,20	0,00321	0,19231	0,26094	-0,06863	0,00471
7:20	187	5,80	0,00317	0,19036	0,26093	-0,07057	0,00498
7:25	192	5,40	0,00314	0,18859	0,26092	-0,07232	0,00523

Continuación del apéndice 2.

7:30	197	5,00	0,00155	0,09313	0,26091	-0,16778	0,02815
7:35	202	4,80	0,00307	0,18408	0,26090	-0,07682	0,00590
7:40	207	4,40	0,00305	0,18281	0,26090	-0,07808	0,00610
7:45	212	4,00	0,00379	0,22760	0,26089	-0,03329	0,00111
7:50	217	3,50	0,00379	0,22738	0,26089	-0,03351	0,00112
7:55	222	3,00	0,00379	0,22737	0,26089	-0,03352	0,00112
8:00	227	2,50	0,00379	0,22757	0,26089	-0,03331	0,00111
8:05	232	2,00	0,00380	0,22800	0,26089	-0,03289	0,00108
8:10	237	1,50	0,01171	0,70271	0,26089	0,44183	0,19521
8:15	242	0,00	0,00000	0,00000	0,26089	-0,26089	0,06806
				0,00000	0,33335	0,26090	1,61517

Fuente: elaboración propia, empleando datos experimentales.

### Apéndice 3. Capacidad de infiltración de la muestra en zona 15

Prueba domingo 13 de octubre del 2019

Datos:

Zona 15

Pozo H-5

Tiempo (min)	Tiempo acumulado (min)	Altura (cm)	f (cm/min)	f(cm/hr)	f(estimado)	Error	e <sup>2</sup>
3:00	0	30,00					
3:05	5	23,00	0,0805	4,8329	4,5393	0,2936	0,0862
3:10	10	21,50	0,0417	2,5002	3,2630	-0,7628	0,5818
3:15	15	20,50	0,0518	3,1084	2,3937	0,7147	0,5108
4:48	20	19,00	0,0148	0,8889	1,8017	-0,9128	0,8332
3:25	25	18,50	0,0393	2,3559	1,3986	0,9574	0,9165
3:30	30	17,00	0,0118	0,7087	1,1240	-0,4153	0,1725
3:35	35	16,50	0,0193	1,1595	0,9370	0,2225	0,0495
9:36	40	15,60	0,0220	1,3180	0,8097	0,5083	0,2584

Continuación del apéndice 3.

3:45	45	14,50	0,0093	0,5595	0,7229	-0,1635	0,0267
3:50	50	14,00	0,0052	0,3120	0,6639	-0,3519	0,1238
3:55	55	13,70	0,0114	0,6838	0,6236	0,0602	0,0036
4:00	60	13,00	0,0109	0,6510	0,5962	0,0548	0,0030
4:05	65	12,30	0,0074	0,4436	0,5776	-0,1339	0,0179
4:10	70	11,80	0,0099	0,5955	0,5649	0,0306	0,0009
4:15	75	11,10	0,0082	0,4925	0,5562	-0,0637	0,0041
4:20	80	10,50	0,0066	0,3961	0,5503	-0,1543	0,0238
4:25	85	10,00	0,0090	0,5381	0,5463	-0,0082	0,0001
4:30	90	9,30	0,0088	0,5261	0,5436	-0,0175	0,0003
4:35	95	8,60	0,0061	0,3671	0,5417	-0,1746	0,0305
4:40	100	8,10	0,0036	0,2139	0,5405	-0,3265	0,1066
10:48	105	7,80	0,0035	0,2073	0,5396	-0,3323	0,1104
4:50	110	7,50	0,0079	0,4741	0,5390	-0,0649	0,0042
4:55	115	6,80	0,0078	0,4700	0,5386	-0,0686	0,0047
5:00	120	6,10	0,0147	0,8805	0,5383	0,3422	0,1171
5:05	125	4,80	0,0092	0,5499	0,5381	0,0118	0,0001
5:10	130	4,00	0,0116	0,6951	0,5380	0,1571	0,0247
5:15	135	3,00	0,0118	0,7096	0,5379	0,1716	0,0295
5:20	140	2,00	0,0250	1,5020	0,5379	0,9641	0,9295
5:25	145	0,00	0,0000	0,0000	0,5378	-0,5378	0,2893
					0,6779	0,0000	5,2598

Fuente: elaboración propia, empleando datos experimentales.

#### Apéndice 4. Capacidad de infiltración de la muestra en zona 10

Prueba viernes 27 de septiembre del 2019

Datos:

Zona 10

Pozo C-1

Tiempo (min)	Tiempo acumulado (min)	Altura (cm)	f(cm/min)	f(cm/hr)	f(estimado)	Error	e <sup>2</sup>
10:35	0	30,00	0,5151	30,9031	30,9068	-0,0037	0,0000
10:40	5	23,50	0,2202	13,2119	13,3642	-0,1523	0,0232
10:45	10	21,00	0,1867	11,2027	9,6419	1,5608	2,4360
10:50	15	19,00	0,0972	5,8337	8,8520	-3,0183	9,1103
10:55	20	18,00	0,1000	6,0004	8,6844	-2,6840	7,2040
11:00	25	17,00	0,1556	9,3349	8,6489	0,6860	0,4706
11:05	30	15,50	0,1077	6,4620	8,6413	-2,1793	4,7493
11:10	35	14,50	0,1111	6,6672	8,6397	-1,9725	3,8908
11:15	40	13,50	0,1736	10,4154	8,6394	1,7760	3,1541
11:20	45	12,00	0,0598	3,5898	8,6393	-5,0495	25,4973
11:25	50	11,50	0,1859	11,1531	8,6393	2,5138	6,3190
11:30	55	10,00	0,0642	3,8533	8,6393	-4,7860	22,9056
11:35	60	9,50	0,0654	3,9253	8,6393	-4,7139	22,2213
11:40	65	9,00	0,1346	8,0779	8,6393	-0,5614	0,3151
11:45	70	8,00	0,0693	4,1586	8,6393	-4,4807	20,0771
11:50	75	7,50	0,1429	8,5726	8,6393	-0,0667	0,0044
11:55	80	6,50	0,2259	13,5531	8,6393	4,9138	24,1454
12:00	85	5,00	0,2415	14,4885	8,6393	5,8492	34,2132
12:05	90	3,50	0,0843	5,0605	8,6393	-3,5788	12,8079
12:10	95	3,00	0,5538	33,2270	8,6393	24,5877	604,5573
12:15	100	0,00	0,0000	0,0000	8,6393	-8,6393	74,6374
					8,8554	0,0008	878,7392

Fuente: elaboración propia, empleando datos experimentales.

Apéndice 5. **Capacidad de infiltración de la muestra en zona 6**

Prueba jueves 26 de septiembre del 2019

Datos:

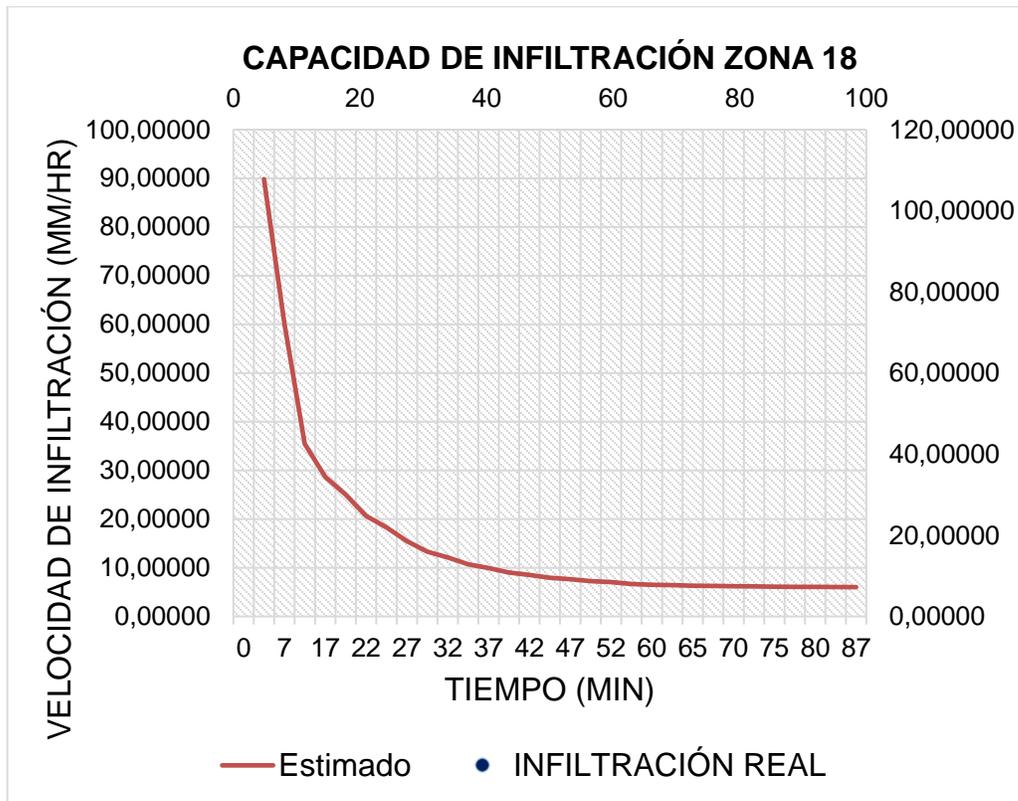
Zona 6

Pozo N-6

Tiempo acumulado (min)	Altura (cm)	f(cm/hr)	f (estimado)	Error	e <sup>2</sup>
0	30,00	38,7301	38,7377	-0,0076	0,0001
5	22,00	38,7301	4,9106	33,8195	1143,7606
10	19,50	38,7301	4,9106	33,8195	1143,7606
15	17,50	38,7301	4,9106	33,8195	1143,7606
20	15,00	38,7301	4,9106	33,8195	1143,7606
25	13,00	38,7301	4,9106	33,8195	1143,7606
30	12,50	38,7301	4,9106	33,8195	1143,7606
35	11,50	38,7301	4,9106	33,8195	1143,7606
40	10,00	38,7301	4,9106	33,8195	1143,7606
45	8,50	38,7301	4,9106	33,8195	1143,7606
50	8,00	38,7301	4,9106	33,8195	1143,7606
55	7,00	38,7301	4,9106	33,8195	1143,7606
60	6,50	38,7301	4,9106	33,8195	1143,7606
65	5,50	38,7301	4,9106	33,8195	1143,7606
70	4,50	38,7301	4,9106	33,8195	1143,7606
75	3,50	38,7301	4,9106	24,1137	581,4697
80	2,50	38,7301	4,9106	24,1137	581,4697
85	0,00	38,7301	4,9106	24,1137	581,4697
			4,9106	545,8069	986,5032

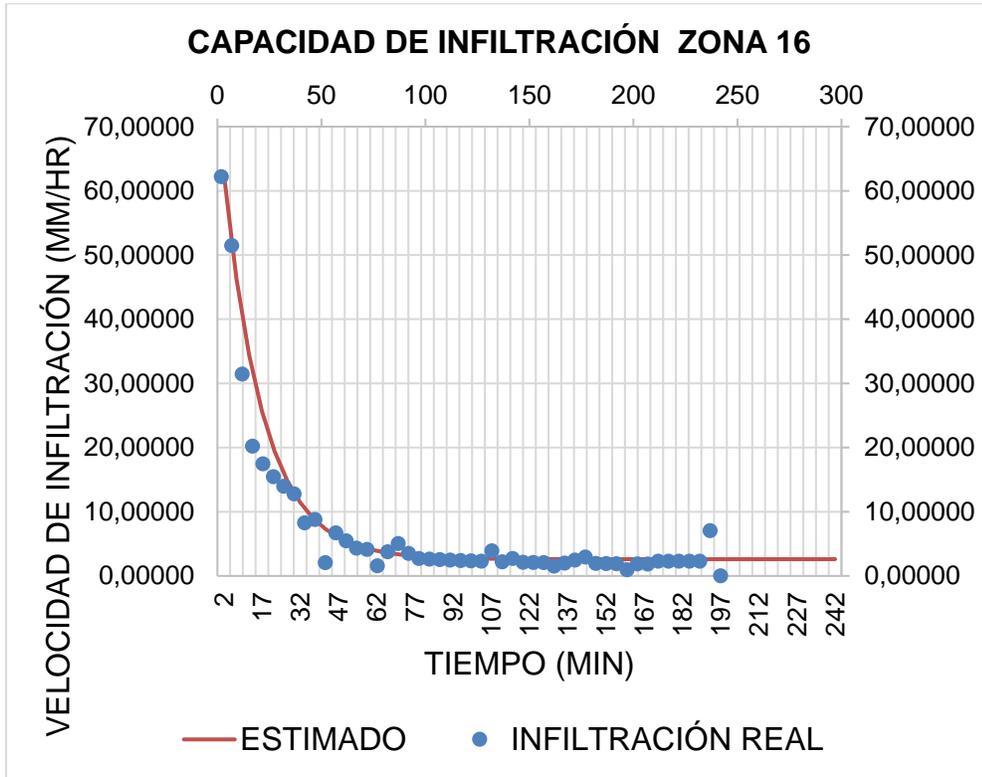
Fuente: elaboración propia, empleando datos experimentales.

Apéndice 6. **Capacidad de infiltración en zona 18, pozo L-2**



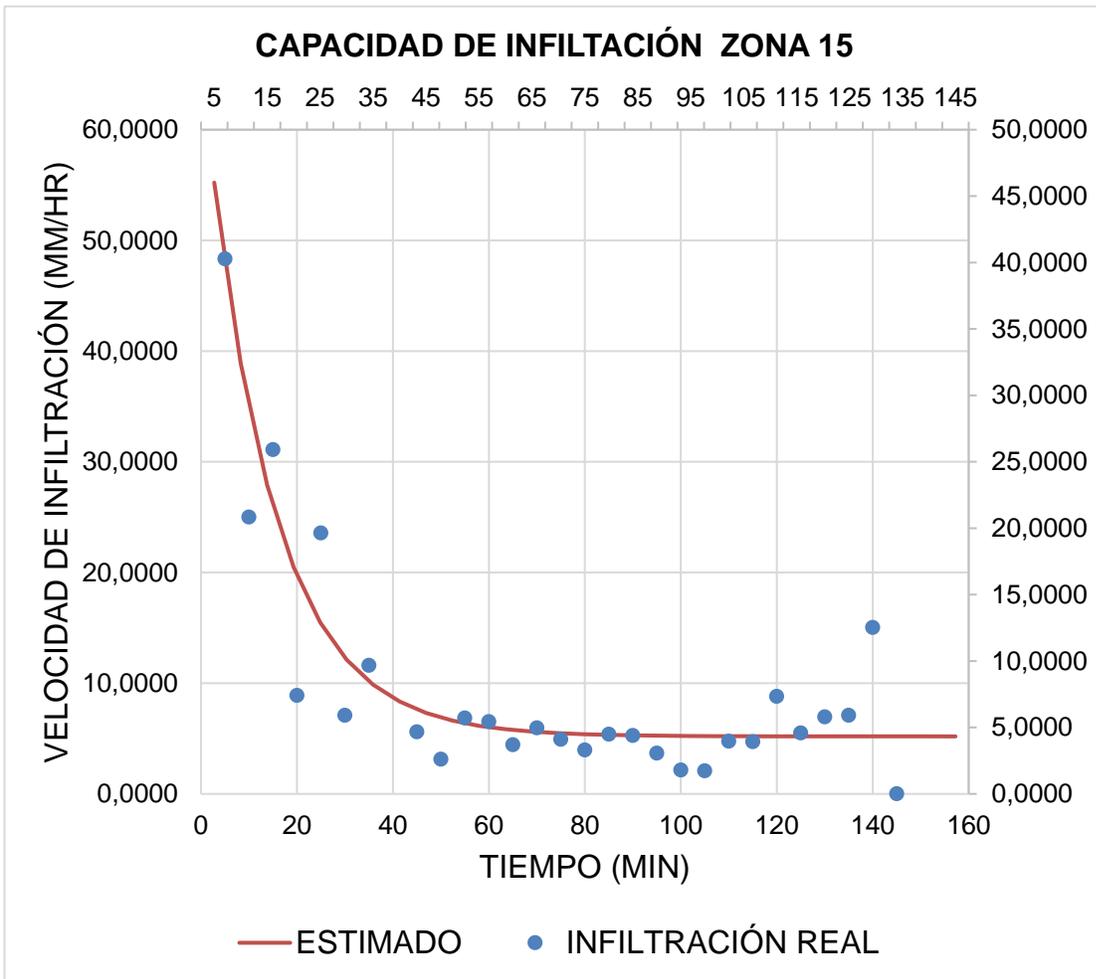
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. Capacidad de infiltración en zona 16, pozo C-10



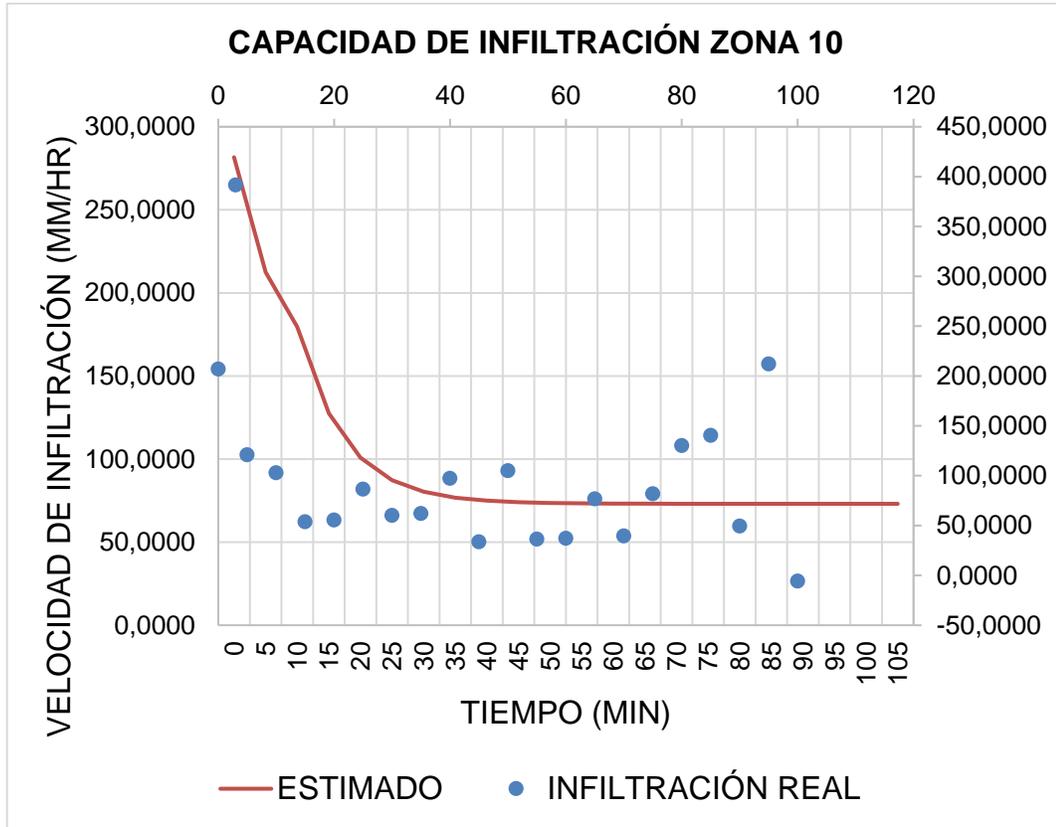
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Capacidad de infiltración en zona 15, pozo H-5**



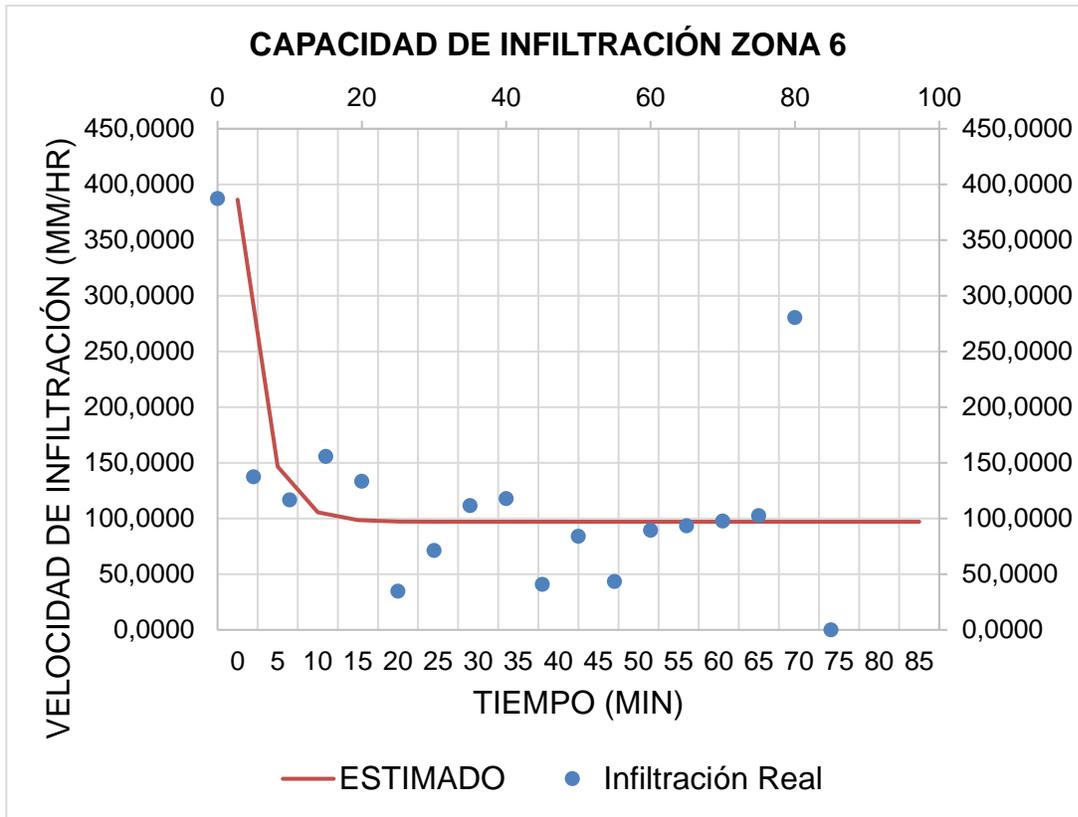
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. Capacidad de infiltración en zona 10, pozo C-1



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Capacidad de infiltración en zona 06, pozo N-6**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Clasificación del tipo de suelo realizada por el Centro de Investigaciones (USAC), año 2019**

Ubicación	Descripción del suelo	Clasificación
Pozo L - 2, Zona 18	Arena limosa con grava color café oscuro	% Grava: 37,59 % Arena: 39,09 % Finos: 23,32
Pozo C - 10, Zona 16	Grava arcillosa con arena color café oscuro	% Grava: 45,49 % Arena: 28,71 % Finos: 25,80
Pozo H - 5, Zona 15	Arena limosa color café oscuro	% Grava: 8,99 % Arena: 57,65 % Finos: 33,36
Pozo C - 1, Zona 10	Arena arcillosa color café oscuro	% Grava: 3,3 % Arena: 52,92 % Fino: 43,76
Pozo N - 6, Zona 6	Arcilla arenosa color café	% Grava: 4,84 % Arena: 42,74 % Finos: 52,42

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Ensayos descripción de muestras de suelo**

Ubicación	Humedad natural	Tipo de suelo	L.L. (%)	I.P. (%)	Clasificación
Zona 6	20,23	Arcilla arenosa color café	36,4	17,5	CL
Zona 10	27,63	Arena arcillosa color café oscuro	32,2	11,6	CL
Zona 15	22,65	Arena limosa color café oscuro	36,1	8,1	ML
Zona 16	23,12	Grava arcillosa con arena color café oscuro	49,8	28	CL
Zona 18	39,60	Arena y grava con limo color café oscuro	45,3	10,2	ML

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Clasificación de pendientes de las zonas estudiadas**

ZONA 18			
Pendientes	Porcentaje	Posibilidad	Ponderación
menor a 20 %	56,93 %	Alta	4
21 % - 25 %	13,87 %	Moderada	3
27 % - 37 %	16,88 %	Moderada	3
38 % - 61 %	11,67 %	Baja	2
mayor 61 %	0,64 %	Muy Baja	1
ZONA 15			
Pendientes	Porcentaje	Posibilidad	Ponderación
menor a 20 %	65,12 %	Alta	4
21 % - 25 %	12,49 %	Moderada	3
27 % - 37 %	14,94 %	Moderada	3
38 % - 61 %	7,93 %	Baja	2
mayor a 61 %	0,03 %	Muy Baja	1
ZONA 6			
Pendientes	Porcentaje	Posibilidad	Ponderación
menor a 20 %	78,70 %	Alta	4
21 % - 25 %	6,64 %	Moderada	3
27 % - 37 %	8,20 %	Moderada	3
38 % - 61 %	6,33 %	Baja	2

Continuación del apéndice 13.

<b>ZONA 16</b>			
Pendientes	Porcentaje	Posibilidad	Ponderación
menor a 20 %	63,71 %	Alta	4
21 % - 25 %	11,58 %	Moderada	3
27 % - 37 %	14,93 %	Moderada	3
38 % - 61 %	9,72 %	Baja	2
mayor a 61 %	0,08 %	Muy Baja	1
<b>ZONA 10</b>			
Pendientes	Porcentaje	Posibilidad	Ponderación
menor a 20 %	93,35 %	Alta	4
21 %-25 %	4,25 %	Moderada	3
27 %-37 %	2,40 %	Moderada	3

Fuente: elaboración propia.

#### Apéndice 14. **Clasificación y ponderación de texturas**

<b>Clasificación y ponderación de texturas</b>			
Zona	Clase	Posibilidad	Ponderación
6	Arcilla arenosa color café	Muy baja	1
10	Arena arcillosa color café oscuro	Baja	2
15	Arena limosa color café oscuro	Moderado	3
16	Grava arcillosa con arena color café oscuro	Alta	4
18	Arena limosa con grava color café oscuro	Moderado	3

Fuente: elaboración propia.

#### Apéndice 15. **Clasificación y ponderación de velocidad de infiltración**

<b>Clasificación y ponderación de velocidad de infiltración</b>		
Zona	Posibilidad	Ponderación
6	Moderada	3
10	Moderada	3
15	Moderada	3
16	Moderada	3
18	Moderada	3

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. **Clasificación y ponderación de la geología de suelos**

Zona	Tipo de roca	Posibilidad de recarga	Ponderación
6	Poco permeable	Baja	2
10	Poco permeable	Baja	2
15	Impermeable	Muy baja	1
16	Impermeable	Muy baja	1
18	Impermeable	Muy baja	1

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17. **Clasificación y ponderación para cobertura vegetal**

Clasificación y ponderación para cobertura vegetal			
Zona	Porcentaje año 2000	Posibilidad de recarga	Ponderación
6	20	Muy baja	1
10	53	Moderada	3
15	78	Alta	4
16	85	Muy alta	5
18	82	Muy Alta	5
Zona	Porcentaje año 2010	Posibilidad de recarga	
6	19	Muy baja	1
10	34	Baja	2
15	48	Baja	2
16	54	Moderada	3
18	28	Muy baja	1
Zona	Porcentaje año 2019	Posibilidad de recarga	
6	9	Muy baja	1
10	53	Moderada	2
15	74	Alta	4
16	73	Alta	4
18	68	Moderada	3

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 18. **Clasificación y ponderación del uso de suelo**

Clasificación y ponderación del uso de suelo			
Zona	Uso de suelo	Posibilidad de recarga	Ponderación
6	Terreno cultivado sin obras de conservación	Baja	2
10	Terreno cultivado con obras de conservación	Moderada	3

Continuación con el apéndice 18.

15	Terreno cultivado con obras de conservación	Moderada	3
16	Terreno cultivado con obras de conservación	Moderada	3
18	Terreno agropecuario con manejo intensivo	Muy baja	1

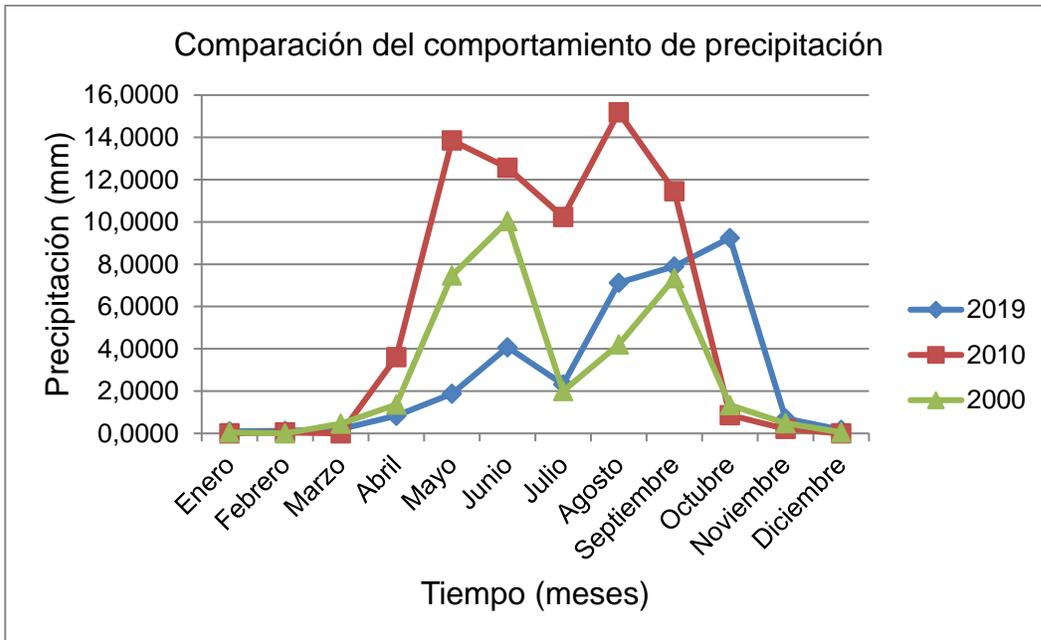
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 19. **Comparativa de precipitación media**

Mes	Precipitación media (mm)		
	2019	2010	2000
Enero	0,1032	0,0000	0,0484
Febrero	0,1179	0,0464	0,0000
Marzo	0,2032	0,0000	0,4613
Abril	0,8333	3,6067	1,3633
Mayo	1,8742	13,8516	7,4645
Junio	4,0762	12,5633	10,0367
Julio	2,3194	10,2387	2,0032
Agosto	7,1226	15,1871	4,2065
Septiembre	7,8967	11,4533	7,3400
Octubre	9,2452	0,8645	1,3387
Noviembre	0,7033	0,2133	0,4833
Diciembre	0,1710	0,0000	0,0516

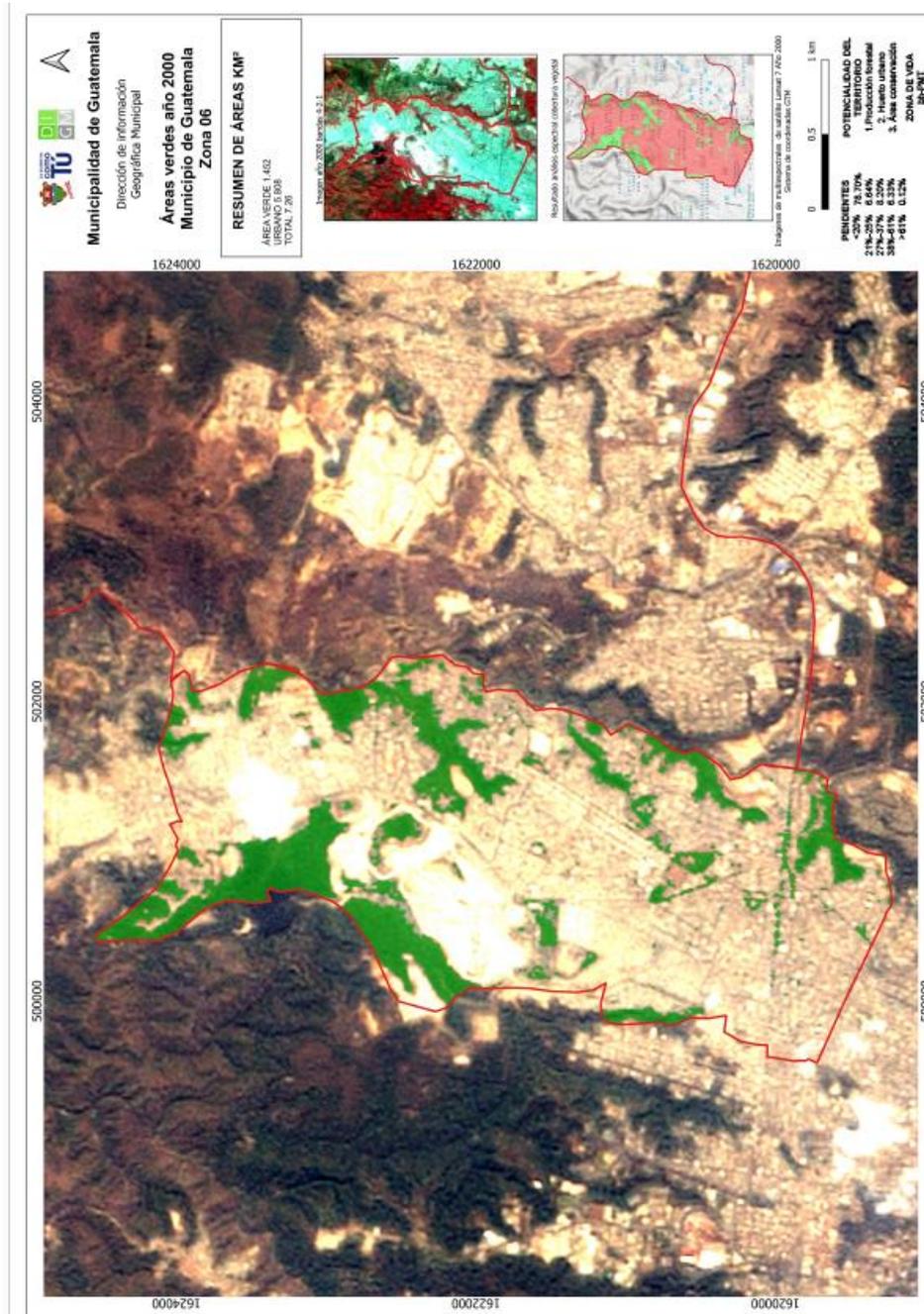
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 20. **Comparación de los comportamientos de precipitación**



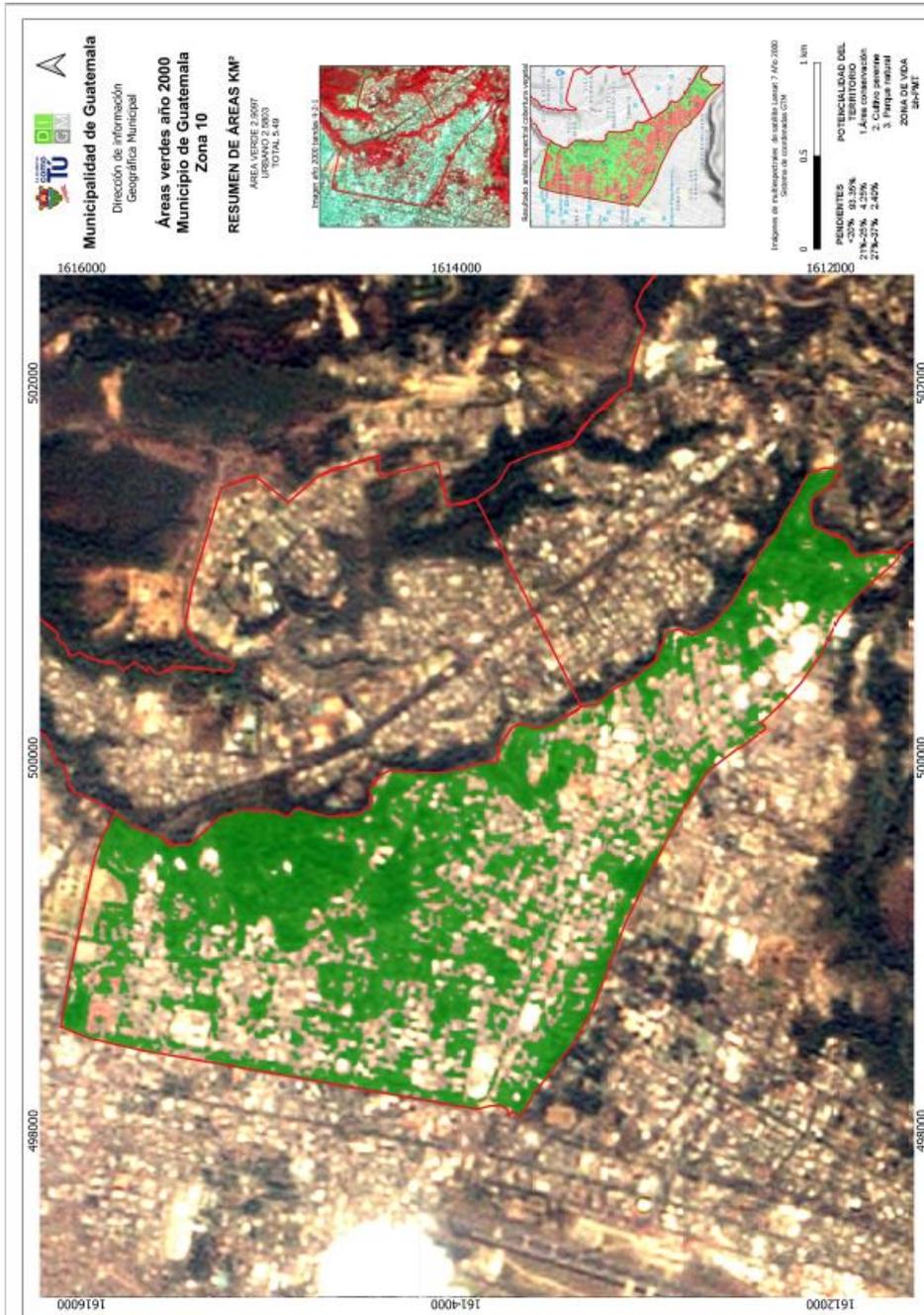
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 21. Cálculo de área verde en zona 06 para el año 2000



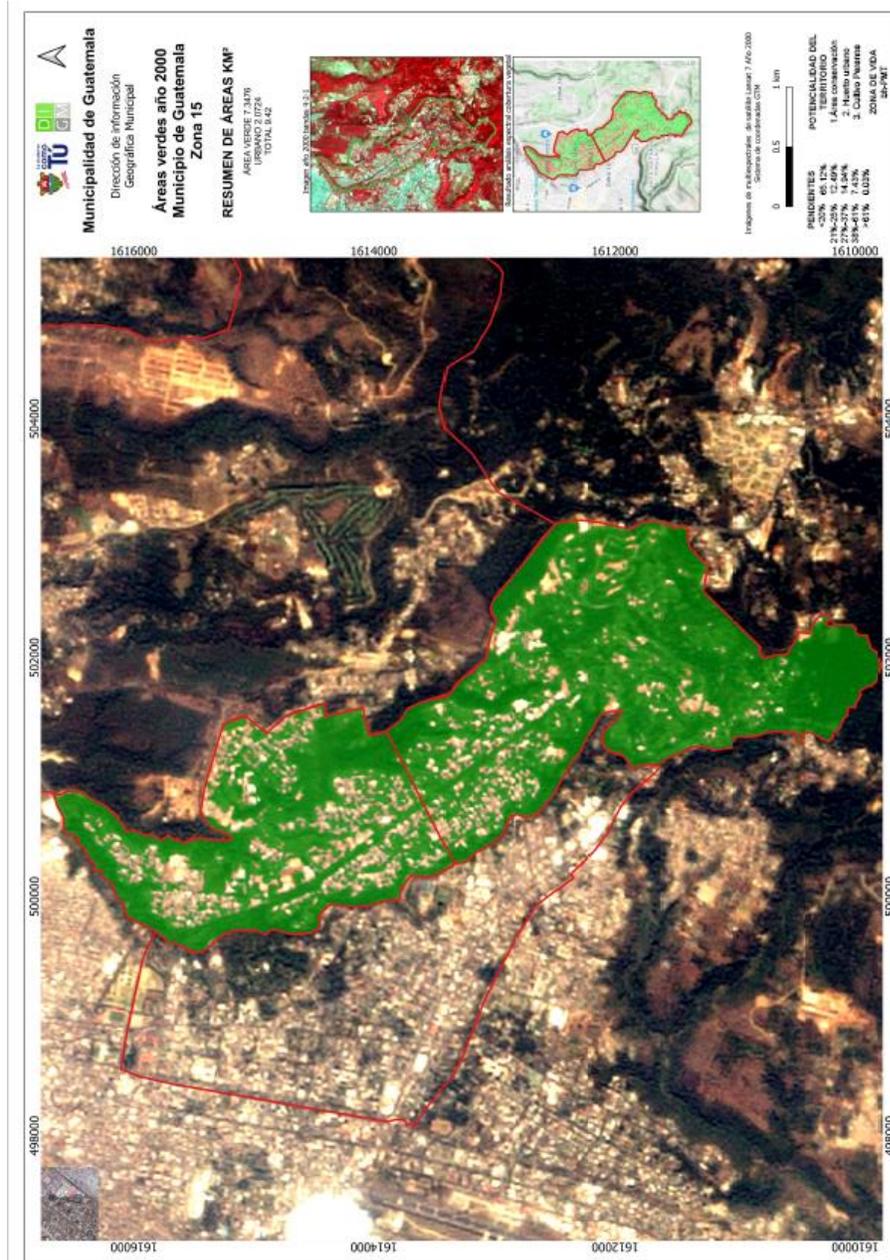
Fuente: elaboración propia, empleando Qgis Palmas 2.18.20.

Apéndice 21. Cálculo de área verde en zona 10 para el año 2000



Fuente: elaboración propia, empleando Qgis Palmas 2.18.20.

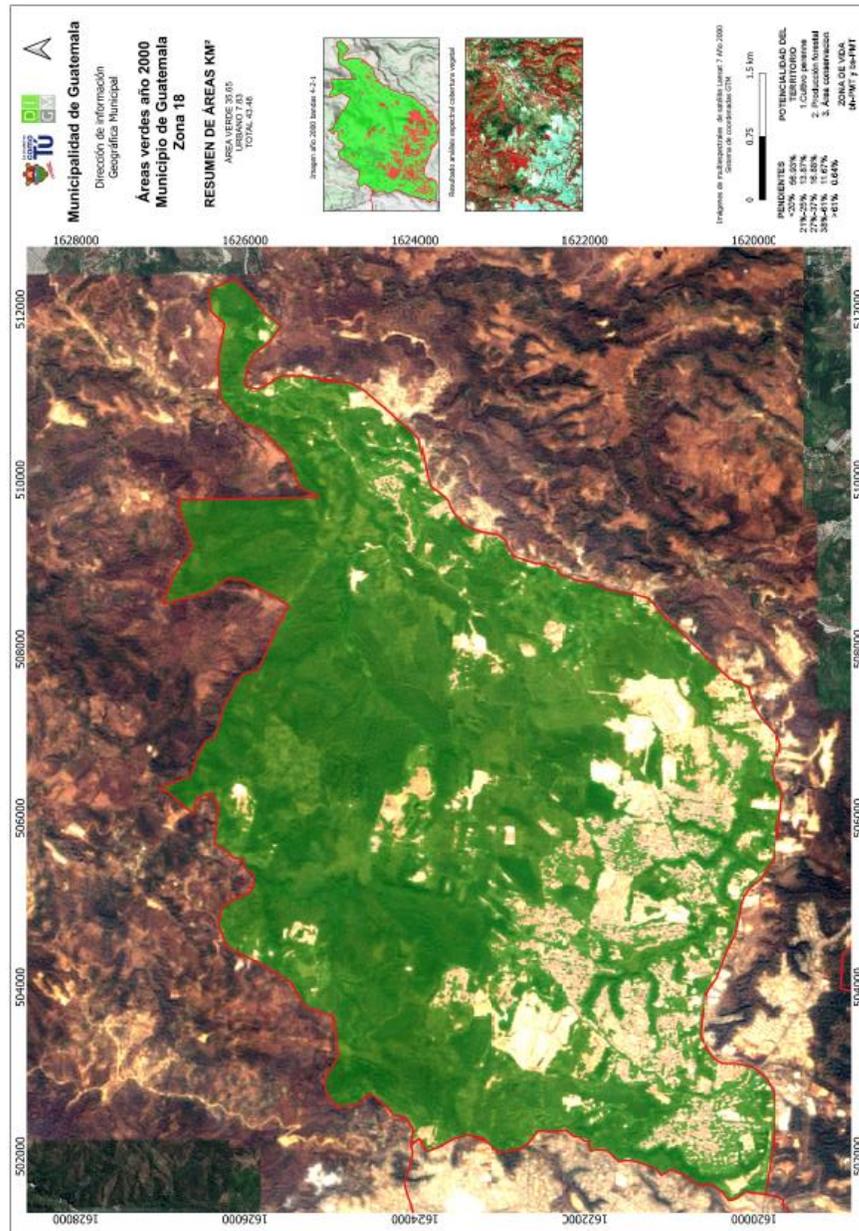
Apéndice 22. Cálculo de área verde en zona 15 para el año 2000



Fuente: elaboración propia, empleando Qgis Palmas 2.18.20.

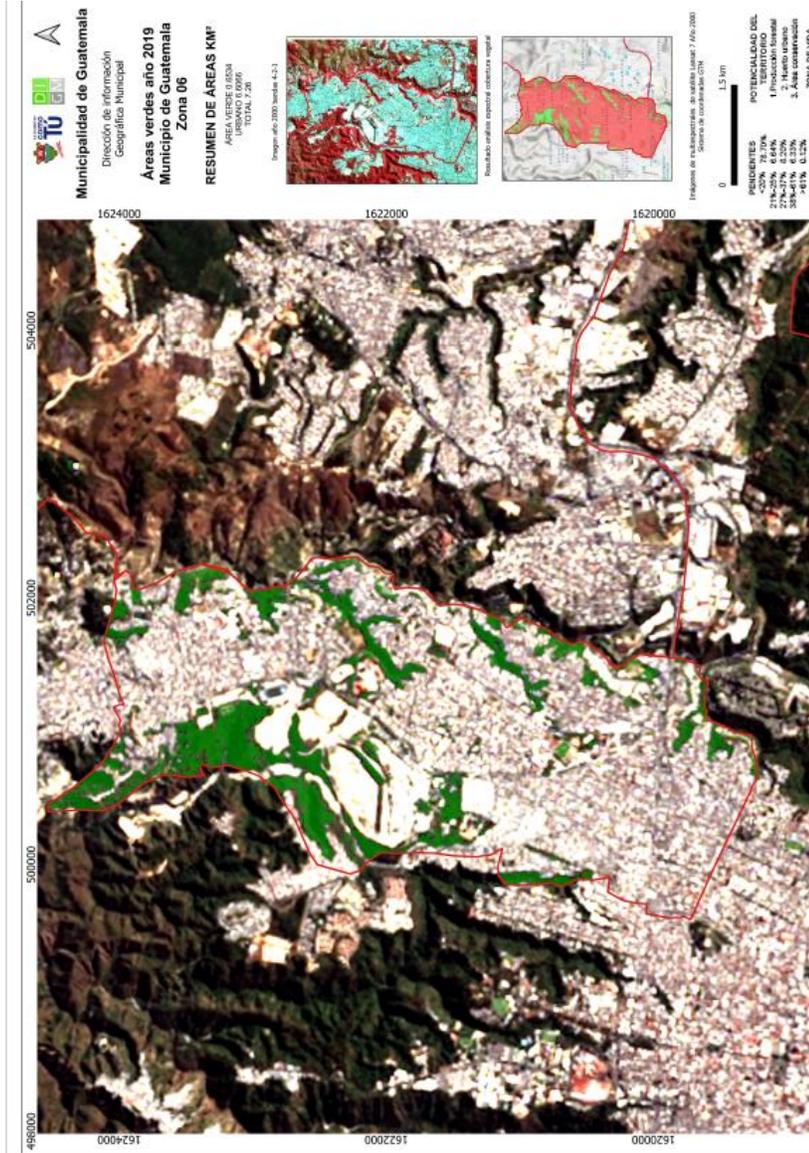


Apéndice 24. Cálculo de área verde en zona 18 para el año 2000



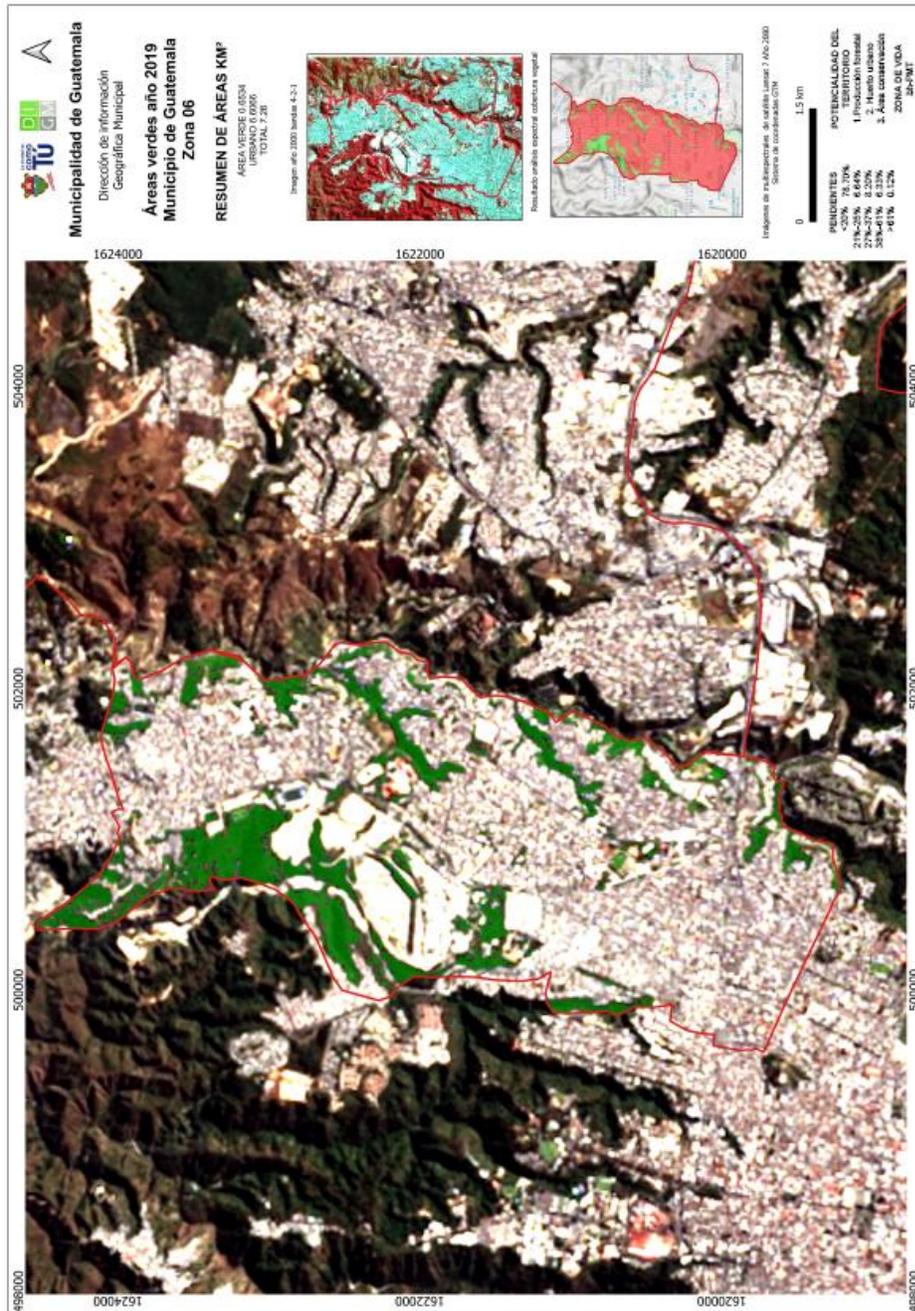
Fuente: elaboración propia, empleando Qgis Palmas 2.18.20.

Apéndice 25. Cálculo de área verde en zona 06 para el año 2019



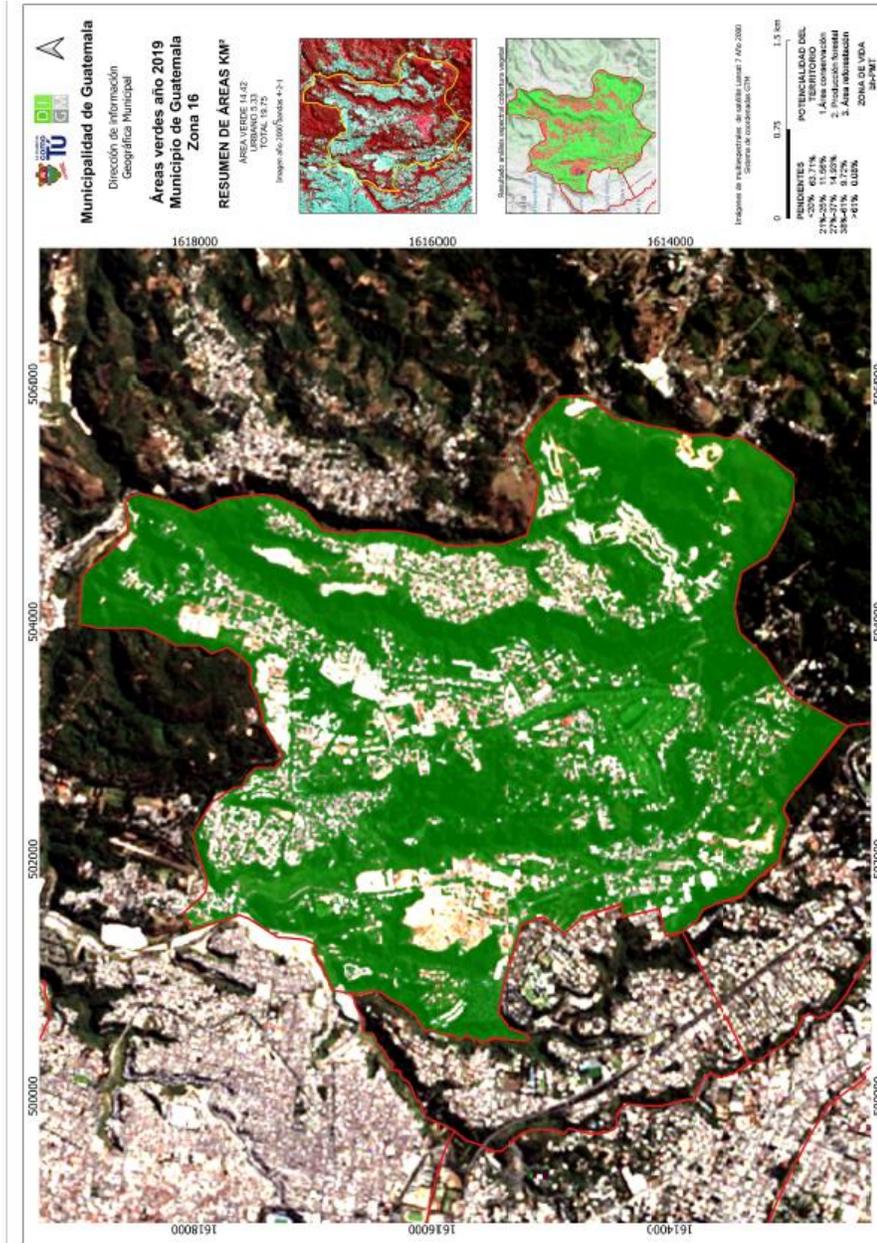
Fuente: elaboración propia, empleando Qgis Palmas 2.18.20.

Apéndice 26. Cálculo de área verde en zona 10 para el año 2019



Fuente: elaboración propia, empleando Qgis Palmas 2.18.20.

Apéndice 27. Cálculo de área verde en zona 15 para el año 2019



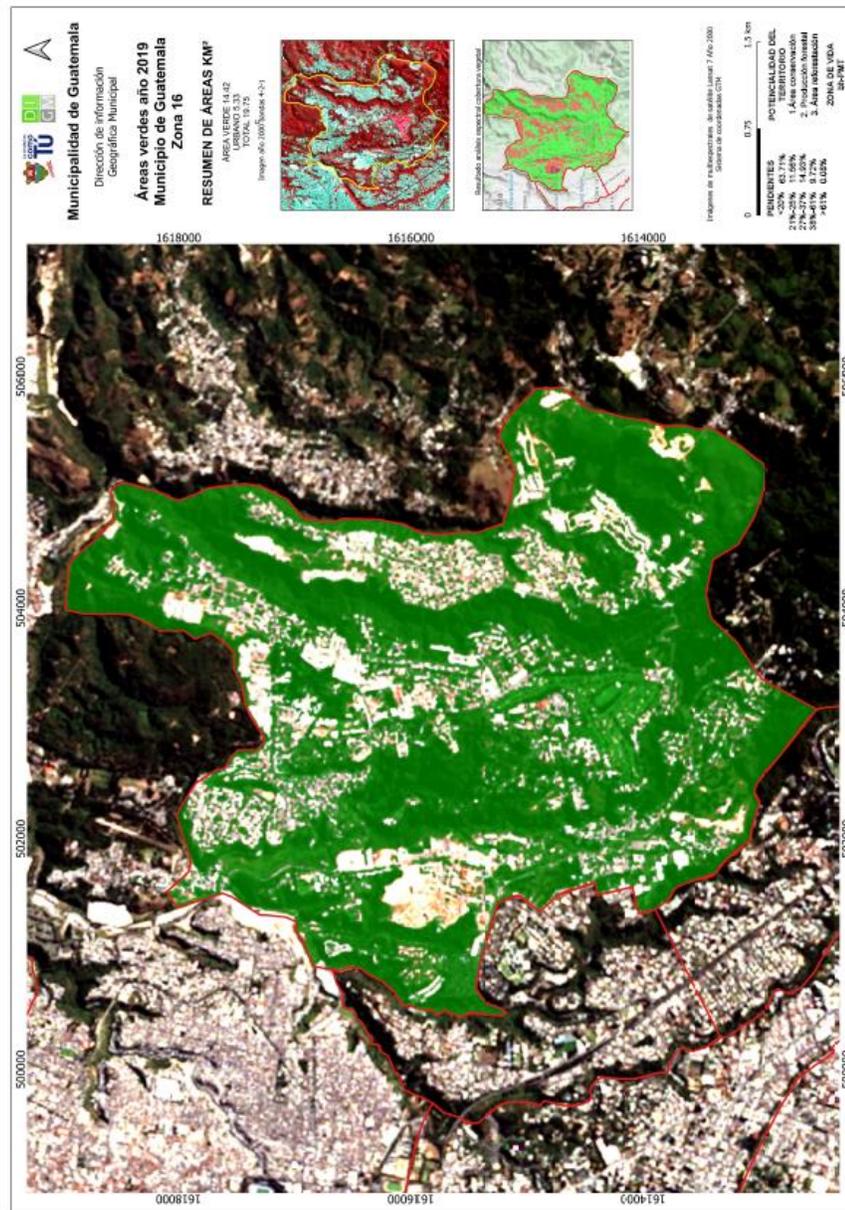
Fuente: elaboración propia, empleando Qgis Palmas 2.18.20.

Apéndice 28. Cálculo de área verde en zona 16 para el año 2019



Fuente: elaboración propia, empleando Qgis Palmas 2.18.20.

Apéndice 28. Cálculo de área verde en zona 18 para el año 2019



Fuente: elaboración propia, empleando Qgis Palmas 2.18.20.



## Anexo 2. Relación precipitación con altura

### CURVA HIPSONOMETRICA, DE LA SUB-CUENCA DEL RIO LAS VACAS

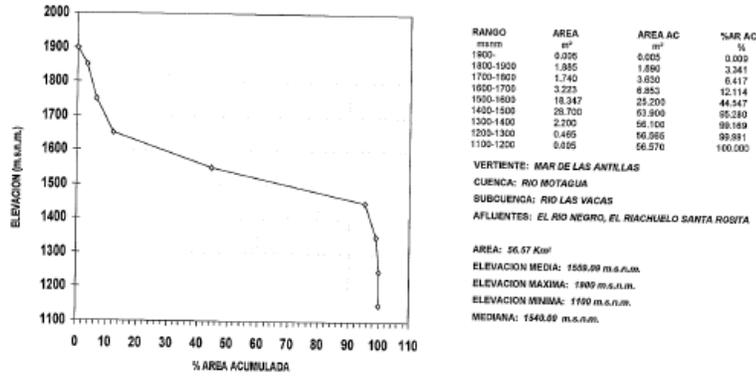


FIGURA 3.4.2.1

97

### CURVA HIPSONOMETRICA, DE LA SUB-CUENCA DEL RIO LOS VADOS (EL CHATO)

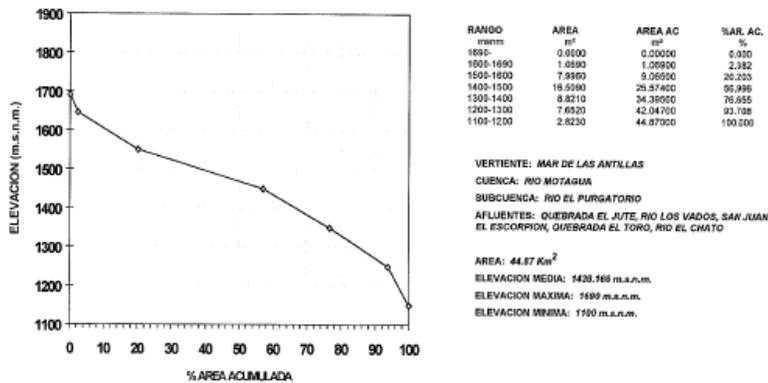


FIGURA 3.4.2.2

98

Continuación del anexo 2.

**CURVA HIPSONOMETRICA, DE LA SUB-CUENCA DEL RIO LOS OCOTES**

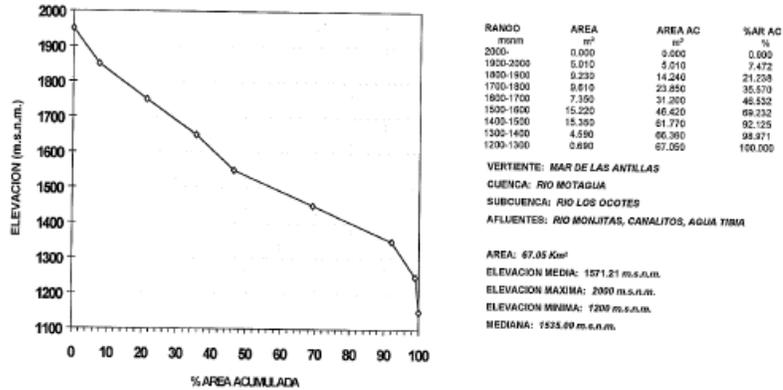


FIGURA 3.4.2.3

66

Fuente: Ckc Chuo Kaihatsu Corporation. *Proyecto de desarrollo de las aguas subterráneas en la Ciudad de Guatemala EMPAGUA 1995.* p. 97 - 99.

### Anexo 3. Estadísticas de metraje construido

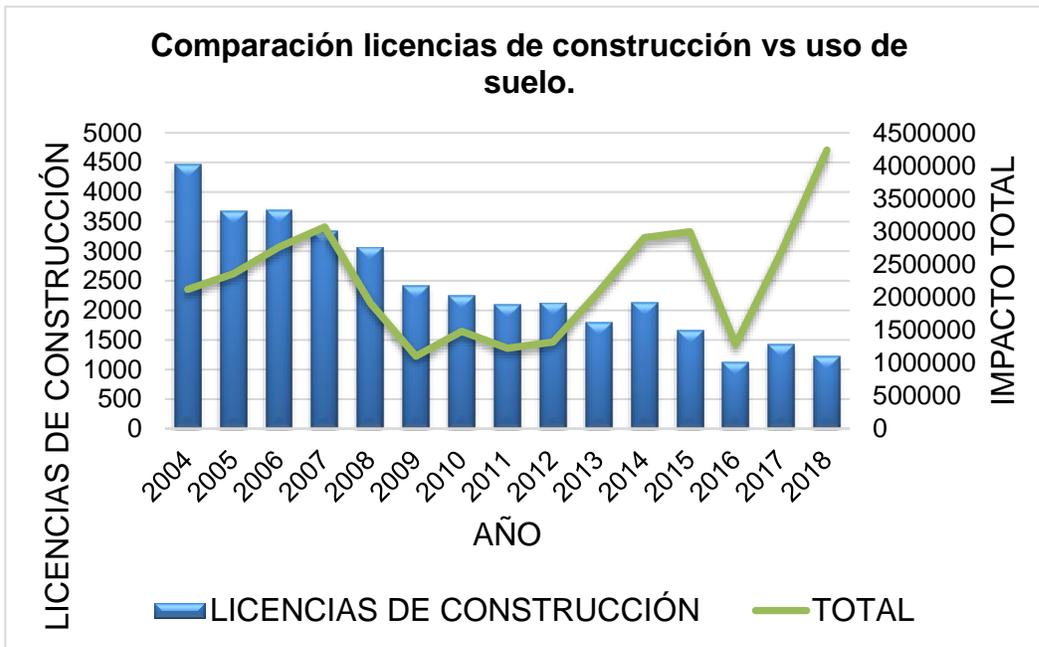
Rubro	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Constructivo (m2)	1472952,71	1067778,9	1490401,8	2381783,94	13525503,8	837678,12	1438201,25
Excavación/ Movimiento de tierra (m3)	334305,31	1113956,09	1017057,69	411889,16	318264,33	211634,54	18136,47
Construcciones complementarias (m2, m)	258063,82	154173,56	230539,56	252583,32	216732,85	46779,87	21435,62
Demolición (m2)	0	0	0	0	0	0	0
Cambio de uso (m2)	54472,59	20692,56	24871,97	20995,16	22783,38	5963,56	2332,04
<b>Total</b>	<b>2119794,43</b>	<b>2356601,11</b>	<b>2762871,02</b>	<b>3067251,58</b>	<b>14083284,4</b>	<b>1102056,09</b>	<b>1480105,38</b>
<b>Licencias</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>
	4466	3680	3689	3347	3063	2415	2246

Continuación del anexo 3.

2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
1109197,4	1223434,15	860272,7	1056347,19	1284195,57	1279,996,34	1233129,32	1620097,84
94052,78	73646,67	1010218,04	1597728,95	1480656,23	1073677,97	1172179,18	2367001,14
19952,32	20056,69	160134,18	176288,02	141578,02	129161,92	157017,14	156410,45
0	0	44432,48	62943,12	79717,36	68563,53	118500	80555,45
1026,78	0	7092,94	13243,82	9360,25	6809,53	8362,79	14672,25
1224229,28	1317137,51	2082150,34	2906551,1	2995507,43	1278212,95	2689188,43	4238737,13
2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
2092	2123	1801	2132	1662	1122	1431	1222

Fuente: Dirección de Planificación Urbana, Registro de licencias de construcción. Municipalidad de Guatemala, 2019.

#### Anexo 4. Comparación de aumento de licencias de construcción



Fuente: Dirección de Planificación Urbana, *Registro de licencias de construcción*. Municipalidad de Guatemala, 2019.

Anexo 5. **Nombre y dirección de los pozos del proyecto**

No.	NOMBRE	DIRECCIÓN
1	BARRIO COLOMBIA	17 Av. Y 15 Calle Alameda II zona 18
2	CANALITOS INSIVUMEH	Aldea Canalitos Lote 8, Mz. 88 Cantón Porvenir Zona 17
3	CANALITOS JICA	Aldea Canalitos Mz. 68 Cantón Porvenir Zona 24
4	CIUDAD NUEVA II	11 Avenida final zona 2 interior parque Ecológico Municipal
5	ILUSIONES	Lote 8 "B" Sección 1, Final Col. Ilusiones zona 18
6	JOCOTALES II	21 Calle "C" entre 23 y 24 Av. Proyecto 4-10 zona 6
7	JOSE MLLA	23 Avenida y 5a. Calle zona 6
8	MAYA I	Colonia Maya zona 18
9	MIRDADOR DE LA CRUZ	Carretera Atlántico Km. 14.5 Mirador de la Cruz zona 25
10	NAVIDAD	2a. Calle "A" entre 19 y 20 Calle zona 6 Frente al 19-50
11	NEURO I	Colonia Atlántida Int. Hospital Neuro Psiquiátrico Zona 18
12	NEURO II	Colonia Atlántida Int. Hospital Neuro Psiquiátrico Zona 18
13	PREVENTIVA	Final Colonia Atlántida zona 18 (Abajo Centro Deten. Preventiva)
14	PROYECTO 4-10	19 Avenida y 23 calle zona 6 Proyecto 4-10
15	PROYECTO 4-3-3	16 Avenida y 26 calle zona 6 Proyecto 4-3
16	PROYECTO 4-4	16 Avenida y 18 calle zona 6 Proyecto 4-4
17	PUENTE BELICE	11 Avenida Redondel Colonia Atlántida zona 18
18	RODRIGUEZ Y RODRIGUITOS	Km. 13 1/2 Carretera Atlántico zona 25
19	SAN ANTONIO	24 Avenida "A" y 17 calle zona 6 Barrio San Antonio
20	SAN RAFAEL III	14 Calle Final Las Colinas San Rafael III zona 18
21	CIPRESALES	19 Avenida y 18 calle Residenciales Cipresales zona 6
22	ARCOS I	Boulevard. Liberación 6a. Av. Zona 9 Arriate Central
23	ARCOS II	Boulevard. Liberación 7a. Av. Zona 9 Arriate Central
24	CENTRO DE SALUD ZONA 3	5a. Avenida 26 calle equina zona 3 Interior Centro de Salud
25	CENTRO AMÉRICA	18 calle entre Avenida Elena y Avenida Centro América zona 1
26	COLON II	12 Avenida entre 8a. Y 9a. Calle zona 1 Interior Parque Colon
27	CONCEPCIÓN LAS LOMAS	2a. Avenida 6a. Calle final zona 15 Aldea Concepción Las Lomas
28	DIAGONAL VI	Diagonal VI 11-10 zona 10
29	EL BOSQUE	8a. Avenida "A" 11-25 zona 3 Barrio El Gallito

Continuación del anexo 5.

30	EL MAESTRO	18 Avenida y 2a. Calle zona 15 Arríate Bol. Vista Hermosa
31	FILTROS BRIGADA I	Calzada San Juan
32	FLORIDA	12 Avenida 5-96 zona 19 Florida Int. Bodega Alcatraz
33	J.A. SALAZAR	18 Calle y 14 Avenida zona 10 Interior Parque Municipal
34	JARDINES	14 calle Diagonal 14, Blrd. Jardines Arríate Central zona 5
35	JUSTO R. BARRIOS I	35 Avenida "B" 8a. Calle "A" Col. Justo Rufino Barrios zona 21
36	JUSTO R. BARRIOS II	33 Avenida Final Col. Justo Rufino Barrios zona 21
37	JUSTO R. BARRIOS III	34 Avenida "B" 8a. Calle "A" Col. Justo Rufino Barrios zona 21
38	LAS AMERICAS	Avenida Las América 2a. Calle zona 13 Arríate central
39	NIMAJUYU I	16 Avenida 11-92 zona 21 Col. Nimajuyú Atrás Estación de Bomberos
40	NIMAJUYU II	19 Avenida "B" 11 calle "A" zona 21 Col. Venezuela
41	PRIMERA Y TERCERA	1a. Calle y 3a. Avenida zona 1
42	REFORMA	Avenida Reforma 11 y 12 calle Arríate Central 10
43	SAN GASPAR	Calle principal zona 16, frente Col. Shaddai
44	SANTO DOMINGO	12 Av. Y 10a. Calle zona 1 Int. Iglesia Santo Domingo
45	TP-2	32 Avenida final 18-32 zona 7 Villa Linda Int. Finca
46	VILLALOBOS	22 calle 6a. Avenida zona 12 Col. Villalobos a la par Estación de Bomberos
47	VISTA HERMOSA III	Blrd. Rafael Landívar y 14 calle zona 15
48	TREBOL	Int. Estadio Trébol zona 7 Col. Landívar
49	C-1	7a Ave y 3a calle "B" zona 10
50	C-3	15 Calle entre 21 y 22 avenidas, zona 18, Alameda III
51	C-6	22 Av. "A" entre 25 Calle "A" y 26 Calle, Puerta de Hierro, Z. 17
52	C-7	Arriate central, Lotif Hacienda Real, 22 Ave, entre 30 y 31 calle, frente al lote 45, Manzana 8, Z. 17

Continuación del anexo 5.

53	C-8	Lote 2, Manzana Q, Lotificación Puerta de Hierro Z. 17
54	C-9	21 Av. "A" Lote 34 Manzana O, Lotif. Puerta de Hierro, Z. 17
55	C-10	Área verde No. 1, Lotif. Hacienda Real, Z. 17
56	H-1	Lotif. Kanajuyú, Finca La Cuchilla, Z. 16, Área forestal No. 5
57	H-2	Lote 194, Lotif. Kanajuyú, Z. 16
58	H-3	Área Verde, Sector San Gaspar, Las Delicias, Kanajuyú Z. 16
59	H-4	Boulevard Vista Hermosa y 19 Ave., z. 15, arriate central
60	H-5	Boulevard Vista Hermosa y 16 Ave., z. 15, arriate central
61	H-7	26 Ave. Lote 40, Manzana 22, Lotificación Hacienda Real, Z. 17
62	L-1	Camino asfaltado al Preventivo Z. 18 (curva antes de llegar al Hospital Neuropsiquiátrico)
63	L-2	Calle principal Las Tapias (ahora Boulevard Los Olivos), Santa Elena 2, Z 18
64	L-3	29 Ave "A" final y 6a calle, Colonia Galilea z. 18
65	N-1	16 avenida final y 21 calle "B", proyecto 4-4, Z. 6
66	N-3	20 Calle y 15 Ave. Z. 6
67	N-4	16 Ave y 18 calle, Proyecto 4-4 Z.6
68	N-5	Finca El Arenal, 16 ave final y 21 calle "B", proyecto 4-4 z-6 (Interior del Internado "Niños de María")
69	N-6	15 Ave entre 2a y 3a calles frente a la Colonia "El Sausalito" Z. 6
70	R-1	3a calle final y 1 ave, Finca "El Matazano", Col Kennedy Z. 18
71	R-2	Universidad Rafael Landívar, Col "Campo Seco", Z. 16, "Concepción Las Lomas"
72	R-4	23 Ave final y 19 Calle Alameda Norte, Z. 18
73	R-5	18 Calle final y 25 Ave "C", "Villas de San Rafael", Z. 18
74	Maya III	8a Ave final, Manzana 29, frente a lote 64"B", Col Maya Z. 18
75	Sta. Luisa	Planta Santa Luisa, Aldeas Acatan, Santa Rosita, Z. 16 (final Calle del Cole Sagrado Corazón)
76	IPM	27 Ave y 38 Calle, Lote 1-53, Lotif. "Hacienda Real", Z.17
77	R-3	26 Ave "A" y 12 calle "A", Villas de San Rafael, Z. 18

Fuente: Sub Unidad de Empagua, *División de pozos*, Empresa Municipal de Agua, Municipalidad de Guatemala.

**Anexo 6. Comparación de la producción entre el rango 2000 al  
2010**

Sistema	Pozo	2,004	2,005	2006	2007	2008	2009	Acumu- lado
San Gaspar	H-3	634,821	620,287	485,745	598,402	582,063	511,985	3,433,303
	H-2	745,965	608,450	487,061	572,628	612,471	611,130	3,637,705
	H-1	315,654	307,973	293,977	282,368	134,994	319,528	1,654,494
	R-2	109,351	112,922	105,812	103,109	100,241	96,261	627,696
	S Luisa	220,362	231,969	254,860	239,650	242,338	315,402	1,504,581
	H-6		54,374	0	0	10,209	1,250	65,833
Vista Hermosa	H-4	411,142	338,993	507,896	344,033	492,336	464,914	2,559,314
	H-5	530,030	644,723	632,048	555,893	479,233	482,684	3,324,611
	C-1				619,188	1,155,592	1,074,816	2,849,596
	R-3	183,253	232,120	183,405	210,766	202,136	220,497	1,232,177
	R-4	796,341	751,548	601,128	529,727	477,438	785,904	3,942,086
	R-5	889,765	838,523	819,033	822,146	834,363	448,163	4,651,993
	R-1	609,591	554,043	522,509	531,071	479,837	149,712	2,846,763
	C-3	894,182	838,334	853,122	998,543	1,095,776	1,057,466	5,737,423
	Maya	915,380	699,281	739,128	676,270	601,729	691,832	4,323,620
Norte	N-1	1,499,035	1,386,725	1,226,996	1,209,108	1,212,584	1,278,535	7,812,983
	N-2	524,894	378,178	169,815	235,925	307,806	307,416	1,924,034
	N-3	792,909	839,662	790,012	654,171	749,829	787,526	4,614,109
	N-4	471,571	341,583	583,517	547,552	554,387	464,319	2,962,929
	N-5	941,832	965,474	914,473	911,019	993,750	1,048,014	5,774,562
	N-6	101,529	72,768	59,794	56,562	30,546	39,553	360,751
Canalitos I	SAN MARTIN		0	51,987	48,643	47,712	46,837	195,179
	CARMEN		0	83,394	42,982	52,096	67,378	245,850
	CHORRERA		0	377,893	639,289	595,187	708,823	2,321,192

Continuación del anexo 6.

Canalitos II	C-6	1,391,392	1,442,057	1,392,967	1,272,931	1,147,405	1,498,736	8,145,488
	C-7	1,092,635	738,256	1,600	643,232	432,792	746,738	3,655,253
	C-8	501,985	565,439	469,539	193,216	350,363	581,268	2,661,810
	C-9	846,271	754,428	841,757	727,128	367,687	777,950	4,315,221
	H-7	729,927	598,949	757,096	458,580	368,402	559,908	3,472,862
	C-10	1,259,884	1,079,266	752,604	588,113	732,960	693,943	5,106,770
	IPM		565,575	807,443	786,467	771,211	858,653	3,789,349
Lavarreda	L-1	530,939	353,497	329,609	117,342	468,965	229,374	2,029,726
	L-2	708,375	809,481	796,957	767,233	735,557	709,720	4,527,323
	L-3	657,938	554,980	580,838	342,726	401,678	235,564	2,773,724
TOTAL MTS/3		19,306,953	18,279,858	17,474,015	17,326,013	17,821,673	18,871,799	109,080,311
Promedio MTS/3 diario		52,896	45,868	47,739	47,342	48,754	51,704	49,050.36
Promedio lts /segundo		612	531	553	548	564	598	568

Fuente: Sub Unidad de Empagua, *División de pozos*, Empresa Municipal de Agua, Municipalidad de Guatemala.

