

**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN  
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

**POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

**PROPUESTA METODOLOGICA PARA LA ESTIMACIÓN DE VOLUMENES POTENCIALES  
DE ALMACENAMIENTO EN ZONAS SEMIÁRIDAS: CASO GRABEN JUCHIPILA, ZAC –  
CALVILLO, AGS.**

Tesis que presenta

**Ing. Ignacio Paz López**

Para obtener el grado de

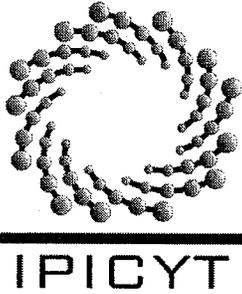
**Maestro en Geociencias Aplicadas**

Director/Co-directora de Tesis:

**Dr. José Alfredo Ramos Leal**

**Dra. Birgit Steinich**

San Luis Potosí, S.L.P., Diciembre de 2016



## Constancia de aprobación de la tesis

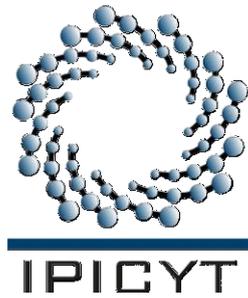
La tesis "**Propuesta Metodológica para la Estimación de Volúmenes Potenciales de Almacenamiento en Zonas Semiáridas: Caso Graben Juchipila, Zac - Calvillo, Ags.**" presentada para obtener el Grado de Maestro en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **Ignacio Paz López** y aprobada el **veintiuno de diciembre del dos mil dieciséis** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

**Dr. José Alfredo Ramos Leal**  
Codirector de la tesis

**Dra. Birgit Steinich**  
Codirector de la tesis

**Dr. José Tuxpan Vargas**  
Miembro del Comité Tutorial

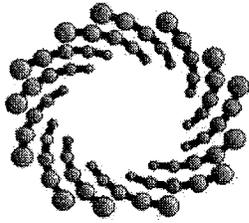
**Dr. Pablo Dávila Harris**  
Miembro del Comité Tutorial



## **Créditos Institucionales**

Esta tesis fue elaborada en la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección y codirección del Dr. José Alfredo Ramos Leal y de la Dra. Birgit Steinich.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología 297360 y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



**IPICYT**

# Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

## Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 022 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 21 días del mes de diciembre del año 2016, se reunió a las 11:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

<b>Dr. José Alfredo Ramos Leal</b>	<b>Presidente</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. Pablo Dávila Harris</b>	<b>Secretario</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. José Tuxpan Vargas</b>	<b>Sinodal</b>	<b>IPICYT</b>

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

**MAESTRO EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

sustentó el C.

**Ignacio Paz López**

sobre la Tesis intitulada:

*Propuesta Metodológica para la Estimación de Volúmenes Potenciales de Almacenamiento en Zonas Semiáridas: Caso Graben Juchipila, Zac.- Catvillo, Ags.*

que se desarrolló bajo la dirección de

**Dr. José Alfredo Ramos Leal**

**Dra. Birgit Steinich**

El Jurado, después de deliberar, determinó

**APROBARLO**

Dándose por terminado el acto a las 12:00 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición del interesado y para los fines que al mismo convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 21 días del mes de diciembre de 2016.

**Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez**  
Jefa del Departamento del Posgrado

**Dr. Marcial Borjilla Marín**  
Secretario Académico



## **Dedicatoria**

Con especial cariño a Dios, a ese Ser Divino Todo Poderoso que en el misterio inmenso de su ser mismo, ha inspirado, desde tiempos remotos e incontables ocasiones, al ser humano a la tarea de tratar de explicar o describir su infinito ingenio plasmado en su creación.

## Agradecimientos

A mis padres, Magdalena López y Gabino Paz, por ser siempre uno de los pilares fuertes que me respaldan en el cumplimiento de mis proyectos personales.

A Isidro Paz y Celina Casillas, por el apoyo y respaldo moral que siempre me han mostrado, por preocuparse siempre de mi formación tanto profesional como personal.

A Francisco Esparza Carranza por ser el guía y consejero confiable en lo personal, por su amabilidad y sabiduría brindadas a lo largo de los años.

A Francisca Monsivais y Meropi Casillas, a las familias Huerta Casillas y Macías Casillas por el afecto, confianza y apoyo prestados en estos años de conocernos.

A mi asesor el Dr. Alfredo Ramos Leal, por tomar la responsabilidad de este proyecto, por las distintas muestras de apoyo, conocimientos y experiencia profesional y personal prestados a lo largo del tiempo y elaboración de este trabajo.

A mi co-asesora la Dra. Birgit, por su tiempo invertido, conocimientos y experiencia profesional y personal que me brindó durante su tiempo de participación en este trabajo. Principalmente en reconocimiento a su iniciativa del carácter autodidacta.

A Gabriela Pérez Assaf por su amabilidad y apoyo prestado durante la elaboración de este trabajo.

Al Instituto del Agua de Aguascalientes (INAGUA) y al Dr. Manuel Ortiz por la información proporcionada para la elaboración de esta tesis.

A los doctores de la División de Geociencias Aplicadas, por todas las enseñanzas y tiempos de aprendizaje compartidos.

A mis amigos, a los que se encuentran lejos y a los que están cerca, por preocuparse en muchos aspectos de mí, por compartir este tiempo conmigo, por enseñarme cuando carecía de conocimientos suficientes, por reconfortarme cuando lo necesitaba, por impulsarme cuando estaba habiendo perdido la motivación, por eso y más que hicieron por mí en esta fase de mi vida.

# Contenido

Constancia de aprobación de la tesis .....	ii
Créditos Institucionales .....	iii
Acta de examen .....	iv
Dedicatorias.....	v
Agradecimientos.....	vi
Contenido .....	vii
Lista de tablas .....	x
Lista de figuras .....	xi
Resumen .....	xiii
Abstract.....	xiv
<b>GENERALIDADES .....</b>	<b>1</b>
Introducción.....	1
Estudios previos .....	2
Hipótesis.....	5
Objetivo Principal .....	5
Objetivos Secundarios .....	5
Localización del área de estudio .....	5
<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>7</b>
Delimitación del área de estudio .....	7
Información hidrológica .....	7
Información climatológica .....	8
Información geológica .....	8
Perfiles geológicos.....	8
Delimitación de las unidades acuíferas .....	9
Volúmenes potenciales de almacenamiento de las unidades acuíferas .....	9

Construcción de mallas auxiliares para interpolación .....	9
Interpolación de valores por método IDW .....	11
Estimación de volúmenes de material .....	12
Estimación de los volúmenes potenciales de almacenamiento .....	12
Volúmenes potenciales de infiltración y precipitación de las unidades acuíferas .....	16
Modelo analítico de Schosinsky y Losilla (2000) .....	16
Coeficiente De Infiltración $C$ .....	17
Precipitación .....	20
Infiltración potencial .....	21
Estimación de los Volúmenes Potenciales de Precipitación e Infiltración potencial .....	22
RESULTADOS .....	23
Descripción del área de estudio .....	23
Climatología .....	23
Geología .....	23
Geología del subsuelo del graben de Calvillo .....	30
Hidrología .....	38
Aplicación del modelo analítico de Schosinsky y Losilla (2000) .....	47
Coeficiente de infiltración por pendiente .....	47
Coeficiente de infiltración por cobertura vegetal.....	49
Coeficiente de infiltración por textura de suelo .....	51
Coeficiente de infiltración ( $C$ ) .....	53
Datos de precipitación.....	59
Precipitación de la zona de estudio .....	62
Cuenca como unidad.....	62
Paquete sedimentario del graben de Calvillo .....	65
Paquete sedimentario del graben de Juchipila .....	69

Paquete volcánico de la cuenca .....	72
Infiltración potencial de la zona de estudio .....	73
Cuenca como unidad.....	73
Paquete sedimentario del graben de Calvillo .....	76
Paquete sedimentario del graben de Juchipila .....	79
Paquete volcánico de la cuenca .....	83
Relaciones porcentuales de infiltración potencial.....	84
Relación territorial .....	84
Relación temporal .....	85
Relación porcentual infiltración potencial-precipitación .....	86
DISCUSIONES .....	88
Volúmenes potenciales para almacenamiento de recursos hídricos (PVC, PSGC Y PSGJ) vs espacio territorial.....	88
Distribución espacial de infiltración potencial versus distribución espacial precipitación.....	88
Volúmenes potenciales de almacenamiento vs zonas favorables para precipitación-infiltración potencial .....	89
Aprovechamiento: zonas de precipitación e infiltración potencial vs concentración de población.....	90
Contrastes entre los resultados de infiltración versus precipitación.....	91
CONCLUSIONES .....	92
SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS.....	94
BIBLIOGRAFÍA.....	95

## Lista de tablas

Tabla 2.1. Porosidad total y eficaz.....	15
Tabla 2.2. Coeficiente de infiltración por pendiente.....	18
Tabla 2.3. Coeficiente de infiltración por cobertura vegetal.....	19
Tabla 2.4. Coeficiente de infiltración por textura del suelo.....	19
Tabla 3.1. Principales unidades geológicas de la zona de estudio.....	27
Tabla 3.2. Resumen del registro de pozos del graben de Calvillo.....	31
Tabla 3.3. Estadísticas de coeficiente por tipo de pendiente para la zona de estudio.....	47
Tabla 3.4 Estadísticas de coeficiente por tipo de cobertura vegetal de la zona de estudio.....	49
Tabla 3.5 Estadísticas de coeficiente por tipo de textura de la zona de estudio.....	51
Tabla 3.6. Estadísticas del coeficiente de infiltración para la zona de estudio.....	53
Tabla 3.7. Estadísticas del coeficiente de infiltración para el PSGC.....	55
Tabla 3.8 Estadísticas del coeficiente de infiltración para el PSGJ.....	56
Tabla 3.9. Porcentajes de precipitación mensual promedio y periodos resultado.....	59
Tabla 3.10 Estaciones climatológicas seleccionadas para la zona de estudio.....	60
Tabla 3.11 Estadísticas de precipitación para el PVC.....	72
Tabla 3.12. Estadísticas de infiltración potencial para el PVC.....	83
Tabla 3.13 Relación porcentual territorial de la infiltración potencial de la zona de estudio.....	84
Tabla 3.14. Relación porcentual año/temporada de Infiltración potencial de las unidades acuíferas y la zona de estudio.....	85
Tabla 3.15. Relación porcentual Infiltración potencial – Precipitación de las unidades acuíferas.....	86

## Lista de figuras

Figura 1.1 Líneas de flujo del graben de Calvillo.....	4
Figura 1.2 Mapa de ubicación de la zona de estudio.....	6
Figura 2.1 Diagrama de flujo de metodología propuesta para el cálculo de los volúmenes potenciales de almacenamiento de las unidades acuíferas .....	10
Figura 2.2 Diagrama de flujo de la metodología del modelo analítico de Schosinsky y Losilla (2000).....	16
Figura 3.1 Climatología de la zona de estudio.....	24
Figura 3.2 Provincias Fisiográficas de México.....	26
Figura 3.3 Mapa geológico de la zona de estudio.....	29
Figura 3.4 Mapa de ubicación de los pozos del graben de Calvillo.....	32
Figura 3.5 Perfil geológico del graben de Calvillo.....	34
Figura 3.6 Perfil geológico del graben de Juchipila.....	36
Figura 3.7 Perfil geológico de la intersección de los graben de Calvillo y Juchipila.....	37
Figura 3.8 Regiones Hidrológicas Administrativas de México.....	38
Figura 3.9 Mapa de interpolación de espesores para el paquete sedimentario del graben de Calvillo.....	40
Figura 3.10 Mapa de interpolación de espesores para el paquete sedimentario del graben de Juchipila.....	43
Figura 3.11 Mapa de interpolación de espesores volcánicos para la zona de estudio.....	45
Figura 3.12 Mapa de pendientes de la zona de estudio.....	48
Figura 3.13 Mapa de coeficientes por cobertura vegetal de la zona de estudio.....	50
Figura 3.14 Mapa de texturas de la zona de estudio.....	52
Figura 3.15 Mapa de coeficientes de infiltración para la zona de estudio.....	54
Figura 3.16 Mapa de coeficientes de infiltración para el PSGC.....	57
Figura 3.17 Mapa de coeficientes de infiltración para el PSGJ.....	58
Figura 3.18 Mapa de la localización de las estaciones climatológicas seleccionadas.....	61
Figura 3.19 Distribución espacial de la precipitación en el área de estudio para el año 1979.....	63

Figura 3.20 Distribución espacial de la precipitación en el área de estudio para el año 2000.....	64
Figura 3.21 Distribución espacial de la precipitación en el área de estudio para el año 2004.....	65
Figura 3.22 Distribución espacial de la precipitación en el PSGC para el año 1979.....	66
Figura 3.23 Distribución espacial de la precipitación en el PSGC para el año 2000.....	67
Figura 3.24 Distribución espacial de la precipitación en el PSGC para el año 2004.....	68
Figura 3.25 Distribución espacial de la precipitación en el PSGJ para el año 1979.....	69
Figura 3.26 Distribución espacial de la precipitación en el PSGJ para el año 2000.....	70
Figura 3.27 Distribución espacial de la precipitación en el PSGJ para el año 2004.....	71
Figura 3.28 Distribución espacial de la infiltración potencial en el área de estudio para el año 1979.....	74
Figura 3.29 Distribución espacial de la infiltración potencial en el área de estudio para el año 2000.....	75
Figura 3.30 Distribución espacial de la infiltración potencial en el área de estudio para el año 2004.....	76
Figura 3.31 Distribución espacial de la infiltración potencial en el PSGC para el año 1979.....	77
Figura 3.32 Distribución espacial de la infiltración potencial en el PSGC para el año 2000.....	78
Figura 3.33 Distribución espacial de la infiltración potencial en el PSGC para el año 2004.....	79
Figura 3.34 Distribución espacial de la infiltración potencial en el PSGJ para el año 1979.....	80
Figura 3.35 Distribución espacial de la infiltración potencial en el PSGJ para el año 2000.....	81
Figura 3.36 Distribución espacial de la infiltración potencial en el PSGJ para el año 2004.....	82

## Resumen

### **Propuesta Metodológica para la Estimación de Volúmenes Potenciales de Almacenamiento en Zonas Semiáridas: Caso Graben Juchipila, Zac – Calvillo, Ags.**

En el presente trabajo se aborda la estimación de los volúmenes de capacidad de almacenamiento potencial e infiltración potencial de los cuerpos acuíferos de la región del Graben Juchipila, Zacatecas – Calvillo, Aguascalientes. Estos elementos son de suma importancia para el manejo integral y establecimiento de medidas de control para los recursos hídricos, especialmente en aquellas regiones que presentan escasez, tales como las áridas y semiáridas.

Las metodologías se aplicaron a tres unidades acuíferas, el Paquete Sedimentario del Graben de Calvillo (PSGC), el Paquete Sedimentario del Graben de Juchipila (PSGJ) de medio granular y el Paquete Volcánico de la Cuenca (PVC) de medio fracturado. La metodología propuesta incorpora información de espesores y características de porosidad de las unidades; además de elementos estructurales que conforman los medios, para finalmente generar la estimación de los volúmenes potenciales de almacenamiento; mientras que el método de Schosinsky y Losilla (2010), se utilizó como complemento para la estimación de los de infiltración potencial.

Como resultado de este trabajo, se estimó que la zona de estudio cuenta con un volumen de almacenamiento potencial de 35 mil  $Mm^3$  a 54 mil  $Mm^3$ , mientras que el PSGC, el PSGJ y el PVC se estima que cuentan con 240  $Mm^3$  a 4 800  $Mm^3$ , 680  $Mm^3$  a 13 600  $Mm^3$  y 34 000  $Mm^3$  a 35 600  $Mm^3$ , respectivamente. En lo que respecta a los de infiltración potencial, la estimación para cuenca es de 1508  $Mm^3$  a 2721  $Mm^3$ , y de 62  $Mm^3$  a 99  $Mm^3$ , 268  $Mm^3$  a 467  $Mm^3$  y 1178  $Mm^3$  a 2155  $Mm^3$ , respectivamente para el PSGC, el PSGJ y el PVC.

**PALABRAS CLAVE:** acuífero, cuenca, porosidad, volumen de almacenamiento potencial, volumen de infiltración potencial

## **Abstract**

### **Methodological propose to estimate potential storage volumes in semi-arid zones: Case Graben Juchipila, Zac-Calvillo Aqs.**

The present work addresses the potential capacity of storage and potential infiltration volumes estimation of aquifer bodies from Juchipila, Zacatecas – Calvillo Aguascalientes Graben region. These elements are of utmost importance for hydric resources' integral management and control measures establishment, especially for those regions where there is shortage, such as arid and semi-arid ones.

The methodologies were applied to three aquifer units, the Calvillo's Graben Sedimentary Package (PSGC), the Juchipila's Graben Sedimentary Package (PSGJ), of granular media, and Basin's Volcanic Package (PVC) of fractured media. The proposed methodology incorporates the geological units thickness and porosity features information; also from structural elements that conforms the different media, to finally generate potential storage volumes estimation; meanwhile the Schosinsky and Losilla (2010) method was used as a complement for the potential infiltration volumes estimation.

As a result, from this work, it is estimated that the study zone counts with a potential storage volume of 35 thousand  $Mm^3$  to 54 thousand  $Mm^3$ , while for the PSGC, PSGJ and PVC are estimated 240  $Mm^3$  to 4 800  $Mm^3$ , 680  $Mm^3$  to 13 600  $Mm^3$  and 34 000  $Mm^3$  to 35 600  $Mm^3$ , respectively. Regarding about potential infiltration volumes, the basin's estimation is about 1508  $Mm^3$  to 2721  $Mm^3$ , and 62  $Mm^3$  to 99  $Mm^3$ , 268  $Mm^3$  to 467  $Mm^3$  and 1178  $Mm^3$  to 2155  $Mm^3$ , respectively to the PSGC, the PSGJ and the PVC.

**KEY WORDS:** aquifer, basin, porosity, potential storage volume, potential infiltration volume.

# GENERALIDADES

## Introducción

La estimación de la recarga de los acuíferos es una necesidad básica para el manejo integral de los recursos hídricos, siendo la infiltración su elemento principal. Por otro lado, estimar la geometría y las capacidades de almacenamiento de los cuerpos acuíferos podría proporcionar una perspectiva diferente al momento de realizar el manejo de estos recursos vitales.

En el presente trabajo se aplica una metodología para estimar la infiltración potencial y se desarrolla una metodología para estimar la capacidad potencial de las unidades acuíferas que se encuentran dentro de una cuenca que abarca principalmente porciones de los estados de Zacatecas y Aguascalientes, además de una pequeña perteneciente al estado de Jalisco. Una región, que de acuerdo con el censo poblacional del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2010), concentra poco más 120 000 habitantes en las zonas urbanas principales. Cuya principal actividad económica es la agricultura de temporal y de riego, según lo reportado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2009a, 2009b, 2015a y 2015b). Los cultivos principales de estas zonas son maíz, avena, trigo, frijol, cebada forrajera, guayaba, durazno, aguacate y alfalfa forrajera, todos estos en el municipio de Jalpa; en el municipio de Juchipila, los principales cultivos son cacahuete, frijol, maíz, sorgo de grano y forrajero, avena forrajera, trébol forrajero, agave tequilero, guayaba, aguacate, alfalfa verde, caña de azúcar, lima y sábila; por su parte en el municipio de Calvillo se cultivan pastos, pero destaca por ser el primer lugar estatal en producción de guayaba (INEGI, 2007).

CONAGUA (2015a) reporta que el acuífero de Jalpa-Juchipila existen un total de 400 aprovechamientos, de los cuales 325 corresponden a pozos (52 inactivos); 71 a norias (9 de ellas inactivas); 3 galerías y 1 manantial. La extracción de los 339 aprovechamientos activos se determinó en 38.32 Mm<sup>3</sup>/año, sin embargo, el 90% de este volumen se extrae en 150 pozos. En cuanto a los usuarios principales el 75%

de este volumen (28.6 Mm<sup>3</sup>) se dedica al riego agrícola; 23% se usa en el abastecimiento de agua potable (8.7 Mm<sup>3</sup>) y el restante 2% se dedica al suministro pecuario, doméstico y servicios; además de una disponibilidad de agua subterránea de poco más de 18 Mm<sup>3</sup>. Mientras que para el acuífero del Valle de Calvillo se reportan 218 aprovechamientos, de los cuales 40 corresponden a uso público-urbano, 173 a uso agrícola, y el resto a uso múltiple, incluyendo el pecuario y doméstico. La extracción total asciende a 40 Mm<sup>3</sup>/año, de los cuales el 82.5% se extrae para uso agrícola, el 16% para uso público-urbano y el resto para usos múltiples; concluyendo con déficit en la disponibilidad de agua subterránea de aproximadamente 15 Mm<sup>3</sup> (CONAGUA, 2015b).

Los aspectos estadísticos mencionados en el párrafo anterior dan idea de que se encuentran en un estado desactualizado. Esto se hace notable al momento de compararlos con sus respectivas versiones anteriores, emitidas por el mismo organismo pero en 2009; en las que no se encuentra alguna diferencia en las cifras y se hace mención que la estadística proviene de recorridos de verificación realizados en 1993, esto último en relación al acuífero del Valle de Calvillo. Lo mismo sucede al comparar los resultados en materia de la disponibilidad de agua subterránea de ambas zonas.

## **Estudios previos**

Respecto a los estudios de carácter hidrogeológico realizados en esta zona encontramos los siguientes:

El realizado por la SARH en la zona de Tlaltenango-Juchipila, tuvo la finalidad de conocer el marco geológico, definir la calidad y distribución del agua subterránea y dictaminar sobre las condiciones geohidrológicas (CONAGUA, 2009a), mientras que el hecho para el estado de Aguascalientes contiene una síntesis de varios estudios integrados acerca de los cuerpos acuíferos del estado (CONAGUA, 2009b). Por otro lado, INEGI en 1993, en su documento titulado “Estudio Hidrológico

del Estado de Aguascalientes”, realizó una recopilación de información de varios estudios para finalmente dar recomendaciones acerca de las condiciones de los principales cuerpos acuíferos del mismo estado.

En 2004 y con el objetivo de plantear el diseño de la red piezométrica del acuífero de Jalpa-Juchipila, CONAGUA analizó la información de niveles piezométricos y los reporta en el estudio de nombre “Reactivación de la red de monitoreo piezométrico en el acuífero Jalpa-Juchipila en Zacatecas” (CONAGUA, 2009a).

En 2005, en su documento titulado “Actualización hidrogeológica del acuífero Jalpa-Juchipila en Zacatecas”, CONAGUA realizó un estudio con la finalidad principal de actualizar el conocimiento de las condiciones geohidrológicas para establecer un diagnóstico de la evolución de los niveles del agua y contar con la información geohidrológica necesaria para determinar la recarga media anual del agua subterránea (CONAGUA, 2015a).

Para 2009 y 2015, CONAGUA, en el Diario Oficial de la Federación publicó “Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea: Acuífero (3209) Jalpa-Juchipila Estado de Zacatecas” y “Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea: Acuífero (0105) Valle de Calvillo Estado de Aguascalientes”, en los que calculan la disponibilidad media anual de agua subterránea haciendo un balance entre la recarga natural y los gastos comprometidos. Teniendo por conclusión para el año 2009, para el primero, una recarga cercana a los 73 Mm<sup>3</sup> y disponibilidad media anual aproximada de 17 Mm<sup>3</sup>; mientras que para el segundo, 25 Mm<sup>3</sup> y un déficit de casi 17 Mm<sup>3</sup>, respectivamente. Con respecto al año 2015, se reportan para el acuífero zacatecano, 73 Mm<sup>3</sup> de recarga y 4.5 Mm<sup>3</sup> de disponibilidad media anual; mientras que para el de Aguascalientes, 25 Mm<sup>3</sup> y un déficit de casi 18 Mm<sup>3</sup>, respectivamente.

Pérez (2016) realizó un estudio de vulnerabilidad acuífera para el acuífero de Calvillo, reportando que la dirección de las líneas de flujo poseen una dirección norte-suroeste, las cuales son mostradas en la Figura 1.1. Mismo comportamiento que podría esperarse en el acuífero del graben de Juchipila.

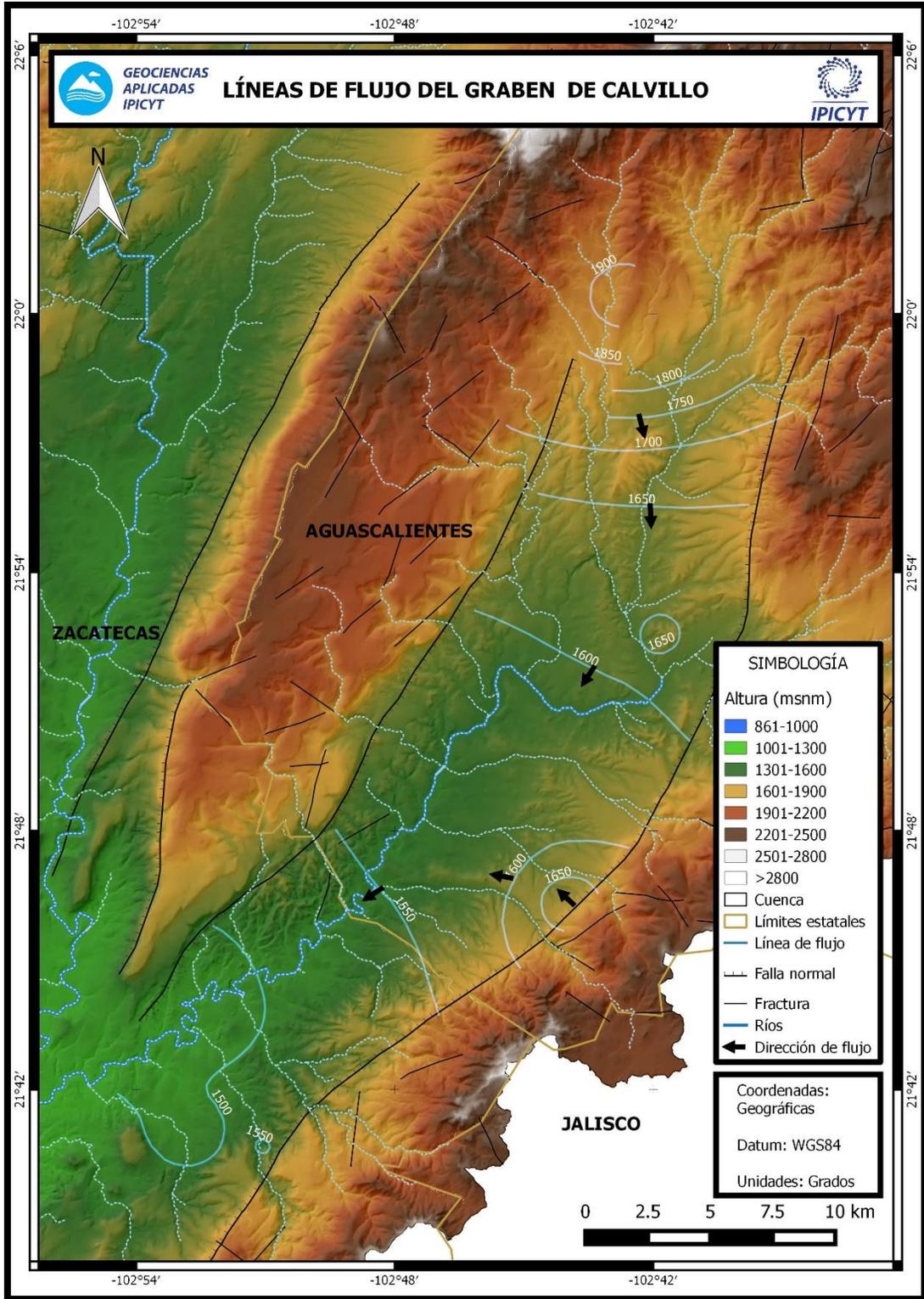


Figura 1.1 Líneas de flujo del graben de Calvillo. Modificado de Pérez (2016).

## **Hipótesis**

Si en una región existen materiales geológicos de buenas condiciones de porosidad y permeabilidad es posible que una porción de los volúmenes de precipitación pueda ser almacenada en estas unidades hidrogeológicas.

## **Objetivo Principal**

- Establecer metodología para la estimación de volúmenes potenciales de almacenamiento de agua subterránea en zonas semiáridas.

## **Objetivos Secundarios**

- Estimar los volúmenes potenciales de almacenamiento e infiltración potencial de las diferentes unidades del sistema.
- Generar mapas temáticos de la distribución espacial de coeficientes de infiltración (por pendiente, por textura y por cobertura vegetal), coeficiente de infiltración (C) y precipitación de las diferentes unidades del sistema para su manejo en una plataforma SIG.
- Obtener una aproximación de la geometría de las unidades acuíferas potenciales dentro de la zona de estudio.

## **Localización del área de estudio**

Geográficamente se ubica entre los meridianos 102° 30' 00" y 103° 45' 00" al oeste del meridiano de Greenwich, y los paralelos 20° 45' 00" y 22° 30' 00" de latitud norte. Cuenta con una extensión territorial de 5707 km<sup>2</sup>, abarcando en su mayor parte territorio del estado de Zacatecas, Aguascalientes y en menor porción del estado de Jalisco, como se puede apreciar en la Figura 1.2.

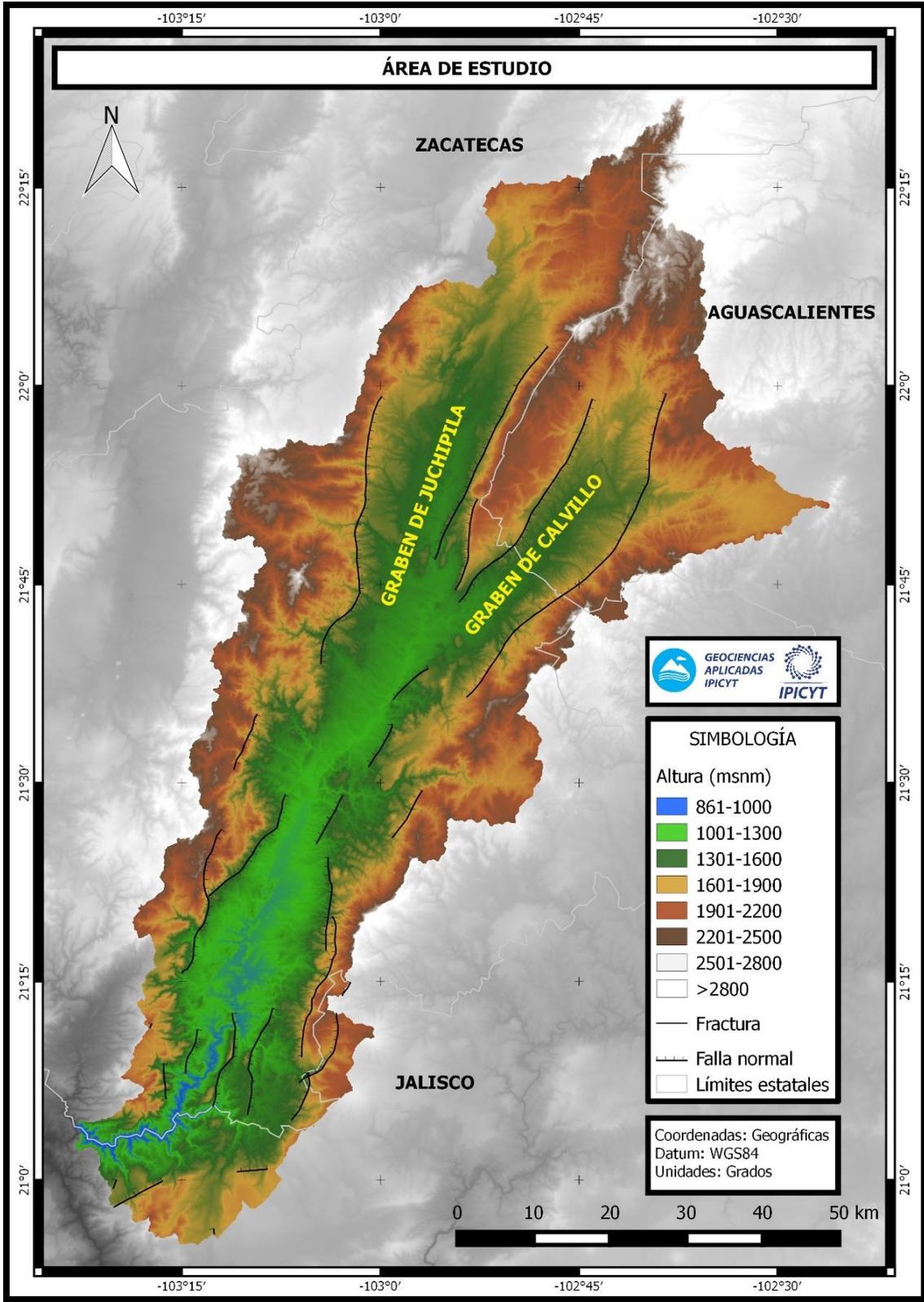


Figura 1.2 Mapa de ubicación de la zona de estudio.

# METODOLOGÍA

Para este trabajo se utilizaron dos metodologías, la primera se desarrolló para evaluar los volúmenes potenciales de almacenamiento y la segunda se adaptó para estimar los volúmenes potenciales de infiltración.

La primera metodología inicia con la recopilación de cartografía geológica y topografía para delimitar las unidades acuíferas del sistema, con información geológica de pozos y estudios de geofísica se establecieron espesores y características litológicas de las unidades hidrogeológicas (Figura 2.1). Algunos detalles de la metodología se describen a continuación.

## **Delimitación del área de estudio**

El área de estudio se delimitó a partir de cuencas hidrográficas que incluyen el graben de Juchipila y Calvillo obtenidos en archivos ráster de elevación con resolución de 0.5" (segundos) por pixel correspondientes a los estados de Aguascalientes, Jalisco y Zacatecas; todos provenientes del Continuo Mexicano de Elevaciones en su versión 3.0 (CEM 3.0) distribuidos por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2013). Dichos ráster se trabajaron en GRASS (2012), además de la correspondiente elaboración de mapas producto en QGIS (2015), en sus versiones 6.4.2 y 2.6.1 "Brighton", respectivamente; además de ser ambos Sistemas de Información Geográfica de plataforma libre.

## ***Información hidrológica***

El área de estudio se obtuvo del archivo vectorial de las Regiones Hidrológicas-Administrativas a escala 1:250, 000 de la Comisión Nacional de Biodiversidad (CONABIO, 2015).

### ***Información climatológica***

A través del archivo vectorial de Climas de México a escala 1:250,000, de la Comisión Nacional de Biodiversidad (CONABIO, 2015) se extrajo la climatología correspondiente al área de estudio.

### ***Información geológica***

La información geológica se obtuvo de los archivos vectoriales de las cartas geológicas del INEGI (2015), "Aguascalientes" (F13-9), "Guadalajara" (F13-12) y "Zacatecas" (F13-6); a escala 1:250,000.

### **Perfiles geológicos**

Con la información geológica, los modelos de elevación de terreno y QGIS (2015) en su versión "Brighton", se trazaron perfiles geológicos de forma perpendicular a las estructuras más importantes para este trabajo, es decir, un perfil del Graben de Juchipila, un perfil del Graben de Calvillo y uno más sobre la intersección de dichas estructuras.

Por contar con datos de perfiles elaborados en la perforación de pozos, proporcionados por parte de Comisión Estatal de Agua Potable, Drenaje y Alcantarillado de Aguascalientes, se hizo un análisis de estos datos que permitiera resaltar aspectos importantes de la geología y su geometría dentro de los perfiles.

Los perfiles topográficos trazados, la geología de la zona, la información de los perfiles de perforación de los pozos del área del Graben de Calvillo y la ayuda de Inkscape (2015) dieron lugar a una aproximación de la geometría correspondiente al perfil del Graben de Calvillo.

Posteriormente, dada la escasez de información que hay en México, se extrapolaron condiciones encontradas en la literatura y el perfil de Calvillo para completar la posible geometría de los otros perfiles faltantes.

### **Delimitación de las unidades acuíferas**

En el área de estudio se identificaron tres unidades hidrogeológicas, su clasificación y delimitación se hizo en función de los medios que provee la zona para el almacenamiento de agua, es decir, acuíferos en medio granular y en medio fracturado. El espesor asignado para cada unidad fue obtenido a partir de cortes litológicos.

### **Volúmenes potenciales de almacenamiento de las unidades acuíferas**

Los volúmenes potenciales de almacenamiento de las unidades acuíferas fueron calculados a partir de los espesores encontrados en los registros de perforación de los pozos del Graben de Calvillo e información bibliográfica.

Las fases en las que se desarrolló y procesó toda esta información se pueden apreciar en la Figura 2.1 y se describen en los siguientes apartados.

### ***Construcción de mallas auxiliares para interpolación***

Debido principalmente a la escasez de información de espesores geológicos y por otro lado de la pobre distribución espacial que presentaron los analizados, se elaboraron mallas de puntos en QGIS (2015) con el propósito de producir una mejor superficie con el método de interpolación a usar.

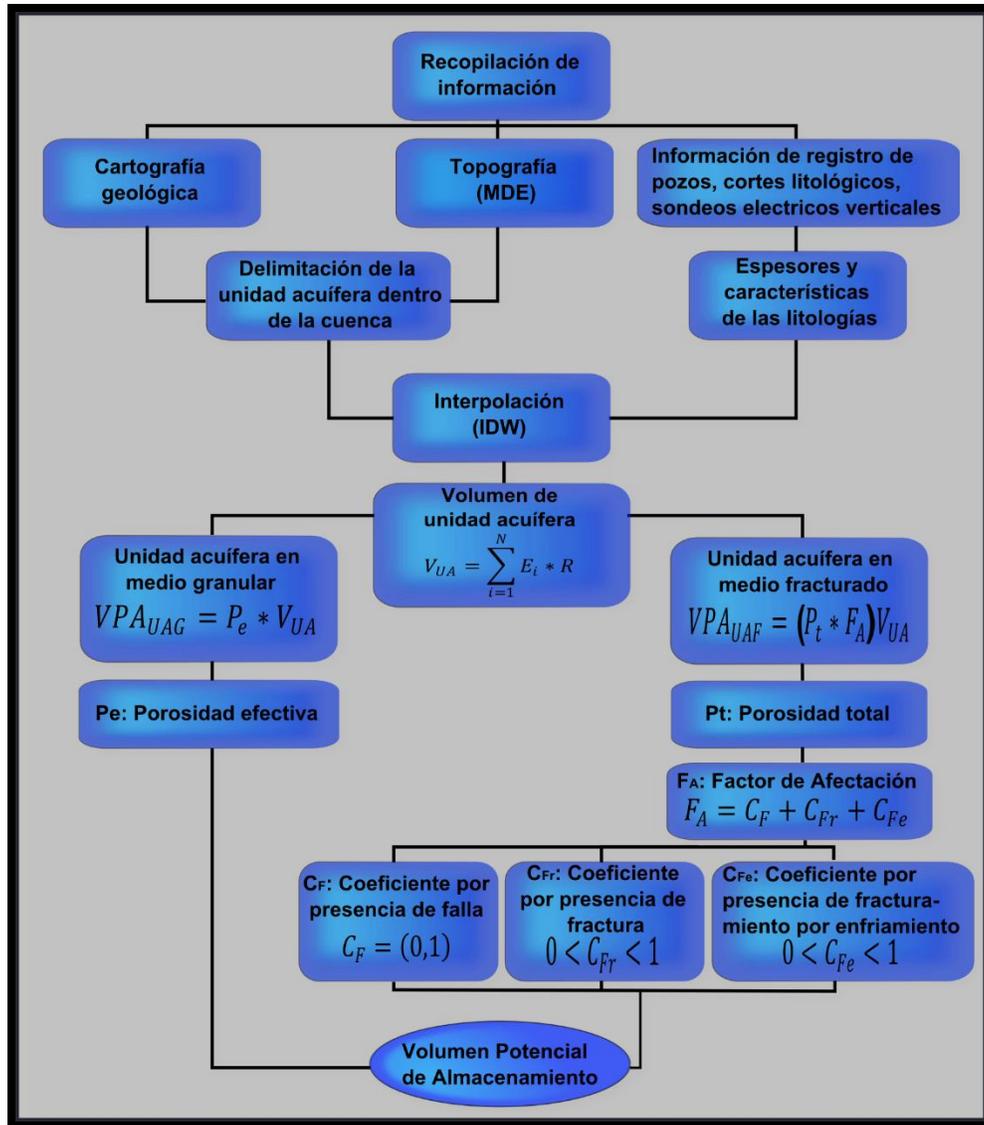


Figura 2.1 Diagrama de flujo de metodología propuesta para el cálculo de los volúmenes potenciales de almacenamiento de las unidades acuíferas.

Los puntos de las mallas mantienen una distancia entre cada uno, tanto en la vertical como en la horizontal, de 3.5 km y fueron rellenados con valores similares a los encontrados en la literatura o en caso del Graben de Calvillo, con valores cercanos a los que proporcionó el análisis de los pozos.

### **Interpolación de valores por método IDW**

Con el objetivo de generar el mapa de espesores correspondiente a las unidades acuíferas de interés, los datos de espesores contenidos en las mallas y los datos de provenientes de los pozos fueron sometidos, dentro de la plataforma de QGIS (2015), al método de interpolación IDW. Este método de interpolación es descrito por la siguiente expresión, misma que fue tomada de Cañada et al. (2010):

$$Z(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i * Z(S_i) \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

$Z(S_0)$  = Valor que se intenta predecir.

$N$  = Número de puntos muestrales alrededor del lugar que se va a predecir y que serán tenidos en cuenta en el cálculo.

$\lambda_i$  = Peso asignado a cada punto muestral.

$Z(S_i)$  = Valor observado del lugar  $S_i$ .

El coeficiente de ponderación ( $\lambda_i$ ) se calcula como sigue:

$$\lambda_i = \frac{d_{i0}^{-P}}{\sum_{i=1}^N d_{i0}^{-P}} \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

$d_{i0}$  = Distancia entre el lugar de predicción  $S_0$  y cada lugar muestral  $S_i$ .

$P$  = Potencia de reducción de la ponderación.

Cuando el coeficiente de ponderación ( $\lambda_i$ ) se incrementa, el valor que se intenta predecir ( $Z(S_0)$ ) se aproxima al valor del punto observado ( $Z(S_i)$ ) (QGIS, 2015b).

Los parámetros seleccionados para la ejecución de este algoritmo en el SIG fueron de P=2 y un tamaño de resolución de celda para el ráster producto de 0.5 segundos, la misma resolución que los MDT provenientes de INEGI.

***Estimación de volúmenes de material***

La herramienta de algebra de mapas del SIG utilizado, hizo posible calcular una aproximación de volúmenes de material de las unidades acuíferas en análisis. Esto a partir de la aplicación de la siguiente expresión a los ráster producto de la fase anterior:

$$V_{UA} = \sum_{i=1}^N E_i * R \dots \dots \dots (3)$$

Donde:

$V_{UA}$  = Volumen aproximado de la unidad acuífera en análisis (m<sup>3</sup>).

$E_i$  = Espesor calculado en la interpolación del pixel  $i$  (m).

$N$  = Número total de pixeles en el ráster.

$R$  = Resolución del pixel del ráster (m<sup>2</sup>).

***Estimación de los volúmenes potenciales de almacenamiento***

Los volúmenes potenciales de capacidad se estimaron dependiendo de la unidad a la que pertenecen, es decir, el volumen potencial de almacenamiento para una unidad acuífera en medio granular se estimó como sigue:

$$VPA_{UAG} = P_e * V_{UA} \dots \dots \dots (4)$$

Donde:

$VPA_{UAG}$  = Volumen potencial de almacenamiento de la unidad acuífera en medio granular ( $m^3$ ).

$P_e$  = Porosidad eficaz de la unidad acuífera en medio granular (%).

$V_{UA}$  = Volumen del material que compone a la unidad acuífera ( $m^3$ ).

Mientras que, para una unidad acuífera en medio fracturado, se estimó tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- 1) Cada falla y fractura produce una zona de afectación sobre el volumen de material, es decir, genera volumen potencial de almacenamiento.
- 2) El fracturamiento generado por el enfriamiento del material volcánico afecta de manera uniforme a todo el volumen de dicho material, por ende, también genera volumen potencial de almacenamiento.

A manera de expresar la influencia de las consideraciones anteriores en la estimación del volumen potencial de almacenamiento, se le hizo el siguiente arreglo a la ecuación para medio granular:

$$VPA_{UAF} = (P_t * F_A) V_{UA} \dots \dots \dots (5)$$

$VPA_{UAF}$  = Volumen potencial de almacenamiento de la unidad acuífera en medio fracturado ( $m^3$ ).

$V_{UA}$  = Volumen del material que compone a la unidad acuífera ( $m^3$ ).

$P_t$  = Porosidad total de la unidad acuífera (%).

$F_A$  = Factor de afectación por falla, fracturas y fracturas por enfriamiento en el material volcánico (%).

El factor de afectación ( $F_A$ ) está dado por la siguiente expresión:

$$F_A = C_F + C_{Fr} + C_{Fe} \dots \dots \dots (6)$$

Donde:

$C_F$  = Coeficiente de afectación por presencia de falla (%).

$C_{Fr}$  = Coeficiente de afectación por presencia de fractura (%).

$C_{Fe}$  = Coeficiente de afectación por presencia de fracturas por enfriamiento (%).

Para el uso de la expresión para el cálculo del factor de afectación, fue necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- 1)  $F_A > 0$ : El factor de afectación ( $F_A$ ) no puede ser cero, debido a que se considera que al menos el material volcánico es afectado por el fracturamiento generado por enfriamiento.
- 2)  $F_A \leq 1$ : El factor de afectación ( $F_A$ ) tiene como valor máximo el 1, es decir, el espesor puede ser afectado completa o parcialmente por fallas, fracturas o fracturas por enfriamiento.
- 3)  $C_F = (0,1)$ : El coeficiente de afectación por presencia de falla ( $C_F$ ) sólo toma dos posibles valores, 1 en la zona de afectación de la falla y 0 fuera de la misma. Se considera que la presencia de una zona de falla afecta la totalidad del espesor; mientras que en su ausencia, el material permanece sano en su totalidad.
- 4)  $0 < C_{Fr} < 1$ : El coeficiente de afectación por presencia de fractura ( $C_{Fr}$ ) puede variar entre 0 y 1. Esto debido a que se considera que las fracturas pueden variar su porcentaje de afectación del espesor por diversas razones, tales como su ubicación respecto a zonas de esfuerzos de distinta intensidad, procesos de colapso, etc.
- 5)  $0 < C_{Fe} < 1$ : El coeficiente de afectación por presencia de fracturas generadas por enfriamiento ( $C_{Fe}$ ) puede variar entre 0 y 1. Principalmente se debe a la variedad de intensidades en los cambios de temperatura a las que

pudo enfriarse un material volcánico. En algunos casos los enfriamientos ocurren de manera lenta que el fracturamiento tiende a no afectar de manera significativa al material volcánico; o en caso contrario, es decir, cuando ocurre de manera rápida, el material volcánico se puede ver afectado de manera moderada a severa.

La representación espacial del factor de afectación ( $F_A$ ) está dada por los lineamientos de la cartografía geológica de INEGI (2015). Por lo que en QGIS (2015), sólo fue necesario el trazado de una zona de influencia alrededor de cada uno de esos lineamientos. Posteriormente se realizó la asignación de valores a cada uno de los coeficientes que componen el factor de afectación ( $F_A$ ). Finalmente, ya con todos los elementos elaborados, se procedió con la herramienta de álgebra de mapas a estimar el volumen potencial de almacenamiento.

Los valores de la porosidad eficaz y de porosidad total usados fueron tomados de Sanders (1998), mismos que se muestran en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1. Porosidad total y eficaz. Tomado de Sanders (1998).

<b>Material</b>	<b>Porosidad total (%)</b>	<b>Porosidad eficaz (%)</b>
Arcillas	40-60	0-5
Limos	35-50	3-19
Arenas finas, arenas limosas	20-50	10-28
Arena gruesa o bien clasificada	21-50	22-35
Grava	25-40	13-26
Shale intacta	1-10	0.5-5
Shale fracturada/alterada	30-50	
Arenisca	5-35	0.5-10
Calizas, dolomías NO carstificadas	0.1-25	0.1-5
Calizas, dolomías carstificadas	5-50	5-40
Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar	0.01-1	0.0005
Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	1-10	0.00005-0.01

## Volúmenes potenciales de infiltración y precipitación de las unidades acuíferas

Para el cálculo de los volúmenes de precipitación e infiltración se hizo uso de un modelo analítico para la determinación de la infiltración potencial, con base en la lluvia mensual propuesto por Schosinsky y Losilla (2000), el cual se detalla en la Figura 2.2 y que se describe después.

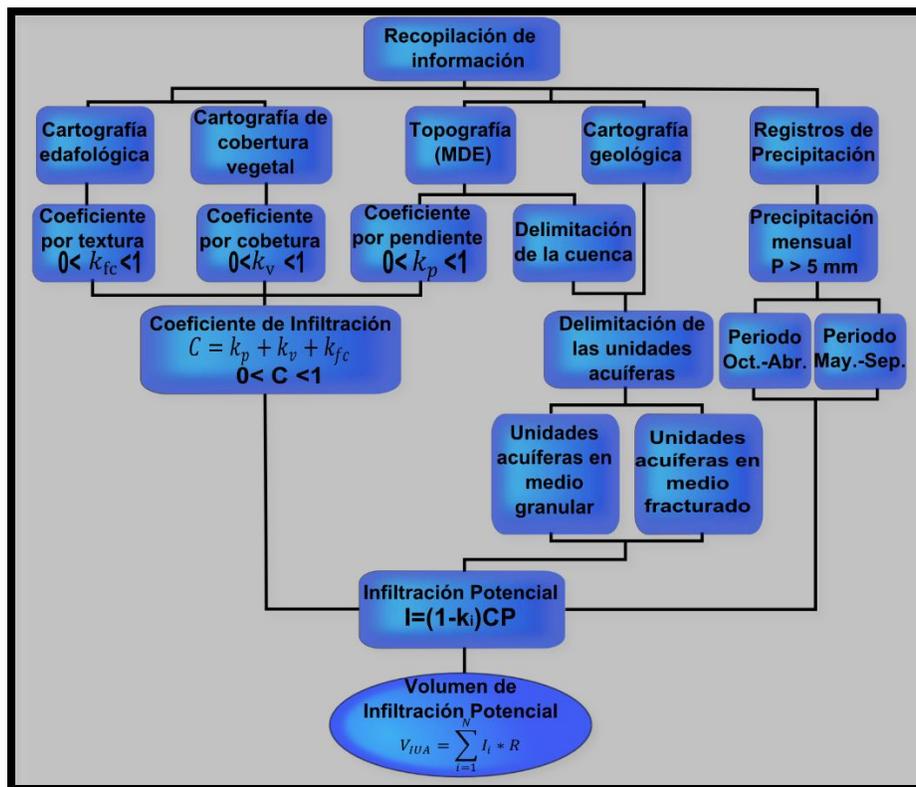


Figura 2.2 Diagrama de flujo de la metodología del modelo analítico de Schosinsky y Losilla (2000).

### **Modelo analítico de Schosinsky y Losilla (2000)**

La ecuación que describe el modelo analítico para la determinación de la infiltración a partir de la precipitación mensual propuesto por Schosinsky y Losilla (2000) es:

$$I = (1 - k_i)CP \dots \dots \dots (7)$$

Donde:

$I$  = Infiltración mensual (mm/mes).

$k_i$  = Fracción de lluvia que es interceptada por el follaje (adimensional).

$C$  = Coeficiente de infiltración (adimensional).

$P$  = Precipitación mensual (mm/mes)

Los autores, después de hacer revisión bibliográfica, asumen una retención por follaje del 12%, es decir, consideran  $k_i = 0.12$ , de esta manera la ecuación anterior queda:

$$I = (0.88)CP \dots \dots \dots (8)$$

Las metodologías para la obtención del resto de los elementos en el modelo se describen detalladamente en los apartados siguientes.

### **Coeficiente De Infiltración ( $C$ )**

El coeficiente de Infiltración ( $C$ ) resulta de la contemplación de tres elementos como se puede observar en la siguiente ecuación:

$$C = k_p + k_v + k_{fc} \dots \dots \dots (9)$$

Donde:

$k_p$  = Fracción que infiltra por efecto de la pendiente (adimensional)

$k_v$  = Fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal (adimensional)

$k_{fc}$  = Fracción que infiltra por la textura del suelo (adimensional)

Existen dos consideraciones hechas por Schosinsky y Losilla (2000) con respecto a este coeficiente:

- $C \leq 1$  Debido a que no se puede infiltrar más del total de precipitación que cae sobre determinada área.
- Si  $P \leq 5mm$ , entonces  $C = 0$ . Se asume que precipitaciones mensuales iguales o menores a estas no generan infiltración ni escurrimiento.

Los tres componentes del coeficiente de infiltración son detallados en las siguientes secciones.

### Coeficiente de Infiltración por Pendiente ( $k_p$ )

Con base en una revisión bibliográfica, Schosinsky y Losilla (2000), proponen la clasificación para las pendientes mostrada en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Coeficiente de infiltración por pendiente.

Tomado de Schosinsky y Losilla (2000).

Coeficiente de infiltración por pendiente ( $k_p$ )		
Muy plana	0.02%-0.06%	0.30
Plana	0.3%-0.4%	0.20
Algo plana	1%-2%	0.15
Promedio	2%-7%	0.10
Fuerte	mayor de 7%	0.06

La clasificación de las pendientes para la zona de estudio se llevó a cabo por medio de los MDT (Modelos Digitales de Terreno) y las herramientas de procesamiento que provee QGIS (2015) en su versión "Brighton".

### Coeficiente de Infiltración por Cobertura Vegetal ( $k_v$ )

La Tabla 2.3 expone las coberturas vegetales que Schosinsky y Losilla (2000) presentaron con sus respectivos valores asociados:

Tabla 2.3. Coeficiente de infiltración por cobertura vegetal.

Tomado de Schosinsky y Losilla (2000).

Coeficiente de infiltración por cobertura vegetal ( $k_v$ )	
Cobertura con zacate menos 50%	0.09
Terrenos cultivados	0.10
Cobertura con pastizal	0.18
Bosques	0.20
Cobertura con zacate más de 75%	0.21

Las diferentes coberturas y usos de suelos fueron obtenidos de INEGI (2015), en específico extraídas de la Carta de Uso de Suelo y Vegetación F13-12 "Guadalajara", F13-9 "Aguascalientes" y F13-6 "Zacatecas", todas a una escala de 1:250 000 y en formato vectorial. Posteriormente se les dio el tratamiento y asignación de su respectivo valor por medio de QGIS (2015).

Coeficiente de Infiltración por Textura del Suelo ( $k_{fc}$ )

Schosinsky y Losilla (2000) proporcionan, para la fracción de infiltración por efecto de la textura del suelo, los valores y texturas que exponen en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Coeficiente de infiltración por textura del suelo.

Tomado de Schosinsky y Losilla (2000).

Coeficiente de infiltración por textura del suelo ( $k_{fc}$ )	
Arcilla compacta impermeable	0.10
Combinación de limo y arcilla	0.20
Suelo limo arenoso no muy compacto	0.40

Las texturas de suelo de la zona de estudio fueron extraídas por medio de QGIS (2015) de los archivos vectoriales: Carta de Tipo de Suelo F13-12 "Guadalajara", F13-9 "Aguascalientes" y F13-6 "Zacatecas", todas a escala 1:250 000 y provenientes de la base de datos de INEGI (2015). Para luego asignarles su valor de dicho coeficiente a cada uno de los tipos de texturas de suelo encontradas.

## ***Precipitación***

La metodología seguida por la cual se obtuvieron los juegos de datos de precipitación para el área de estudio se detallan en las siguientes secciones.

### *Recopilación y selección de la información*

Los datos de precipitación en crudo fueron extraídos de la base de datos de estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Se seleccionaron los registros que estuvieran más completos, contemplando obtener tres años con características de rangos de precipitación variados, es decir, de poca precipitación, de precipitación promedio y de abundante precipitación.

### *Tratamiento de los datos seleccionados*

Realizada la selección de las estaciones con los periodos de precipitación deseados, se promediaron los registros diarios para obtener el promedio mensual de precipitación para cada mes del año y a la vez para cada una de las estaciones con registros útiles.

### *Ubicación espacial de los registros de precipitación*

Los datos mensuales de precipitación resultado de este tratamiento anterior y las coordenadas de ubicación de las estaciones a las cuales pertenecen fueron guardados en formato CSV (tabulación delimitada por comas), formato legible y de fácil manejo para QGIS (2015), con la finalidad de georreferenciar esta información,

transformar la información en archivos vectoriales de puntos y proceder a la siguiente fase.

### *Distribución espacial de la precipitación*

La distribución espacial de la precipitación fue producto de la interpolación por el método IDW sobre la plataforma SIG QGIS (2015), siendo materia prima los archivos generados en la sección anterior.

### *Escalas de análisis*

Espacialmente, la precipitación es analizada de acuerdo a la extensión de las unidades acuíferas delimitadas. Mientras que para la escala temporal es dividido el año de precipitación en dos periodos. El criterio para realizar esta división fue el de incluir en un sólo periodo los meses que aportaran aproximadamente el 85% del volumen de precipitación, esto a partir de los resultados arrojados por las medias aritméticas mensuales de todas las estaciones promediadas mensualmente.

### ***Infiltración potencial***

Por medio de la herramienta de Calculadora Ráster de QGIS (2015) fue aplicada la ecuación del modelo analítico de Schosinsky y Losilla (2010). Primero para obtener el coeficiente de infiltración ( $C$ ) y después para multiplicarlo por cada uno de los ráster de precipitación generados por las interpolaciones.

## ***Estimación de los Volúmenes Potenciales de Precipitación e Infiltración potencial***

La metodología es similar a la usada en la sección del cálculo de volumen de materiales, sólo que en vez de ser ráster de espesores fueron usados ráster de precipitación y posteriormente de infiltración potencial.

# RESULTADOS

## Descripción del área de estudio

### *Climatología*

De acuerdo a la Comisión Nacional de Biodiversidad (CONABIO) (2015), el clima predominante de la región es semiárido semicálido (BS1hw), tal y como se aprecia en la Figura 3.1. La temperatura promedio anual es de 18°C, la del mes más frío es de 18° C y la del más cálido es de 22° C; con lluvias en verano y una aportación del 5 a 10% de precipitación anual durante la estación invernal. La precipitación media anual en la cuenca del Río Calvillo es de 615 mm, mientras que en la cuenca del Río Juchipila cuenta con 537 mm/año (CONAGUA, 2009a 2009b, 2015a y 2015b).

### *Geología*

#### *Geología regional*

Con respecto al marco geológico de la zona a analizar en el presente estudio, tenemos que se encuentra dentro de la provincia volcánica de la Sierra Madre Occidental (SMOc), en colindancia al sur con el Eje Neovolcánico y al noroeste con la Mesa del Centro, tal y como se puede apreciar en la Figura 3.2.

La Sierra Madre Occidental es una de las provincias silíceas más grandes del mundo perteneciente al Cenozoico. La cubierta ignimbrítica de la SMOc que se estima en la actualidad es aproximadamente 300 000 km<sup>2</sup>. Dicha provincia es el resultado de diferentes episodios magmáticos y tectónicos que tuvieron lugar durante el Cretácico-Cenozoico, asociados a la subducción de la Placa de Farallón debajo de la Placa de Norteamericana y a la apertura del Golfo de California (Ferrari et al. 2005).

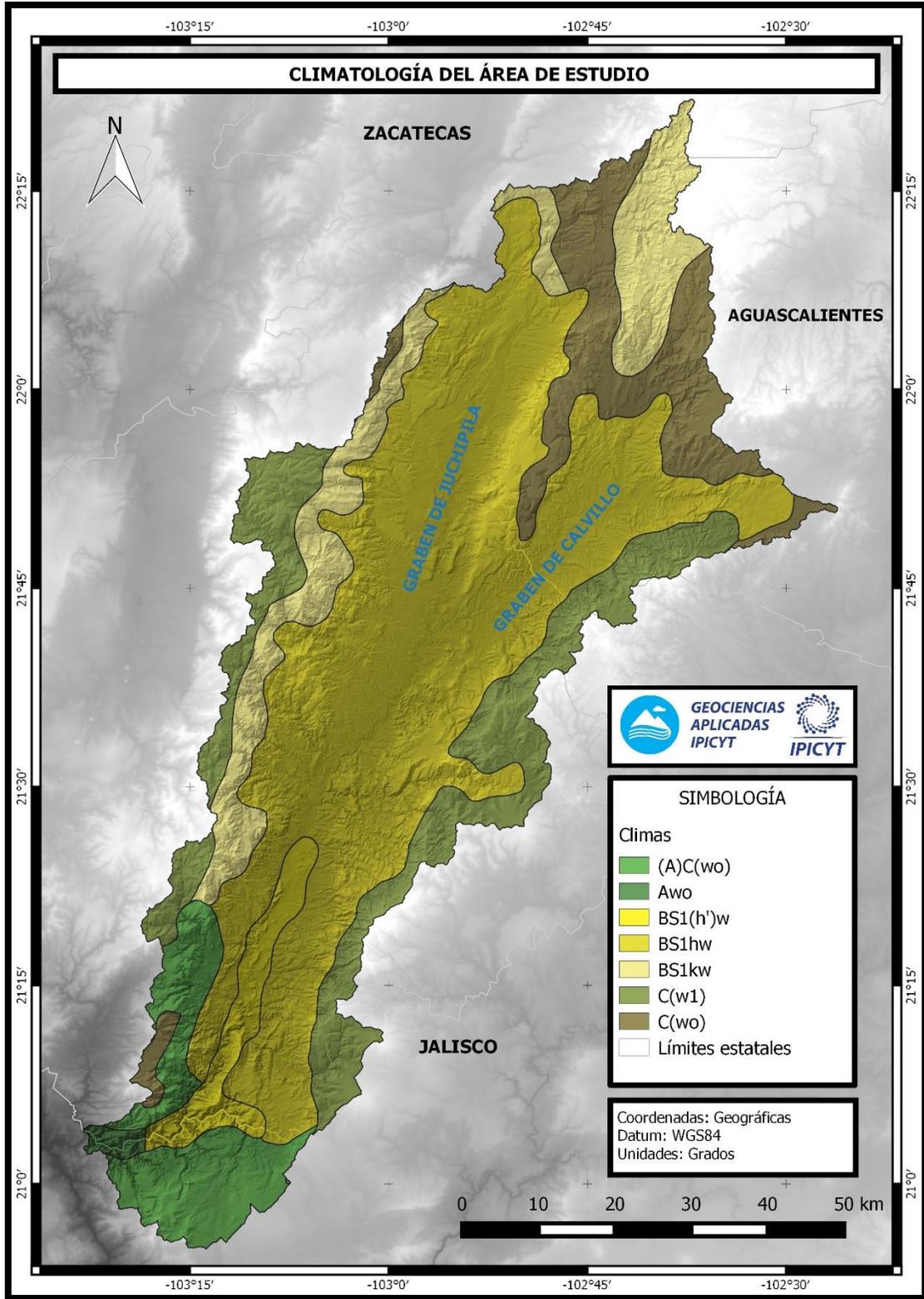


Figura 3.1 Climatología de la zona de estudio.

El paquete ígneo de la SMOc está constituido por dos grandes secuencias estratigráficas; la secuencia inferior o “Complejo Volcánico Inferior” (CVI) que comprende derrames de lava, ignimbritas y grandes batolitos que varían en edad desde el Cretácico Tardío hasta el Terciario Temprano. La segunda secuencia descansa discordantemente sobre la primera, cuenta con un gran espesor de ignimbritas, derrames riolíticos, toba y algunos derrames de basalto, y es conocida como “Supergrupo Volcánico Superior” (SVS) (Córdoba, 1988).

Aguirre et al. (2008), marcan que es generalmente aceptado que la SMOc fue formada durante varios episodios volcánicos y que los picos de estos episodios volcánicos coinciden con los picos del régimen extensivo de largo plazo. Dio origen a la provincia del Basin and Range (B&R), es decir que la formación de las dos provincias se traslapan en tiempo y espacio. Aguirre y Labarthe (2003) proponen que una porción muy grande de las ignimbritas de la SMOc están relacionadas a fisuras-respiradero asociadas con el sistema de fallas regional y graben de la provincia del B&R, a este periodo conocido como el “Estallido de las Ignimbritas” (Ignimbrite Flare-up, en su nomenclatura en inglés). Dichos autores lo definieron textualmente como “un periodo de actividad volcánica explosiva que produjo enormes volúmenes de capas de ignimbrita silícica, el cual tomó lugar principalmente entre 38 y 23 Ma en México”.

Este periodo de actividad volcánica aparentemente migró del noreste al suroeste, es decir, de Chihuahua Central (38-27 Ma) a Durango-Toyaltita (32-29 Ma), después a Zacatecas-Tepic (24-23 Ma) y aparentemente terminando a los 16 Ma en Jalisco-Nayarit (Aguirre y Labarthe 2003).

Aguirre y Labarthe. (2003), concluyen que como resultado final del traslape en tiempo y espacio de la provincia de la SMOc y la provincia del B&R se forman depresiones particularmente largas y profundas al sur de la SMOc. Las fallas normales con tendencia noroeste-noreste que disectan la provincia de la SMOc originan la formación de estructuras tipo graben y semi-graben.



Figura 3.2 Provincias Fisiográficas de México.

### Geología estructural

La zona está compuesta por dos estructuras de tipo graben conocidas como graben de Juchipila y graben de Calvillo, este último considerado como una ramificación del primero. De acuerdo con Nieto et al. (1999), la fosa de Juchipila es una depresión alargada con aproximadamente 80 km de longitud y de 15 km de anchura, mientras que la fosa de Calvillo es catalogada como una depresión bien definida de 40 km de longitud y 12 km de anchura; las cuales cuentan con 1000 m y 900 m aprox. de desnivel topográfico, respectivamente.

En la porción norte de las fosas tectónicas predominan depósitos sedimentarios de arenisca-conglomerado, en la parte central se tiene además limolita-arenisca, tobas, depósitos aluviales, riolitas y calizas lacustres, en tanto que en la porción sur de

estas estructuras dominan arenisca-conglomerado, calizas lacustres y brechas volcánicas.

Los pilares (Sierra de Morones, Sierra Fría, Sierra El Laurel y Sierra de Nochistlán) están conformados por unidades de riolita-toba ácida principalmente en el norte, toba ácida en la región central y a medida que se avanza hacia el sur aumentan los afloramientos de basalto. También se puede observar un pequeño afloramiento de andesita en la Sierra de Morones.

### Estratigrafía

En la Tabla 3.1, se muestran las áreas en kilómetros cuadrados y en porcentaje de las principales unidades geológicas en afloramiento dentro de la cuenca en estudio.

Tabla 3.1. Principales unidades geológicas de la zona de estudio.

Unidad geológica	Clave de unidad	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje de área (%)
<b>Riolita-Toba ácida</b>	R-Ta	3264	57.19
<b>Arenisca-Conglomerado</b>	Ar-Cg	949	16.63
<b>Basalto</b>	B	664	11.63
<b>Limolita-Arenisca</b>	Lm-Ar	246	4.31
<b>Toba ácida</b>	Ta	164	2.87
<b>Aluvial</b>	A	159	2.79
<b>Basalto-Brecha volcánica básica</b>	B-Bvb	91	1.59
<b>Caliza-Limolita</b>	Cz-Lm	87	1.52
<b>Otras unidades</b>	----	83	1.45
<b>Total</b>		<b>5707</b>	<b>100</b>

Las principales unidades geológicas que conforman la zona de estudio se muestran en la Figura 3.3:

Andesita (A): En la literatura se reporta que los acontecimientos geológicos que influyeron en la formación de la actual zona de estudio dieron inicio en el Oligoceno-Mioceno de la Sierra Madre Occidental según Damon et al. (1981), por medio de

dos eventos, al principio del Oligoceno (Mc Dowell y Keizer, 1977) se depositaron rocas de composición intermedia constituidas por andesitas y andesitas basálticas, las cuales constituyen la secuencia andesítica inferior. Webber et al. (1994) aportan una sección estratigráfica correspondiente a un área cercana al municipio de Juchipila, Zac., ésta consiste de flujos andesítico-basálticos a andesíticos de edad eocénica, que fueron cubiertos discordantemente por flujos de lavas basálticas a andesítico-basálticas de edad oligocénica y flujos de ceniza de composición riolítica.

Conglomerado rojizo de Guanajuato (Cg): que consiste de un conglomerado oligomíctico con clastos subredondeados, compuesto por rocas andesíticas (Ferrari et al. 2005).

Riolita-Toba ácida (R-Ta): El segundo evento al que Damon et al. (1981) se refieren, es el que aportó las rocas de mayor distribución en el área de estudio, con espesores mayores a los 800 m de una secuencia continua con predominancia de toba riolítica, riolita-ignimbrita y dacita con edades del Oligoceno superior-Mioceno inferior.

Limolita-Arenisca (Lm-Ar), Caliza lacustre-Limolita (Cz-Lm), Lutita-Arenisca (Lu-Ar), Arenisca-Conglomerado (Ar-Cg), Depósitos aluviales (Al): La carta geológica F13-9 Aguascalientes perteneciente al Servicio Geológico Mexicano (SGM) aporta que durante el Plioceno dentro del graben de Juchipila se depositó un paquete sedimentario continental como relleno de la fosa, consta de calizas lacustres, lutitas, areniscas y lentes de conglomerado de hasta 200m de espesor. Finalmente, en el Plioceno medio se depositaron unidades de conglomerados oligomícticos y polimícticos.

De manera general, Nieto et al. (1999) describen la estratigrafía de relleno del graben de Juchipila como una sucesión volcánico-sedimentaria estratificada que consiste de 10 a 20 m de conglomerado cuársico volcánico seguido de aproximadamente 250 m de arcillas, limos y calizas lacustres, además de depósitos aluviales (gravas y arenas) de edad desconocida tales como las que rellenan el graben de Tlaltenango.

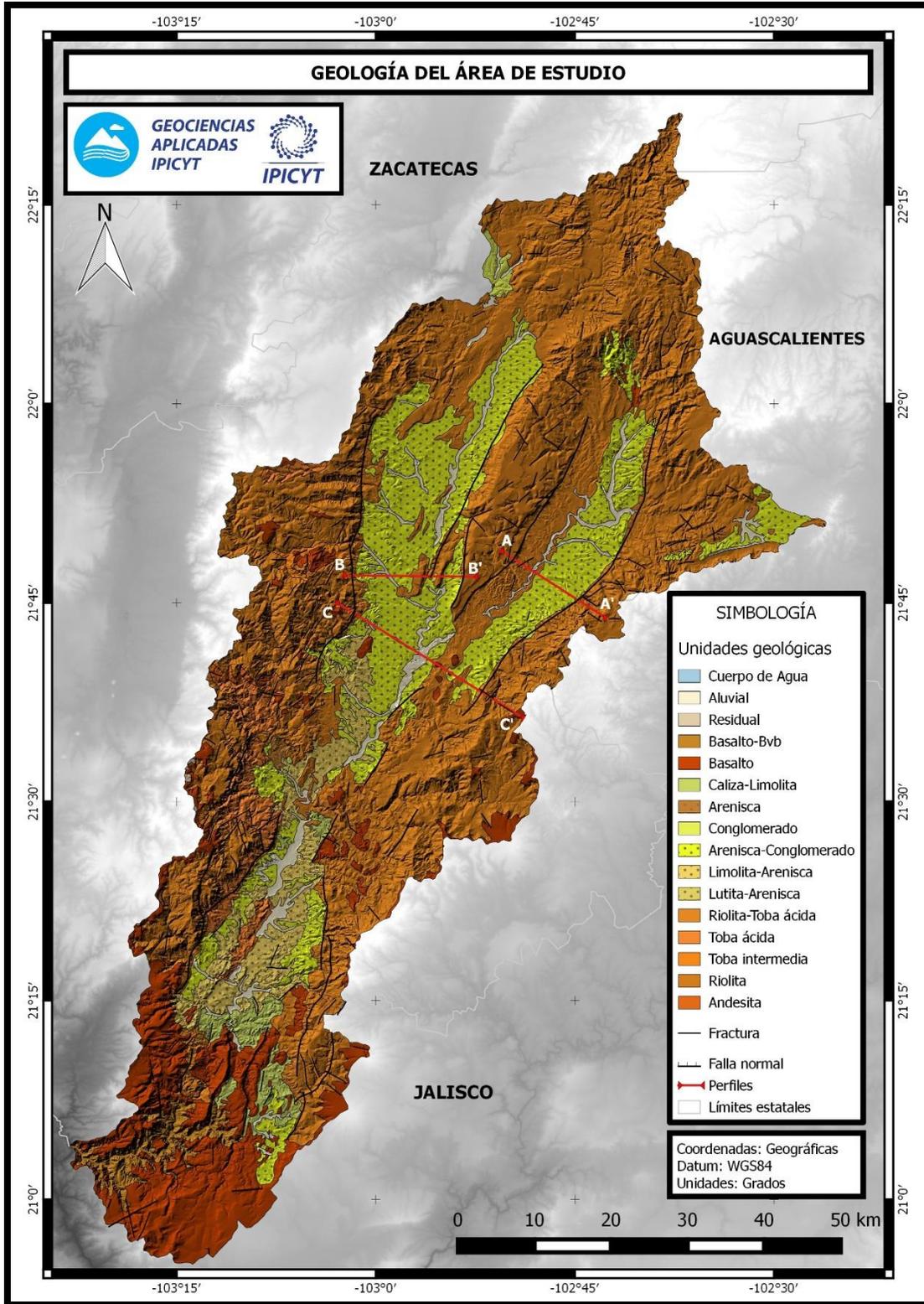


Figura 3. 3 Mapa geológico de la zona de estudio.

### ***Geología del subsuelo del graben de Calvillo***

Como complemento para lograr una caracterización más realista de los perfiles se analizó información de pozos procedente de la Instituto del Agua de Aguascalientes (INAGUA) para los localizados dentro del graben de Calvillo. La Tabla 3.2 muestra el resumen extraído de la información, por otro lado la Figura 3.4 muestra sus localizaciones.

El análisis de pozos dentro del graben de Calvillo reveló que la unidad geológica arenisca-conglomerado constituye posiblemente el acuífero libre de la zona del cual se alimentan dichos pozos, esta unidad cuenta con espesores de 160 m en su parte más delgada hasta aproximadamente 330 m en su parte más gruesa, ubicadas en la parte este-centro y oeste de dicha estructura, respectivamente.

Por otro lado, los pozos ubicados sobre los hombros al este del graben indican la continuidad del acuífero libre pero en un medio fracturado. Dentro de la unidad riolita-toba ácida, los registros de pozos en esta zona indican que existe fracturamiento hasta una profundidad de 270 m aproximadamente.

Otro dato importante que aportó esta información fue el comportamiento muy vertical que tiene la falla normal oriente que delimita al Graben de Calvillo, ya que el pozo que se encuentra cerca de dicha área no cortó material fracturado que diera indicios que apuntaran a lo contrario.

Tabla 3.2. Resumen del registro de pozos del graben de Calvillo.(Basado en la descripción litológica de pozos proporcionada por el INAGUA)

LOCALIDAD	MATERIAL SOBRE EL QUE SE EMPLAZÓ	PROFUNDIDAD DE PERFORACIÓN	PROFUNDIDAD MÁXIMA DEL MATERIAL DONDE SE EMPLAZÓ	INTERVALOS DE FRACTURAMIENTO Y ALTERACIONES DE UNIDADES
Terrero de la Labor	Sedimentario	300	222	-----
La Labor	Sedimentario	300	60	-----
Ojocaliente	Sedimentario	300	300	-----
Los Arcos	Sedimentario	450	382	-----
La Panadera	Sedimentario	300	280	-----
El Cuervero 1	Sedimentario	250	mayor a 250	-----
Vista Hermosa	Sedimentario	400	204	-----
Calvillo	Sedimentario	260	260	-----
CBTA	Sedimentario	450	304	-----
SEDENA	Sedimentario	250	mayor a 250	-----
Emiliano Zapata	Sedimentario	260	mayor a 250	-----
Mesa Grande	Sedimentario	327	mayor a 327	-----
Jaltiche de Abajo 1	Sedimentario	390	163	-----
La Teresa	Sedimentario	280	64	-----
El Temazcal	Volcánico	500	-----	56-76, 112-140,152-173,273-302,332-358,368-420,430-500
Puerta de Fragua	Volcánico	350	-----	111-280
Presa la Codorniz	Volcánico	294	-----	0-6,12-34,50-186,224-264
El Sauz de la Labor 1	Volcánico	385	-----	108-272
El Sauz de la Labor 2	Volcánico	300	-----	-----
El Maguey 1	Volcánico	357	-----	30-100, 138-170
El Maguey 2	Volcánico	450	-----	128-151,162-187,202-276,284-432
El Sauz	Volcánico	400	-----	270-327
Colomos	Volcánico	390	-----	254-390
Malpaso	Volcánico	350	-----	-----
Coyotillos	Volcánico	308	-----	(SED. MAYOR/TE)
Terrero del Refugio	Volcánico	450	-----	14-42,62-88
Cerro Blanco	Volcánico	275	-----	0-22,26-121,132-154,184-198,216-275
Jaltiche de Abajo 2	Volcánico	300	-----	-----
El Cuervero 2	Volcánico	472	-----	160-298

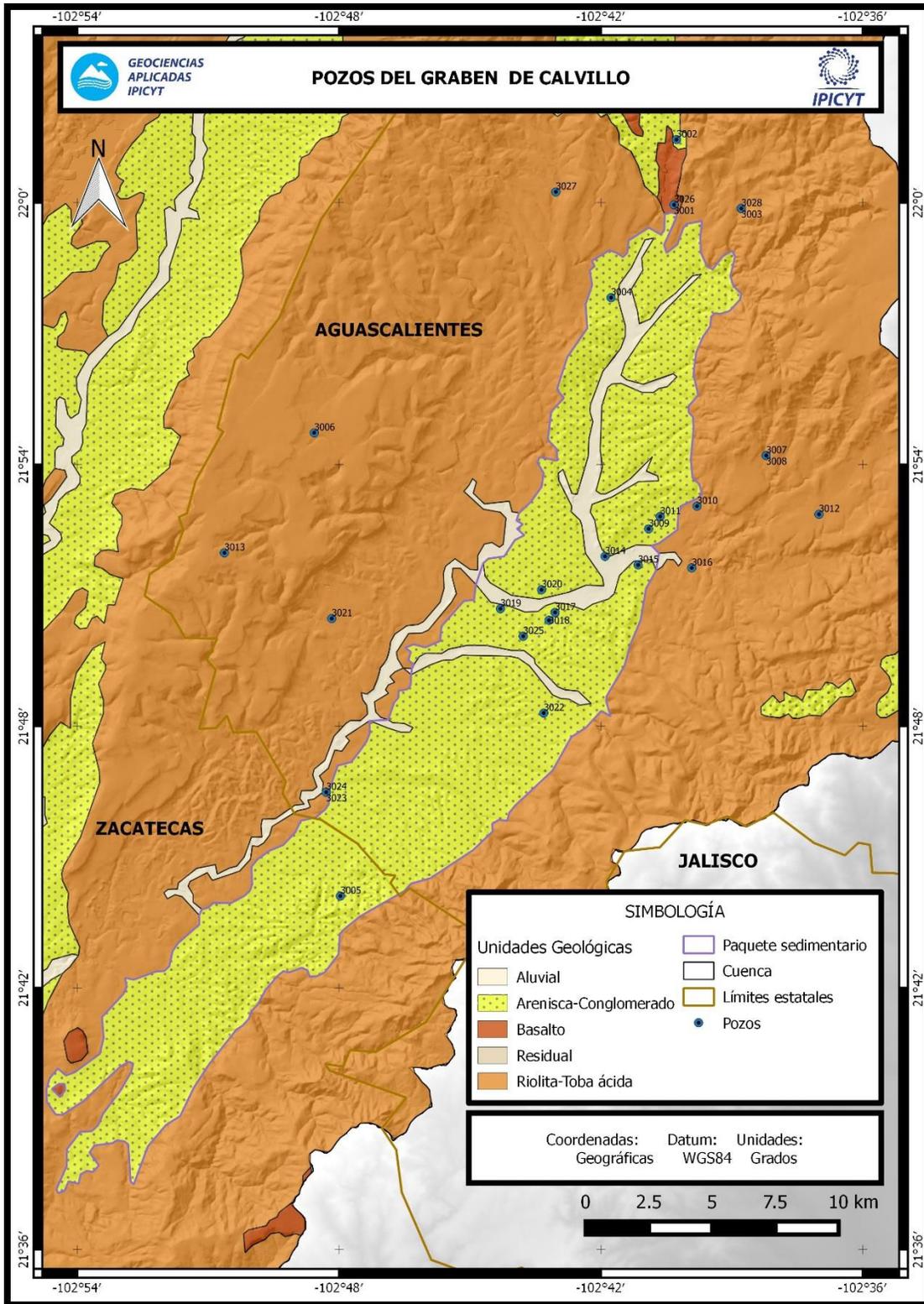


Figura 3.4 Mapa de ubicación de los pozos del graben de Calvillo.

### Descripción de los perfiles geológicos

Con el propósito de obtener una idea clara de la geometría y los aspectos hidrogeológicos importantes de los graben en estudio, tales como las fallas, fracturas, continuidad hidráulica y profundidades en unidades geológicas de interés, se realizaron tres perfiles geológicos, uno para el graben de Juchipila, otro para el graben e Calvillo y un tercero para la zona de intersección de los anteriores. La Figura 3.2 muestra la ubicación de los perfiles a analizar.

#### Perfil del graben de Calvillo

Cuenta con una orientación N60°W, la cual permite cortar las fallas normales características de estas estructuras, tal y como se puede observar en la Figura 3.5. Como unidad base del perfil se encuentra la andesita, unidad de la cual se desconoce sus espesores, pero es reportada en la literatura por Mc Dowell y Keizer, 1977; Webber et al. 1994, perteneciente al CVI de la Sierra Madre Occidental. Ferrari et al. (2005) afirma que esta secuencia de andesitas está cubierta por arenisca y conglomerado rojizos, marcados en la Figura 3.5 con espesor aproximado de 100 m. La secuencia volcánica de riolitas y tobas ácidas que sobreyacen las arenisca-conglomerado rojizos, pertenecen al SGVS de la Sierra Madre Occidental, dentro de este perfil cuenta con espesores que van desde los 700 m en su parte más gruesa hasta los 400 m en su parte más delgada. La unidad geológica sedimentaria que cubre discordantemente a la riolita-toba ácida del SGVS es la arenisca-conglomerado, ésta alcanza espesores aproximados de 400 m en su parte más gruesa y de 250 m en su parte más delgada. También sobreyace concordantemente a la lutita-arenisca. La cual se encuentra en intercalación con la arenisca-conglomerado en capas en ocasiones gruesas o delgadas según lo reportado en la bibliografía de INEGI (2015). Sobre de estas dos últimas unidades y en los lechos de los ríos encontramos aluvión y bajo de este, unidades de caliza lacustre-limolita de espesores delgados.

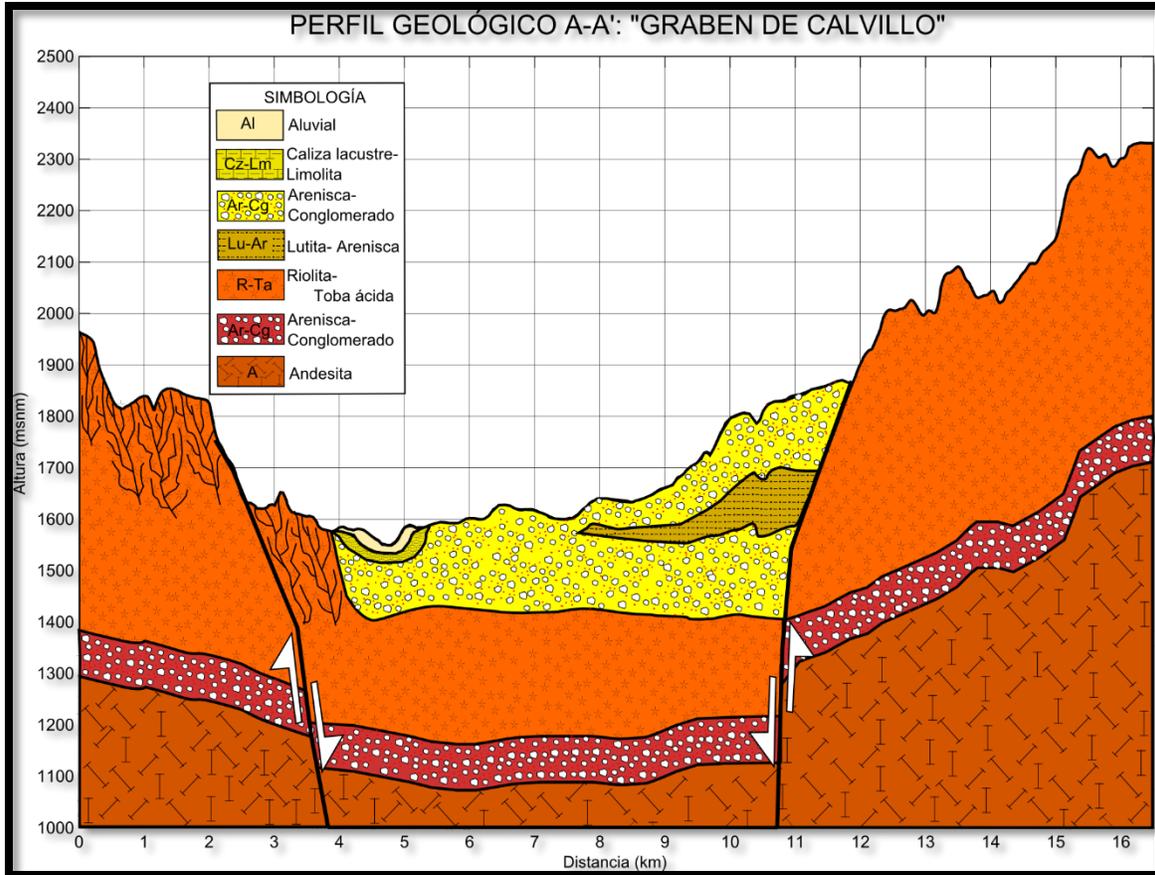


Figura 3.5 Perfil geológico del graben de Calvillo.

En materia de potencial de almacenamiento para aguas subterráneas, las unidades que podrían ser de importancia, de acuerdo al tipo de medio que proveen para el almacenamiento del recurso, son:

- A) Acuífero en medio granular: La arenisca-conglomerado representa la mejor unidad para este tipo de medio, los registros de pozos de este graben muestran que los pozos se encuentran extrayendo agua de este paquete sedimentario.
  
- B) Acuífero en medio fracturado: Las intercalaciones mostradas por la riolita y la toba ácida representan la unidad de tipo volcánico para medio fracturado de más importancia. La información de los pozos indica que hay fracturamiento en esta unidad y que almacena agua, ya que varios de los pozos se encuentran situados sobre esta unidad.

## Perfil del graben de Juchipila

Este perfil geológico, que se muestra en la Figura 3.6, cuenta con una orientación Oeste-Este. Al igual que en el anterior perfil, la andesita constituye la unidad base para el perfil, seguido al igual por el arenisca-conglomerado rojiza, ambos pertenecientes al CVI de la SMO. La riolita-toba ácida aparece en este perfil con una profundidad de 700 m aprox. en las zonas más gruesas del perfil y de 300 m aprox. en las más delgadas. De igual manera que en el perfil del Graben de Calvillo, esta unidad del SVS, es cubierta discordantemente por arenisca-conglomerado de espesor máximo de 350 m aprox. y un espesor mínimo de 100 m aprox. Esta unidad, también sobreyace, pero de manera concordante, a la limolita-arenisca, presente en ocasiones en alternancia y en otras en interdigitación. Cuenta con espesores variables, para su representación se ha aproximado a 100 m. Finalmente, y de la misma manera que se presentó en el graben de Calvillo, tenemos unidades de material aluvial y caliza lacustre-limolita de espesores menores a 50 m en los lechos de los ríos.

Al tratarse del mismo ambiente, en este caso volcánico, y del mismo tipo de unidades geológicas presentes, las unidades que son de interés por su capacidad de almacenamiento son las mismas que las mencionadas para el perfil que anteriormente fue descrito.

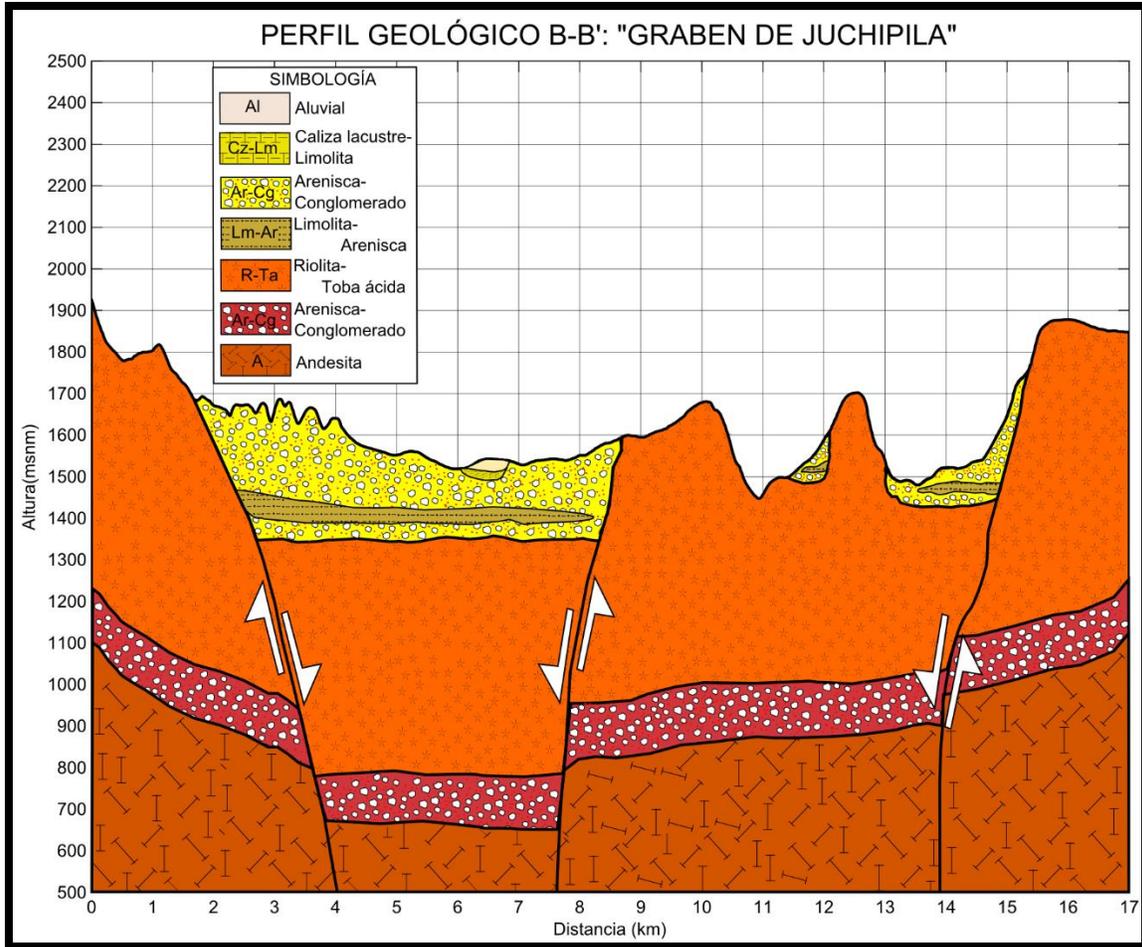


Figura 3.6 Perfil geológico del graben de Juchipila.

#### Perfil de intersección

A manera de formular una idea del comportamiento del agua, su almacenamiento y movimiento dentro de las unidades geológicas presentes en la zona de estudio, se trazó el perfil geológico correspondiente a la intersección de las estructuras tipo graben. La Figura 3.7 muestra en detalle los espesores y las unidades del perfil.

La orientación de este perfil es N60°W. Al igual que los perfiles anteriores y por el motivo de pertenecer al mismo ambiente, las unidades que se encuentran no varían en acomodo, sólo varían sus espesores. La andesita sigue siendo la unidad base del perfil junto con la arenisca-conglomerado rojiza, mientras que son cubiertas discordantemente por riolita-toba ácida. Los espesores de la riolita-toba ácida van

desde los 800 m aprox., principalmente en el extremo derecho, hasta aproximadamente 600 m, al extremo contrario; mientras que en el centro los espesores son de aprox. 400 m. La presencia de algunas porciones de basalto no afecta de manera importante el comportamiento hidrogeológico de la zona.

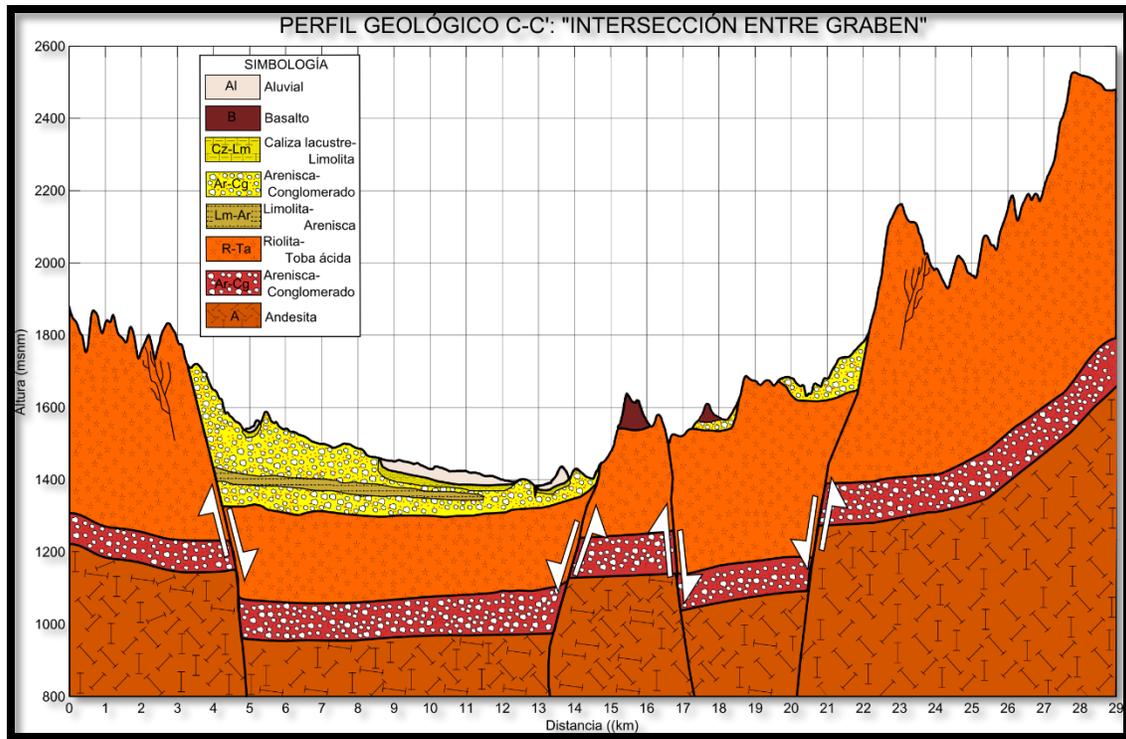


Figura 3.7. Perfil geológico de la intersección de los graben de Calvillo y Juchipila.

Con respecto a los espesores de las unidades sedimentarias que rellenan la estructura, se encuentra el arenisca-conglomerado con espesores de 350 m en su parte gruesa y menor a 100 m en sus partes más delgadas. Al igual que en el perfil del graben de Juchipila, hacen su aparición unidades de limolita-arenisca, caliza lacustre-limolita y aluvial, con espesores menores a los 50 m además de que estos dos últimos como remanente de los lechos de los ríos.

## Hidrología

La delimitación de las Regiones Hidrológicas Administrativas que reporta CONABIO (2015), ubica la zona de estudio, marcada dentro del marco rojo en el mapa de la Figura 3.8, dentro de la Región Hidrológica Administrativa VIII, denominada “Lerma-Santiago-Pacífico”.



Figura 3.8 Regiones Hidrológicas Administrativas de México.

A partir del modelo digital de elevaciones y la red de escurrimiento se delimitaron 45 subcuencas, las cuales después de revisión fueron reducidas a 10, mismas que conforman el área en análisis. Los principales ríos que conforman la red de drenaje de la zona de estudio son el Río Juchipila que atraviesa el graben que lleva el mismo nombre en dirección noreste a suroeste y el Río Calvillo de dirección noreste a

suroeste, mismo que atraviesa el graben homónimo y que más adelante pasa a ser parte del primero en la intersección de estas estructuras geológicas.

En el área de estudio se tienen un medio granular y un medio fracturado, el primero se distribuye en el graben de Juchipila (PSGJ) y el del graben de Calvillo (PSGC); en tanto que el medio fracturado (PVC) se distribuye en toda el área de estudio. Sus principales características se describen a continuación.

### *Volumetría de las unidades acuíferas*

La estimación de los volúmenes de almacenamiento de las distintas unidades acuíferas consideradas en el presente, son analizadas en los siguientes apartados.

#### Paquete sedimentario del graben de Calvillo

De acuerdo con el mapa geológico (Figura 3.5) y el perfil geológico trazado (Figura 3.3) se delimitó el área correspondiente al paquete sedimentario que rellena el graben de Calvillo, siendo consideradas dentro de este paquete las unidades geológicas: arenisca-conglomerado, caliza lacustre-limolita, lutita arenisca y aluvial.

El paquete sedimentario del graben de Calvillo se puede describir como un lente grueso en su parte central, que se adelgaza a medida de su avance hacia sus límites norte y suroeste. Esta simetría lateral que posee contrasta con una asimetría en su ancho, ya que se adelgaza conforme se aproxima hacia el límite oeste.

Los espesores, materia prima para la interpolación, se obtuvieron de los registros de pozos del graben, específicamente de aquellos cuya localización estuviera dentro del paquete delimitado.

La Figura 3.9 muestra el resultado de interpolar con el método IDW, el rango de valores de espesor tiene un mínimo y un máximo de 61 y 420 m, respectivamente.

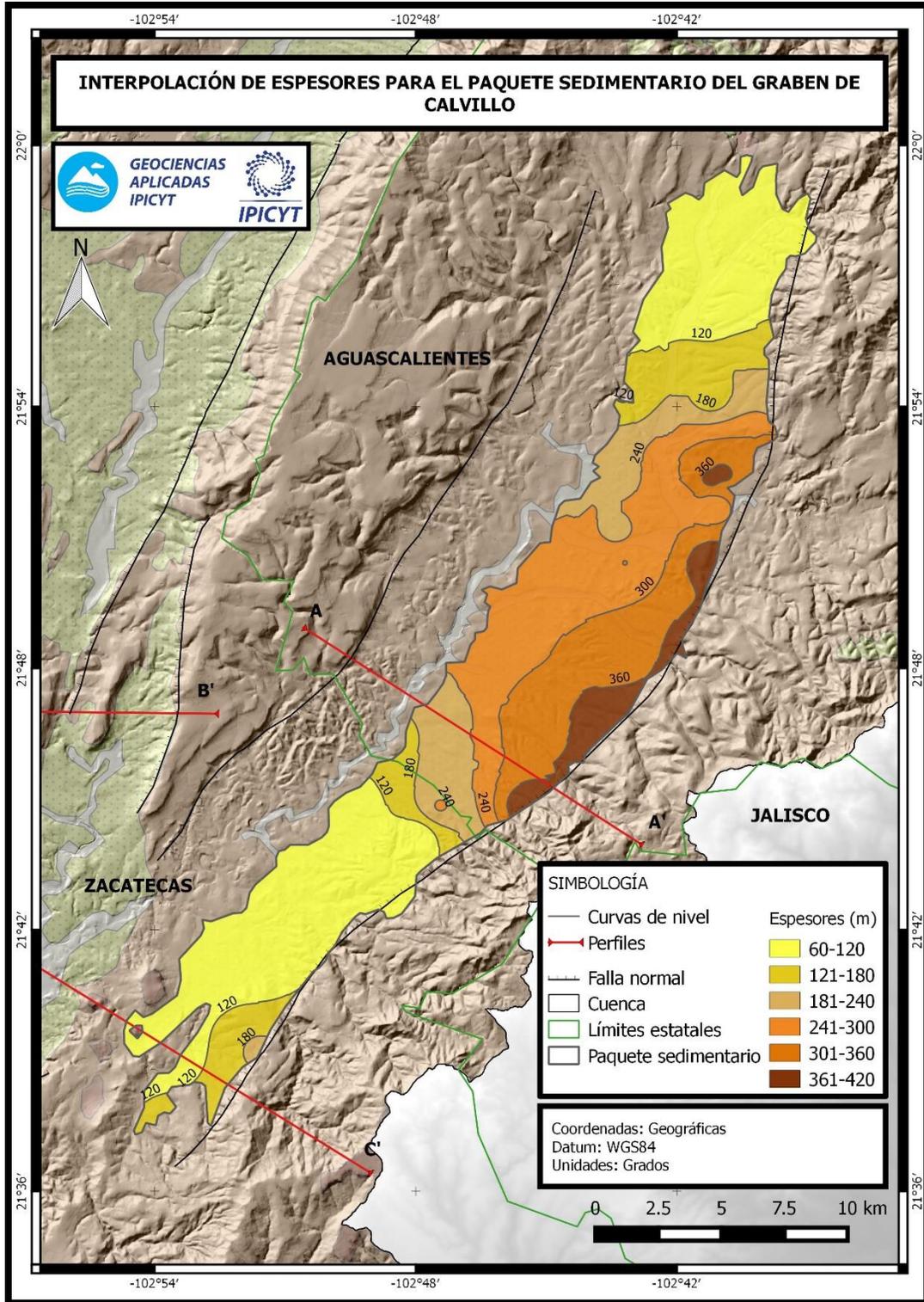


Figura 3.9. Mapa de interpolación de espesores para el paquete sedimentario del graben de Calvillo.

Los espesores más grandes, en general, se encuentran cercanos a la falla normal este que delimita el graben de Calvillo, en específico en la parte central del paquete sedimentario, mientras que los mínimos se encuentran en los límites noreste y suroeste. Al centro del paquete sedimentario, el rango de espesores va de los 240 a los 420 m, siendo identificada entonces como la zona con mayor espesor, además de seguir la tendencia de adelgazado al oeste originando su asimetría transversal.

El paquete sedimentario del graben de Calvillo cuenta con un volumen calculado de 48 000 Mm<sup>3</sup> distribuido en un área de 242 km<sup>2</sup>, ambos resultados calculados por algebra de mapas, a partir de la interpolación y la delimitación del paquete sedimentario. Con respecto a su volumen potencial de almacenamiento, los resultados fueron obtenidos dos escenarios, uno de porosidad eficaz en su máximo y otra en su mínimo. El rango de porosidad eficaz que fue tomado de la Tabla de Sanders (1998) fue el de la arenisca (0.5-10%). Con una porosidad efectiva del 0.5%, el volumen potencial de almacenamiento fue de 240 Mm<sup>3</sup>; y con una del 10%, fue de 4800 Mm<sup>3</sup>, respectivamente.

#### Paquete sedimentario del graben de Juchipila

Al igual que sucedió con el paquete sedimentario del graben de Calvillo, se delimitó el área correspondiente al paquete sedimentario que rellena el graben de Juchipila, considerando el paquete sedimentario compuesto por: arenisca-conglomerado, arenisca, conglomerado, caliza lacustre-limolita, limolita-arenisca, lutita-arenisca y aluvial.

A diferencia del graben de Calvillo, la inexistencia o escasez de información de espesores para el graben de Juchipila limitó la construcción de una malla de puntos apoyada en datos reales de campo, a manera de mitigar esta limitante se extrapolaron tendencias principales que presenta el graben de Calvillo y espesores de acuerdo a los que se observan en las Figuras 3.5 y 3.7, correspondientes a los perfiles dentro de dicho graben. Las características del graben de Juchipila son:

- 1) El carácter subvertical de la falla normal oriental que delimita el graben de Calvillo, reflejada en la falla normal occidental que delimita el graben de Juchipila, en consecuencia generando un mayor espesor a medida que se aproxima a la misma y justificado en función de la topografía, pues es en el lado occidente del graben de Juchipila donde se encuentra material sedimentario a mayor altura.
- 2) El adelgazamiento del paquete sedimentario en los límites norte, sur y oeste del graben de Calvillo se puede observar dentro del graben de Juchipila, sólo que para éste el límite oeste cambia por límite este, debido a la tendencia expuesta anteriormente.
- 3) La asimetría transversal dentro de la parte más gruesa del paquete sedimentario del graben de Calvillo permanece pero con la orientación de acuerdo con los dos puntos mencionados previamente.

La Figura 3.10 muestra los resultados de interpolación obtenidos con el método IDW para el paquete sedimentario del graben de Juchipila, se puede observar un rango que va desde los 60-367 m para los espesores mínimo y máximo, respectivamente. En su parte central más gruesa el rango de espesores es de 367-60 m en dirección oeste-este, el cual se ve disminuido a medida que de avance hacia el norte con valores de 160-60 m y hacia el sur con máximo de 130 y mínimo de 60 m.

El paquete sedimentario del graben de Juchipila cuenta con un volumen calculado 136 000 Mm<sup>3</sup> distribuidos en un área de 1 045 km<sup>2</sup>, ambos resultados calculados por algebra de mapas, a partir de la interpolación y la delimitación del paquete sedimentario. El volumen potencial mínimo de almacenamiento fue de 680 Mm<sup>3</sup>, mientras que el máximo fue de 13 600 Mm<sup>3</sup>. Cabe mencionar que este volumen potencial de almacenamiento, se determinó bajo el mismo rango de porosidad efectiva que para el graben de Calvillo.

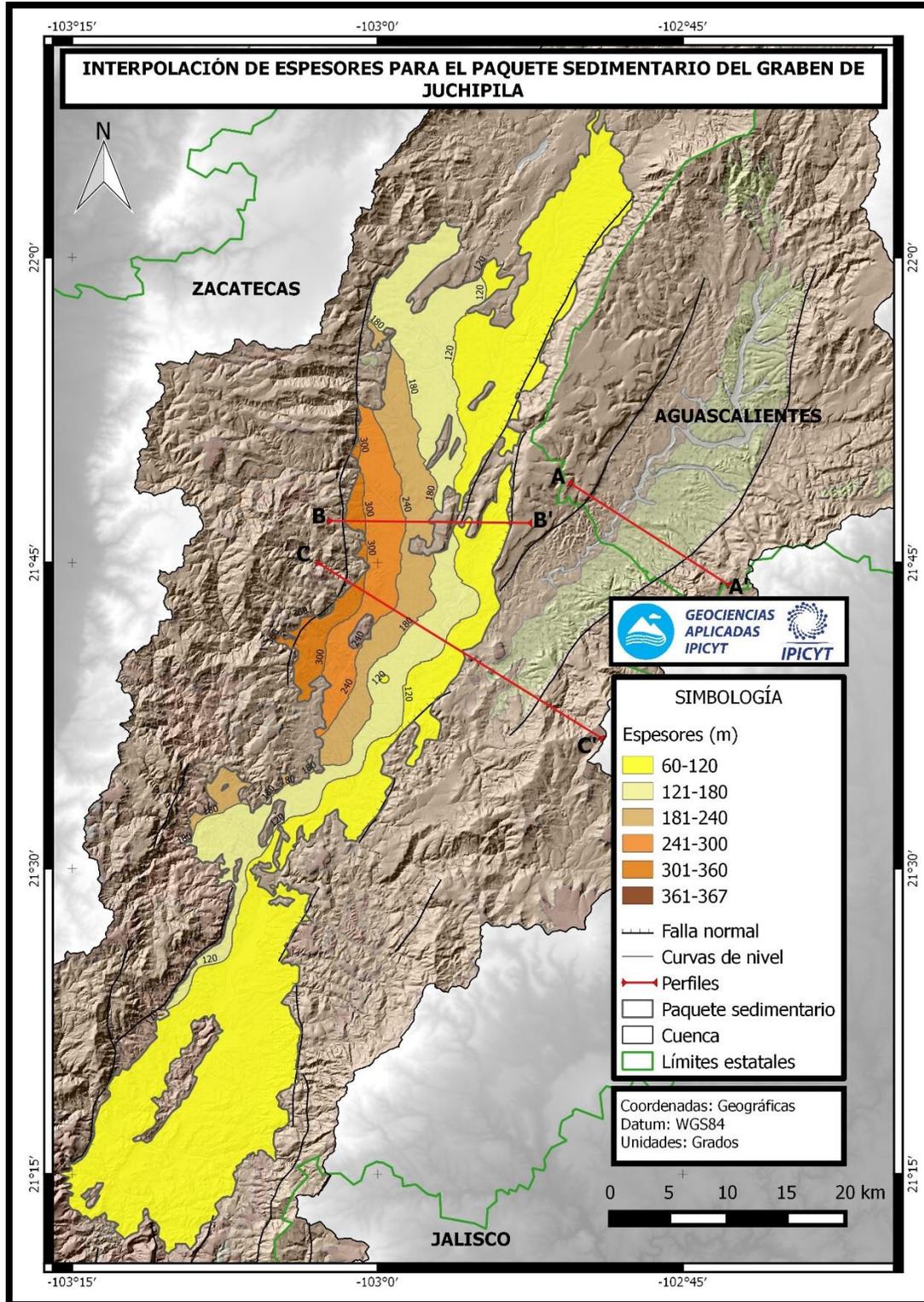


Figura 3.10. Mapa de interpolación de espesores para el paquete sedimentario del graben de Juchipila.

## Paquete de material volcánico de la cuenca

Para la estimación del volumen del paquete volcánico de la cuenca sólo se tomó en cuenta la unidad riolita-toba ácida. Con el objetivo de lograr una aproximación realista, se llevó a cabo bajo las siguientes consideraciones:

- 1) El espesor máximo es de 1000 m, obedeciendo a lo marcado por Ferrari et al. (2005).
- 2) Los espesores se asignaron a una malla de valores acorde a los valores reflejados en los perfiles y los valores de altura proporcionados por el Modelo de Digital de Elevaciones.

La Figura 3.11 muestra el resultado de la interpolación con el método IDW aplicado a la malla de valores de espesor, tal y como se explicó en las consideraciones de construcción, los valores cercanos a 1000 m se encuentran en los puntos topográficos más altos de la zona, ubicándose principalmente en el extremo oeste y norte de la misma. Mientras que, valores menores a los anteriores y mayores a 550 m se muestran en las pendientes de las cadenas montañosas, esto en evidencia del desvanecimiento de los espesores a medida que el nivel topográfico de la zona desciende. Los valores que pertenecen a las fosas son más grandes donde las fosas se estrechan y más pequeños donde se abren. Al norte del graben de Juchipila son de aproximadamente 650 m, mismos que se van degradando conforme se avanza con dirección al sur. Por otro lado, al norte del graben de Calvillo, se han tomado valores similares a los anteriores. En el punto en que las fosas del graben de Calvillo y la del de Juchipila se intersectan, los espesores son de entre 450m en la zona alta, mientras que en la baja son de 300 m.

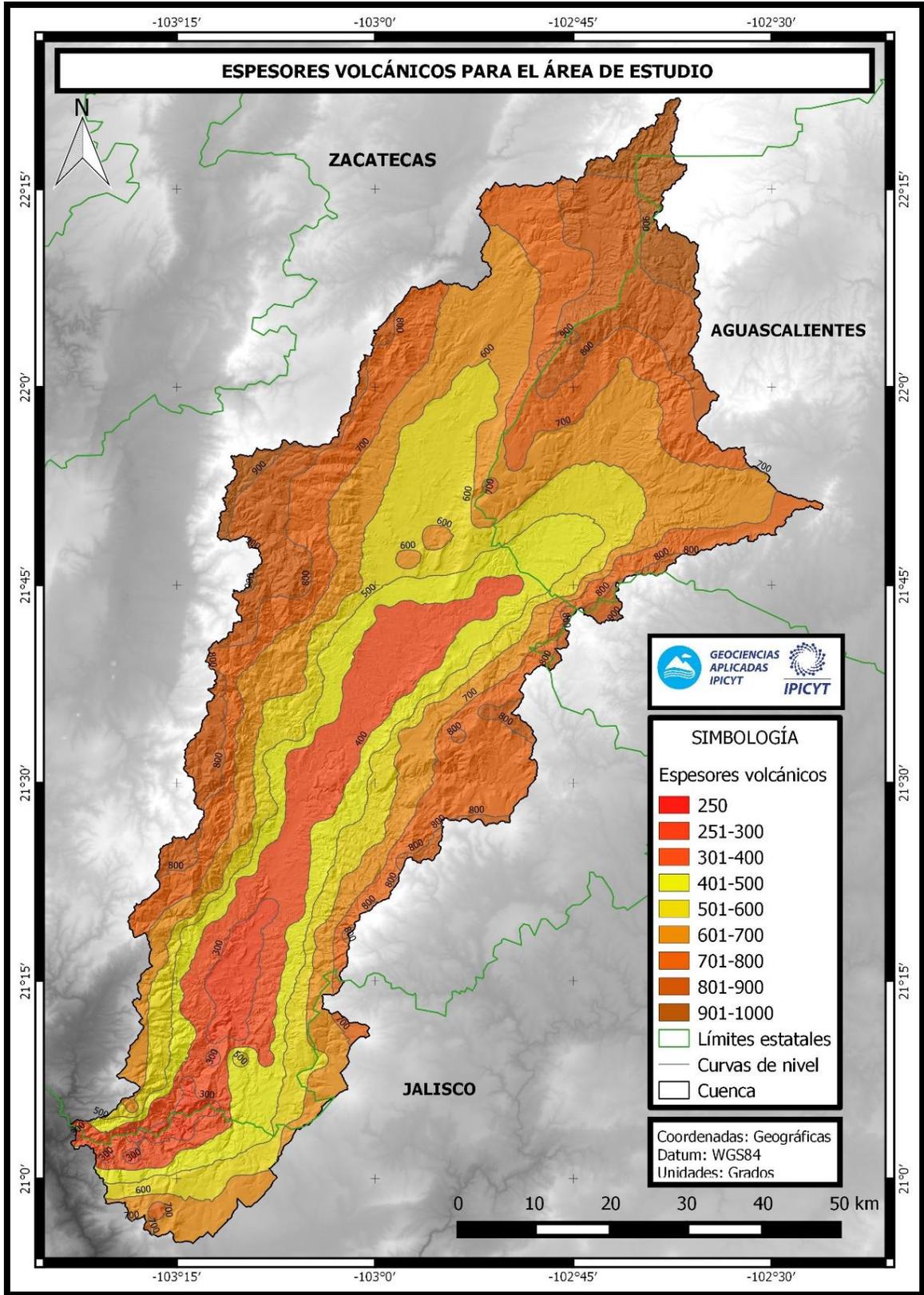


Figura 3.11 Mapa de interpolación de espesores volcánicos para la zona de estudio.

Continuando en el recorrido en dirección sur dentro de las fosas, los valores de los espesores del material volcánico conservan los 300 m sobre un segmento estrecho de la fosa. Al ampliarse nuevamente la fosa, el espesor se reduce a su valor mínimo asignado de 250 m, espesor que perdura hasta el punto de salida de la cuenca. Esta zona de valor mínimo se hizo coincidir con la zona de menor nivel topográfico de acuerdo al MDE de la cuenca.

La estimación para el volumen del paquete volcánico de la zona de estudio arrojó un valor de 3 500 km<sup>3</sup>, distribuidos en los 5 707 km<sup>2</sup> que comprende. Para el cálculo del volumen potencial de almacenamiento se tomaron las siguientes medidas:

- 1) Los lineamientos fueron convertidos en áreas, es decir, se les hizo extensiones laterales. En caso de las fallas se consideró que afectan 750 m a su alrededor, mientras que para las fracturas, 90 m. En lo que respecta a las fracturas por enfriamiento, se consideró que afectan la totalidad del paquete volcánico.
  
- 2) Los valores propuestos para el factor de afectación fueron de 1 para todas las zonas afectadas por falla, 0.005 para las zonas afectadas por fracturas por enfriamiento, finalmente se propusieron dos valores para las zonas afectadas por fracturas, 0.2 y 0.6. Por lo tanto se generaron dos escenarios, uno en el que se considera que el fracturamiento afecta sólo un 20% del espesor del material volcánico y otro en el que el 60% del espesor se ve afectado.

De esta manera, los resultados de volumen potencial de almacenamiento para el escenario que contempla el 20% de espesor afectado fue de 34 000 Mm<sup>3</sup>, mientras que en el que se consideró un 60% de espesor afectado alcanzó los 35 600 Mm<sup>3</sup>.

## Aplicación del modelo analítico de Schosinsky y Losilla (2000)

En los siguientes apartados se darán a conocer los resultados del procesado en GIS de la información requisito para la aplicación del Método Analítico de Schosinsky y Losilla (2000).

### *Coefficiente de infiltración por pendiente*

La Figura 3.12 muestra los correspondientes valores asignados como coeficientes, la distribución espacial y los diferentes tipos de pendientes de la cuenca en estudio. El tipo de pendiente dominante de la zona de estudio es fuerte (mayor al 7%), representados por pixeles en color rojo. Seguido en frecuencia se encuentran las pendientes de tipo promedio (2%-7%), pixeles resaltados de color amarillo intenso. Las pendientes con menor frecuencia que las anteriores son las muy planas (0.02%-0.06%) representadas por pixeles en color verde intenso y presente sobre los cuerpos de agua de la zona y algunos espacios dentro de la zona de las fosas. En menor frecuencia se encuentran las pendientes tipo algo planas (1%-2%) y con frecuencia nula están las pendientes tipo planas (0.3%-0.4%), en color amarillo y verde tenues, respectivamente. La Tabla 3.3 muestra el resultado de la clasificación de las pendientes en el área de estudio. En resumen, la cuenca cuenta con casi el 83% de pendiente tipo fuerte, casi un 15% de pendiente tipo promedio y cerca del 2% son pendientes de tipo planas.

Tabla 3.3. Estadísticas de coeficiente por tipo de pendiente para la zona de estudio.

Tipo de Pendiente		Área (km <sup>2</sup> )	k <sub>p</sub>	Porcentaje de cuenca
Muy plana	0.02%-0.06%	89	0.3	1.56
Plana	0.3%-0.4%	0	0.2	0.00
Algo plana	1%-2%	57	0.15	1.00
Promedio	2%-7%	843	0.1	14.77
Fuerte	mayor de 7%	4718	0.06	82.67

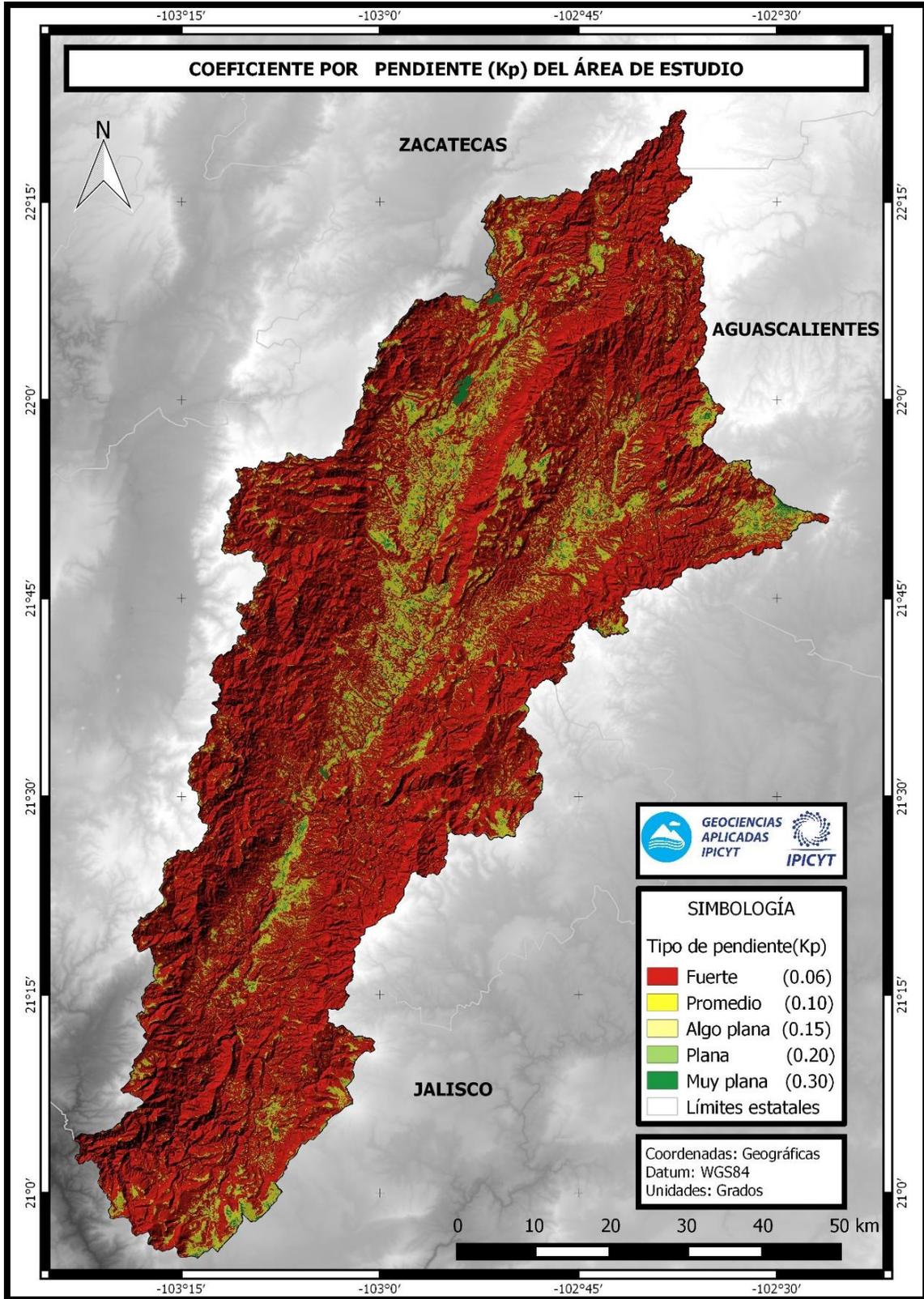


Figura 3.12 Mapa de pendientes de la zona de estudio.

### ***Coefficiente de infiltración por cobertura vegetal***

En la Figura 3.13 se muestra la distribución espacial de los distintos tipos de cobertura vegetal y usos de suelo, mientras en la Tabla 3.4 se aprecian estadísticos importantes de la distribución de las coberturas dentro de la zona de estudio.

Tabla 3.4 Estadísticas de coeficiente por tipo de cobertura vegetal de la zona de estudio.

<b>Cobertura</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>K<sub>v</sub></b>	<b>Porcentaje de cuenca</b>
Agricultura de riego	501	0.1	8.78
Agricultura de temporal	1018	0.1	17.84
Asentamientos humanos	1	0	0.02
Bosque de encino	1648	0.2	28.89
Bosque de encino-pino	92	0.2	1.61
Bosque de pino-encino	23	0.2	0.40
Cuerpo de agua	11	0	0.19
Desprovisto de vegetación	1	0.09	0.02
Matorral crasicaule	25	0.09	0.44
Pastizal inducido	508	0.18	8.90
Pastizal natural	131	0.18	2.30
Selva baja caducifolia	1705	0.2	29.89
Selva baja subcaducifolia	27	0.2	0.47
Zona urbana	14	0	0.25

En materia de porcentajes de área, los resultados indican que poco más del 60% de la cuenca cuenta con un coeficiente por cobertura vegetal ( $k_v$ ) de 0.2, poco más del 25% tiene  $k_v$  de 0.1, aproximadamente poco más del 10% resultó con 0.18 y menos de un 3% cuenta con un valor menor a 0.1.

La distribución espacial obtenida resalta el uso principal de carácter agrícola dentro de las fosas, el crecimiento de bosques de encino, encino-pino y pino-encino a lo largo de los hombros de los graben. Se nota principalmente al sur de la cuenca la presencia de selvas bajas caducifolias y subcaducifolias dentro y fuera de las fosas así como la disminución del uso agrícola. Por su parte los pastizales tanto naturales como inducidos son más frecuentes sobre las serranías comprendidas dentro del área de estudio pero con una distribución que denote alguna tendencia recalculable. Los usos de suelos restantes (cuerpos de agua, matorral crasicaule, zonas

desprovistas de vegetación, zonas urbanas y asentamientos urbanos) son poco apreciables por sus extensiones tan pequeñas en relación con la de la cuenca.

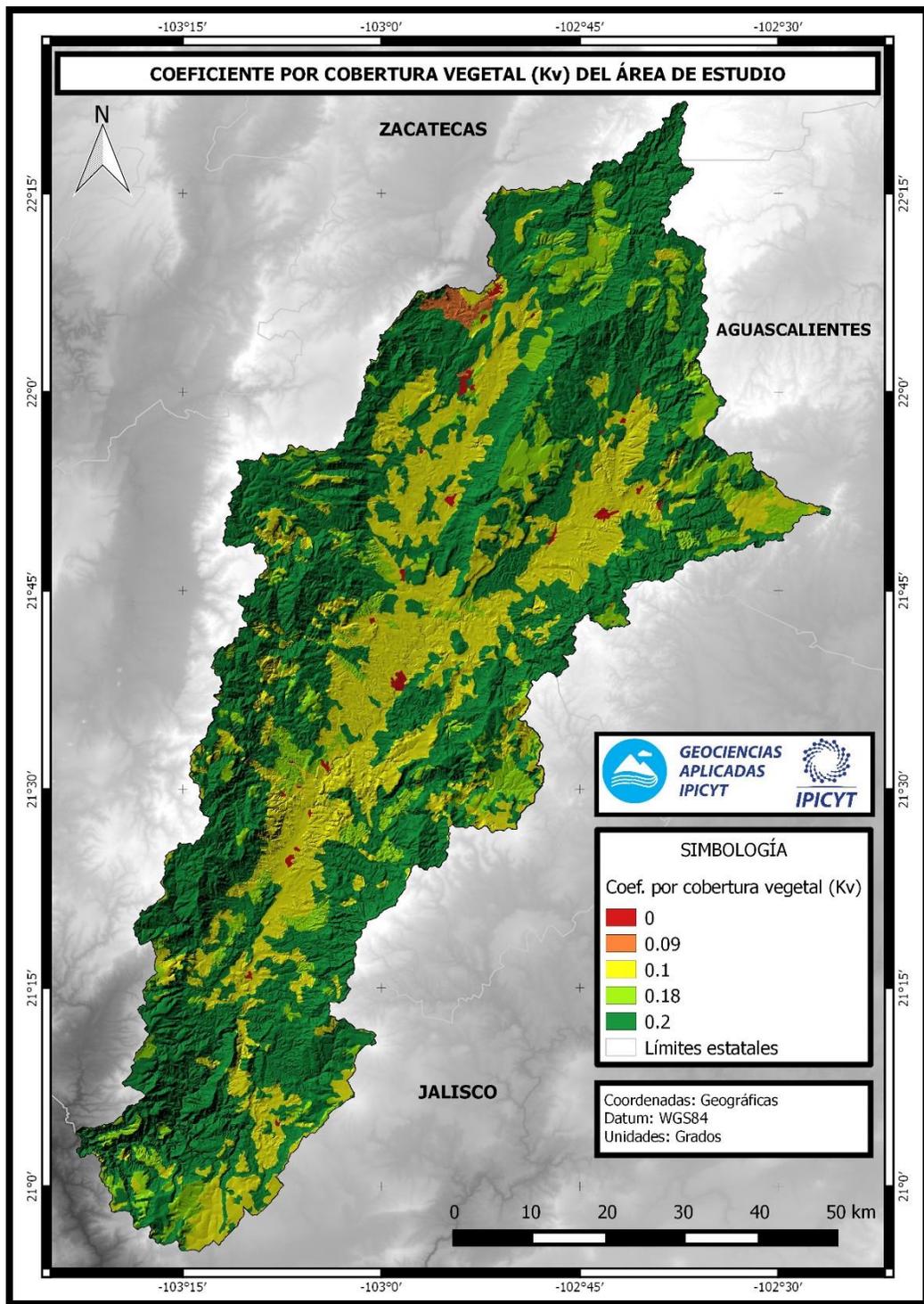


Figura 3.13 Mapa de coeficientes por cobertura vegetal de la zona de estudio.

## Coeficiente de infiltración por textura de suelo

La Figura 3.14 muestra la distribución espacial de las diferentes tipos de texturas en la zona de estudio. El tipo predominante de textura, con poco más del 94% de la cuenca y representado por la porción de color café, es el suelo limo arenoso no muy compacto. La arcilla compacta impermeable cuenta con una porción poco mayor al 5% y se presenta principalmente en la fracción sur de la zona de estudio. Las zonas urbanas y los cuerpos de agua ocupan menos del 1% y están distribuidas por toda la cuenca y marcadas en color rojo. Por otro lado, la presencia de arcilla compacta impermeable fue nula.

La Tabla 3.5 resume estadísticamente la distribución espacial de las texturas presentadas por el área de estudio, además de mostrar el correspondiente coeficiente asignado.

Tabla 3.5 Estadísticas de coeficiente por tipo de textura de la zona de estudio.

<b>Tipo de textura del suelo</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>k<sub>fc</sub></b>	<b>Porcentaje de cuenca</b>
Zonas urbanas y cuerpos de agua	25	0	0.44
Arcilla compacta impermeable	298	0.1	5.22
Combinación de limo y arcilla	0	0.2	0.00
Suelo limo arenoso no muy compacto	5384	0.4	94.34

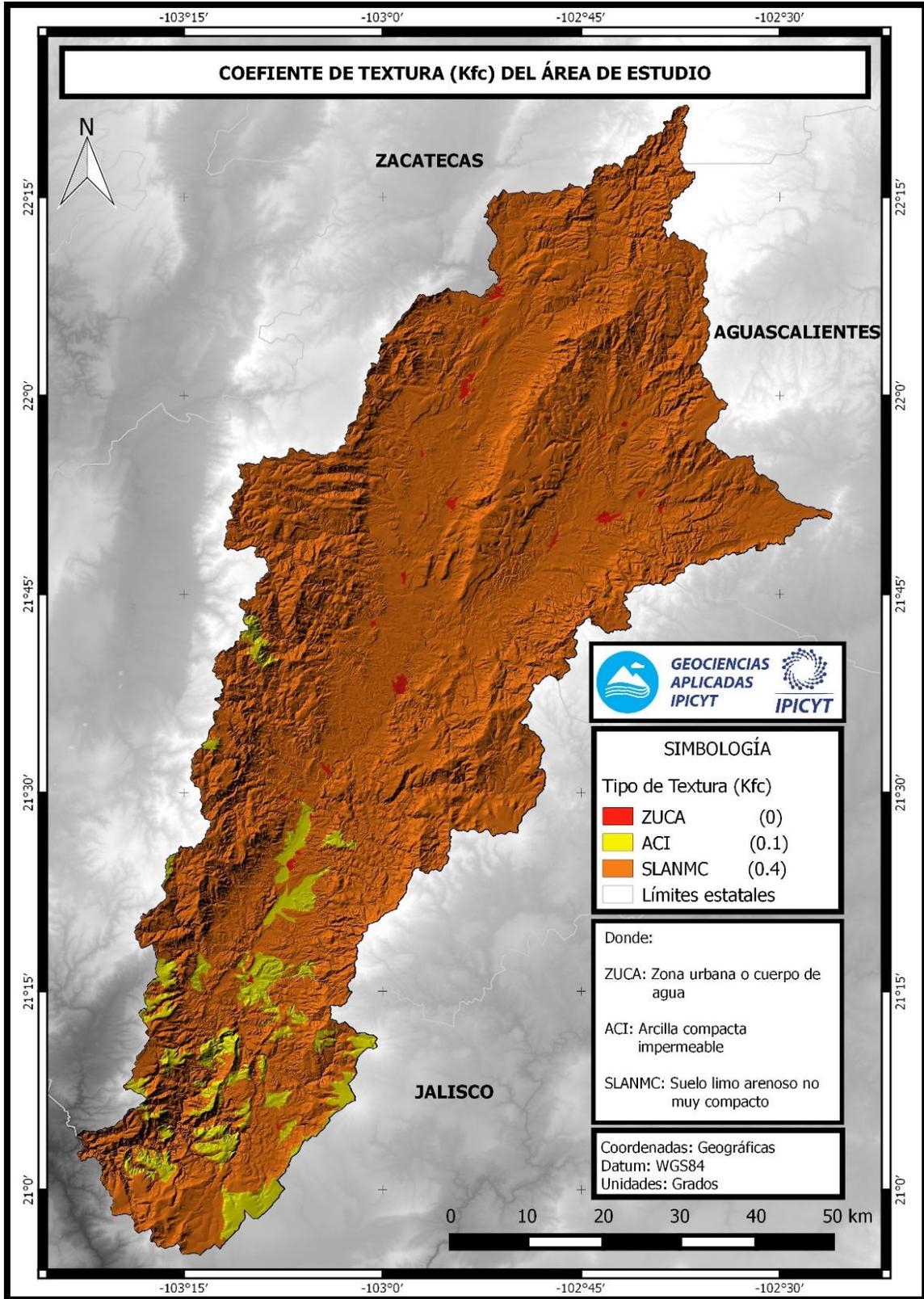


Figura 3.14 Mapa de texturas de la zona de estudio.

## ***Coefficiente de infiltración (C)***

### *Cuenca como unidad*

En la Figura 3.15 se muestra el mapa de coeficiente de infiltración para la zona de estudio, mismo que fue resultado de la suma algebraica de los coeficientes anteriores. La Tabla 3.6 muestra los intervalos de coeficientes de infiltración y el porcentaje de cuenca que alcanzaron.

Tabla 3.6. Estadísticas del coeficiente de infiltración para la zona de estudio.

<b>Coeficiente de infiltración ( C )</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje de cuenca</b>
0.01 - 0.1	19	0.33
0.11 - 0.2	4	0.07
0.21 - 0.3	103	1.80
0.31 - 0.4	177	3.10
0.41 - 0.5	12	0.21
0.51 - 0.6	1346	23.59
0.61 - 0.7	3953	69.27
0.71 - 0.8	68	1.19
0.81 - 0.9	25	0.44

La distribución espacial resultado muestra que los intervalos del coeficiente de infiltración más presentes son 0.61-0.7 con poco menos del 70% de la extensión territorial de cuenca, estos coeficientes se ubican principalmente sobre las regiones boscosas y montañosas de textura limosa arenosa no muy compacta; mientras que en las fosas imperan el intervalo de coeficientes de 0.51-0.6 con un poco menos del 24% de misma textura pero de uso principalmente de agriculturas. El 6% restante se reparte en los demás intervalos, siendo que los intervalos de coeficientes más elevados aparecen sólo en las pequeñas planicies dentro de las fosas y sobre las montañas; los tres menores inmediatos a los predominantes se localizan especialmente sobre la porción sur y se relacionan principalmente al tipo de textura existente, arcilla compacta impermeable; finalmente el intervalo de valores menores se pueden asociar a las manchas urbanas o pequeñas poblaciones rurales de la

zona de estudio donde, debido a la cubierta impermeable que el concreto proporciona y la compactación de los suelos no permiten que se lleve a cabo la infiltración a mayor rango.

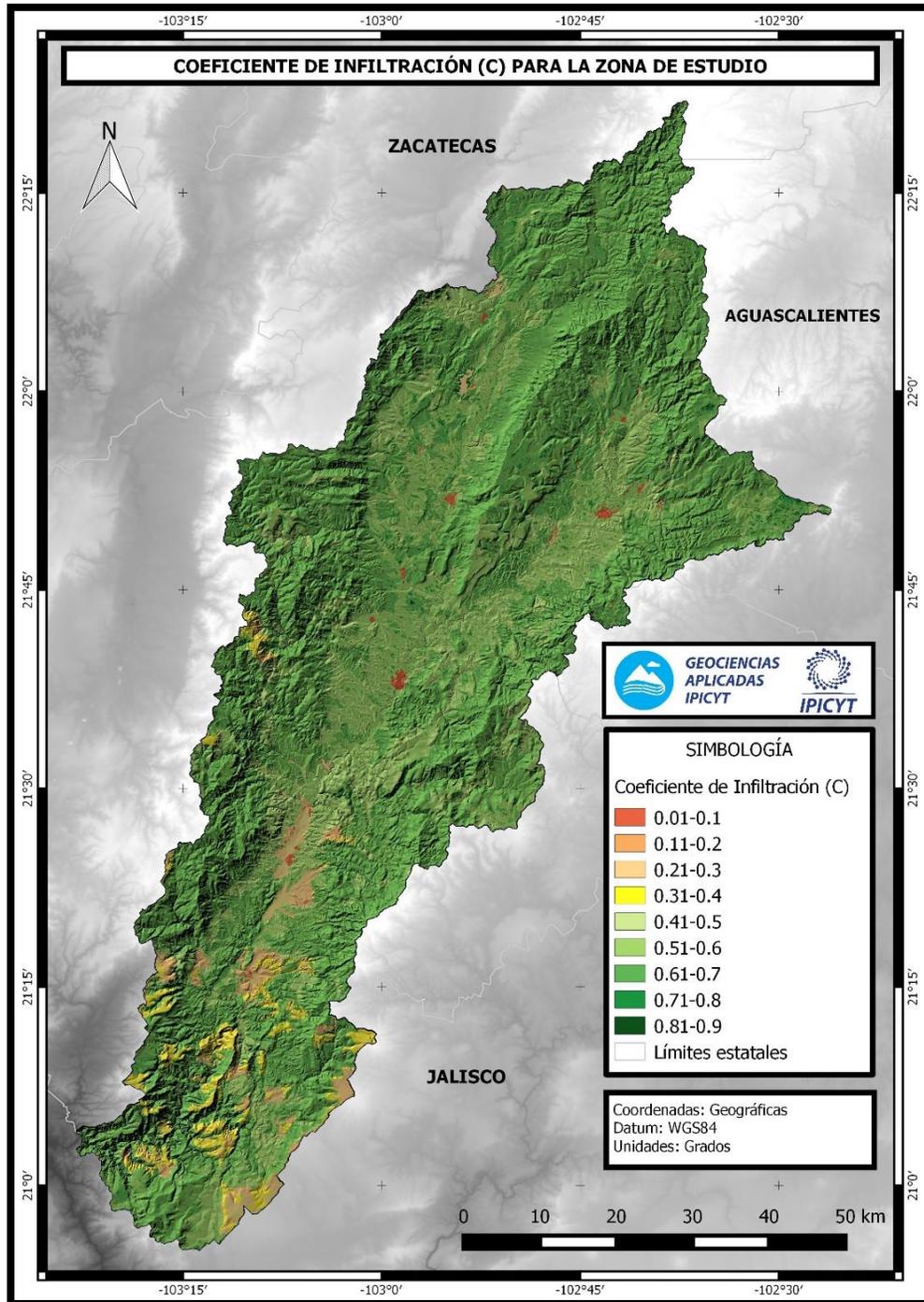


Figura3.15 Mapa de coeficientes de infiltración para la zona de estudio.

### Paquete Sedimentario del Graben de Calvillo

En la Figura 3.16 se muestra el mapa de coeficiente de infiltración para el PSGC, mismo que fue extraído del perteneciente a la cuenca para su análisis. La Tabla 3.7 muestra los intervalos de coeficientes de infiltración y el porcentaje de territorio del PSGC que alcanzaron.

Tabla 3.7. Estadísticas del coeficiente de infiltración para el PSGC.

<b>Coeficiente de infiltración ( C )</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje del PSGC</b>
0.01 - 0.1	4.0	1.65
0.11 - 0.2	0.2	0.08
0.21 - 0.3	0.3	0.12
0.31 - 0.4	0.1	0.04
0.41 - 0.5	0.1	0.04
0.51 - 0.6	166.0	68.60
0.61 - 0.7	65.0	26.86
0.71 - 0.8	6.0	2.48
0.81 - 0.9	0.3	0.12

De acuerdo a las estadísticas mostradas en la Tabla anterior, el intervalo de coeficiente de infiltración más común en este paquete sedimentario es el 0.51-0.6 y se le encuentra principalmente en las partes centrales y bajas. Por otro lado, los valores del intervalo 0.61-0.7 se encuentran en los márgenes sur y norte, sobre puntos altos de la zona. Las manchas en tonos de rojo, pertenecen a las zonas urbanas dentro de este paquete, se aprecia principalmente la mancha urbana del municipio de Calvillo, Ags.

### Paquete Sedimentario del Graben de Juchipila

En la Figura 3.17 se muestra el mapa de coeficiente de infiltración para el PSGJ, mismo que fue extraído, al igual que el del PSGC, del perteneciente a la cuenca

para su análisis. La Tabla 3.8 muestra los intervalos de coeficientes de infiltración y el porcentaje de área del PSGJ que ocuparon.

De acuerdo con los resultados en la Tabla 3.8, el intervalo de coeficiente de infiltración con mayor presencia dentro del PSGJ es el 0.51-0.6, que al igual que en el PSGC, se encuentran en las partes centrales y bajas del mismo. Para el caso del intervalo 0.61-0.7, se presenta en los márgenes de todo el paquete, asociado principalmente a puntos de alto nivel topográfico. Las manchas urbanas de poblaciones como Tabasco, Jalpa y Juchipila se pueden apreciar por su coloración en rojo debida a sus bajos valores de coeficiente de infiltración.

Tabla 3.8 Estadísticas del coeficiente de infiltración para el PSGJ.

<b>Coeficiente de infiltración ( C )</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje del PSGJ</b>
0.01 - 0.1	10	0.96
0.11 - 0.2	2	0.19
0.21 - 0.3	57	5.45
0.31 - 0.4	23	2.20
0.41 - 0.5	7	0.67
0.51 - 0.6	495	47.37
0.61 - 0.7	418	40.00
0.71 - 0.8	28	2.68
0.81 - 0.9	5	0.48

En este paquete, se puede observar un contraste fuerte de intervalos en la parte sur de la misma, esto asociado a los diferentes valores de los coeficientes que integran el de infiltración.

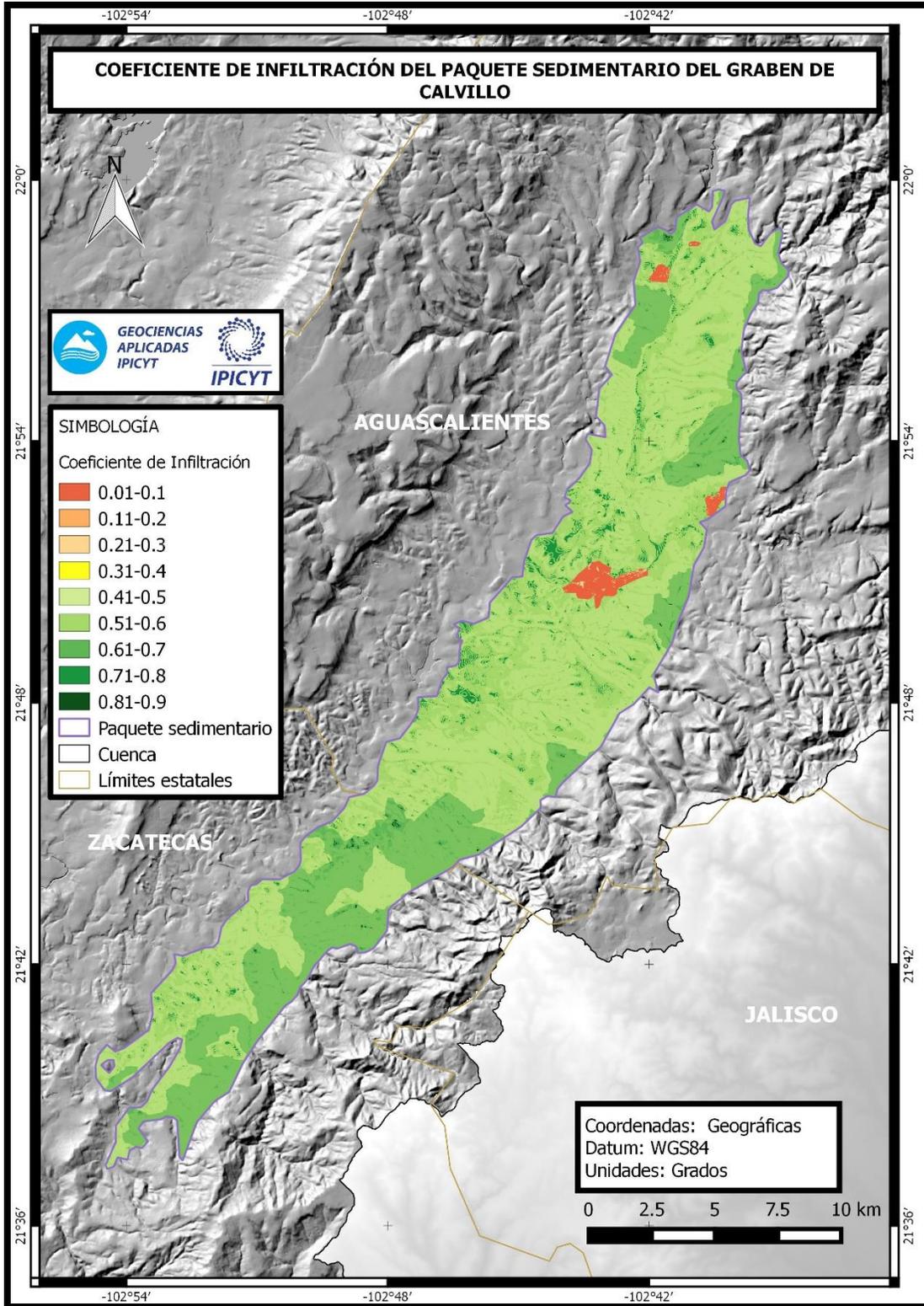


Figura 3.16 Mapa de coeficientes de infiltración para el PSGC.

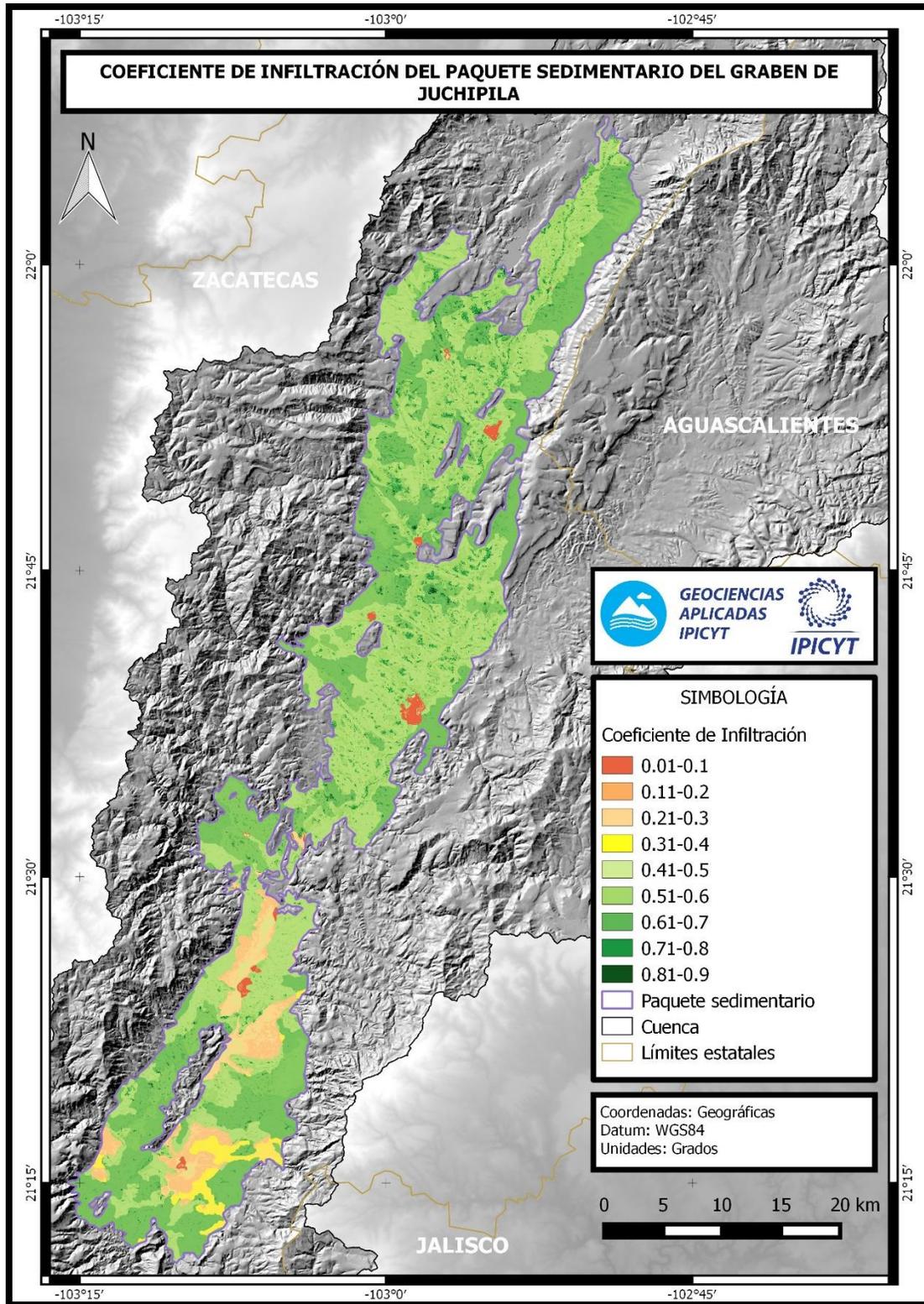


Figura 3.17 Mapa de coeficientes de infiltración para el PSGJ.

## Datos de precipitación

En la Tabla 3.10 aparece la lista de las 89 estaciones climatológicas seleccionadas, mientras que en la Figura 3.18 se pueden localizar con la clave correspondiente. Del total de estaciones, 28 se encuentran situadas en el estado de Aguascalientes, 32 en Jalisco y 29 en Zacatecas.

De acuerdo con los registros de precipitación, estadísticamente hablando el año 1979 resultó con menor precipitación, el año 2004 presentó la mayor y el año 2000 puede considerarse como mediático entre las precipitaciones de los ya antes mencionados. En la parte superior de la Tabla 3.9 se muestran los porcentajes de precipitación mensual promedio para cada uno de los años tomados en cuenta para el análisis temporal de las series mensuales de precipitación. Mientras que en la parte inferior se aprecian los periodos escogidos ya que presentan un porcentaje de precipitación mensual promedio acumulado mayor al 80%.

Tabla 3.9. Porcentajes de precipitación mensual promedio y periodos resultado

MES	Porcentaje de Precipitación Mensual Promedio		
	AÑO 1979	AÑO 2000	AÑO 2004
Enero	0.37	0.00	5.30
Febrero	2.67	0.22	0.27
Marzo	0.14	0.00	3.52
Abril	0.11	0.07	0.13
Mayo	0.14	11.93	6.73
Junio	9.62	27.61	24.07
Julio	29.91	18.38	16.01
Agosto	31.09	19.14	18.74
Septiembre	13.72	10.34	22.16
Octubre	0.13	7.90	2.81
Noviembre	0.08	0.31	0.12
Diciembre	12.01	4.10	0.13
<b>PERIODO</b>			
5 a 9	84.49	87.39	87.71
10 a 4	15.51	12.61	12.29
	100	100	100

Tabla 3.10 Estaciones climatológicas seleccionadas para la zona de estudio.

No.	Clave	Nombre	No.	Clave	Nombre
1	1003	Calvillo (SMN)	46	14144	Tanasco
2	1005	Presa El Niagara	47	14145	Teocaltiche (DGE)
3	1009	La Labor (SMN)	48	14147	Tepatitlán
4	1010	La Tinaja	49	14153	Totatiche
5	1011	Malpaso	50	14159	Valle de Guadalupe
6	1012	Presa Media Luna	51	14165	Villa Obregón
7	1017	Presa Potrerillos	52	14167	Yahualíca de González Gallo (SMN)
8	1018	Presa Plutarco Elías Calles	53	14175	Colotlán (DGE)
9	1019	Presa Jocoque	54	14186	Teocaltiche (SMN)
10	1020	Presa La Codorníz	55	14192	Yahualíca de González Gallo (DGE)
11	1021	Rancho Viejo	56	14266	San Gaspár de los Reyes
12	1023	Calvillo (DGE)	57	14331	El Zapote
13	1027	Venadero (DGE)	58	14337	Apozol
14	1046	La Labor (DGE)	59	14345	Ahuetita
15	1047	Agua Zarca	60	14373	Agua Prieta
16	1074	Cieneguilla	61	32013	El Chique
17	1077	El Ocote	62	32017	El Tecomate
18	1078	El Ocote	63	32019	Excame
19	1080	Presa Canutillo	64	32025	Huanusco
20	1089	Presa 50 Aniversario	65	32029	Juchipila (SMN)
21	1090	Jesús María (DGE)	66	32032	La Villita
22	1091	Los Alisos	67	32039	Nochistlán
23	1095	Milpillas de Arriba	68	32042	Palomas
24	1098	La Posta U A A	69	32055	Tayahua
25	1103	Alamitos (Campamento)	70	32056	Teúl de González Ortega (SMN)
26	1104	Abelardo L. Rodríguez	71	32057	Tlaltenango de Sánchez Román
27	1105	Los Cuartos	72	32062	Villanueva (SMN)
28	1106	La Primavera	73	32067	Juchipila (DGE)
29	14006	Ajojúcar	74	32070	Teúl de González Ortega (DGE)
30	14025	Calera	75	32073	Villanueva (DGE)
31	14026	Casa Llanta	76	32097	Tenayuca
32	14037	Presa Achemic	77	32105	Tlachichila
33	14038	Cuixtla	78	32111	Jalpa
34	14039	Cuquio	79	32119	Felipe Ángeles
35	14069	Huejúcar (OBS)	80	32120	Genaro Codina
36	14073	Ixtlahucán del Río	81	32124	Momax
37	14074	Jalostotitlán	82	32125	Moyahua de Estrada
38	14080	La Cuna	83	32132	Tepetongo
39	14100	Mexxicacán	84	32136	Vicente Guerrero
40	14101	Michoacanejo	85	32140	Mezquital del Oro
41	14108	Paso del Sabino	86	32143	García de la Cadena
42	14122	San Bernardo	87	32180	General Joaquín Amaro
43	14127	San Juanico	88	32184	Los Fresnos
44	14131	San Miguel el Alto	89	32189	Presa Santa Teresa
45	14135	Santa María de los Ángeles			

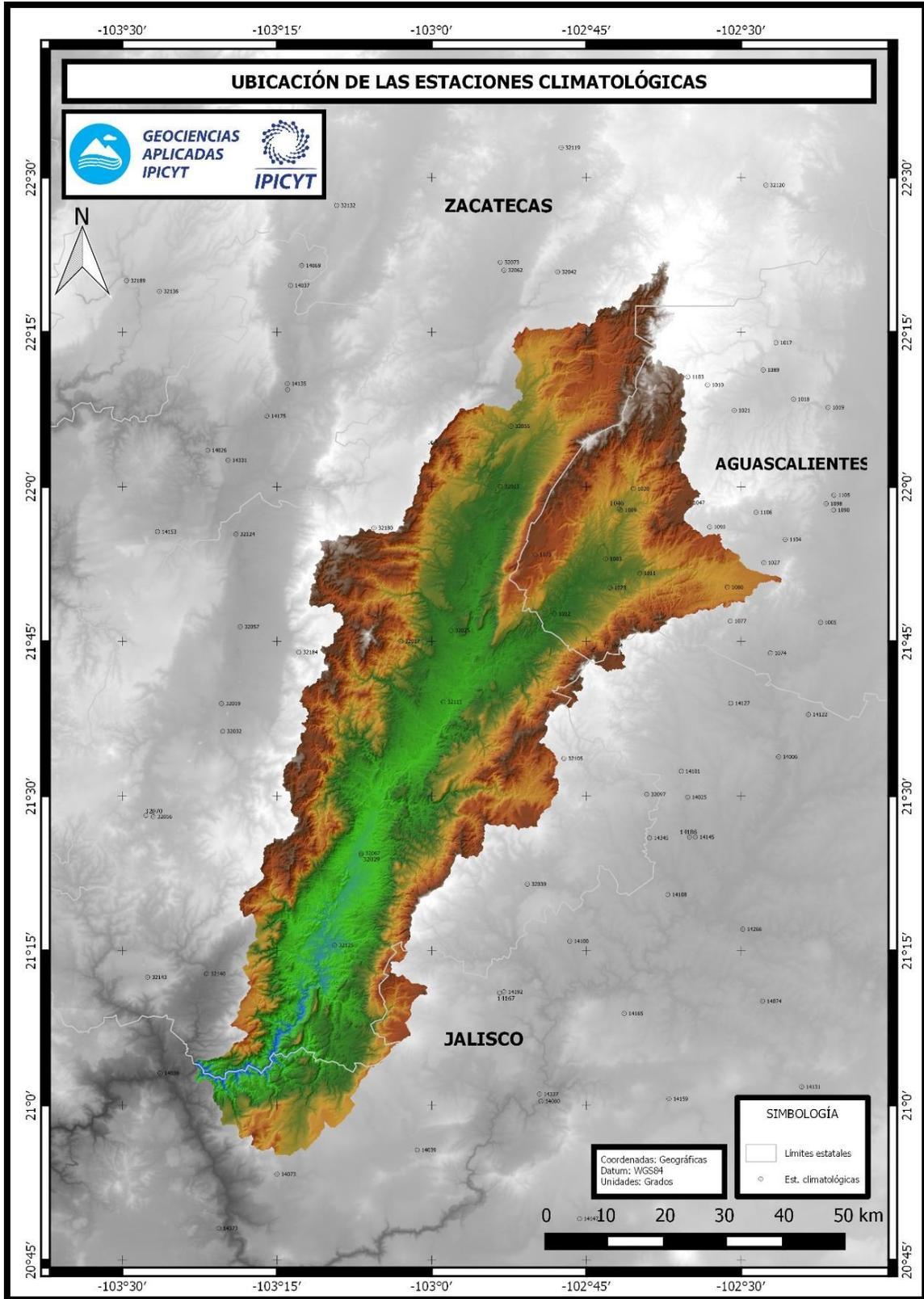


Figura 3.18 Mapa de la localización de las estaciones climatológicas seleccionadas.

## **Precipitación de la zona de estudio**

Los resultados gráficos y estadísticos obtenidos de las interpolaciones de los valores de precipitación serán presentados en los siguientes apartados; Tomándose en cuenta, la zona de estudio como una sola unidad y por otro lado como un conjunto de unidades de importancia hidrogeológica, es decir por unidades acuíferas.

### ***Cuenca como unidad***

#### ***Año de poca precipitación (1979)***

Clasificado por el National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, por sus siglas en inglés) (2015) como año niño débil, el año de 1979 registró precipitaciones en un rango anual de 300-652 mm, los cuales generaron un volumen de 2 767 Mm<sup>3</sup> de precipitación. Para el periodo mayo-septiembre (5-9) fue de 238-591 mm, calculándose 2 349 Mm<sup>3</sup> de precipitación para la cuenca. En su periodo octubre-abril (10-4), se obtuvo un rango de 37-104 mm con su correspondiente volumen de 418 Mm<sup>3</sup>. Los meses con mejores registros de precipitación fueron agosto con un rango de 95-224 mm y un volumen de 905 Mm<sup>3</sup>; y el mes de diciembre con 17-92 mm y 349 Mm<sup>3</sup>, respectivamente en cada periodo.

La Figura 3.19 muestra la distribución espacial de las precipitaciones para los dos periodos identificados. Para el periodo octubre-abril, la distribución de la precipitación es de mayor rango en la parte centro y centro sur de la cuenca, los valores más bajos se encuentran en la parte sur del área de estudio y en la zona de intersección de las fosas, mientras que las regiones con valores superiores se localizan sobre la parte norte y sur de la fosa de Calvillo. Por otro lado, la distribución espacial en el periodo mayo-septiembre tiene sus máximos sobre la parte centro sur

y sureste, los rangos bajos se encuentran sobre la región norte principalmente sobre las serranías.

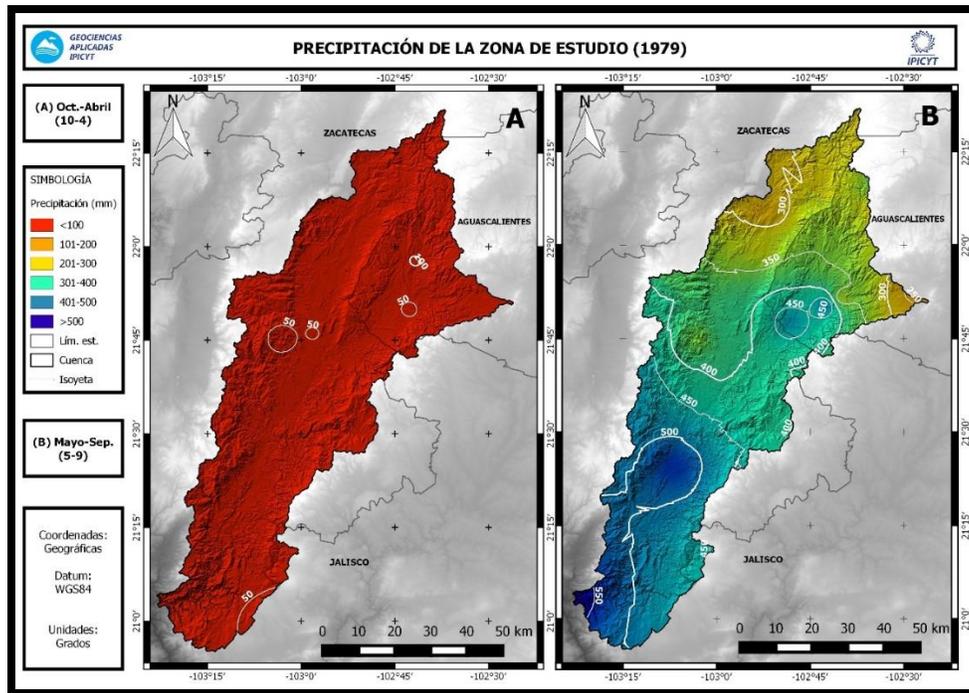


Figura 3.19 Distribución espacial de la precipitación en el área de estudio para el año 1979.

### Año de precipitación promedio (2000)

El año 2000, clasificado por el NOAA (2015) como año niña débil-moderado, registró precipitaciones en un rango a nivel anual de 377-821 mm, los cuales generaron un volumen de 3 067 Mm<sup>3</sup> de precipitación. En tanto al periodo mayo-septiembre, fue de 287-711 mm, calculándose 2 656 Mm<sup>3</sup>, respectivamente. Los resultados correspondientes al periodo octubre-abril fueron un rango de 26-139 mm y un volumen de 411 Mm<sup>3</sup>. Los meses con mejores registros de precipitación fueron junio con un rango de 88-229 mm y un volumen de 816 Mm<sup>3</sup>; y octubre con 4-106 mm y 265 Mm<sup>3</sup>, respectivamente en cada periodo.

La distribución de la precipitación que se presentó en este año es mostrada en la Figura 3.20. Para el periodo octubre-abril los mínimos de precipitación se ubicaron en la parte norte de la cuenca, afectando a la región de las fosas tectónicas, por

otro lado, los máximos ocurrieron en la región sur, justo sobre el punto de salida de la cuenca en estudio. Mientras que, para el periodo mayo-septiembre el mínimo que resalta se situó en la parte centro sur y el máximo por su parte sobre el extremo sur.

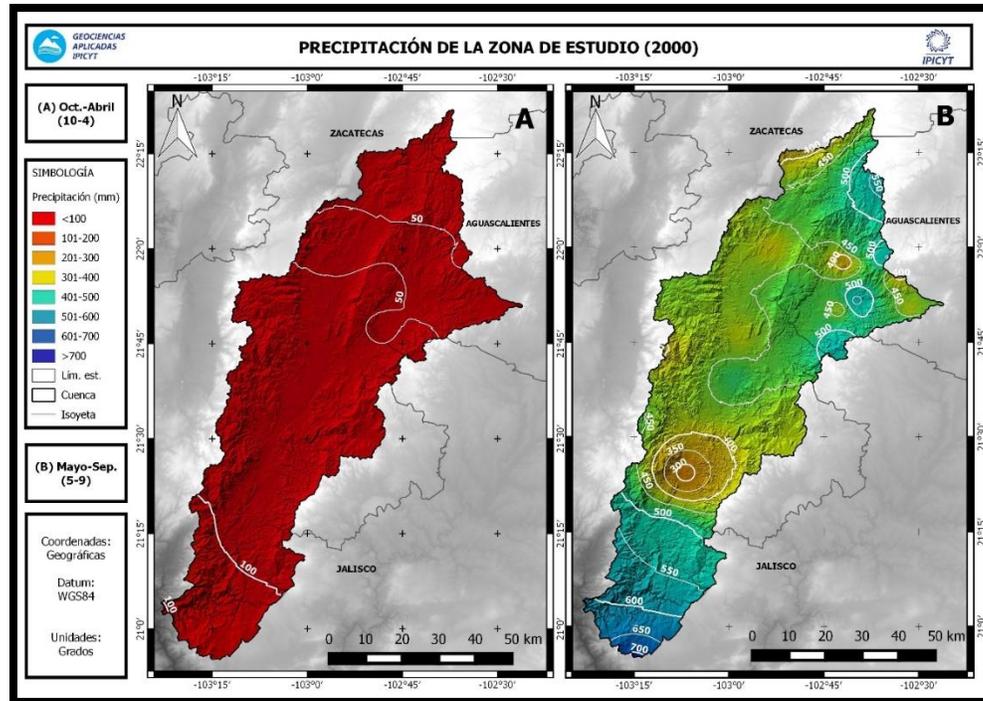


Figura 3.20 Distribución espacial de la precipitación en el área de estudio para el año 2000.

### Año de precipitación abundante (2004)

De acuerdo con el NOAA, el año 2004 fue clasificado como año niño débil, en su registro de precipitaciones se obtuvo un rango anual de 544-1102 mm, generando un volumen de 4 981 Mm<sup>3</sup> de precipitación. Lo correspondiente a su periodo mayo-septiembre, fue de 462-1029 mm, calculándose 4 400 Mm<sup>3</sup>, respectivamente. Los obtenidos para el periodo octubre-abril fueron un rango de 43-182 mm y un volumen de 581 Mm<sup>3</sup>. Los mejores registros mensuales fueron agosto con un rango de 88-258 mm y un volumen de 1 069 Mm<sup>3</sup>; y enero con 0-94 mm y 240 Mm<sup>3</sup> aprox., respectivamente en cada periodo. Con respecto a la distribución espacial, los resultados obtenidos se muestran en la Figura 3.21, muestran que para el periodo octubre-abril, la región de mínimos prácticamente abarca desde la parte central

hasta el extremo sur de la zona de estudio, mientras que la región de máximos ocupa el resto del territorio. En el caso del periodo complementario, los resultados anteriores se invirtieron, ya que la región de mínimos ahora se encuentra sobre la parte norte de la cuenca, con un mínimo marcado justo al norte de la fosa de Calvillo; por su parte la región de máximos se ubicó sobre la parte sur del área con su máximo cerca del punto de salida de la cuenca.

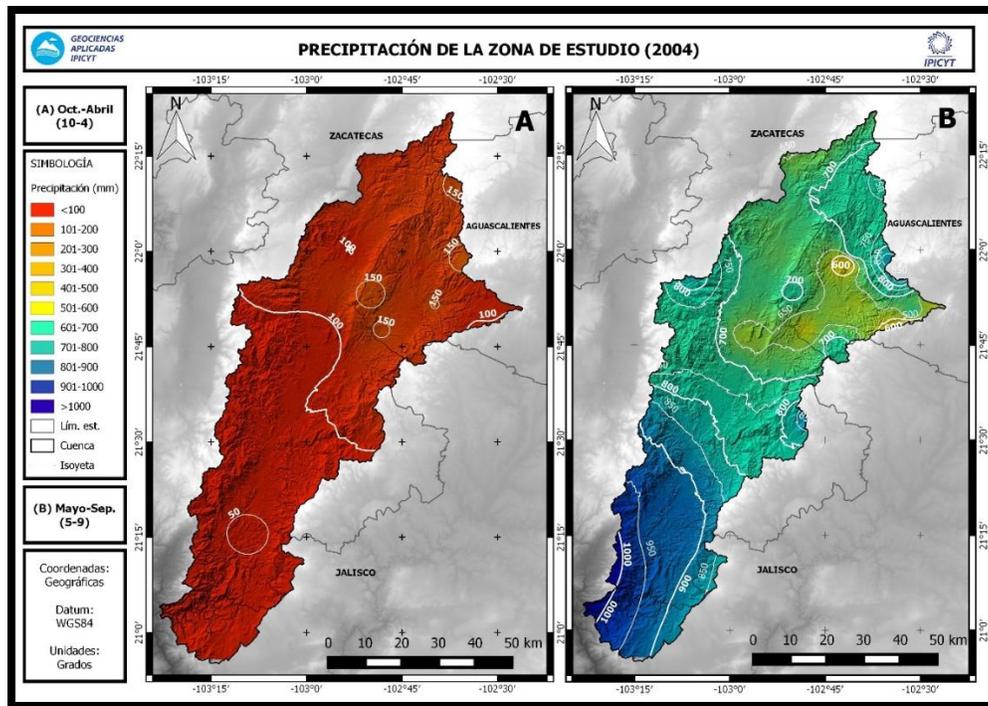


Figura 3.21 Distribución espacial de la precipitación en el área de estudio para el año 2004.

### ***Paquete sedimentario del graben de Calvillo***

#### ***Año de poca precipitación (1979)***

La precipitación calculada para el PSGC para el año 1979 cuenta con un rango anual de 419-574 mm, con un volumen de 119 Mm<sup>3</sup>. Los rangos y volúmenes aproximados para sus dos periodos, mayo-septiembre y octubre-abril, fueron de 343-491 mm produciendo 101 Mm<sup>3</sup>; y 37-104 mm con una producción de 18 Mm<sup>3</sup>, respectivamente. Los meses con mayor rango de precipitación y producción de

volumen fueron julio para el periodo mayo-septiembre, con 125-200 mm y 40 Mm<sup>3</sup>; y diciembre registrando 17-92 mm con 15 Mm<sup>3</sup>.

En la Figura 3.22 se aprecian las distribuciones espaciales para los dos periodos en cuestión. La región de mínimo para el periodo octubre-abril se localiza sobre la parte centro norte del PSGC mientras que el resto del mismo parece tener equilibrio en el rango evitando poder notar un máximo. Para el periodo mayo-septiembre la región de máximos se situó sobre el centro de PSGC, con una cobertura que se expande tanto hacia el centro norte como hacia el centro sur del mismo.

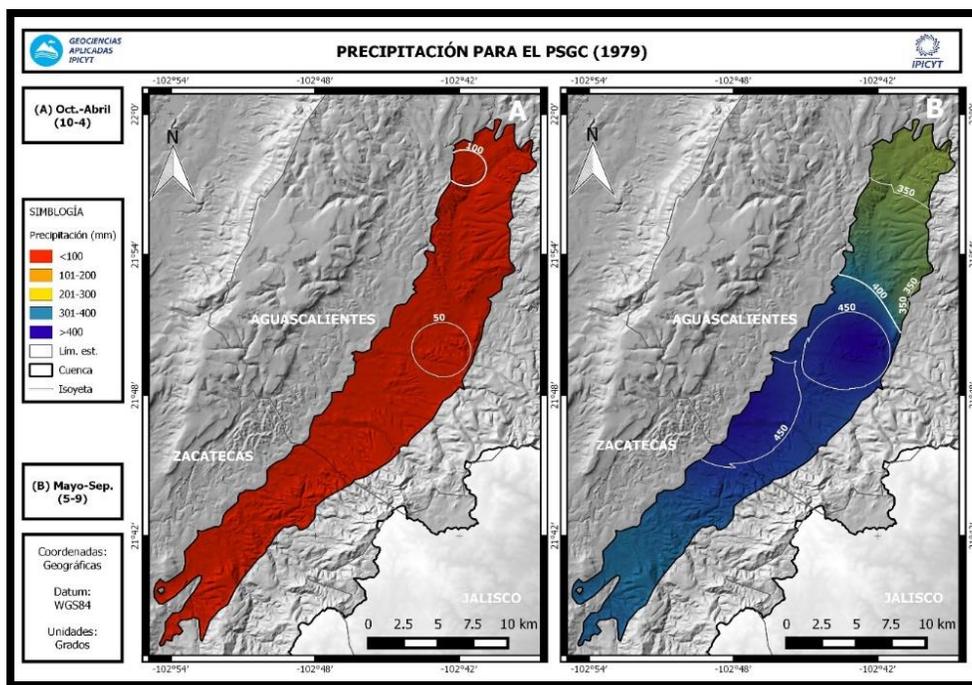


Figura 3.22 Distribución espacial de la precipitación en el PSGC para el año 1979.

### Año de precipitación promedio (2000)

Para el año 2000, los rangos y los volúmenes de precipitación a escala anual fueron 414-587 mm y 125 Mm<sup>3</sup>; para lo respectivo a los periodos mayo-septiembre y octubre-abril fueron 364-540 mm y 35-76 mm, así como 112 Mm<sup>3</sup> y 13 m<sup>3</sup>, respectivamente. Siendo los meses con mayor precipitación junio para el periodo mayo-septiembre, mientras que para el periodo octubre-abril fue octubre, el primero

con un rango de 88-164 mm y un volumen de 32 Mm<sup>3</sup>; y el segundo con 4-52 mm generando 6 Mm<sup>3</sup>. La distribución espacial resultante, mostrada en la Figura 3.23, para los dos periodos en análisis muestra, que para el periodo octubre-abril, la región de máximo se dio sobre el extremo sur del PSGC, mientras que para el periodo mayo-septiembre, apareció al noroeste del mismo. En cuestión a las regiones de mínimos, para el primero no parece resaltar en especial una señal puntual sino que se mantiene el rango mínimo sobre la mayor parte de la extensión del PSGC; para el segundo, aparece una pequeña región de mínimo en el extremo norte del PSGC.

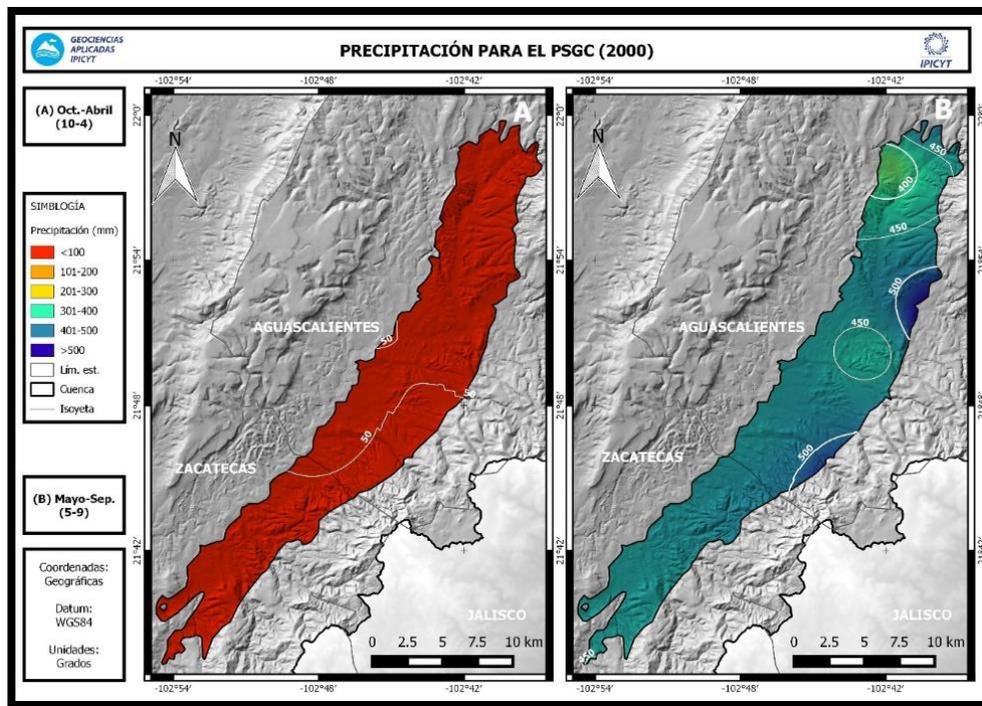


Figura 3.23 Distribución espacial de la precipitación en el PSGC para el año 2000.

*Año de precipitación abundante (2004)*

Los resultados correspondientes a la precipitación del 2004 revelan un rango anual de 633-897 mm, que produjeron 189 Mm<sup>3</sup> de volumen. Para el periodo mayo-septiembre, el rango que se obtuvo fue de 514-749 mm acumulando un volumen igual a 157 Mm<sup>3</sup>; siendo junio el mes de mejor rango con 134-189 mm y con una

producción de 38 Mm<sup>3</sup>, sin embargo, agosto fue el que consiguió un valor más elevado de volumen, recabando 39 Mm<sup>3</sup> contando con un rango de 101-188 mm. Con respecto al periodo octubre-abril, el rango resultado fue de 109-153 mm reuniendo un volumen de 32 Mm<sup>3</sup>; el mes con mejor rango de precipitación fue octubre con 34-77 mm y un volumen acumulado de 12 Mm<sup>3</sup>.

La Figura 3.24 muestra la distribución espacial para la precipitación de este año en sus dos periodos en estudio. Con respecto al periodo octubre-abril deja ver una región de mínimo en el extremo sur del PSGC, en tanto a la región de máximo se situó sobre la porción central-sur del mismo. Por otro lado el periodo mayo-septiembre tuvo localizados sus regiones de máximos en sus extremos norte y sur, y la región de mínimo al norte, muy cerca a la de máximo.

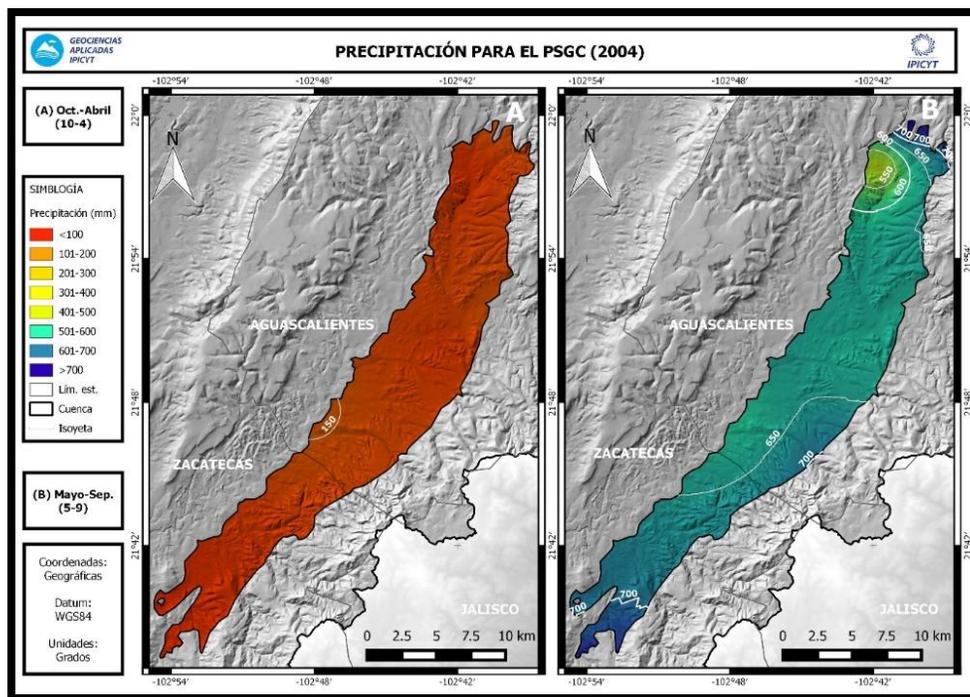


Figura 3.24 Distribución espacial de la precipitación en el PSGC para el año 2004.

## Paquete sedimentario del graben de Juchipila

### Año de poca precipitación (1979)

La precipitación calculada para el PSGJ para el año 1979 cuenta con un rango anual de 366-619 mm, con un volumen de 520 Mm<sup>3</sup>. Los rangos y volúmenes para sus dos periodos, mayo-septiembre y octubre-abril, fueron de 283-537 mm produciendo 443 Mm<sup>3</sup>; y 48-86 mm con una producción de 77 Mm<sup>3</sup>, respectivamente. Los meses con mayor rango de precipitación en lámina y producción de volumen fueron agosto para el periodo mayo-septiembre, con 108-224 mm y 177 Mm<sup>3</sup>; y diciembre registrando 36-81 mm con 67 Mm<sup>3</sup>. En la Figura 3.25 se aprecian las distribuciones espaciales para los dos periodos en cuestión. La región de mínimo para el periodo octubre-abril se localiza sobre la parte centro norte del PSGJ un poco arriba de la zona de intersección de las fosas, mientras que el resto del mismo parece tener equilibrio en el rango evitando poder notar un máximo. Para el periodo mayo-septiembre la región de máximos se situó sobre el centro-sur del PSGJ, en lo que respecta a la región de mínimo se ubicó sobre el extremo norte.

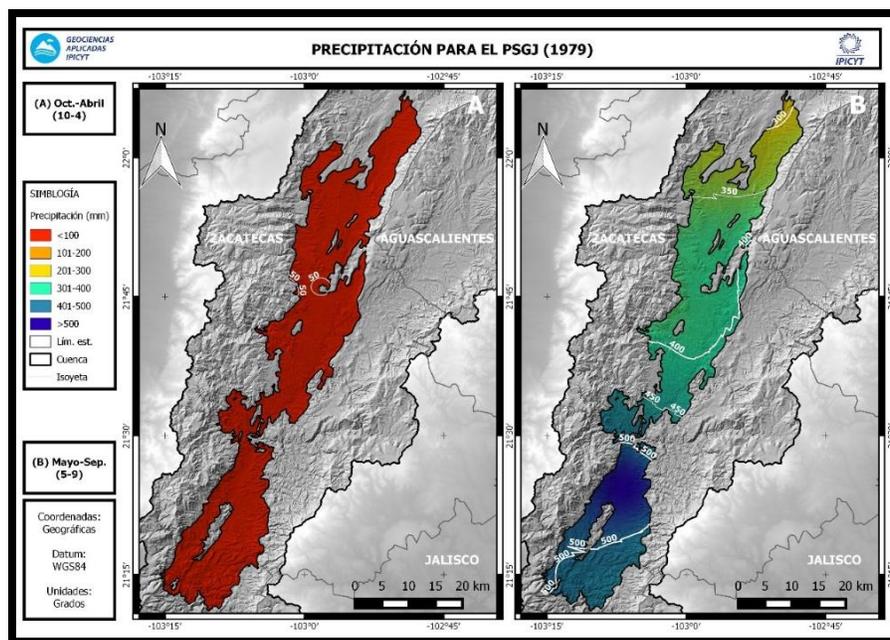


Figura 3.25. Distribución espacial de la precipitación en el PSGJ para el año 1979.

Año de precipitación promedio (2000)

Para el año 2000, los rangos y los volúmenes de precipitación a escala anual para el PSGJ fueron 377-650 mm y 534 Mm<sup>3</sup>; para lo respectivo a los periodos mayo-septiembre y octubre-abril fueron 287-539 mm y 26-110 mm, así como 457 Mm<sup>3</sup> y 77 Mm<sup>3</sup>, respectivamente. Los meses con mayor precipitación junio para el periodo mayo-septiembre, mientras que para el periodo octubre-abril fue octubre, el primero con un rango de 89-194 mm y un volumen de 148 Mm<sup>3</sup>; y el segundo con 10-87 mm generando 49 Mm<sup>3</sup>.

La distribución espacial resultante está representada en la Figura 3.26. Para el periodo octubre-abril, la región de máximo se dio sobre la mayor parte del sur del PSGJ. Coincidiendo en orientación se localizó el máximo del periodo mayo-septiembre, pero su extensión es mucho más pequeña y orientada hacia el extremo del paquete sedimentario. En cuestión con las regiones de mínimos, para el primer periodo esta región se presentó al norte del PSGJ; para el segundo periodo, aparece en muy cercana a la región de máximo, ambas sobre la porción sur del paquete.

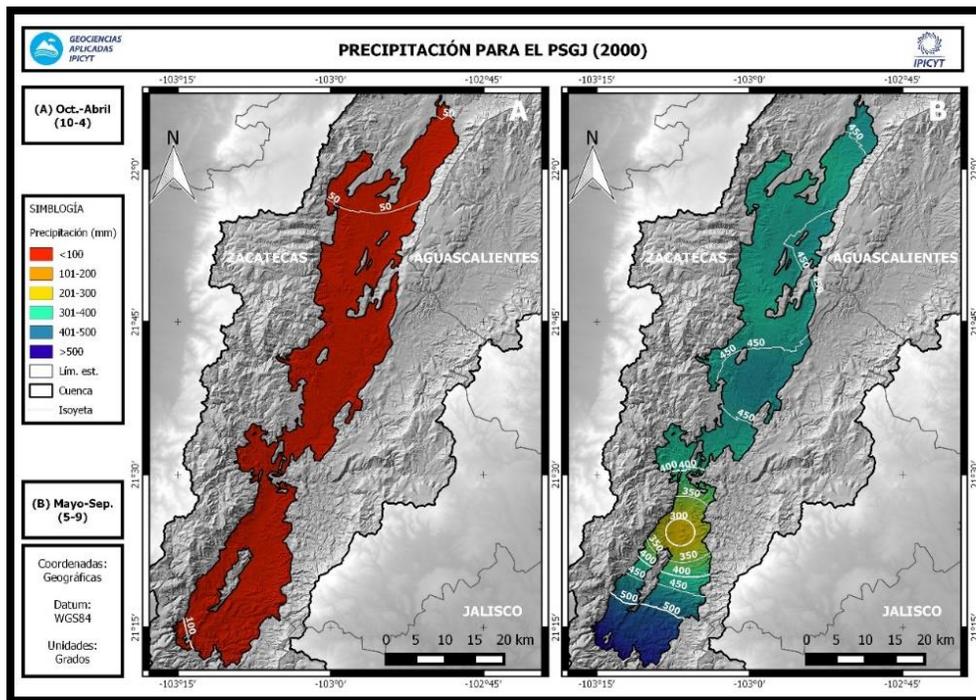


Figura 3.26 Distribución espacial de la precipitación en el PSGJ para el año 2000.

### Año de precipitación abundante (2004)

Los resultados correspondientes a la precipitación del 2004 revelan un rango anual de 695-1030 mm, que produjeron 903 Mm<sup>3</sup> de volumen. Para el periodo mayo-septiembre, el rango que se obtuvo fue de 629-969 mm acumulando un volumen de 810 Mm<sup>3</sup>; siendo junio el mes de mejor rango con 115-227mm y produciendo un volumen de 1 107 Mm<sup>3</sup>. Con respecto al periodo octubre-abril, el rango resultado fue de 43-152 mm reuniendo un volumen de 93 Mm<sup>3</sup>; el mes con mejor rango de precipitación fue enero con 1-61 mm y un volumen acumulado de 36 Mm<sup>3</sup>.

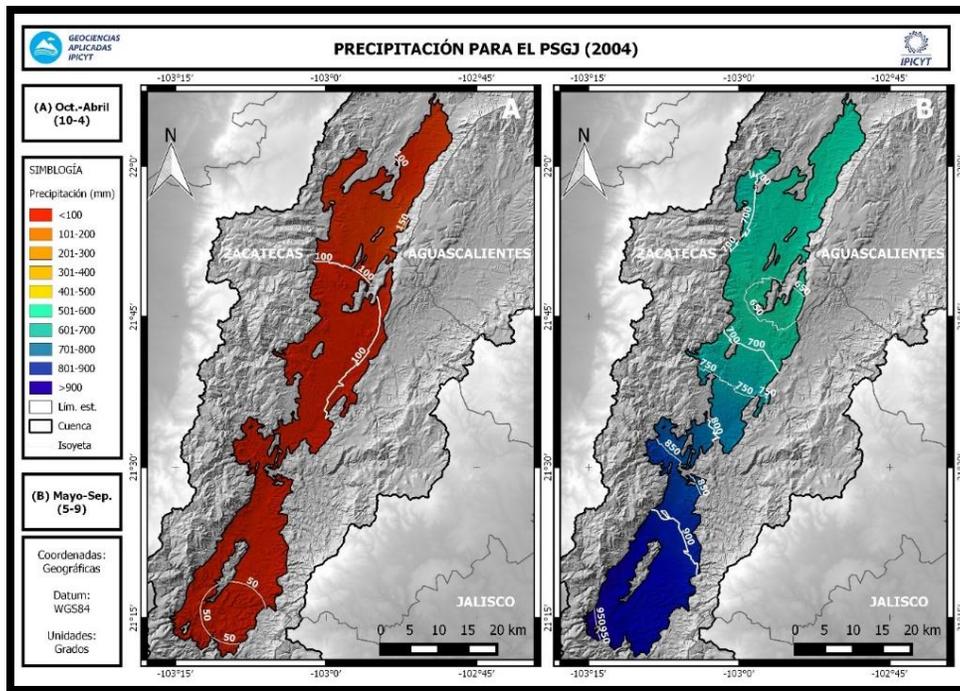


Figura 3.27. Distribución espacial de la precipitación en el PSGJ para el año 2004.

En la Figura 3.27 se aprecian las distribuciones espaciales para los dos periodos en cuestión. La región de mínimo más acentuada para el periodo octubre-abril se localiza sobre la parte centro norte del PSGJ, pero también existe otra un poco arriba de la zona de intersección de las fosas. Por otro lado, la región de máximo se localiza principalmente sobre la porción norte del paquete. Para el periodo mayo-septiembre la región de máximos se situó sobre el sur del PSGJ, en lo que respecta a la región de mínimo se ubicó sobre la región centro norte del mismo.

### ***Paquete volcánico de la cuenca***

La Tabla 3.11 muestra las estadísticas resultado para la precipitación que cayó fuera de los paquetes sedimentarios de las fosas en estudio, es decir, el paquete volcánico.

Tabla 3.11 Estadísticas de precipitación para el PVC.

<b>Año</b>	<b>Periodo</b>	<b>Volumen de Precipitación (Mm<sup>3</sup>)</b>
<b>1979</b>	<b>Anual</b>	2128
	<b>May.-Sept.</b>	1805
	<b>Oct.-Abr.</b>	323
<b>2000</b>	<b>Anual</b>	2408
	<b>May.-Sept.</b>	2087
	<b>Oct.-Abr.</b>	321
<b>2004</b>	<b>Anual</b>	3889
	<b>May.-Sept.</b>	3433
	<b>Oct.-Abr.</b>	456

Los resultados muestran que del 77 al 79% de la precipitación total que cae en la cuenca es captada por el PVC. De lo caído, del 85 al 88% caen en el periodo mayo-septiembre mientras que los restantes 15 al 12% en el periodo octubre-abril.

## **Infiltración potencial de la zona de estudio**

A manera de hacer comparaciones, los resultados de infiltración serán presentados de manera similar a los de precipitación.

### ***Cuenca como unidad***

#### ***Infiltración potencial para el año 1979***

Para el año de 1979, se calculó un rango de infiltración anual de 68-149 mm, los cuales generaron un volumen infiltrado de 1 508 Mm<sup>3</sup>. Para el periodo mayo-septiembre fue de 54-135 mm, calculándose 1 281 Mm<sup>3</sup> de infiltración para la cuenca. En su periodo octubre-abril, se obtuvo un rango de 8-24 mm con su correspondiente volumen de 227 Mm<sup>3</sup>. Los meses con mejores rangos y volúmenes de infiltración fueron agosto con un rango de 22-51 mm y un volumen de 493 Mm<sup>3</sup>; y el mes de diciembre con 4-21 mm y 191 Mm<sup>3</sup>, respectivamente en cada periodo.

La Figura 3.28 muestra la distribución espacial de la infiltración para los dos periodos identificados. Para el periodo octubre-abril, la distribución de la infiltración es de mayor rango en la parte norte de la cuenca, los valores más bajos se encuentran en la parte sur del área de estudio y un poco al norte de la zona de intersección de las fosas. Por otro lado, la distribución espacial en el periodo mayo-septiembre tiene sus máximos sobre la parte centro sur y sureste, los rangos bajos se encuentran sobre la región norte principalmente sobre las serranías y al norte se encuentran las regiones con valores menores pero considerables. Cabe mencionar que la infiltración en la fosa de Calvillo es notable.

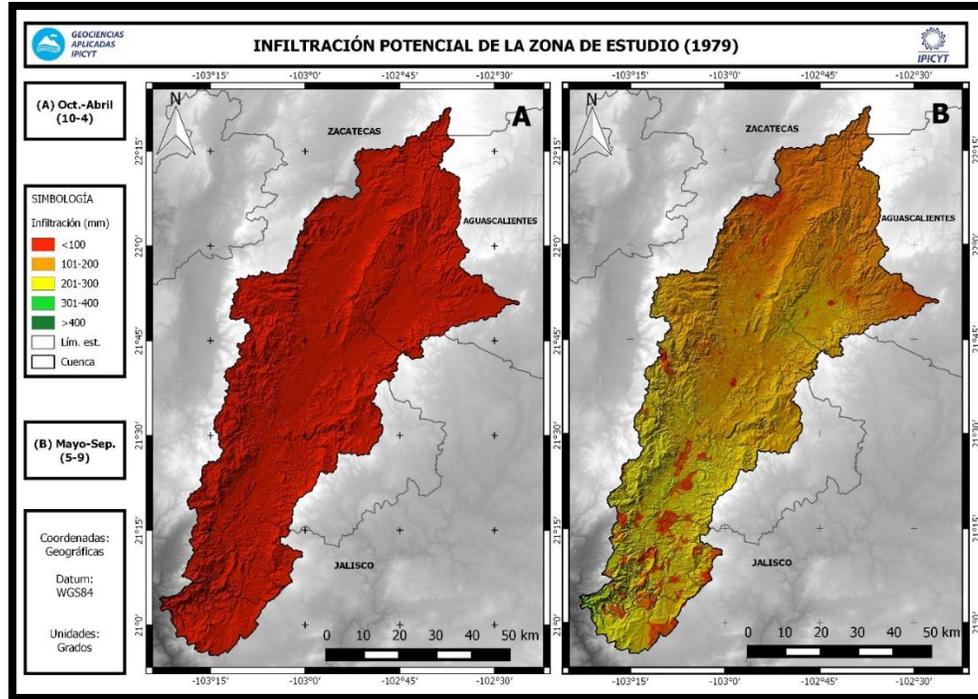


Figura 3.28 Distribución espacial de la infiltración potencial en el área de estudio para el año 1979.

### Infiltración potencial para el año 2000

Respecto al año 2000, se obtuvieron infiltraciones en un rango a nivel anual de 86-187 mm, los cuales generaron un volumen de 1675 Mm<sup>3</sup> de infiltración. En tanto al periodo mayo-septiembre, fue de 65-162 mm, calculándose 1457 Mm<sup>3</sup>, respectivamente. Los resultados correspondientes al periodo octubre-abril fueron un rango de 6-32 mm y un volumen de 218 Mm<sup>3</sup>. Los meses con mejores resultados de infiltración fueron junio con un rango de 1-40 mm y un volumen de 447 Mm<sup>3</sup>; y octubre con 0-18 mm y 143 Mm<sup>3</sup>, respectivamente en cada periodo. La distribución espacial de la infiltración que se presentó en este año es mostrada en la Figura 3.29.

Para el periodo octubre-abril los mínimos de infiltración se ubicaron en la parte norte de la cuenca, afectando a la región de las fosas tectónicas. Por otro lado, los máximos ocurrieron en la región sur, justo sobre el punto de salida de la cuenca en estudio. Mientras que, para el periodo mayo-septiembre el mínimo que resalta se

situó en la parte centro sur y el máximo sobre el extremo sur y al extremo norte, cargado hacia la zona del graben de Calvillo.

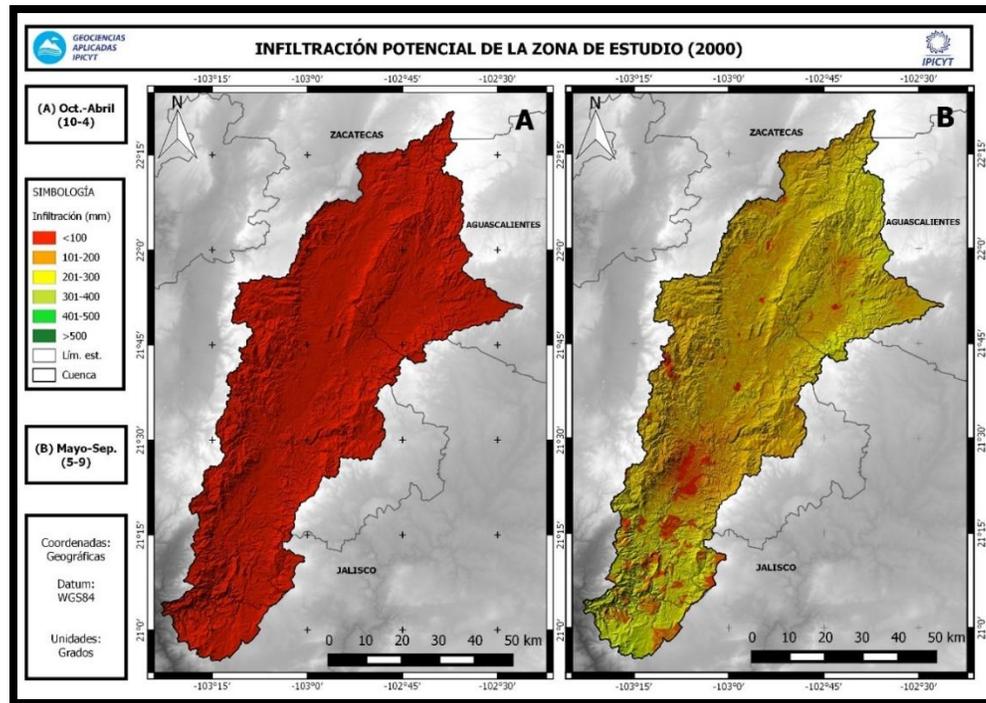


Figura 3.29 Distribución espacial de la infiltración potencial en el área de estudio para el año 2000.

### Infiltración potencial para el año 2004

Para 2004, se obtuvo un rango anual de 124-251 mm, generando 2 721 Mm<sup>3</sup> de volumen de infiltración. Lo correspondiente a su periodo mayo-septiembre, fue de 105-234 mm, calculándose 2 406 Mm<sup>3</sup>, respectivamente. Los obtenidos para el periodo octubre-abril fueron un rango de 10-41 mm y un volumen de 315 Mm<sup>3</sup>. Los meses de mayor infiltración fueron junio con un rango de 26-65 mm y un volumen de 606 Mm<sup>3</sup>; y enero con 0-21 mm y 132 Mm<sup>3</sup>, respectivamente en cada periodo.

Con respecto a la distribución espacial, los resultados obtenidos son mostrados en la Figura 3.28. Para el periodo octubre-abril, la región de los mínimos está situada desde el centro hasta la parte sur, mientras que hacia el norte se encuentra la región con los máximos. En el caso del periodo complementario, los resultados son

opuestos, ya que hacia la parte sur es donde se localizan los máximos, en especial sobre la parte oeste; y los valores mínimos se encuentran cargados hacia el norte.

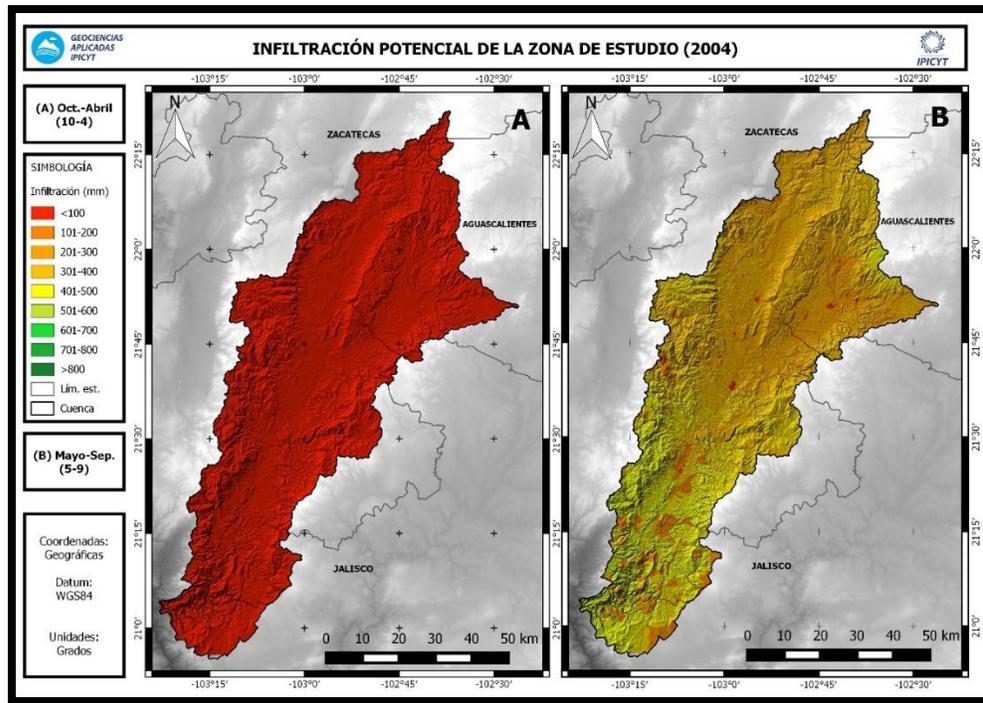


Figura 3.30 Distribución espacial de la infiltración potencial en el área de estudio para el año 2004.

### ***Paquete sedimentario del graben de Calvillo***

#### ***Infiltración potencial para el año 1979***

La infiltración calculada para el PSGC para el año 1979 cuenta con un rango anual de 22-432 mm, con un volumen de 62 Mm<sup>3</sup>. Los rangos y volúmenes aproximados para sus dos periodos, mayo-septiembre y octubre-abril, fueron de 18-374 mm produciendo 53 Mm<sup>3</sup>; y 2-82 mm con una producción de 9 Mm<sup>3</sup>, respectivamente. Los meses con mejores rangos y volúmenes de infiltración fueron, julio para el periodo mayo-septiembre, con 8-158 mm y 21 Mm<sup>3</sup>; y diciembre con 1-72 mm y 8 Mm<sup>3</sup>.

En la Figura 3.31 se aprecian las distribuciones espaciales para los dos periodos en cuestión. La región de mínimo para el periodo octubre-abril se situó sobre el centro

norte, sobre Calvillo y sus cercanías del este, por otro lado, el resto del paquete parece conservar valores fuera del mínimo sin denotar la presencia de regiones máximas. Para el periodo mayo-septiembre la región de mínimos se localizó sobre el extremo norte del PSGC, con una cobertura que se expande hacia el extremo sur del mismo, mientras que al norte se la región de valores mínimos es más notoria.

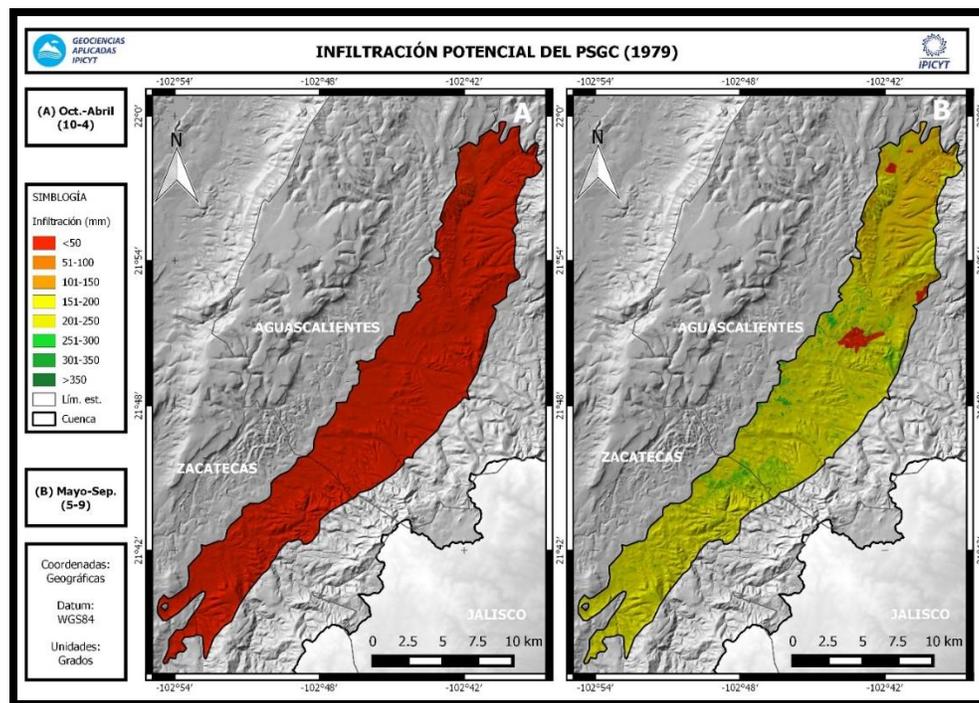


Figura 3.31 Distribución espacial de la infiltración potencial en el PSGC para el año 1979.

### Infiltración potencial para el año 2000

Para el año 2000, los rangos y los volúmenes de infiltración a escala anual fueron 22-443 mm y 66 Mm<sup>3</sup>; para lo respectivo a los periodos mayo-septiembre y octubre-abril fueron 19-406 mm y 2-56 mm, así como 59 Mm<sup>3</sup> y 7 Mm<sup>3</sup>, respectivamente. Siendo los meses con mayor precipitación junio para el periodo mayo-septiembre, mientras que para el periodo octubre-abril fue octubre, el primero con un rango de 5-128 mm y un volumen de 17 Mm<sup>3</sup>; y el segundo con 0-38 mm generando 3 Mm<sup>3</sup>.

La distribución espacial resultante, mostrada en la Figura 3.32, para los dos periodos en análisis muestra, que para el periodo octubre-abril, la región de máximo

se dio sobre el extremo sur del PSGC, mientras que para el periodo mayo-septiembre, apareció al noroeste del mismo. En cuestión a las regiones de mínimos, para el primero no parece resaltar en especial una señal puntual sino que se mantiene el rango mínimo sobre la mayor parte de la extensión del PSGC; para el segundo, aparece una pequeña región de mínimo en el extremo norte del PSGC.

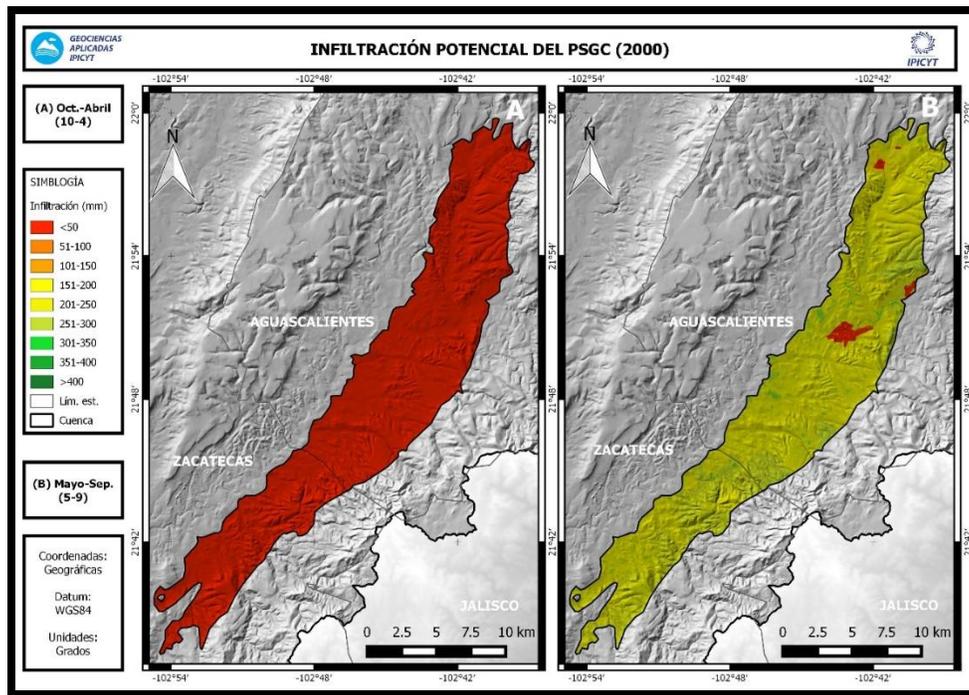


Figura 3.32 Distribución espacial de la infiltración potencial en el PSGC para el año 2000.

### Infiltración potencial para el año 2004

Los resultados correspondientes a la infiltración del 2004 revelan un rango anual de 33-710 mm, que produjeron 99 Mm<sup>3</sup> de volumen. Para el periodo mayo-septiembre, el rango que se obtuvo fue de 27-592 mm acumulando un volumen igual a 82 Mm<sup>3</sup>; siendo junio el mes de mejor rango con 7-150 mm y con una producción de 20 Mm<sup>3</sup>, sin embargo, agosto fue el que consiguió un valor más elevado de volumen, recabando 21 Mm<sup>3</sup> contando con un rango de 5-145 mm. Con respecto al periodo octubre-abril, el rango resultado fue de 6-117 mm reuniendo un volumen de 17 Mm<sup>3</sup>; el mes con mejor rango de infiltración fue octubre con 2-54 mm y un volumen acumulado de 6 Mm<sup>3</sup>.

La Figura 3.33 muestra la distribución espacial para la infiltración de este año en sus dos periodos en estudio. Con respecto al periodo octubre-abril parece tener una distribución uniforme de infiltración. Por otro lado el periodo mayo-septiembre, muestra pequeñas regiones de mínimos en sus extremos norte y sur, ambos con tendencia al este, el resto del PSGC parece seguir de manera uniforme como en el anterior periodo

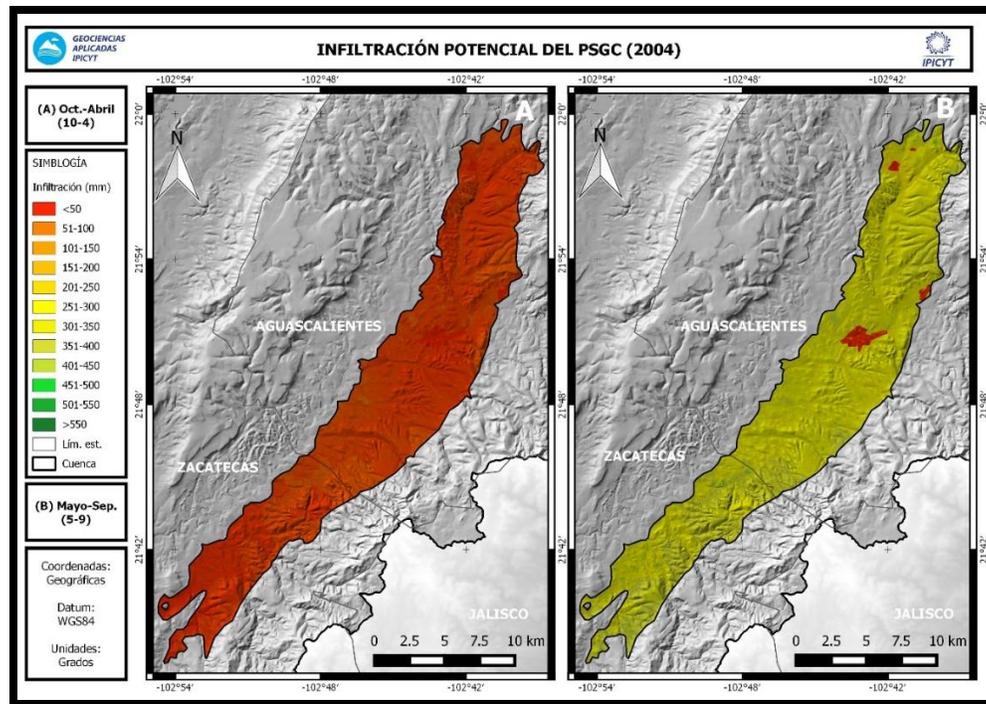


Figura 3.33 Distribución espacial de la infiltración potencial en el PSGC para el año 2004.

### ***Paquete sedimentario del graben de Juchipila***

#### ***Infiltración potencial para el año 1979***

La infiltración calculada para el PSGJ para el año 1979 cuenta con un rango de 21-484 mm, con un volumen de 268 Mm<sup>3</sup>. Los rangos y volúmenes para sus dos periodos, mayo-septiembre y octubre-abril, fueron de 17-419 mm infiltrando 229 Mm<sup>3</sup>; y 3-65 mm con una infiltración de 39 Mm<sup>3</sup>, respectivamente. Los meses con mayor rango de infiltración y de volumen infiltrado fueron agosto para el periodo

mayo-septiembre, con 6-172 mm y 91 Mm<sup>3</sup>; y diciembre registrando 2-62 mm con 35 Mm<sup>3</sup>.

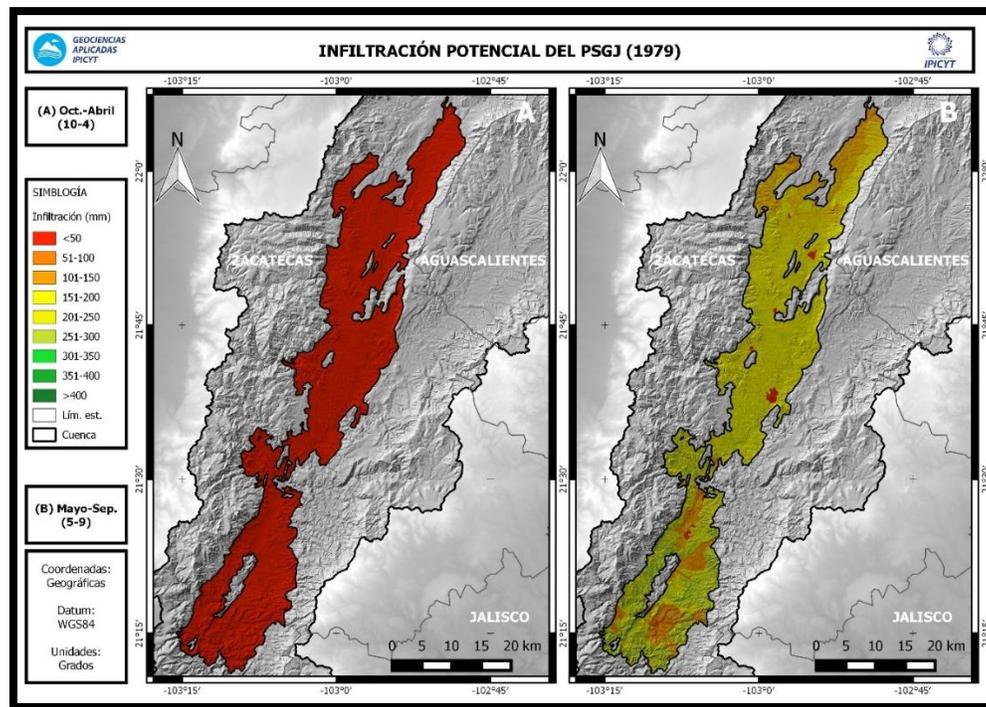


Figura 3.34 Distribución espacial de la infiltración potencial en el PSGJ para el año 1979.

En la Figura 3.34 se aprecian las distribuciones espaciales para los dos periodos del año 1979. Para el periodo octubre-abril la distribución parece uniforme, con excepción de una pequeña zona ligeramente marcada de mínimos justo arriba de la zona de intersección de las fosas. Para el periodo mayo-septiembre la región de máximos se situó sobre la porción sur del PSGJ, en lo que respecta a la región de mínimo se ubicó sobre el extremo norte del mismo.

### Infiltración potencial para el año 2000

Para el año 2000, los rangos y los volúmenes de infiltración para el PSGJ fueron 20-512 mm y 278 Mm<sup>3</sup>; con respecto a los periodos mayo-septiembre y octubre-abril fueron 15-426 mm y 1-83 mm; así como, 239 Mm<sup>3</sup> y 39 Mm<sup>3</sup>, respectivamente. Los meses con mayor infiltración fueron junio para el periodo mayo-septiembre,

mientras que para el periodo octubre-abril fue octubre, el primero con un rango de 5-152 mm y un volumen de 77 Mm<sup>3</sup>; y el segundo con 1-68 mm generando 25 Mm<sup>3</sup>.

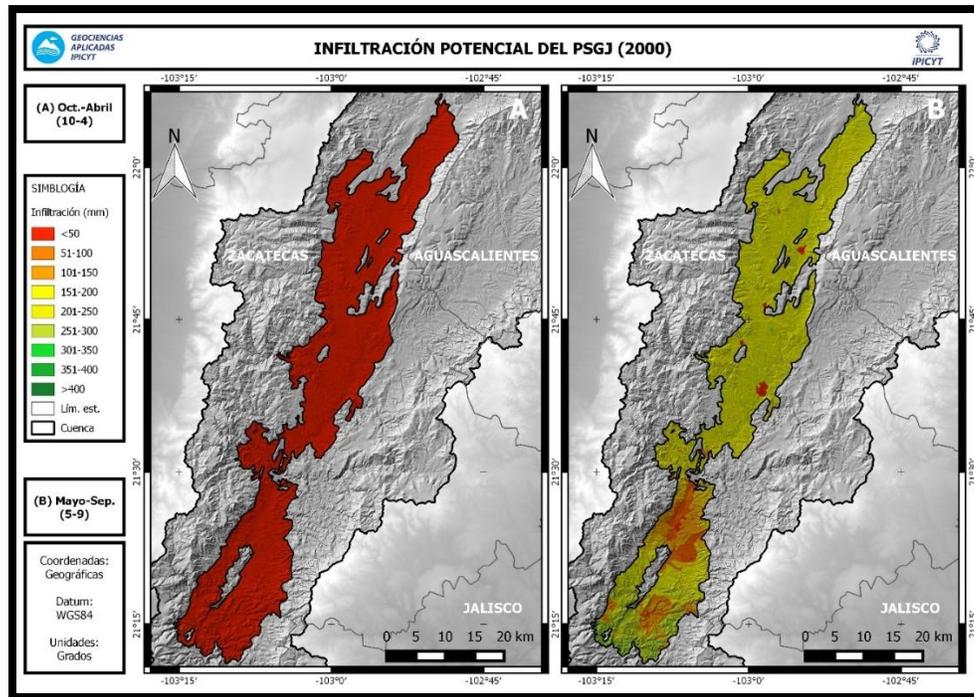


Figura 3.35 Distribución espacial de la infiltración potencial en el PSGJ para el año 2000.

La distribución espacial de la infiltración para este año se muestra en la Figura 3.35. Para el periodo octubre-abril, la región de máximo se dio sobre la mayor parte del sur del PSGJ. Con orientación en el extremo sur, se localizó el máximo del periodo mayo-septiembre; por otro lado las regiones del centro y norte presentan valores uniformes. En cuestión con las regiones de mínimos, para el primer periodo esta región se presentó al norte del PSGJ; para el segundo periodo, aparece en muy cercana a la región de máximo, ambas sobre la porción sur del paquete.

### Infiltración potencial para el año 2004

Los resultados de infiltración del 2004 revelan un rango de 37-812 mm, que produjeron 467 Mm<sup>3</sup> de volumen. Para el periodo mayo-septiembre, el rango que se obtuvo fue de 33-763 mm acumulando 419 Mm<sup>3</sup>; siendo agosto el mes de mejor

rango con 9-193 mm y un volumen de 108 Mm<sup>3</sup>. Por otro lado el periodo octubre-abril, el rango resultado fue de 2-115 mm reuniendo un volumen de 48 Mm<sup>3</sup>; el mes con mejor rango de infiltración fue enero con 0-46 mm y un volumen acumulado de 19 Mm<sup>3</sup>.

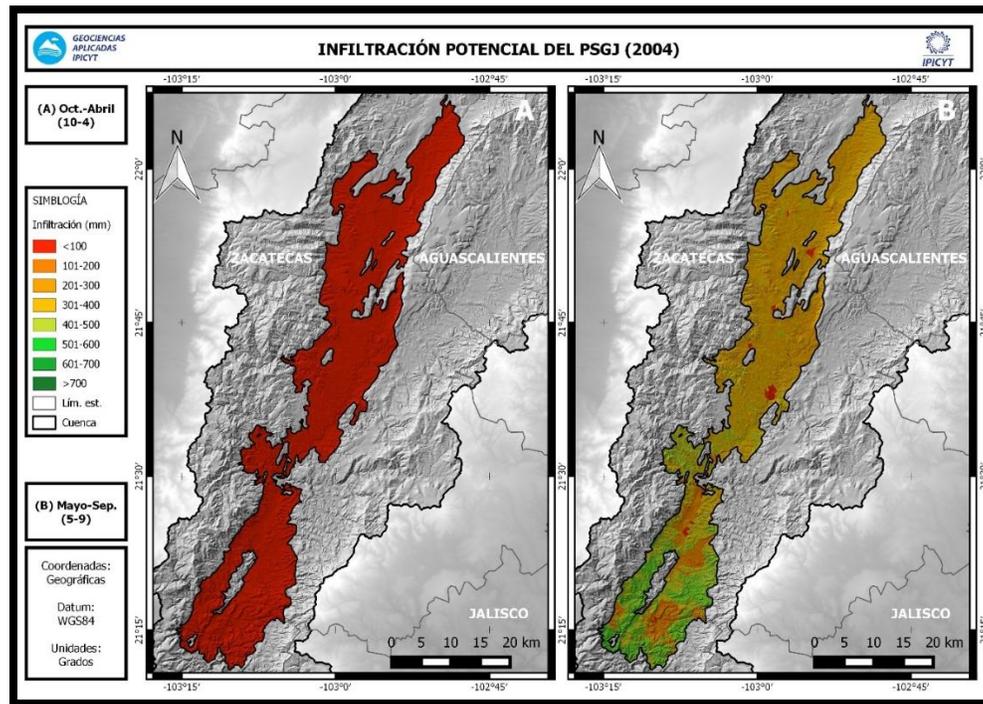


Figura 3.36 Distribución espacial de la infiltración potencial en el PSGJ para el año 2004.

En la Figura 3.36 se aprecian las distribuciones espaciales para los dos periodos en cuestión. La región de mínimo más acentuada para el periodo octubre-abril se localiza sobre la parte centro sur del PSGJ, pero también existe otra un poco arriba de la zona de intersección de las fosas. Por otro lado, la región de máximo se localiza principalmente sobre la porción norte del paquete. Para el periodo mayo-septiembre la región de máximos se situó sobre el sur del PSGJ, en lo que respecta a la región de mínimo se ubicó sobre la región centro norte del mismo.

### ***Paquete volcánico de la cuenca***

La Tabla 3.12 muestra las estadísticas resultado para la infiltración potencial que cayó sobre el paquete volcánico de la cuenca.

Tabla 3.12. Estadísticas de infiltración potencial para el PVC.

<b>Año</b>	<b>Periodo</b>	<b>Volumen de Infiltración Potencial (Mm3)</b>
<b>1979</b>	<b>Anual</b>	1178
	<b>May.-Sept.</b>	999
	<b>Oct.-Abr.</b>	179
<b>2000</b>	<b>Anual</b>	1331
	<b>May.-Sept.</b>	1159
	<b>Oct.-Abr.</b>	172
<b>2004</b>	<b>Anual</b>	2155
	<b>May.-Sept.</b>	1905
	<b>Oct.-Abr.</b>	250

Los resultados muestran que el PVC reúne de un 77 a 80% de la infiltración potencial total de la cuenca. De este volumen, el 85 al 88% se infiltra en el periodo mayo-septiembre, mientras que los restantes 15 a 12%, lo hacen durante el periodo octubre-abril.

## Relaciones porcentuales de infiltración potencial

Con resultados de los volúmenes de infiltración potencial, se elaboraron las siguientes relaciones porcentuales, siguiendo dos aspectos importantes de este parámetro.

### *Relación territorial*

Considerando al volumen de infiltración potencial de la cuenca como porcentaje total, entonces la distribución de este porcentaje para los cuerpos acuíferos que la integran resulta como se muestra en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13 Relación porcentual territorial de la infiltración potencial de la zona de estudio.

I. P.		Volumen de Infiltración Potencial (Mm3)				Relación porcentual (%)		
Año	Periodo	Cuenca	PSGC	PSGJ	PVC	Cuenca a PVC	Cuenca a PSGC	Cuenca a PSGJ
1979	Anual	1508	62	268	1178	78.12	4.11	17.77
	May.-Sept.	1281	53	229	999	77.99	4.14	17.88
	Oct.-Abr.	227	9	39	179	78.85	3.96	17.18
2000	Anual	1675	66	278	1331	79.46	3.94	16.60
	May.-Sept.	1457	59	239	1159	79.55	4.05	16.40
	Oct.-Abr.	218	7	39	172	78.90	3.21	17.89
2004	Anual	2721	99	467	2155	79.20	3.64	17.16
	May.-Sept.	2406	82	419	1905	79.18	3.41	17.41
	Oct.-Abr.	315	17	48	250	79.37	5.40	15.24

Los resultados muestran que el PVC logra una infiltración potencial de 78-80% del total que representa la cuenca, porcentaje que se mantiene en ambos periodos de análisis. Por su parte, el PSGJ alberga del 15-18% de la registrada para la cuenca, porciones que también se mantienen para los periodos. Finalmente, el PSGC guarda de un 3-5% del total de infiltración potencial, porciones que se mantienen durante los periodos contemplados.

### **Relación temporal**

Considerando el volumen de infiltración potencial anual de cada uno de los cuerpos acuíferos como porcentaje total, entonces la distribución de la infiltración potencial de cada uno de los cuerpos acuíferos en los dos periodos establecidos en el presente, es la que se muestra en la Tabla 3.14.

*Tabla 3.14. Relación porcentual año/temporada de Infiltración potencial de las unidades acuíferas y la zona de estudio.*

I.P.		Volumen de infiltración (Mm3)				Relación porcentual año/temporada (%)			
Año	Periodo	Cuenca	PSGC	PSGJ	PVC	Cuenca	PSGC	PSGJ	PVC
1979	Anual	1508	62	268	1178	100.00	100.00	100.00	100.00
	May.-Sept.	1281	53	229	999	84.95	85.48	85.45	84.80
	Oct.-Abr.	227	9	39	179	15.05	14.52	14.55	15.20
2000	Anual	1675	66	278	1331	100.00	100.00	100.00	100.00
	May.-Sept.	1457	59	239	1159	86.99	89.39	85.97	87.08
	Oct.-Abr.	218	7	39	172	13.01	10.61	14.03	12.92
2004	Anual	2721	99	467	2155	100.00	100.00	100.00	100.00
	May.-Sept.	2406	82	419	1905	88.42	82.83	89.72	88.40
	Oct.-Abr.	315	17	48	250	11.58	17.17	10.28	11.60

Los resultados muestran que de aprox. el 84-86% de la infiltración potencial para el año 1979 (año con registro menor de precipitación) se produjo en la temporada mayo-septiembre, mientras que del 14-16% se produjo en la temporada octubre-abril. Los correspondientes al año 2000 (año con registro medio de precipitación) indican que de un 86-89% de la infiltración potencial se logra en la temporada mayo-septiembre, el restante 11-14% lo hacen durante la temporada complementaria. Finalmente, para el año 2004 (año con registro mayor de precipitación) los obtenidos indican que del 88-90% de la infiltración porcentual es captada en la temporada mayo-septiembre, mientras que los restantes 12-10% se logran en la de octubre-

abril. Cabe mencionar que para este último año, en lo que respecta al PSGC, los resultados se vieron afectados por la distribución espacial de la precipitación, por lo que finalmente no fueron tomados para concluirlos junto con los obtenidos por las demás unidades acuíferas.

### Relación porcentual infiltración potencial-precipitación

Considerando la precipitación como el ingreso total de agua sobre cada cuerpo acuífero en análisis y la infiltración potencial como la porción captada por el mismo, entonces podemos observar las relaciones porcentuales mostradas en la Tabla 3.15.

*Tabla 3.15. Relación porcentual Infiltración potencial – Precipitación de las unidades acuíferas*

Relación Infiltración potencial/Precipitación (%)					
Año	Periodo	Cuenca	PSGC	PSGJ	PVC
1979	Anual	54.50	52.10	51.54	55.36
	May.-Sept.	54.53	52.48	51.69	55.35
	Oct.-Abr.	54.31	50.00	50.65	55.42
2000	Anual	54.61	52.80	52.06	55.27
	May.-Sept.	54.86	52.68	52.30	55.53
	Oct.-Abr.	53.04	53.85	50.65	53.58
2004	Anual	54.63	52.38	51.72	55.41
	May.-Sept.	54.68	52.23	51.73	55.49
	Oct.-Abr.	54.22	53.13	51.61	54.82

Los resultados de relación de los parámetros indica que para el año 1979, la cuenca conserva un 54% de a nivel anual y que se mantiene igual para ambos periodos; para el año 2000, estas relaciones se presentan con un 54% a nivel anual y de igual manera periodo mayo-septiembre, por otro lado para el periodo con octubre-abril llegó a un 53%; finalmente, para el año 2004, el 54% se mantiene tanto a nivel anual como a nivel periodos.

Con relación a los obtenidos para las unidades acuíferas que lo conforman:

- Los resultados del PVC para 1979 fueron de una relación del 55% anual y para los periodos en análisis; por su parte, los obtenidos para 2000 fueron de 55% de manera anual y para el periodo mayo-septiembre, y de 53% para el periodo octubre-abril; los de 2004 repiten con 55% de manera anual y en el periodo mayo-septiembre, y para el octubre-abril fue de 54%.
- El PSGC obtuvo para el año 1979 una relación del 52% tanto anualmente como para el periodo mayo-septiembre, para el periodo complementario, resultó en 50%; en el año 2000, de manera anual al igual que para el periodo mayo-septiembre, el resultado fue de una relación del 52%, por otro lado los resultantes para el periodo octubre-abril fueron poco mayores al 53%, en 2004, se repiten las cifras reportadas para el año 2000, con ligeras variaciones decimales.
- El PSGJ, en 1979, repite un valor de 51% de manera anual y en el periodo mayo-septiembre, el periodo restante logró poco más del 50%; en 2000, repiten con 52% al igual que en ocasiones pasadas, el periodo anual y el mayo-septiembre, el octubre-abril alcanzó un 50%; finalmente, para 2004, los resultados para todos los periodos en consideración fueron de 51%.

## DISCUSIONES

### **Volúmenes potenciales para almacenamiento de recursos hídricos (PVC, PSGC Y PSGJ) vs espacio territorial**

Las estadísticas significativa y representativa del sistema-cuenca y de sus unidades acuíferas que lo componen, indican que siendo el volumen máximo de almacenamiento 54 000 Mm<sup>3</sup>, es aportado individualmente por cada una de sus unidades de manera que el 66% proviene del PVC, el 25% del PSGJ y el 9% del PSGC. Sin embargo, al hablar del volumen mínimo, es decir de un volumen de 35000 Mm<sup>3</sup>, la aportación que predomina es la hecha por el PVC con un 97%, mientras que los paquetes sedimentarios de Juchipila y Calvillo aportan 2% y 1%, respectivamente. En ambos casos, la aportación del PVC es la más importante debido a que su extensión territorial en afloramiento es del 78%, mientras que los paquetes sedimentarios de Juchipila y Calvillo, representan un 18% y 4%, respectivamente. Es importante mencionar que el PVC, está contemplado en la extensión total de la cuenca.

### **Distribución espacial de infiltración potencial versus distribución espacial precipitación**

Las distintas distribuciones espaciales presentadas por los fenómenos de infiltración potencial y precipitación dentro de las zonas de análisis pueden hablar de una correspondencia directa, es decir, entre estos fenómenos y sus áreas de ocurrencia común. Este aspecto dio positivo a nivel cuenca, para los tres años considerados, siendo las regiones de mayor ocurrencia para ambos fenómenos las comprendidas entre los paralelos 22° 0' y 22° 15', 21° 15' y 21° 30', y finalmente 21° 0' y 21° 15'; que corresponden a la región norte, centro-sur y sur. Lo ocurrido en el PSGC, indica que las regiones centro y sur son las que presentan esta característica de

correspondencia, ubicadas dentro de los paralelos 21° 45' y 21° 52' 30", 21° 37' 30" y 21° 45', respectivamente. Para el caso del PSGJ, la región sur, es decir, la localizada dentro de los paralelos 21° 15' y 21° 30', es la que cumple con esta característica.

Es de importancia mencionar que, teniendo en cuenta los dos periodos de tiempo considerados y las distribuciones espaciales de ambos fenómenos, existen algunas regiones constantes en aparición, tal es el caso de la región sur de la cuenca, la cual expone una constancia en aparición como zona de correspondencia directa entre los fenómenos en el periodo mayo-septiembre. La situación para el PSGC indica que, para el periodo mayo-septiembre, la región centro presenta esta característica; mientras que en el octubre-abril, es presentada por la región sur. Por otro lado, el PSGJ, asemeja con lo suscitado en la cuenca, ya que su largo es similar.

### **Volúmenes potenciales de almacenamiento vs zonas favorables para precipitación-infiltración potencial**

La coincidencia de las unidades acuíferas con zonas de precipitación-infiltración potencial es un aspecto de suma importancia, en sentido de que tanto es lo que se beneficia el cuerpo acuífero de acuerdo a la distribución de la precipitación y consecuente infiltración. En el caso del PSGJ, en lo particular con este tema, se observó un comportamiento no favorable de coincidencia de factores, debido a que presenta una zona de correspondencia de precipitación-infiltración potencial sobre un área donde el acuífero posee menor profundidad, menor coeficiente de infiltración (debido a suelos arcillosos principalmente), además de localizarse en el límite sur de este paquete sedimentario. La situación para el PSGC, es más favorable, esto por presentar coincidencia de factores en su zona centro principalmente y zona sur. Poseer esta característica en su centro puede indicar una mejor distribución del recurso hacia sus zonas norte y sur. Finalmente, el caso del PVC revela ser medianamente favorable, al presentar coincidencia de factores

en el norte, centro-sur y principalmente sur. Al hablar de ser principalmente la porción sur, también se habla de ser la región de desembocadura de la cuenca.

### **Aprovechamiento: zonas de precipitación e infiltración potencial vs concentración de población**

El aprovechamiento de los recursos hídricos es tema fundamental, el cual está ligado a la coincidencia entre las zonas de correspondencia de la precipitación y la infiltración potencial, y finalmente a las ubicaciones de las concentraciones importantes de población. En tanto a esta temática, a nivel de cuenca, el análisis muestra que no hay congruencia entre los factores, debido a que las concentraciones de población que se beneficiarían de las zonas de correspondencia son mínimas, mientras que la porción con mayor población se beneficia en mucha menor proporción. Las regiones centro-sur y sur de la cuenca reúnen el 20% de la población de la cuenca en tres poblados (Apozol, Juchipila, Moyahua de Estrada), además de ser la más beneficiada en tanto a correspondencia en el periodo mayo-septiembre (el caracterizado por tener la mayor precipitación). Por otro lado, las regiones centro, centro-norte y norte reúnen el 80% restante de la población en cuatro poblados importantes (Jalpa, Huanusco, Tabasco y Calvillo) y carecen de zonas de correspondencia, las cuales a su vez, no son constantes para algún periodo de tiempo en especial. Si tomamos como referencia los cuerpos acuíferos, el PSGC, el cual concentra el 45% de la población de la cuenca, expone una buena relación de estos factores, ya que su zona de correspondencia es la centro en el periodo mayo-septiembre, compartiendo ubicación con la misma, sin embargo, la situación en el periodo complementario no es favorable, debido a que la zona de mejor correspondencia está en la porción sur de este cuerpo; el PSGJ, muestra una relación de parámetros no favorable, ya que su zona de mejor correspondencia es la sur en el periodo mayo-septiembre, la cual sólo posee el 35% de la población, el restante 65% de la población se distribuye en zonas sin correspondencia estable.

## Contrastes entre los resultados de infiltración versus precipitación

Al observar la Tabla 3.15, no se puede evitar notar la repetición de valores en la relación de infiltración potencial-precipitación de las diferentes unidades acuíferas. Este comportamiento de la estadística indica que independientemente de la distribución espacial de los fenómenos, se sigue presentando la misma relación entre los volúmenes de infiltración potencial y de precipitación. Por lo tanto, denominaremos *coeficiente de potencial volumétrico de infiltración ( $k_{PVI}$ )* al patrón numérico repetitivo que implica, por un lado, una independencia entre las configuraciones de la distribución espacial de los fenómenos, y por otro, una relación porcentual constante entre los volúmenes de infiltración potencial y de precipitación de determinada zona.

El coeficiente o índice de potencial volumétrico de infiltración puede analizarse a distintas escalas, de esta manera podemos obtener una mejor apreciación del funcionamiento del área de estudio, ya que los datos nos lo permitieron:

- Escala anual: La cuenca mostró tener un coeficiente de 0.54, mientras que sus unidades acuíferas, es decir, el PSGC, el PSGJ y PVC obtuvieron 0.52, 0.51 y 0.55, respectivamente.
- Escala a base de temporadas: Los resultados recopilados sugieren que la temporada mayo-septiembre presenta un coeficiente estable y similar al anual. En diferencia, el periodo octubre-abril, muestra un coeficiente que tiene ligeras variaciones:

$$\text{Cuenca: } 0.53 < k_{PVI} < 0.54$$

$$\text{PSGC: } 0.50 < k_{PVI} < 0.54$$

$$\text{PSGJ: } 0.50 < k_{PVI} < 0.52$$

$$\text{PVC: } 0.53 < k_{PVI} < 0.55$$

## CONCLUSIONES

- La cuenca considerada en este estudio cuenta con un volumen potencial de almacenamiento estimado de entre 35 mil Mm<sup>3</sup> a 54 mil Mm<sup>3</sup>.
- El volumen estimado de infiltración potencial de la cuenca es de 1508 Mm<sup>3</sup> a 2721 Mm<sup>3</sup>.
- El PSGC cuenta con un volumen potencial de almacenamiento estimado de 240 Mm<sup>3</sup> a 4 800 Mm<sup>3</sup>, aportando de un 1% a 9% del estimado que posee la cuenca.
- El volumen estimado de infiltración potencial del PSGC es de 62 Mm<sup>3</sup> a 99 Mm<sup>3</sup>, con respecto a la cuenca, estos representan del 3 a 5% del volumen total, recopilando de un 80 a 90% en el periodo mayo-septiembre y de un 20 a 10% en el octubre-abril.
- Se estimó para el PSGJ un volumen potencial de almacenamiento de 680 Mm<sup>3</sup> a 13 600 Mm<sup>3</sup>, aportando de un 2% a 25% del estimado que posee la cuenca.
- El volumen estimado de infiltración potencial del PSGJ es de 268 Mm<sup>3</sup> a 467 Mm<sup>3</sup>, con respecto a la cuenca, estos representan del 15 a 18%, recopilando de un 85 a 90% en el periodo mayo-septiembre y de un 10 a 15% en el octubre-abril.
- El PVC cuenta con un volumen potencial de almacenamiento estimado de 34 000 Mm<sup>3</sup> a 35 600 Mm<sup>3</sup>, aportando de un 66% a 97% del estimado que posee la cuenca.

- El volumen estimado de infiltración potencial es de 1178 Mm<sup>3</sup> a 2155 Mm<sup>3</sup>, con respecto a la cuenca, estos representan del 78 a 80%, recopilando de un 85 a 88% en el periodo mayo-septiembre y de un 12 a 15% en el octubre-abril.
- En general, los valores de  $K_{PVI}$  tiene poca variación en las unidades acuíferas de la zona.
- La metodología propuesta para obtener el volumen potencial de almacenamiento de una unidad acuífera es complementaria a la metodología para obtener el volumen de infiltración potencial de la misma.
- La metodología propuesta permite obtener una primera aproximación del volumen potencial de almacenamiento de las unidades acuíferas, cuya principal importancia yace en el manejo integral y la elaboración de medidas de control de los recursos hídricos de una región.

## SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS

- Alimentar la metodología propuesta cada vez con una mayor cantidad de información en materia de espesores, esto con la finalidad de obtener una mejor aproximación de la geometría y capacidad que el cuerpo en estudio posee.
- Realizar la mayor cantidad de pruebas de campo para validar la metodología propuesta.
- Se recomienda un mayor detalle estructural de las áreas de estudio con el propósito de una mejor caracterización hidráulica de las estructuras.
- Se recomienda normalizar los coeficientes que intervienen en ambas metodologías, esto con el objetivo de obtener mapas que muestren las zonas favorables derivadas de las correlaciones entre precipitación, infiltración potencial y distribución poblacional.
- Se recomienda la correspondiente calibración y validación de ambas metodologías.

## BIBLIOGRAFÍA

Aguirre Díaz Gerardo J., Labarthe Hernández Guillermo, Tristán González Margarito, Nieto Obregón Jorge y Gutiérrez Palomares Isaac. 2008. **The Ignimbrite Flare Up and graben calderas of the Sierra Madre Occidental, México.** Developments in vulcanology, vol. 10 pp. 143-180.

Aguirre Díaz Gerardo J. y Labarthe Hernández Guillermo. 2003. **Fissure ignimbrites: fissure-source origin for voluminous ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and its relationship with Basin and Range faulting.** Geology, vol. 31, no. 9 pp. 773-776.

Cañada Torrecilla, R., Vidal Domínguez, M.J. y Moreno Jiménez, A. 2010. **Interpolación espacial y visualización cartográfica para el análisis de la justicia ambiental: ensayo metodológico sobre la contaminación por partículas atmosféricas en Madrid.** En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 691-715.

Comisión Nacional de la Biodiversidad (CONABIO):

- Archivo Shape de la **“División Política Mexicana”** escala 1:1,000,000. Sitio: [http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/destdv1gw.xml?\\_httpcache=yes&\\_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc\\_html.xsl&\\_indent=no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/destdv1gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no). Consultado en la fecha: 2 de marzo de 2015.
- Archivo Shape de **“Climas de México”** escala 1:1,000,000. Sitio: [http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/clima1mgw.xml?\\_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc\\_html.xsl&\\_indent=no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/clima1mgw.xml?_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no). Consultado en la fecha: 2 de marzo de 2015.
- Archivo Shape de las **“Regiones Hidrológicas Administrativas”** escala 1:250,000. Sitio: [http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/rha250kgw.xml?\\_xsl=/](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/rha250kgw.xml?_xsl=/)

db/metadata/xsl/fgdc\_html.xsl&\_indent=no. Consultado en la fecha: 2 de marzo de 2015.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2009a. **Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea: Acuífero (3209) Jalpa-Juchipila Estado de Zacatecas.** Diario Oficial de la Federación.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2009b. **Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea: Acuífero (0105) Valle de Calvillo Estado de Aguascalientes.** Diario Oficial de la Federación.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2015a. **Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea: Acuífero (3209) Jalpa-Juchipila Estado de Zacatecas.** Diario Oficial de la Federación.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2015b. **Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea: Acuífero (0105) Valle de Calvillo Estado de Aguascalientes.** Diario Oficial de la Federación.

Córdoba Diego A. 1988. **Estratigrafía de las rocas volcánicas de la región entre Sierra de Gamón y laguna de Santiaguillo, estado de Durango.** Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología. Revista vol. 7, no. 2, pp. 136-147.

Ferrari Luca, Valencia Moreno Martín y Bryan Scott. 2005. **Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la Margen Occidental de Norteamérica.** Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen Conmemorativo del Centenario. Temas selectos de la Geología Mexicana, Tomo LVII, no. 3, pp. 343-378.

GRASS Development Team, 2012. **Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 6.4.2.** Open Source Geospatial Foundation. <http://grass.osgeo.org>

Inkscape Development Team 2015. **Inkscape version 0.48.5**. Open Source Vector Graphics Editor. <https://inkscape.org/es/>.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 1993. **Estudio hidrológico del estado de Aguascalientes**.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2007. **Principales cultivos anuales y perennes en Aguascalientes**. Censo Agropecuario 2007.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2010. **Estadísticas del censo de población y de vivienda 2010 por entidad federativa:**

- Aguascalientes: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/ags/poblacion/default.aspx?tema=me&e=01>
- Zacatecas: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/zac/poblacion/default.aspx?tema=me&e=32>

Consultados: 25 de enero de 2016.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2015a. **Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0):**

- Ráster del Estado de Aguascalientes de resolución a 0.5 segundos por pixel
- Ráster del Estado de Jalisco de resolución a 0.5 segundos por pixel
- Ráster del Estado de Zacatecas de resolución a 0.5 segundos por pixel

Sitio: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx>. Consultado en la fecha: 12 de marzo de 2015

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2015b. **Bibliotecas de información:**

- Archivo Shape de la Carta Geológica F13-9 “**Aguascalientes**” escala 1:250,000.

Sitio: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825674885>. Consultado en la fecha: 2 de marzo de 2015.

- Archivo Shape de la Carta Geológica F13-12 "**Guadalajara**" escala 1:250,000. Sitio: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=70282567482>  
3. Consultado en la fecha: 2 de marzo de 2015.
- Archivo Shape de la Carta Geológica F13-6 "**Zacatecas**" escala 1:250,000. Sitio: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=70282567486>  
1. Consultado en la fecha: 2 de marzo de 2015.
- Archivo Shape de la Carta de Uso de Suelo y Vegetación F13-12 "**Guadalajara**" a escala 1:250 000. Sitio: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=70282557023>  
1. Consultado: 24 de octubre de 2015.
- Archivo Shape de la Carta de Uso de Suelo y Vegetación F13-9 "**Aguascalientes**" a escala 1:250 000. Sitio: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=70282557014>  
9. Consultado: 24 de octubre de 2015.
- Archivo Shape de la Carta de Uso de Suelo y Vegetación F13-6 "**Zacatecas**" a escala 1:250 000. Sitio: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=70282557000>  
2. Consultado: 24 de octubre de 2015.
- Archivo Shape de la Carta de Tipo de Suelo F13-12 "**Guadalajara**" a escala 1:250 000. Sitio: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=70282529567>  
7. Consultado: 24 de octubre de 2015.
- Archivo Shape de la Carta de Tipo de Suelo F13-9 "**Aguascalientes**" a escala 1:250 000. Sitio: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=70282523560>  
4. Consultado: 24 de octubre de 2015.
- Archivo Shape de la Carta de Tipo de Suelo F13-6 "**Zacatecas**" a escala 1:250 000. Sitio:

<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=70282523557>

4. Consultado: 24 de octubre de 2015.

Nieto Samaniego Ángel Francisco, Ferrari Luca, Alaniz Álvarez Susana Alicia y Labarthe Hernández Guillermo. 1999. **Variation of cenozoic extension and vulcanism across the southern Sierra Madre Occidental volcanic province, Mexico.** Geological Society of America Bulletin , vol. 111, no. 3, pp. 347-363.

Méndez Montealvo Héctor Manuel. 2016. **Utilización de percepción remota y sistemas de información geográfica como herramienta de apoyo para obtener la vulnerabilidad del acuífero de Calvillo, Aguascalientes.** UNAM Tesis de maestría. pp 127

QGIS Development Team, 2015a. **Quantum GIS Geographic Information System version 2.6.1 “Brighton”.** Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.

QGIS Development Team, 2015b. **Quantum GIS Geographic Information System version 2.6.1 “Brighton”.** Open Source Geospatial Foundation Project. [http://docs.qgis.org/2.6/es/docs/gentle\\_gis\\_introduction/spatial\\_interpolation.html?highlight=distancia%20inversa%20ponderada](http://docs.qgis.org/2.6/es/docs/gentle_gis_introduction/spatial_interpolation.html?highlight=distancia%20inversa%20ponderada). Consultado en la fecha 2 de noviembre de 2015.

Sanders, L. 1998. **A Manual of Field Hydrogeology.** Prentice Hall, pp. 381

Schosinsky Gunther y Losilla Marcelino. 2000. **Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual.** Revista Geológica de América Central no. 23, pp. 43-55.

Webber Karen L., Fernández Louis A. y Simmons Wm. B. 1994. **Geochemistry and mineralogy of the eocene-oligocene volcanic sequence, southern Sierra Madre Occidental, Juchipila, Zacatecas, Mexico.** Geofísica Internacional, vol. 33, no. 1, pp.77-89.