



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

POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

**ESTUDIO DE LA RECARGA HÍDRICA EN EL COMPLEJO
VOLCÁNICO DE LA SIERRA DE SAN MIGUELITO
(CVSSM), MEDIANTE TÉCNICAS ESTADÍSTICAS
MULTIVARIADAS**

Tesis que presenta
José Luis Uc Castillo

Para obtener el grado de
Maestro en Geociencias Aplicadas

Directora de la Tesis:
Dra. Ana Elizabeth Marín Celestino

San Luis Potosí, S.L.P., Octubre de 2020



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis “**Estudio de la recarga hídrica en el Complejo Volcánico de la Sierra de San Miguelito (CVSSM), mediante técnicas estadísticas multivariadas**” presentada para obtener el Grado de Maestro en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **José Luis Uc Castillo** y aprobada el **07 de Octubre de 2020** 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.

Dra. Ana Elizabeth Marín Celestino
Directora de la tesis

Dr. José Alfredo Ramos Leal
Miembro del Comité Tutorial

Dr. Ulises Rodríguez Robles
Miembro del Comité Tutorial

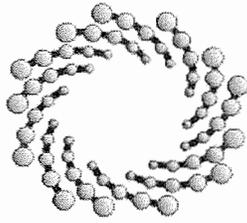
Dr. Adrián Cervantes Martínez
Miembro del Comité Tutorial



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 de la Dra. Ana Elizabeth Marín Celestino.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (No. De **930739**) 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 063 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 7 días del mes de octubre del año 2020, se reunió a las 12:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

Dr. José Alfredo Ramos Leal	Presidente	IPICYT
Dra. Ana Elizabeth Marín Celestino	Secretaria	IPICYT
Dr. Omar Delgado Rodríguez	Sinodal	IPICYT

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

MAESTRO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

sustentó el C.

José Luis Uc Castillo

sobre la Tesis intitulada:

Estudio de la recarga hídrica en el Complejo Volcánico de la Sierra de San Miguelito (CVSSM), mediante Técnicas Estadísticas Multivariadas

que se desarrolló bajo la dirección de

Dra. Ana Elizabeth Marín Celestino

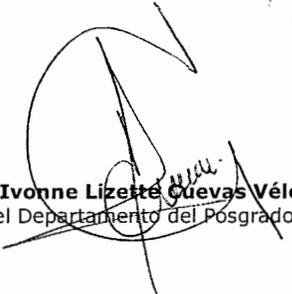
El Jurado, después de deliberar, determinó

APROBARLO

Dándose por terminado el acto a las 13:40 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 7 días del mes de octubre de 2020.


Dr. Marcial Bonilla Marín
Secretario Académico


Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez
Jefa del Departamento del Posgrado



Dedicatorias

A mis padres, Mirle Librada Castillo Baeza y Luis Alberto Uc Maza, por acompañarme y brindarme su apoyo en estos dos años que estuve fuera de casa. Este trabajo fue realizado con mucho empeño y amor, siendo el fruto de todo sus esfuerzos y sacrificios.

Agradecimientos

Primeramente, agradezco a mis padres por acompañarme a lo largo de este camino. Por brindarme su amor, apoyo moral y económico en este desafío que decidí realizar. Gracias por brindarme una educación y por impulsarme día a día a superarme y crecer tanto personal como profesionalmente.

Al IPICYT, especialmente a la División de Geociencias Aplicadas por permitirme formar parte de su posgrado y a CONACYT por la beca otorgada durante este tiempo para poder concluir mis estudios de maestría.

Agradezco a la Dra. Ana Elizabeth Marín Celestino, porque a pesar del tiempo restante de maestría confió en mi y me brindó la oportunidad de llevar a cabo este trabajo. Gracias por invertir su valioso tiempo, por asesorarme y resolver todas mis dudas. Me llevo un enorme aprendizaje de usted.

Al Dr. Ulises Rodríguez Robles, por su disposición y contribuciones para la realización de este trabajo.

A los Dres. José Alfredo Ramos Leal y Adrián Cervantes Martínez, por sus observaciones y recomendaciones brindadas para el fortalecimiento de este trabajo de tesis.

A ti, Esme, por el amor y apoyo incondicional que me has brindado, por estar ahí cuando lo necesité y por acompañarme en esta etapa de mi vida, se que no ha sido algo sencillo para los dos, pero esta experiencia nos ayudó a fortalecernos más. Al final podemos decir orgullosos que lo conseguimos ante todo pronóstico.

A mis compañeros de Oozma Kappa, gracias por la compañía y los momentos divertidos, me llevo un grato aprendizaje de cada uno de ustedes. Así mismo, a Melendez y Marla, por el apoyo y la compañía brindada. *Les deseo lo mejor.*

TABLA DE CONTENIDO

Constancia de aprobación de la tesis	II
Créditos Institucionales	III
Dedicatorias	V
Agradecimientos.....	VI
Lista de tablas.....	X
Lista de figuras	XI
Abreviaturas.....	XII
Glosario	XIII
Resumen.....	XV
Abstract	XVII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 JUSTIFICACIÓN	6
3 OBJETIVOS	10
3.1 Objetivo general	10
3.2 Objetivos específicos	10
4 HIPÓTESIS	10
5 MARCO FÍSICO	11
5.1 Localización de la zona de estudio	11
5.2 Fisiografía	12
5.3 Geología.....	12
Geología Regional.....	12
Geología Local	14
5.4 Hidrología.....	20
5.5 Clima.....	22
5.6 Uso de suelo y tipo de vegetación	22
5.7 Edafología.....	23
6 MARCO TEÓRICO.....	23
6.1 Ciclo hidrológico	24
6.2 Recarga hídrica	26
Zonas de recarga hídrica.....	27
Identificación y delimitación de las zonas de recarga hídrica.....	27
Caracterización de las zonas de recarga hídrica	29

Clasificación de las zonas de recarga hídrica	30
Factores que influyen en la recarga hídrica	32
6.3 Aspectos hidrogeológicos del Valle de San Luis Potosí (VSLP).....	40
6.4 Técnicas Estadísticas Multivariadas	44
Análisis de Correlaciones	46
Análisis de Clúster (CA)	47
Análisis de Componentes Principales (PCA)	50
6.5 Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE).....	51
Conductividad Eléctrica	52
Conductividad Hidráulica.....	53
7 METODOLOGÍA	56
7.1 Revisión de literatura.....	57
Selección de variables.....	57
Obtención de datos crudos.....	57
Pruebas de Conductividad Hidráulica	58
7.2 Tratamiento de datos crudos	58
Uso de suelo y tipo de vegetación.....	58
Tipo de suelo	58
Geología	58
Cálculo de altitud	58
Cálculo de pendiente.....	59
Cálculo de precipitación	59
Cálculo de Evapotranspiración Potencial	60
Coeficiente de escurrimiento	61
Cálculo de humedad relativa	62
Cálculo de temperatura	62
Identificación de puntos de estudio	63
Determinación de la conductividad hidráulica (K)	65
7.3 Análisis Estadístico Multivariado	67
Pretratamiento de la base de datos.....	67
Análisis de Correlación.....	70
Análisis de Clúster.....	70
Análisis de Componentes Principales	71
7.4 Análisis de Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE).....	72
TRE en la Sierra de San Miguelito	73
TRE en Mexquitic de Carmona, S.L.P.....	75
8 RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	76
8.1 Conductividad hidráulica (K)	76
8.2 Análisis Estadístico Multivariado	78
Pretratamiento de la base de datos.....	78
Análisis de Correlación.....	80
Análisis de Clúster (CA)	87

Análisis de Componentes Principales (PCA)	92
8.3 Análisis de Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE).....	95
TRE en la Sierra de San Miguelito	96
TRE y vegetación	100
TRE en Mexquitic	104
9 CONCLUSIONES.....	108
10 PERTINENCIA SOCIOAMBIENTAL DESDE LA INVESTIGACIÓN	110
11 RECOMENDACIONES.....	112
12 REFERENCIAS	113
13 ANEXOS.....	129
13.1 Anexos de figuras	129
13.2 Anexos de tablas.....	149

Lista de tablas

Tabla 1. Tiempo promedio de residencia del agua en los distintos reservorios	24
Tabla 2. Variables empleadas para la caracterización de zonas de recarga	30
Tabla 3. Volumen de extracción de agua subterránea en el VSLP	43
Tabla 4. Variables seleccionadas para este estudio	57
Tabla 5. Coeficientes de escurrimiento de Prevert.....	61
Tabla 6. Coeficientes de escorrentía de Chow	62
Tabla 7. Descripción de los perfiles geoelectricos realizados	73
Tabla 8. Descripción de los perfiles geoelectricos realizados	75
Tabla 9. Resultados de la prueba Shapiro-Wilk	78
Tabla 10. Resultados de la prueba KMO.....	79
Tabla 11. Matriz de correlación de Spearman para las variables de estudio	86
Tabla 12. Estadísticas de los tres clústers encontrados en el análisis de agrupamiento de K-medias.....	88
Tabla 13. Resumen de las cargas del Análisis de Componentes Principales (PCA)	92

Lista de figuras

Figura 1. Distribución del agua en la Tierra.....	1
Figura 2. Condición de los acuíferos de México.....	2
Figura 3. Regionalización del Estado de San Luis Potosí.....	3
Figura 4. Localización del área de estudio en el CVSSM.....	11
Figura 5. Geología regional del VSLP.....	13
Figura 6. Estratigrafía del VSLP.....	14
Figura 7. Geología del CVSSM.....	19
Figura 8. Ciclo hidrológico.....	25
Figura 9. Componentes del sistema hidrológico.....	26
Figura 10. Pasos para la identificación y delimitación de zonas de recarga hídrica.	28
Figura 11. Regiones Hidrológico Administrativas de México.....	32
Figura 12. Precipitación promedio anual por RHA en México.....	33
Figura 13. Evapotranspiración Potencial en México para el año 2011.....	34
Figura 14. Regimen de flujo subterráneo y tiempos de residencia típicos de unidades hidrogeológicas importantes en regiones semiáridas.....	39
Figura 15. Valle de San Luis Potosí.....	40
Figura 16. Conductividad eléctrica y resistividad de rocas comunes.....	53
Figura 17. Esquema de la Ley de Darcy.....	54
Figura 18. Conductividad hidráulica de rocas y materiales.....	54
Figura 19. Esquema metodológico del estudio.....	56
Figura 20. Localización de Puntos de Referencia Climáticos.....	59
Figura 21. Localización de puntos en el área de estudio.....	64
Figura 22. Localización de TRE en la SSM.....	74
Figura 23. Localización de las TRE en Mexquitic de Carmona.....	75
Figura 24. Distribución de la conductividad hidráulica dentro del área de estudio.....	76
Figura 25. Distribución espacial de los clústers.....	87
Figura 26. Gráfico del Análisis de Componentes Principales.....	95
Figura 27. Relación entre la conductividad hidráulica y la resistividad eléctrica en la TRE SM.....	98
Figura 28. Imágenes de conductividad hidráulica calculada a partir de TRE SM.....	99
Figura 29. Relación entre conductividad hidráulica y resistividad eléctrica en cada bosque.....	101
Figura 30. Características de la vegetación en el área de estudio.....	102
Figura 31. Imágenes de conductividad hidráulica calculada a partir de TRE de bosques.....	103
Figura 32. Representación gráfica del flujo subhipodérmico.....	104
Figura 33. Relación entre conductividad hidráulica y resistividad eléctrica de las TRE Mexquitic.....	105
Figura 34. Imágenes de conductividad hidráulica calculada a partir de TRE A-A' y B-B' en Mexquitic.....	107

Abreviaturas

CA	Análisis de Clúster
CFRS	Climate Forecast System Reanalysis
CVSSM	Complejo Volcánico de la Sierra de San Miguelito
HCA	Hierarchical Cluster Analysis
hm³	Hectómetros cúbicos
IDW	Interpolación Distancia Inversa Ponderada
KMO	Kaiser Meyer Olkin
m/d	Metro por día
m/s	Metro sobre segundo
Ma	Millones de años
mm	Milímetros
Mm³	Millones de metros cúbicos
msnm	Metros Sobre el Nivel del Mar
NE	Noreste
NO	Noroeste
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PCA	Análisis de Componentes Principales
RAN	Registro Agrario Nacional
RH	Región Hidrológica
RHA	Región Hidrológico Administrativa
SA	Sierra de Álvarez
SE	Sureste
SHP	Shapefile
SLP	San Luis Potosí
SO	Suroeste
SSM	Sierra de San Miguelito
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
TRE	Tomografía de Resistividad Eléctrica
VSLP	Valle de San Luis Potosí

Glosario

Advección. Se define como el transporte horizontal de una sustancia contaminante por el agua.

Conductividad hidráulica. Representa la mayor o menor facilidad con la que el medio deja pasar el agua a través de él por unidad de área transversal a la dirección del flujo.

Eigenvalues. Son un conjunto especial de escalares asociados con un sistema lineal de ecuaciones (es decir, una ecuación matricial). También se conocen como valores característicos o valores propios.

Emplazamiento. Término que describe el desarrollo de una masa de roca eruptiva dentro de otra roca preexistente sin existir ninguna relación entre ellas.

Eutaxítica. [*Textura*] Textura de las rocas extrusivas bandeadas causada por la alternancia de las capas de diferente estructura, composición y color.

Flujo piroclástico. Se denomina así a una mezcla de gases volcánicos calientes, materiales sólidos calientes y aire atrapado, que se mueve a nivel del suelo y resulta de ciertos tipos de erupciones volcánicas.

Flysch. Son facies rocosas de origen sedimentario compuestas por alternancia rítmica de capas de rocas duras (calizas, pizarras o areniscas) intercaladas con otras más blandas (margas y arcillas), las cuales son erosionadas con mayor facilidad.

Infiltración. Es el ingreso vertical descendente del agua de lluvia a través de la superficie de un suelo no saturado con agua.

Lítico. Pertenece o relativo a la roca.

Matriz. Masa de minerales finos, dentro de la cual sobresalen minerales desarrollados.

Microporfirítica. [*Textura*] Textura porfirítica reconocible solo bajo el microscopio.

Mioceno. Período geológico del Cenozoico comprendido entre el Oligoceno infrayacente y el Plioceno suprayacente. Tuvo una duración de 12 millones de años.

Oligoceno. Período geológico del Cenozoico o Terciario, comprendido entre el Eoceno infrayacente y el Mioceno suprayacente. Su duración fue de 7 millones de años.

Plagioclasa. Son un conjunto de minerales que comprenden la serie albita-anortita, sección triclínica del grupo de los feldespatos, perteneciente al grupo de los tectosilicatos.

Pómez. Roca volcánica que se encuentra llena de vacuolas o poros, tornándose por lo tanto muy leve, su densidad es de 0.7 a 1.1. Por lo tanto, flota la mayoría de las veces en el agua. Se le conoce también como pumita.

Porfírica. [*Textura*] Denominación usada en geología para las rocas ígneas con una diferencia distintiva en el tamaño de los cristales que las conforman.

Recarga hídrica. Se define como el proceso por el cual se incorpora agua de forma natural a un acuífero. La principal recarga al acuífero es por la infiltración de agua de lluvia, de corrientes superficiales como ríos, lagos, manantiales, etc., o de unidades hidrogeológicas adyacentes.

Resistividad eléctrica. Es una propiedad específica de la materia que mide la dificultad que presenta un medio para conducir la corriente eléctrica. Entre mayor sea la resistividad, menor será la capacidad para conducir la corriente eléctrica.

Sobreyaciendo. Material (estrato o roca) que se encuentra sobre de otro.

Subyaciendo. Material (estrato o roca) sobre el cual reposa otro material; es decir, se encuentra debajo.

Resumen

Estudio de la recarga hídrica en el Complejo Volcánico de la Sierra de San Miguelito (CVSSM), mediante Técnicas Estadísticas Multivariadas

Las zonas de recarga hídrica son fuentes principales de agua dulce y juegan un papel importante en el ciclo hidrológico, permitiendo la conservación, la preservación, renovación y el aprovechamiento del agua. El CVSSM ha sido considerado como zona de recarga hacia acuífero profundo en el Valle de San Luis Potosí; sin embargo, actualmente no existen estudios suficientes y robustos que lo confirmen. El objetivo del trabajo fue determinar si el CVSSM funciona o no como una zona de recarga hídrica, aplicando Técnicas Estadísticas Multivariadas: análisis de correlación, análisis de clúster (AC) y análisis de componentes principales (ACP). Se integró una matriz de datos con 66 puntos de estudio y 12 variables (altitud, pendiente, temperatura, tipo de suelo, tipo de vegetación, precipitación, geología, humedad relativa, ETP, uso de suelo, coeficiente de escurrimiento y conductividad hidráulica). Las variables fueron determinadas en cada punto de estudio a través de cálculos, estimaciones y superposición de capas en un SIG. El análisis de correlación mostró altas correlaciones tanto positivas como negativas entre las variables climáticas: ETP, temperatura, humedad y precipitación, mientras que la geología fue la variable no climática que más se correlacionó con otras, resaltando su importancia en el área de estudio. El CA por *K-medias* clasificó los puntos de estudio en tres grupos, donde el clúster 2 presentó un potencial de recarga debido a la composición geológica (aluvión) y al uso de suelo (agrícola); sin embargo, factores como la alta ETP, temperatura y baja humedad están limitando este hecho, mientras que en el clúster 1 y 3 la recarga se encuentra limitada por variables como la geología, la altitud y la pendiente, y la infiltración podría verse favorecida por las fallas presentes en el área de estudio. El ACP reveló que variables como la conductividad hidráulica, la precipitación y la humedad pueden favorecer la infiltración, mientras que la recarga se ve limitada por las unidades geológicas presentes en la zona de

estudio, los altos niveles de ETP y de temperatura. Por otro lado, se analizaron y relacionaron Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE), indicando que la combinación de la vegetación y la geología en las partes altas de la SSM juega un papel importante en la infiltración superficial, reafirmando la existencia de un flujo subhipodérmico. Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que dadas las condiciones climáticas y geológicas del CVSSM, este no funcionaría de manera óptima como zona de recarga hacia el acuífero profundo; sin embargo, cumple con otros procesos ecológicos de importancia como la existencia de un flujo subhipodérmico que puede contribuir al llenado de bordos y presas así como al soporte de otros servicios ecosistémicos. Los resultados contribuirán a la óptima protección, conservación y aprovechamiento sostenible del recurso hídrico en el Valle de San Luis Potosí.

PALABRAS CLAVE. AC, ACP, Algoritmo *K-medias*, conductividad hidráulica, CVSSM, infiltración, recarga hídrica, TRE

Abstract

Study of hydric recharge in the Sierra de San Miguelito Volcanic Complex (SSMVC), using Multivariate Statistical Techniques

Water recharge areas are the main sources of fresh water and play an important role in the hydrological cycle, allowing the conservation, preservation, renewal and use of water. The SSMVC has been considered as a recharge zone towards the deep aquifer in San Luis Potosi Valley; however, currently there are not enough and robust studies to confirm it. The aim of this work was to determine if the SSMVC works or not as a water recharge zone, applying Multivariate Statistical Techniques: correlation analysis, cluster analysis (CA) and principal components analysis (PCA). A data matrix was integrated with 66 study points and 12 variables (altitude, slope, temperature, soil type, vegetation type, precipitation, geology, relative humidity, PET, land use, runoff coefficient and hydraulic conductivity). The variables were determined at each study point through calculations, estimates and layer overlap in a GIS. The correlation analysis showed high positive and negative correlations between the climatic variables: PET, temperature, humidity and precipitation, while geology was the non-climatic variable that was most correlated with others, highlighting its importance in the study area. The CA by *K-means* classified the study points in three groups, where cluster 2 presented a recharge potential due to geological composition (alluvium) and land use (agriculture); however, factors such as high PET, temperature and low humidity are limiting this fact, while in cluster 1 and 3 recharge is limited by variables such as geology, altitude and slope, and infiltration could be favored by the faults present in the study area. The PCA revealed that variables such as hydraulic conductivity, precipitation and humidity may favor infiltration, while recharge is limited by the geological units present in the study area, high levels of PET and temperature. On the other hand, Electrical Resistivity Tomography's (ETR) were analyzed and related, indicating that the combination of vegetation and geology in the upper parts of the SSMVC plays an important role in the surface

infiltration, reaffirming the existence of a sub-hypodermical water flow. The results obtained in this study demonstrate that the climatic and geological conditions of the SSMVC do not allow it to function optimally as a recharge zone towards the deep aquifer; however, it complies with other important ecological processes such as the existence of a sub-hypodermical water flow, which can contribute to the filling of embankments and dams as well as the support of other ecosystem services. The results will contribute to the optimal protection, conservation and sustainable use of water resources in the San Luis Potosí Valley.

KEY WORDS. CA, ERT, hydraulic conductivity, hydric recharge, infiltration, *K-means* algorithm, PCA, SSMVC

1 INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital para la vida que presenta diferentes funciones en todos los ecosistemas y es considerado un bien estratégico para el desarrollo económico y social del ser humano, para el abastecimiento y uso del agua potable (Díaz-Pulido *et al.*, 2009).

La mayor parte de la Tierra está formada por agua (97.2%), que se encuentra almacenada en los océanos pero no puede ser aprovechada por ser agua salada. Por otra parte, solo un 2.8% comprende agua dulce, la cual podría ser aprovechada; no obstante, no toda está disponible debido a que se encuentra en regiones polares y en la atmósfera mientras que el agua dulce disponible se almacena en cauces de corrientes, lagos y aguas subterráneas (Tarbuck & Lutgens, 2005). La Figura 1 muestra los porcentajes de distribución del agua en la Tierra.

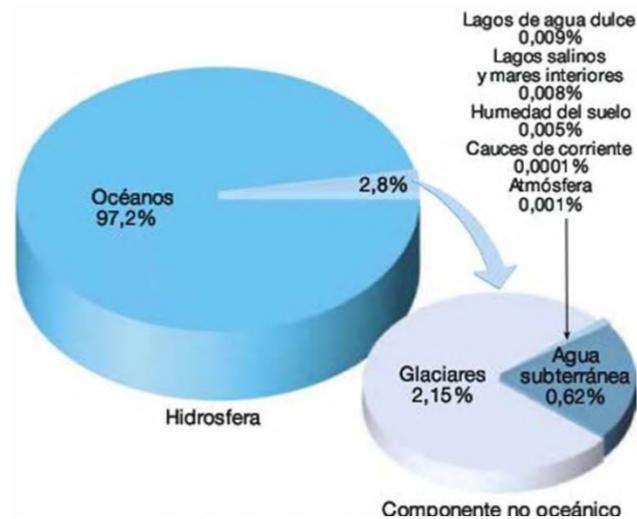


Figura 1. Distribución del agua en la Tierra.

Fuente: Tarbuck & Lutgens, 2005.

La recarga hídrica es un componente importante dentro del ciclo hidrológico, y el volumen de agua que se recargará a un acuífero dependerá de la precipitación que se infiltra en los poros del suelo y de las rocas, seguido de la conductividad hidráulica, la composición litológica y estratigráfica del acuífero, el tipo de suelo y

vegetación, y de la evapotranspiración (Chamorro-Castillo, 2016; Chávez-Gómez *et al.*, 2017).

La conductividad hidráulica es un parámetro de gran importancia, que permite estimar el volumen de agua que se está recargando a un acuífero, y se define como la capacidad de infiltración, por medio del transporte de agua en un suelo permeable y es expresada por unidad de velocidad. Es el parámetro más importante del acuífero en lo referente al flujo de fluido en el subsuelo y que permite estimar cuánta agua se está recargando a un acuífero (Peinado-Guevara *et al.*, 2010; Guerrero-Martínez *et al.*, 2018).

Si bien la recarga hídrica es muy variable espacialmente en cada región, la alteración de las condiciones hidrológicas naturales por la sobreexplotación de los acuíferos, en muchos casos ha resultado en la disminución total o parcial de la recarga en muchos acuíferos de México (Figura 2) (Díaz-Pulido *et al.*, 2009; Galindo-Castillo, 2011; CONAGUA, 2018b).



Figura 2. Condición de los acuíferos de México.
Fuente: CONAGUA, 2018c

Con base en la CONAGUA (2018b), la recarga media anual en los acuíferos de México es de 92, 544 hm³/año. La región sureste del país presenta una mayor recarga hídrica (54, 560 hm³/año) a diferencia de la región norte, centro y noreste que juntas recargan un total de 37, 975 hm³/año. Lo anterior se debe principalmente a que dos terceras partes del territorio presentan un clima árido (González-Cervantes *et al.*, 2006).

En el Estado de San Luis Potosí, la recarga en los acuíferos varía según las características climáticas y orográficas de cada una de las zonas en las cuales se divide el Estado: la Huasteca hacia el Golfo de México, la Zona Media, Zona Centro y la del Altiplano al poniente (Figura 3) (IPICYT, 2007; Noyola-Medrano *et al.*, 2009).

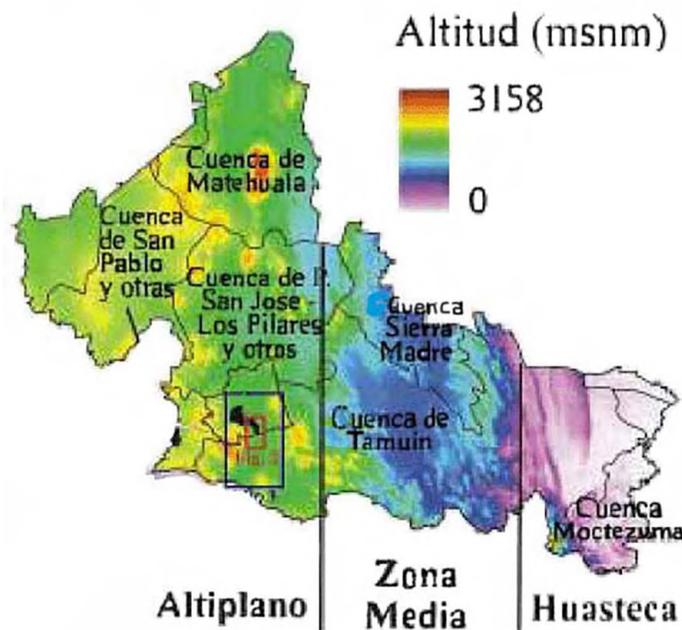


Figura 3. Regionalización del Estado de San Luis Potosí
Fuente: Modificada de Noyola-Medrano *et al.*, 2009

La recarga tiende a ser diferente en cada zona debido a los patrones climáticos de precipitación, temperatura, humedad, viento y presión que presenta cada zona, los cuales se encuentran fuertemente influenciados por la orografía (IPICYT, 2007; Noyola-Medrano *et al.*, 2009).

Primeramente, se tiene un gradiente de humedad que va de la Huasteca (más húmeda por la influencia del Golfo de México) hacia el Altiplano donde hay menos; así mismo, el patrón de precipitación es similar al de la humedad, en la Huasteca se presentan valores de >2000 mm de lluvia acumulada por año mientras que en el Altiplano varía de 350-400 mm (IPICYT, 2007).

Por otra parte, la capacidad de evapotranspiración (2251 mm) excede la precipitación (350-400 mm), que combinado con las altas temperaturas ocasiona una escasez en la disponibilidad del agua, limitando la recarga de los acuíferos en esta zona a diferencia de las demás (IPICYT, 2007; Pineda-Martínez *et al.*, 2007; Hernández-Constantino, 2020).

En el Valle de San Luis Potosí (VSLP), la recarga hídrica ocurre en el acuífero de SLP, específicamente del acuífero somero (colgado), originado por la infiltración de: precipitaciones, aguas residuales de origen urbano e industrial, de retornos de riego y también de las fugas de la red de agua potable (Carrillo-Rivera *et al.*, 1992; Contreras-Servín & Galindo-Mendoza, 2008). Otros autores han reportado que también existe recarga al acuífero profundo y viene de la parte alta y baja de la Sierra de San Miguelito (SSM) y de los límites con la subcuenca Villa de Reyes (Contreras-Servín & Galindo-Mendoza, 2008). Sin embargo, otros estudios han reportado que existe una capa impermeable de arcilla que impide la recarga al acuífero profundo (volcánico fracturado) (Hernández-Constantino, 2020).

En ese sentido, definir y delimitar zonas de recarga hídrica en el CVSSM resulta imprescindible, especialmente porque en el VSLP el 84% del agua utilizada para el abastecimiento de actividades público-urbanas, agrícolas, industriales y mineras, viene del agua subterránea del acuífero profundo (INTERAPAS, 2013).

Por lo antes mencionado y de no haber recarga al acuífero profundo, se estarían alterando las condiciones hidrológicas naturales y sobreexplotando dicho acuífero. Por tal motivo, determinar los factores que favorecen o limitan las zonas de

recarga son de gran utilidad, pues dan mayor certidumbre al desarrollo de planes de manejo del recurso hídrico y sirven como apoyo al diseño de planes para la conservación de áreas prioritarias (Peñuela-Arévalo & Carrillo-Rivera, 2012).

Muchos estudios han reportado que las técnicas estadísticas multivariadas son herramientas robustas para el manejo de los recursos hídricos subterráneos. Estas técnicas han sido aplicadas exitosamente en muchas áreas como biología, química, física, hidrogeología, entre otras, debido a que son una herramienta que permite comprender un gran número de variables (Brown, 1998; Rencher, 2002; Yadav *et al.*, 2014; Huang & Han, 2016).

Dentro de esas técnicas, el uso combinado del Análisis de Componentes Principales (PCA por sus siglas en inglés) y del Análisis Clúster (CA por sus siglas en inglés), han sido ampliamente aplicados para la investigación ambiental y en particular para la evaluación de la contaminación del agua subterránea, siendo herramientas útiles para identificar los factores que afectan la contaminación del agua subterránea y clasificar las muestras de agua y sus fuentes en función de sus características hidroquímicas (Marín-Celestino *et al.*, 2018; Marín-Celestino *et al.*, 2019; Naranjo-Fernández *et al.*, 2020; Oh *et al.*, 2020).

Respecto a la identificación y delimitación de zonas de recarga hídrica, pocos estudios han aplicado las técnicas estadísticas multivariadas. Demlie *et al.* (2007) emplearon un Análisis Jerárquico de Conglomerados (HCA) a un conjunto de datos hidrogeoquímicos con la finalidad de identificar zonas con características similares y con base a su contenido iónico determinar si correspondían a una zona de recarga. Por otra parte, Setiawan *et al.* (2019) examinaron los factores que contribuyen a la infiltración e identificaron aquellas características morfológicas en asociación con la infiltración en un ambiente volcánico cuaternario.

En este estudio se plantea aplicar un PCA y un CA para determinar si el Complejo Volcánico de la Sierra de San Miguelito (CVSSM) funciona como zona de recarga hídrica.

2 JUSTIFICACIÓN

Es bien sabido que el agua subterránea es menos vulnerable a la contaminación que el agua superficial, lo que la ha convertido en un recurso natural muy valioso, y al mismo tiempo un recurso muy explotado. Ante esta situación, para remediar la sobreexplotación y hacer un buen manejo de los recursos hídricos, es necesario tener certeza de la ubicación de zonas de recarga y con ello poder extraer volúmenes de agua subterránea en áreas específicas.

Se ha mencionado dentro de un modelo tradicional al Complejo Volcánico de la Sierra de San Miguelito (CVSSM) como zona de recarga del *acuífero profundo* de la ciudad de San Luis Potosí. Lo anterior debido a la relación suelo-vegetación presente en la zona, ya que en la parte central hay presencia de vegetación boscosa de alta a mediana densidad, generalmente del grupo de encinos así como la presencia de suelos clasificados como Leptosoles lítico-paralíticos, lo cual se asocia a zonas de recarga, aunado a las condiciones mayores de precipitación (500 mm/año) en la parte alta de la sierra (FAO, 2006b; Contreras-Servín & Galindo-Mendoza, 2008; Stevens-Vázquez, 2014).

Así mismo, se han utilizado indicadores superficiales (como suelo, vegetación, elevación topográfica, hidrología superficial y conductividad hidráulica) para la definición de zonas de recarga y descarga en la Meseta Central, se menciona como zona de recarga a la SSM, debido a que presenta características particulares de estas zonas tal como una elevación topográfica alta, suelo ácido y poco desarrollado con poca cantidad de materia orgánica y una vegetación adaptada a un ambiente relativamente seco (Peñuela-Arévalo & Carrillo-Rivera, 2012).

Sin embargo, otros estudios mencionan que dicha área no se encuentra funcionando de manera óptima debido a varios factores.

Primeramente, el comportamiento hidrogeológico de las unidades estratigráficas de la SSM tal como la Ignimbrita Cantera que aflora en la zona SO y la Riolita de San Miguelito que aflora en la zona meridional son de carácter impermeable (Noyola-Medrano *et al.*, 2009). En el caso de las rocas volcánicas fracturadas, estas se encuentran selladas por minerales de origen hidrotermal, lo cual limitaría la recarga hídrica (Ramos-Leal *et al.*, 2007b).

Cabe señalar que como evidencia de que no ha habido recarga en la región de estudio, se determinó el tiempo de residencia del agua, indicando una edad aproximada entre 5300 a 6300 años, demostrando que no existe agua infiltrada recientemente (Cardona *et al.*, 2006), esto indica que la recarga al acuífero profundo ocurrió hace miles de años (López-Álvarez *et al.*, 2013). Por lo tanto, los efectos de la recarga por la precipitación serían evidentes en el futuro (Noyola-Medrano *et al.*, 2009).

Visto desde la presencia de la vegetación, el bosque de Pino y Encino que predomina en el CVSSM crece en un suelo poco profundo con afloramiento rocoso, donde las especies han adaptado su sistema radicular que se desarrolla entre el sustrato rocoso intemperizado (< 30 cm de profundidad) para anclarse y disponer del agua que se almacena y moviliza subhipodérmicamente (Rodríguez-Robles *et al.*, 2015; Rodríguez-Robles *et al.*, 2017).

Otro motivo por el cual se menciona que la recarga hídrica es prácticamente nula es debido a los cambios de uso de suelo. Históricamente las modificaciones del entorno se deben a la actividad minera, agrícola e industrial, ejerciendo una alteración en el sistema hídrico de la ciudad al ocasionar una reducción en los niveles de recarga (Noyola-Medrano *et al.*, 2009; López-Álvarez, 2012).

Aunado a lo anterior, la gran demanda de agua por el acelerado crecimiento urbano en la ciudad (772,604 habitantes para el año 2010) ha sobreexplotado el recurso hídrico, impactando fuertemente la recarga hídrica a tal grado de extraer el doble de agua (150 Mm³) de la que se recarga (75 Mm³), ocasionando el descenso gradual de los niveles piezométricos entre 1 y 4 metros al año (Sharda *et al.*, 2006; Noyola-Medrano *et al.*, 2009; INEGI, 2010; INTERAPAS, 2013).

Por otra parte y como ya mencionó anteriormente, las condiciones climáticas del VSLP limitan la recarga por precipitación, debido a que la precipitación media anual (402.6 mm) es mucho menor que la evapotranspiración potencial anual (2251 mm), esto significa que la mayor parte de la precipitación se pierde por evapotranspiración, lo cual en combinación con una temperatura media anual de 17.5 °C, genera condiciones de aridez (Noyola-Medrano *et al.*, 2009; Hernández-Constantino, 2020).

Actualmente, en el CVSSM no existen estudios suficientes y robustos que confirmen y demuestren si el CVSSM es o no una zona de recarga hídrica.

El desconocimiento de los procesos de infiltración y/o recarga hídrica, así como su delimitación y ubicación en el CVSSM, impiden hacer un buen manejo de los recursos hídricos, ya que pueden presentarse impactos adversos dentro de la dinámica de la recarga hídrica que se verán reflejados en los acuíferos y por consiguiente, en el aprovechamiento de la cantidad y calidad del agua para usos múltiples (Arela-Mayta, 2014; Donis-Caceres, 2015).

En este estudio se plantea determinar si el CVSSM funciona o no como una zona de recarga hídrica, mediante la aplicación de un Análisis Estadístico Multivariado, en el cual se pretende identificar y delimitar los procesos de infiltración y/o recarga hídrica empleando un Análisis de Clúster (K-medias). Este análisis tiene como finalidad encontrar grupos, en donde los puntos de muestreo agrupados en un clúster contengan variables con características similares y que al mismo tiempo se

diferencien de los demás clústers. Mediante un Análisis de Componentes Principales, se pretende establecer que variables determinan los procesos de infiltración y/o recarga hídrica, el cual estará representado con el mayor porcentaje de *eigenvalue* y el número de componentes principales. Así mismo, se plantea identificar correlaciones entre las variables hidrogeológicas en los procesos de infiltración y/o recarga hídrica.

Este será el primer trabajo que emplee técnicas estadísticas multivariadas como K-medias y PCA para la zona de estudio. Los resultados contribuirán a la óptima protección, conservación y aprovechamiento sostenible del recurso hídrico en la ciudad de San Luis Potosí.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Mediante un Análisis de Componentes Principales (PCA) y un Análisis de Clúster (CA), determinar si el Complejo Volcánico de la Sierra de San Miguelito (CVSSM) funciona como zona de recarga hídrica.

3.2 Objetivos específicos

- 1) Caracterizar los procesos de infiltración superficial, subsuperficial y/o recarga hídrica en el CVSSM.
- 2) Ubicar y delimitar los procesos de infiltración superficial, subsuperficial y/o de recarga hídrica en el CVSSM; así como identificar variables con similitudes dentro de un grupo y diferencias entre grupos.
- 3) Establecer las variables que determinan los diferentes procesos de infiltración y/o de recarga hídrica en el CVSSM.
- 4) Analizar y relacionar Tomografías de Resistividad Eléctrica con los procesos de de infiltración y/o de recarga hídrica en el CVSSM.

4 HIPÓTESIS

- 1) El clima semiárido y las características geológicas que presenta el CVSSM no permiten una recarga hídrica.
- 2) Las características hidrogeológicas del suelo rocoso poco profundo y los rasgos de adaptación de la vegetación en el CVSSM, limitan la recarga hídrica.
- 3) Los flujos subhipodérmicos por fisuramiento local originados por exudados de raíces sugieren un proceso de infiltración superficial.

5 MARCO FÍSICO

En esta sección se describirá la localización de la zona de estudio, así como sus características y componentes fisiográficos, geológicos, topográficos, hidrogeológicos, climáticos, de uso de suelo, vegetación y edafológicos.

5.1 Localización de la zona de estudio

El Complejo Volcánico de la Sierra de San Miguelito (CVSSM) se localiza en la parte central de México, hacia el borde occidental del Estado de San Luis Potosí en el Altiplano Potosino entre las coordenadas $101^{\circ} 15' 13''$ y $100^{\circ} 54' 50''$ de Longitud Oeste y $21^{\circ} 47' 56''$ y $22^{\circ} 16' 30''$ de Latitud Norte. El área de estudio tiene una extensión aproximada de 148,353 ha (Figura 4). El rasgo morfológico más importante de la zona de estudio es la SSM, la cual se encuentra limitada por el Graben Villa de Reyes (NE-SO) y es parte del sistema de fallas San Luis-Teprehuanes (NO-SE) (Nieto-Samaniego *et al.*, 1999; Nieto-Samaniego *et al.*, 2005; Gaytan-Martínez *et al.*, 2017).

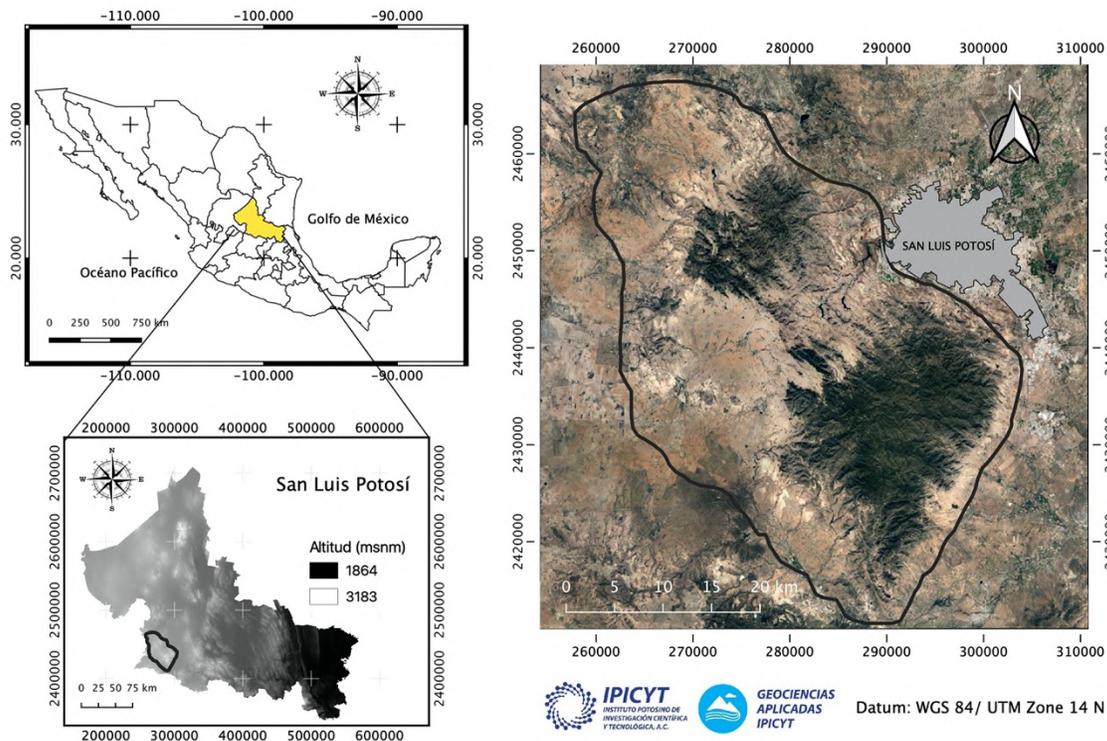


Figura 4. Localización del área de estudio en el CVSSM

5.2 Fisiografía

Fisiográficamente, el CVSSM pertenece a la provincia de la Meseta Central y yace sobre tres sub-provincias fisiográficas: Sierras y Llanuras Potosino-Zacatenacas, Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato y Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005; IPICYT & SEGAM, 2018).

La región montañosa es abrupta e irregular, se caracteriza por presentar pendientes mayores a 30° y una elevación entre 1900 y 2870 msnm (Rodríguez-Robles, 2011; Rodríguez-Robles *et al.*, 2015).

En la SMM los cerros que presentan las mayores altitudes son: Mesa de San José (2700 msnm), Joya de Lira (2650 msnm), Mesa de San Roque (2600 msnm), Cabezón (2500 msnm), El Gallo (2300 msnm) y Cerro Pelón (2150 msnm); debido a lo anterior, la sierra está clasificada como Sierra Alta con Mesetas (IPICYT & SEGAM, 2018).

5.3 Geología

En esta sección se abordará la geología regional del VSLP, tanto a nivel estratigráfico como estructural. Así mismo, se abordará la geología local del área de estudio describiendo las unidades estratigráficas que la componen, así como su geología estructural.

Geología Regional

El VSLP está limitado por dos sierras principales, al poniente la SSM y al oriente por la Sierra de Álvarez (SA) (Noyola-Medrano *et al.*, 2009). La columna estratigráfica del Altiplano Potosino incluye rocas tanto sedimentarias y como volcánicas que van del periodo Cretácico al Reciente. Las rocas sedimentarias del Cretácico se encuentran conformadas por las formaciones Tamabra, Indidura y Cuesta del Cura. Estas unidades se encuentran expuestas en la SA y con algunos

afloramientos en el Valle al sur de la SSM (Tardy *et al.*, 1975; Tardy *et al.*, 1976; López-Doncel, 2003; Ramos-Leal *et al.*, 2007a).

Cubriendo discordantemente a las unidades cretácicas se encuentran rocas volcánicas del Terciario, las cuales se encuentran formadas por derrames de basaltos, latitas e ignimbritas. En algunas zonas se observan intercalaciones de basaltos con sedimentos cuaternarios, ignimbritas, riolíticas y tobas arenosas del Oligoceno Medio y Superior (Figura 5) (López-Álvarez, 2012).

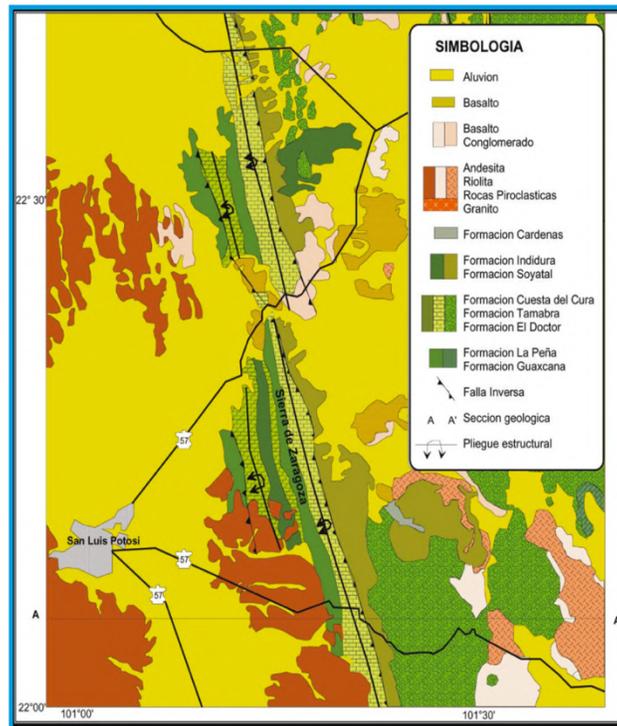


Figura 5. Geología regional del VSLP
Fuente: IPICYT, 2007

La unidad más antigua corresponde a la Formación Indidura del Cretácico Tardío y está formada por calizas arcillosas. Sobre esta unidad yace la Formación Cenicera que va del Paleoceno al Terciario Temprano y se encuentra formada por conglomerados. Cubriendo a la Formación Cenicera, se localiza la Latita Portezuelo del Oligoceno Tardío, constituida por una latita de color gris claro. Hacia la parte occidente del VSLP se encuentra la Formación Panalillo que cubre a la Latita Portezuelo y a la Riolita San Miguelito. La porción central del valle está formado por material aluvial del Cuaternario y presenta intercalaciones de

sedimentos lacustres y conglomerados, además de una cubierta compacta de limos, arcillas y arenas (Figura 6) (IPICYT, 2007; López-Álvarez, 2012).



Figura 6. Estratigrafía del VSLP
Fuente: IPICYT, 2007

Estructuralmente el valle está formado por fallas normales orientadas hacia el Norte, los cuales fueron rellenadas con flujos piroclásticos, flujos de lava y abanicos aluviales distribuidos regionalmente (IPICYT, 2007).

Convergen los sistemas de fallas N-S, NE-SW y NW-SE. El Sistema NE-SW pertenece el graben de Villa de Reyes el cual es influenciado por el sistema NW-SE de la SA. En el caso del sistema N-S, este es menos evidente; sin embargo, se ha reportado que en el subsuelo y en superficie es más evidente al norte de la ciudad de San Luis Potosí (IPICYT, 2007; Ramos-Leal *et al.*, 2007a).

Geología Local

La estratigrafía del CVSSM es de origen volcánico, constituida por una gran cantidad de rocas silíceas del Oligoceno y Mioceno (Figura 7). Su formación viene

de derrames de lava de composición riolítica, los cuales contribuyeron al sellado de las fracturas de roca (Orozco-Esquivel *et al.*, 2002; Tristán-González *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2013).

Las rocas pre-volcánicas del CVSSM son de facies marinas de tipo flysch del Cretácico tardío y pertenecen a la Formación Caracol (López-Loera & Tristán-González, 2013). El CVSSM está constituido por diez unidades geológicas, que se describen a continuación:

Ignimbrita Santa María

Esta unidad geológica cubrió la secuencia sedimentaria anterior al CVSSM en el Oligoceno medio a través de flujos piroclásticos voluminosos (Tristán-González *et al.*, 2009). Aflora en el nor-poniente y su espesor varía entre 60 y 100 metros (López-Loera & Tristán-González, 2013). Aún no se ha determinado su edad aproximada y con base en análisis químicos se encuentra clasificada como riolita (Orozco-Esquivel *et al.*, 2002).

Latita Portezuelo

Se emplazó al inicio de la actividad volcánica, presenta afloramientos en la parte oriental de la SSM, sobreyaciendo a la Ignimbrita Santa María y subyaciendo a la Riolita de San Miguelito, su localidad tipo es el poblado de Portezuelo, S.L.P. (IPICyT & SEGAM, 2018). Su espesor puede alcanzar 600 m y está conformada por lavas de color gris claro a café grisáceo, las cuales formaron cadenas largas de domos exógenos. Su edad determinada es de 31 ± 0.7 Ma y se ha clasificado como una roca de dacita a riolita (López-Loera & Tristán-González, 2013; Gaytan-Martínez *et al.*, 2017; IPICyT & SEGAM, 2018).

Riolita de San Miguelito

Esta unidad se encuentra compuesta por varios pulsos de coladas de lava riolítica fluidal, ocupando el mayor volumen de roca del CVSSM y formando cuatro domos gigantes: Cerros Grande, Del Potosí-Fraile, Sierra de Carranco y Sierra las Mesas. Su espesor es variable y alcanza hasta 800 metros en el centro (López-Loera & Tristán-González, 2013). Es una roca de color gris claro a pardo rojizo, con un contenido de fenocristales de entre 20 y 30%. Su edad estimada es de 30.0 ± 1.5 Ma y ha sido clasificada como riolita (Aguillón-Robles *et al.*, 1994; Orozco-Esquivel *et al.*, 2002; Gaytan-Martínez *et al.*, 2017).

Riodacita Barbechos

Es una secuencia de lavas de composición dacítica asociada a la formación del domo Blanco (Tristán-González *et al.*, 2009). Esta unidad aflora en la porción noroeste de la SSM, se originó por la acumulación de toba de grano fino, de color amarillento, el grueso de la unidad son los derrames de lava que llegan a tener hasta 5 m de espesor. La riodacita es una roca de color gris a café claro, con textura porfirítica que contiene un 30% de fenocristales de 2 a 5 mm (Aguillón-Robles & Aranda-Gómez, 1996; Rodríguez-Ríos *et al.*, 2013). Su edad se sitúa entre la edad de la Riolita de San Miguelito y la de Ignimbrita Cantera y se ha clasificado como una roca de dacita a riolita (Orozco-Esquivel *et al.*, 2002; Gaytan-Martínez *et al.*, 2017).

Ignimbrita Cantera

Esta unidad se encuentra sobre la Riolita de San Miguelito y aflora en la porción oriente y parte baja de la SSM. Es un paquete de cuatro derrames piroclásticos que van desde bien soldados hasta sin soldar y alcanza un espesor de 300 m en el centro (López-Loera & Tristán-González, 2013). Es una roca de color café-rosáceo, de textura porfirítica. Su edad estimada es de 29 ± 1.5 Ma y se

ha clasificado como riolita (Orozco-Esquivel *et al.*, 2002; López-Loera & Tristán-González, 2013; Gaytan-Martínez *et al.*, 2017; IPICYT & SEGAM, 2018).

Riolita El Zapote

Esta unidad esta compuesta por derrames de lava y se encuentra en las partes más elevadas de la SSM, específicamente sobre la Ignimbrita Cantera (López-Loera & Tristán-González, 2013). Su espesor es de unos 130 metros, es una roca de color gris claro de textura porfirítica. Su edad estimada es de 29.2 ± 0.8 Ma y ha sido clasificada como riolita rica en potasio (Orozco-Esquivel *et al.*, 2002; López-Loera & Tristán-González, 2013; Gaytan-Martínez *et al.*, 2017).

Ignimbrita Panalillo (miembro inferior y superior)

Erupciones piroclásticas dieron origen a la Ignimbrita Panalillo, a partir de diques piroclásticos emplazados en fallas normales en la Riolita San Miguelito y la Ignimbrita Cantera (González-Naranjo, 2012). Dicha unidad incluye dos miembros separados por un flujo basáltico: la Ignimbrita Panalillo Inferior y la Ignimbrita Panalillo Superior; así mismo, es posible encontrarla como Riolita Panalillo en otros estudios (Tristán-González *et al.*, 2009; López-Loera & Tristán-González, 2013). La Ignimbrita Panalillo Inferior es una secuencia de flujo de caída, flujos sin soldar y oleadas piroclásticas, estos flujos de ceniza son por lo general abundantes en líticos y pómez, su espesor varía entre 40 y 150 m (López-Loera & Tristán-González, 2013).

El emplazamiento de la Ignimbrita Panalillo Superior ocurrió durante una etapa tardía de volcanismo de carácter orogénico (Tristán-González *et al.*, 2009). Es una roca de color café rojizo, café claro o rosa claro de textura porfirítica, eutaxítica, con un aproximado de 5-8 % de fenocristales de cuarzo > sanidino dentro de una matriz parcialmente desvitrificada y bien soldada, su espesor no es mayor a los 20 m (González-Naranjo *et al.*, 2012; López-Loera & Tristán-González, 2013).

La edad estimada para la Ignimbrita Panalillo Inferior es de 28 Ma, mientras que para la Ignimbrita Panalillo Superior la edad registrada es de 26.8 ± 1.3 Ma, se han clasificado químicamente como riolitas (Orozco-Esquivel et al., 2002; Gaytan-Martínez et al., 2017).

Basalto Cabras

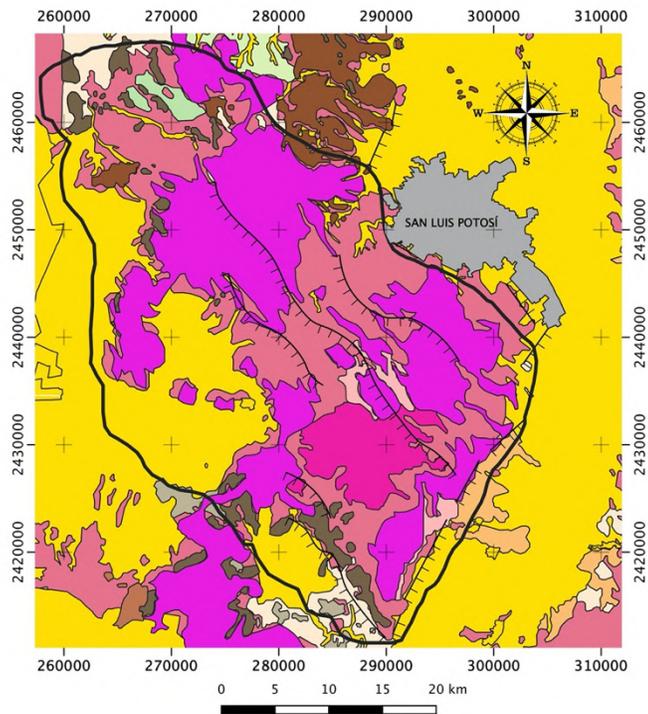
La última actividad volcánica del CVSSM sucedió en el Mioceno con la emisión de lavas, las cuales varían de basálticas (Basalto Cabras) y traquitas (Traquita Los Castillo) (Tristán-González et al., 2009). El Basalto Cabras aflora hacia la parte norte occidental de la fosa de Bledos y sobreyace a la Riolita Panalillo Superior, presenta un espesor de aproximadamente 25 m (Reyes-Nava, 2005).

Es una roca de color negro de textura microporfirítica y microfenocristales de andesina y olivino alterado, presenta una matriz de microlitos de plagioclasa (López-Loera & Tristán-González, 2013). Su edad estimada es de 21.5 ± 0.3 Ma (Gaytan-Martínez et al., 2017).

Traquita Los Castillo

Algunos autores lo manejan como Andesita Los Castillo (López-Loera & Tristán-González, 2013). Se encuentra aflorando en la porción sur-occidental del CVSSM al sur-oriental del valle de Villa de Arriaga, es una roca de color café a gris oscuro con textura porfirítica con 10-15% de fenocristales de 2 a 4 mm de plagioclasas en una matriz fina (Reyes-Nava, 2005; López-Loera & Tristán-González, 2013). Su espesor no supera los 50 m. La edad calculada es de 20.05 ± 0.5 Ma. (López-Loera & Tristán-González, 2013; Gaytan-Martínez et al., 2017).

Estructuralmente, la sierra contiene numerosas fallas normales con rumbo de 300-340° y casi todas presentan una dirección de inclinación que varía de 45° a 75°; así mismo, fueron datadas entre 30 a 26.6 Ma (Nieto-Samaniego *et al.*, 1999; Xu *et al.*, 2004). La fallas fueron clasificadas como un sistema de dominó debido a que muestran una dirección de inclinación de falla uniforme y ángulos de inclinación similares (Figura 7) (Xu *et al.*, 2004).



LEYENDA

- | | |
|---|---|
| Aluvial | Ignimbrita Panalillo Inferior |
| Arenisca | Ignimbrita Santa María |
| Basalto Cabras | Riolita El Zapote |
| Lutita | Ignimbrita Panalillo Superior |
| Ignimbrita Cantera | Traquita Los Castillo |
| Riolita San Miguelito | Falla Normal |
| Latita Portezuelo | Área de estudio |



Datum: WGS 84/ UTM Zone 14 N

Figura 7. Geología del CVSSM

Fuente: elaboración propia a partir de Tristán-González *et al.*, (2009) y Rodríguez-Robles (2016)

5.4 Hidrología

La SSM se encuentra comprendida dentro de las regiones hidrológicas (RH) El Salado (núm. 37, porción noroccidental) y Pánuco (núm. 36, porción suroriental). No presenta corrientes superficiales extensas ya que se encuentra constituida por una serie de cuencas cerradas con altos niveles de evapotranspiración (INEGI, 2002).

Entre las cuencas pertenecientes a la SSM se encuentran (INEGI, 2002):

- *Cuenca Presa San José-Los Pilares y Otras:* se localiza en la porción centro-occidental del Estado y en la zona sureste de la RH núm. 37. La precipitación media anual varía de 300 mm (sur) a 400 mm (norte). El rango de escurrimiento es de aproximadamente de 10 mm y existen presas como parte de la infraestructura hidráulica.
- *Cuenca Río Taumín:* es la cuenca de mayor extensión en la entidad, se localiza en la porción sur y oriental del Estado y en la zona noroccidental de la RH Pánuco. La temperatura media anual varía notablemente de 16 °C (porción occidental) a 24 °C (porción oriental), de igual manera la precipitación total anual varía de 400 a 2000 mm. Mientras que el rango de escurrimiento se encuentra comprendido entre 200 y 500 mm.
- *Cuenca San Pablo y Otras:* se localiza al occidente y suroccidente del Estado hacia la porción sur de la RH El Salado. La precipitación total anual es de 400 mm mientras que el rango de escurrimiento es de 10 a 20 mm.

Así mismo, la topografía de la SMM permite la existencia de numerosos escurrimientos (IPICyT & SEGAM, 2018):

- *Arroyo El Muerto*: este arroyo se origina en el Cerro El Potosí, a 2500 msnm y a 11km al SSW de San Luis Potosí con un curso inicial de rumbo norte. Cruza la carretera 80 y descarga en la Presa San José. Su longitud total es de aproximadamente 16 km.
- *Arroyo Grande*: tiene su origen a 2600 msnm, a 16 km al SSW de la ciudad de San Luis Potosí y descarga sus aguas en la Presa el Peaje.
- *Arroyo Las Cabras*: inicia a una altitud de 2800 msnm. Se le considera el nacimiento del Río Santiago y su curso inicial es rumbo NW. En él desembocan otros arroyos menores como La Ordeña y El Ocote. Descarga sus aguas en la Presa El Peaje y presenta una longitud total de 20 km.
- *Arroyo Las Escobas*: este arroyo por lo general aporta sus aguas al Río Santiago, aproximadamente unos 3 km debajo de la cortina de la Presa El Peaje. Se origina a 15.6 km de la ciudad de San Luis Potosí a una altitud aproximada de de 2450 msnm.
- *Río Potosino*: aporta sus aguas al Río Santiago, muy cerca del municipio de Escalerillas. Se origina al SSW de la ciudad de San Luis Potosí y tiene un curso NW. En este río desembocan otros arroyos de menor magnitud, como el Jacate.
- *Río Santiago*: se origina a partir de la Presa El Peaje. De manera general no presenta escurrimiento durante el año, excepto cuando se abre la Presa San José o bajo lluvias torrenciales, llegando a producir inundaciones en el norte de la ciudad.

5.5 Clima

Es en su mayoría semiárido templado, con precipitaciones en verano de junio a septiembre y con pequeñas lluvias en invierno de diciembre a enero. La evaporación excede la precipitación y es considerado como un clima de transición entre los secos y subhúmedos (INEGI, 2002).

De acuerdo con la CONAGUA (2018b), en los últimos 46 años, la precipitación anual ha variado entre 300 y 700 mm con un promedio de 413 mm. La temperatura media anual es de 17 °C, siendo la temperatura más baja de -5 °C y la máxima 36 °C. En las zonas más altas la precipitación media es de 500 mm con una temperatura de 16 °C.

5.6 Uso de suelo y tipo de vegetación

La SSM es un sistema montañoso que divide los ecosistemas áridos de matorrales hacia el norte y el bioma de pastizales semiáridos hacia el sur de México. Pertenece principalmente a ejidos, comunidades y pequeños propietarios (Anexos 1 y 21). Se ha caracterizado por ser una fuente importante de carbón vegetal para la minería del Estado; así como para el aprovechamiento de leña para uso doméstico. Entre otros aprovechamientos se encontraron la minería de plata, uso agrícola y a partir del Siglo XX la ganadería (García de Alba V., 2008, Braasch, 2012).

Actualmente, las principales actividades son: 1) agrícola, la cual se desarrolla en las planicies cercadas a la SSM y en menor medida sobre algunos lomeríos de esta. La agricultura es de temporal y de riego, aunque en su mayoría son cultivos de temporales cuyas variedades tienen requerimientos mínimos de agua, tales como: sorgo, maíz, chícharo y pastos, y 2) ganadería de cabras, ovejas y vacas (García de Alba V., 2008; IPICYT & SEGAM, 2018).

Respecto a la vegetación, el clima semiárido permite la adaptación de las especies nativas; por lo tanto, la riqueza de especies es alta dentro de la SSM. Existe una gran variedad de tipos de vegetación presentes en el sitio, desde pastizales y matorrales desérticos ubicados en las faldas de la sierra (*Rosetófilo*, *Crasicaule* y *Micrófilo*), hasta los bosques (pino y encino) presentes en la parte central y con mayor altitud (Rodríguez-Robles, 2016; IPICYT & SEGAM, 2018). Las especies nativas dominantes son *Pinus cembroides* Zucc. (1832) y *Quercus potosina* Trel. (1924) (Rodríguez-Robles, 2016).

5.7 Edafología

La SSM puede dividirse en dos zonas de acuerdo con la estructura general de sus suelos. En las partes elevadas de la sierra, asociados con pendientes pronunciadas y afloramientos rocosos, se pueden encontrar suelos poco desarrollados y en general, muy poco profundos (<25 cm). Mientras que en las zonas bajas de los cerros se observan suelos de pie de monte asociados a pequeñas terrazas de ríos y lomeríos de pendiente suave. Estos últimos suelos, especialmente los de las zonas más bajas, suelen tener una profundidad media y ser más continuos (Rodríguez-Robles, 2016; IPICYT & SEGAM, 2018).

Con base en la carta edafológica de INEGI (2008), los tipos de suelo que se pueden encontrar están: calcisoles, cambisoles, durisoles, fluvisoles, leptosoles, luvisoles, phaeozem, planosoles y regosoles.

6 MARCO TEÓRICO

En esta sección se abordará el concepto de ciclo hidrológico, zona de recarga hídrica; así como su delimitación, caracterización, clasificación, importancia y los factores que influyen en ella. Por otra parte, se realizará una breve descripción de los aspectos hidrogeológicos del VSLP, la cual incluirá las características de los acuíferos presentes en el valle; así como las zonas potenciales de recarga hídrica que han sido identificadas. También, se realizará una descripción del fundamento de la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)

y sus aplicaciones. Finalmente, se describirán la Técnicas Estadísticas Multivariadas (Análisis de Correlación, Análisis de Clúster y Análisis de Componentes Principales) y sus aplicaciones.

6.1 Ciclo hidrológico

El agua que se encuentra en cada uno de los reservorios no permanece constante, debido a que puede cambiar rápidamente de estado (sólido, líquido o gaseoso); es decir, el movimiento del agua es irregular tanto en el espacio como en el tiempo (Noriega-Arriaga, 2005; Tarbuck & Lutgens, 2005). Por lo tanto, el agua presentará distintos tiempos de residencia, que pueden ir desde 9 días en la atmósfera hasta aproximadamente 39000 años de residencia en los océanos (Tabla 1).

Tabla 1. Tiempo promedio de residencia del agua en los distintos reservorios

Reservorio	Tiempo promedio
Océanos	39000 años
Glaciares	20 a 100 años
Cubierta de nieve	2 a 6 meses
Lagos	50 a 100 años
Ríos	2 a 6 meses
Agua superficial	100 a 200 años
Agua subterránea	10000 años
Humedad del suelo	1 a 2 meses
Atmósfera	9 días

Fuente: Pidwirny (2006) y Pérez (s.f.)

Esta dinámica del agua comúnmente es conocida como **ciclo hidrológico** (Figura 8), en donde el agua se evapora desde el océano y la superficie terrestre hacia la atmósfera, posteriormente se advecta en forma de vapor de agua y se condensa dentro de las nubes, precipitándose en forma de lluvia, nieve, aguanieve o granizo de regreso hacia la superficie terrestre (Pagano & Sorooshian, 2002). Cuando la precipitación desciende, una proporción importante regresa a la atmósfera en forma de evapotranspiración, mientras que el resto escurre por corrientes y cuerpos de agua delimitados por las cuencas, constituyendo las aguas superficiales o bien, se infiltra al subsuelo como agua subterránea (Noriega-Arriaga, 2005; Mendoza-Chávez, 2016; CONAGUA, 2018b).

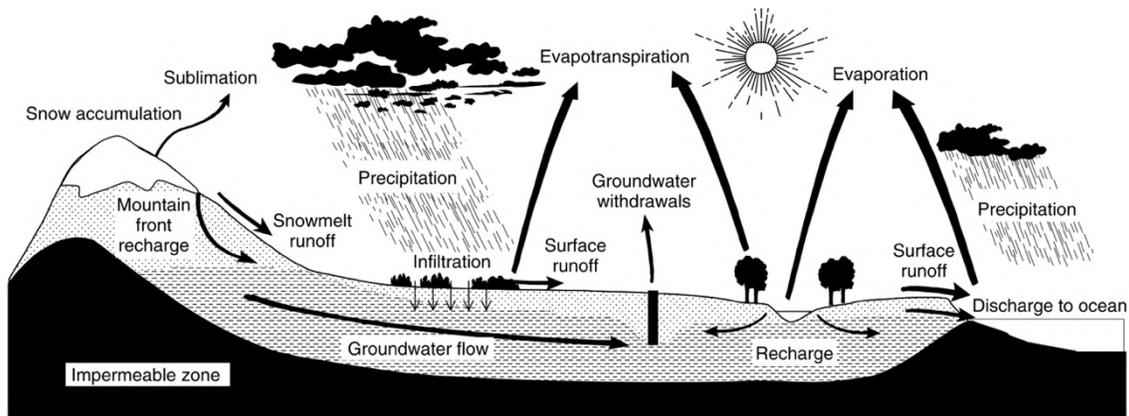


Figura 8. Ciclo hidrológico
Fuente: Pagano & Sorooshian, 2002

Dichos fenómenos hidrológicos son muy complejos; por lo tanto, son difíciles de estudiar y comprender (Guevara & Cartaya, 1991). Debido a ello, a falta de una concepción concreta se pueden representar mediante el concepto de **sistema hidrológico** (Figura 9), en el cual todos los componentes interactúan como un todo (Estrela, 1992).

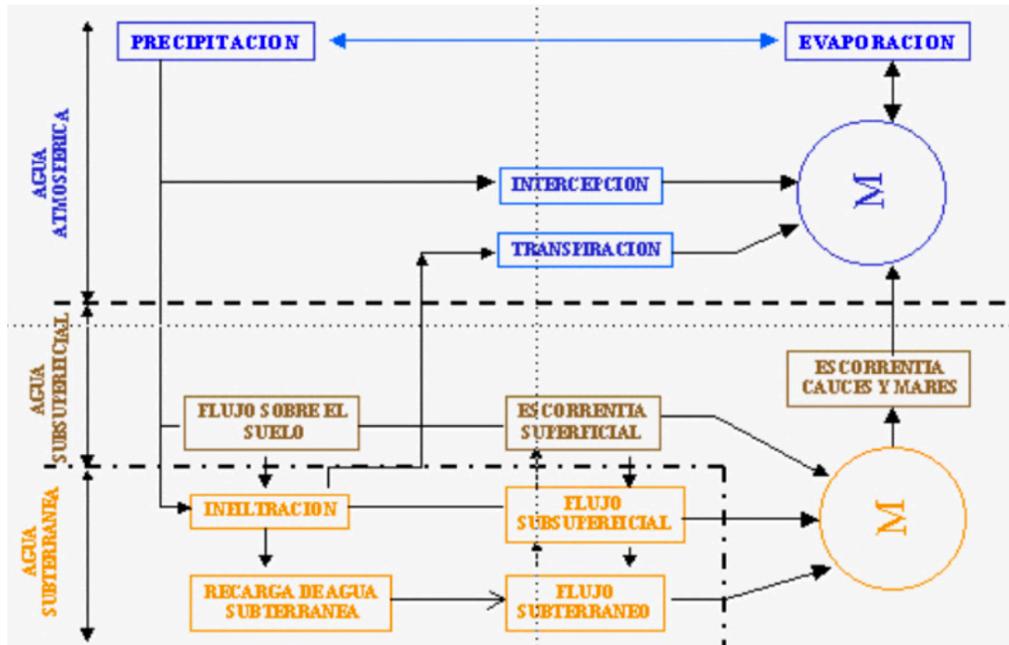


Figura 9. Componentes del sistema hidrológico
Fuente: Estrela, 1992

6.2 Recarga hídrica

La recarga hídrica se define como el proceso por el cual se incorpora agua de forma natural a un acuífero, es un componente importante del sistema hidrológico, pues de ello depende el volumen de agua que se recargará a un acuífero (Chamorro-Castillo, 2016; Chávez-Gómez *et al.*, 2017).

La infiltración por la precipitación es la principal recarga al acuífero, aunque también puede recargarse por corrientes superficiales como ríos, lagos, lagunas, manantiales, etc., o de unidades hidrogeológicas adyacentes (INAB, 2005; Matus *et al.*, 2009; Palacio & Betancur, 2007). La recarga es más alta en áreas con climas húmedos y tipos de suelo o de rocas permeables, debido a que en este tipo de materiales la tasa de recarga puede ser hasta la mitad de la tasa de precipitación. Por otra parte, en materiales de baja permeabilidad, solo una pequeña fracción de la precipitación se convierte en recarga; por ejemplo, con

suelos arcillosos masivos la tasa de recarga puede ser inferior al 1% de la tasa de precipitación (Fitts, 2013a).

De igual manera, las actividades antropogénicas pueden inducir la recarga artificial, ya sea por flujos por retornos de riego, fugas de agua en las redes de abastecimiento e infiltraciones de embalses y depósitos (Vélez-Otálvaro & Vásquez-Ariza, 2004; Palacio & Betancur, 2007; López-Álvarez, 2012).

Zonas de recarga hídrica

Matus *et al.* (2009) definen a la zona de recarga como la parte de la cuenca hidrográfica donde sucede la recarga hídrica. Esta zona se caracteriza por presentar una alta capacidad de infiltración así como determinadas características de altitud, tipo vegetación, flujo vertical y descendente, de forma que captan el agua superficial más fácilmente que otras zonas, favoreciendo la recarga hasta la zona saturada y permitiendo muchas veces que los acuíferos recuperen sus niveles estables de agua (Noriega-Arriaga, 2005; Peñuela-Arévalo, 2007; Tsai *et al.*, 2014 Chávez-Gómez *et al.*, 2017).

Las zonas de recarga hídrica son imprescindibles por ser fuentes de agua dulce e importantes en el ciclo hidrológico. Permiten la conservación, la preservación, renovación y el aprovechamiento del agua, manteniendo un equilibrio ecológico, a través de la aportación a los acuíferos donde los flujos subterráneos se desplazan de forma horizontal hacia otros cuerpos de agua como los lagos, ríos, manantiales y océanos (INAB, 2005; Donis-Caceres, 2015; Chamorro-Castillo, 2016).

Identificación y delimitación de las zonas de recarga hídrica

Peñuela-Arévalo & Carrillo-Rivera (2012) mencionan que la identificación y delimitación de las zonas de recarga es más complicada en comparación con las zonas de descarga, puesto que el agua se infiltra y no se tiene evidencia superficial a diferencia de las zonas de descarga, excepto si se perfora y se toman

muestras de suelo y subsuelo; sin embargo, muchas veces la limitante es el presupuesto necesario para realizarlo.

De acuerdo con Donis-Caceres (2015), existen varias metodologías que permiten identificar y delimitar zonas potenciales de recarga hídrica, basadas en elementos tanto cuantitativos como cualitativos. Por lo general, estas metodologías consisten en la superposición de capas en un SIG; por ejemplo: litología, tipo de suelo, altitud, cobertura vegetal, pendiente, presencia de manantiales y lagos; así mismo, con el empleo de la Teoría de los Sistemas de Flujo (Tóth, 2000; Peñuela-Arévalo & Carrillo-Rivera, 2012; Blanco-Rojas, 2017).

No obstante, una de las metodologías más empleadas para identificar y delimitar zonas de recarga es la propuesta por Matus *et al.* (2009), mostrada en la Figura 10.

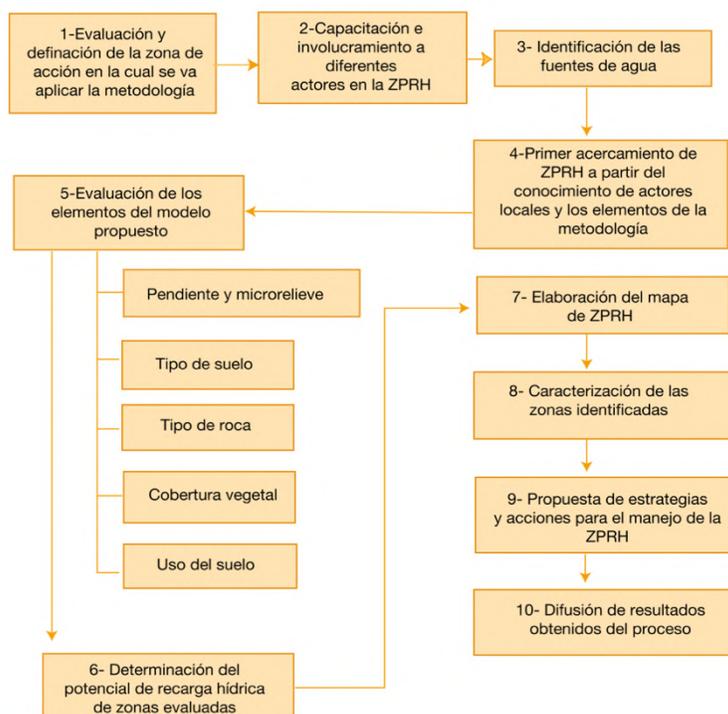


Figura 10. Pasos para la identificación y delimitación de zonas de recarga hídrica.
Fuente: Matus *et al.*, 2009

Esta metodología está enfocada a la capacitación y participación de la gente local, la cual brinda sus conocimientos y experiencias con la finalidad de identificar y

delimitar las zonas de recarga hídrica. Estudios como los realizados por Bueso-Campos (2010), Arela-Mayta (2014), Rodríguez-Lugo & Pérez-Álvarez (2014), Chamorro-Castillo (2016) y Chávez-Gómez *et al.* (2017) han empleado dicha metodología con resultados satisfactorios.

La definición y delimitación de las zonas de recarga permite hacer un manejo sostenible de los recursos hídricos de tal manera que se garantice la disponibilidad de agua a largo plazo y se cuente con la calidad adecuada para el suministro de agua potable (Chamorro-Castillo, 2016; Martínez-Valdés & Villalejo-García, 2018).

Por otra parte, identificar y delimitar estas zonas, servirá como base para tomar decisiones informadas, para que los planes de manejo del recurso hídrico estén bien enfocados de acuerdo a las necesidades y características propias de cada región. De tal manera que se propongan alternativas precisas y adecuadas para el manejo sostenible de estas zonas y que al mismo tiempo incluyan una mejor planeación del crecimiento y desarrollo urbano (Blanco-Rojas, 2017).

Caracterización de las zonas de recarga hídrica

La caracterización debe contener los resultados de las evaluaciones realizadas y brindar una descripción detallada de las propiedades de la zona identificada.

Dichas propiedades pueden ser clasificadas en: físicas, edafológicas, físico-químicas e hidrogeológicas, dentro de las cuales las variables de mayor peso al determinar una zona de recarga hídrica son la conductividad hidráulica, la resistividad aparente, el tipo de roca, la infiltración básica, la elevación topográfica, la precipitación y la evapotranspiración (Tabla 2).

Tabla 2. Variables empleadas para la caracterización de zonas de recarga

<i>Propiedades físicas</i>	<i>Propiedades edafológicas</i>	<i>Propiedades físico-químicas</i>	<i>Propiedades hidrogeológicas</i>
Pendiente	Evapotranspiración	Contenido iónico	Tipo de roca
Clima	Porosidad	Temperatura del agua	Conductividad hidráulica (K)
Precipitación	Tipo de suelo	pH	Tiempo de residencia del agua subterránea
Elevación topográfica	Uso de suelo	Potencial redox (Eh)	Infiltración básica
	Balance hídrico de suelos		Coefficiente de almacenamiento
	Humedad inicial de suelos		Transmisividad
	Tipo de vegetación		Volumen de recarga
	Profundidad de raíces		Coefficiente de escurrimiento
	Erosión de suelos		Resistividad aparente (R ₀)

Fuente: elaboración propia a partir de Peñuela-Arévalo (2007), Noyola-Medrano *et al.* (2009), Matus *et al.* (2009), Bueso-Campos (2010) & Peñuela-Arévalo & Carrillo-Rivera (2012),

Clasificación de las zonas de recarga hídrica

Según Matus *et al.* (2009) es posible caracterizar las zonas de recarga dependiendo del tipo de movimiento del agua en el suelo subsuelo y manto rocoso. Las zonas de recarga hídrica pueden ser clasificadas de la siguiente manera:

- *Zonas de infiltración superficial.* Abarca la mayoría de la cuenca hidrográfica, en donde se excluyen las zonas totalmente impermeables. Esta zona es la que se humedece después de cada precipitación, lo cual genera escorrentía superficial según las condiciones del relieve del suelo y su saturación.
- *Zonas de infiltración subsuperficial.* Son partes de la cuenca con suelos que tienen la capacidad de retener agua o la almacenan de forma superficial sobre una capa impermeable, lo cual permite que el flujo (horizontal) se concentre aguas abajo.
- *Zonas de recarga hídrica subterránea.* Son aquellas zonas de la cuenca donde el flujo vertical de la infiltración es significativa, alimentando a los acuíferos, por lo general son sitios planos con rocas permeables. Un aspecto importante es la conexión entre acuíferos así como el agua que viene de otra cuenca (recarga externa). Para la evaluación de estas zonas se pueden considerar dos métodos: 1) directo: a través de sondeos, bombeos y prospección geofísica y 2) indirecto mediante la realización de un balance hidrogeológico.

En México, la gestión de recursos hídricos se lleva a cabo mediante la regiones hidrológico-administrativas (RHA). De acuerdo con la CONAGUA (2018b) hay 13 RHA, las cuales se encuentran constituidas por agrupaciones de cuencas, unidades básicas en la gestión de los recursos hídricos. Las RHA se dividen a nivel regional en 1) Norte, centro y noroeste y 2) Sureste. Actualmente no se ha desarrollado un mapa en donde se muestren las zonas de recarga en México; sin embargo, cada RHA presenta una determinada recarga media total de acuíferos. Cabe mencionar que la RHA XII Península de Yucatán tiene la mayor recarga media total con 25, 316 hm³/año, mientras que la RHA I Península de Baja California tiene la menor recarga media total con 1,641 hm³/año (Figura 11). Es

importante señalar que el VSLP pertenece a la RHA VII Cuencas Centrales del Norte y presenta una recarga de 2,474 hm³/año.



Figura 11. Regiones Hidrológico Administrativas de México
Fuente: modificado de CONAGUA (2018b)

Factores que influyen en la recarga hídrica

De acuerdo con estudios realizados por diversos autores, los factores que influyen en la recarga hídrica son los siguientes:

Precipitación

La precipitación es el principal factor en la recarga hídrica en un acuífero. Noriega-Arriaga (2005) menciona que se considera como precipitación todas las formas de humedad que caen a la tierra, provenientes de las nubes, como agua, nieve y hielo. Se ha registrado que actualmente México recibe aproximadamente un total de 1,449,471 Mm³ de agua en forma de precipitación (CONAGUA, 2018b). A nivel regional la precipitación es muy variable, en el año 2017 la RHA I Península de Baja California registró la menor precipitación (149.9 mm/año) a

diferencia de la RHA XI Frontera Sur que registró la mayor precipitación con 1986.7 mm/año (Figura 12).

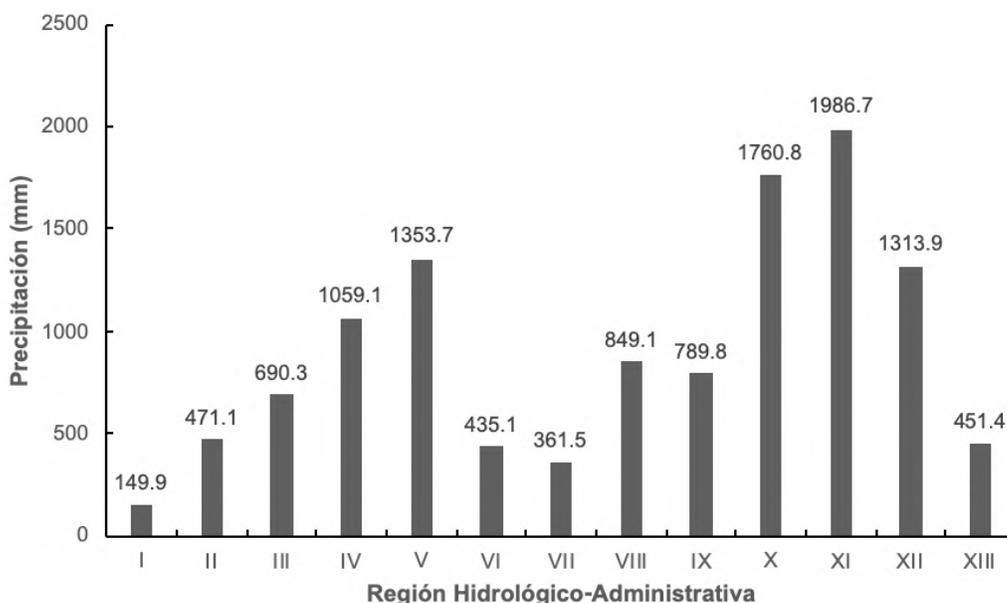


Figura 12. Precipitación promedio anual por RHA en México
Fuente: elaboración propia a partir de datos de CONAGUA (2018b)

Evapotranspiración

Si bien la recarga hídrica de un acuífero depende principalmente de la precipitación, el volumen de agua que se recargue estará determinado en gran medida por la evapotranspiración. Esta es definida como la suma de los procesos combinados de evaporación directa en la superficie del suelo y la transpiración de las plantas (Noriega-Arriaga, 2005; Fitts, 2013a).

Las tasas de evapotranspiración se rigen por varios factores, los más importantes son la temperatura, la radiación solar y la humedad del aire así como la disponibilidad de agua en la superficie y en el subsuelo (Mata-Martínez, 2011; Fitts, 2013a). Por ejemplo, en regiones con fuertes variaciones climáticas estacionales, la tasa de evapotranspiración es más baja en invierno que en verano debido a que se puede evaporar menos agua en aire frío que en aire cálido (Fitts, 2013a).

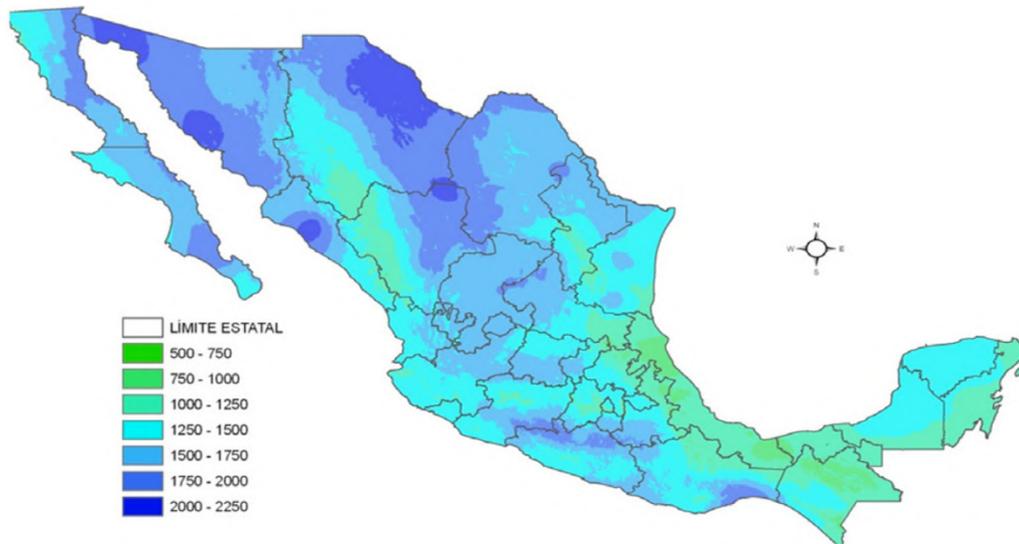


Figura 13. Evapotranspiración Potencial en México para el año 2011
Fuente: Díaz-Padilla *et al.* (2011)

Glenn *et al.* (2007) mencionan que en regiones áridas y semiáridas, aproximadamente del 90% de la precipitación se puede perder por la evapotranspiración, lo cual limitará la recarga de los acuíferos, ya que al haber mayor evapotranspiración la recarga será menor.

La evapotranspiración se divide en *evapotranspiración potencial* y *evapotranspiración real*. La evapotranspiración potencial se determina a partir de datos climáticos, mediante diferentes fórmulas empíricas, cuya elección dependerá del tipo de datos climáticos que se encuentren disponibles en una zona. Las metodologías más empleadas para estimar este parámetro son la de Thornthwaite, Penman, Hargraves, Blaney-Cridde y Penman-Montheith. Por otra parte, la evapotranspiración real se define como la evapotranspiración de un cultivo u otra vegetación bajo condiciones ambientales existentes (Chávez-Gómez *et al.*, 2017).

En México, para el 2017 la evapotranspiración fue de 1,045,835 hm³ (CONAGUA, 2018b). A nivel espacial es muy variable; por ejemplo, los rangos de

evapotranspiración potencial en el país son entre los 500 y los 2,250 mm (Díaz-Padilla *et al.*, 2011) (Figura 13).

Infiltración

La infiltración se puede definir como el ingreso vertical descendente de la precipitación que cae sobre la superficie de un suelo que no se encuentra saturado con agua. Es influenciada por las propiedades físicas del suelo como lo son: textura, estructura, contenido de materia orgánica y grado de humedad; así como por la vegetación, topografía y estratificación geológica (Noriega-Arriaga, 2005; Chamorro-Castillo, 2016).

Fitts (2013a) menciona que durante un gran evento de precipitación, el agua que se infiltra hacia el subsuelo es arrastrada hacia abajo por efecto de la gravedad, el proceso donde el agua que se mueve desde la zona no saturada hacia la zona saturada se llama recarga; sin embargo, en ocasiones esta puede ser desviada horizontalmente por capas de baja permeabilidad en la zona no saturada (interflujo). La infiltración es mayor donde hay suelo o roca porosa y permeable, topografía plana y un historial de condiciones secas. Por otra parte, la infiltración puede verse favorecida por el escurrimiento superficial de un área adyacente (Noriega-Arriaga, 2005).

Topografía

El tiempo de contacto entre el agua y la superficie del terreno determinará la recarga. Si un terreno posee pendientes pronunciadas la escorrentía superficial se verá favorecida, disminuyendo el tiempo de contacto del agua con la superficie y reduciendo la infiltración. Sin embargo, si un terreno posee pendientes de menor grado, el contacto del agua con la superficie se maximizará, incrementando la infiltración y por ende la recarga se verá favorecida (Matus *et al.*, 2009; Donis-Caceres, 2015).

Cobertura vegetal

Chamorro-Castillo (2016) la define como el porcentaje de suelo que ocupan las comunidades vegetales. La cobertura vegetal disminuye la escorrentía superficial, debido a que permite un mayor tiempo de contacto del agua con la superficie, facilitando el proceso de infiltración; además, un porcentaje de la precipitación puede ser interceptada por la cobertura vegetal. En este factor es necesario considerar la profundidad y densidad de las raíces y la capacidad de retención del dosel vegetal (Matus *et al.*, 2009; Chamorro-Castillo, 2016).

Escorrentía

Matus *et al.* (2009) mencionan que la escorrentía se refiere a la cantidad de agua de lluvia, de riego o deshielo que excede la capacidad de infiltración del suelo, ocasionando que esta fluya en dirección longitudinal a la pendiente hacia cuerpos de agua como ríos, lagos, embalses y océanos.

Uso de suelo

El suelo se deteriora cuando el uso de suelo que se establece no es el indicado, pudiendo ocasionar erosión y compactación. Lo anterior reduce la capacidad de infiltración del suelo, disminuyendo la recarga hacia el acuífero. Entre las principales actividades que alteran las características de las zonas de recarga se encuentran la agricultura, la ganadería, la producción forestal y el desarrollo urbano (Donis-Caceres, 2015; Chamorro-Castillo, 2016).

Suelo

Un suelo que sea impermeable y esté compactado impedirá o dificultará la infiltración y la recarga hídrica, por el contrario, un suelo permeable facilita la misma (INAB, 2003; Fitts, 2013a). Entre las características del suelo que influyen en la recarga se encuentran la textura, la porosidad y la conductividad hidráulica.

La textura del suelo se refiere a la distribución del tamaño de las partículas elementales que lo componen: arenas (grande), limos (medio) y arcillas

(pequeño), y esta influye decisivamente en el comportamiento del suelo respecto de su capacidad de infiltración del agua, entre mayor sea el tamaño de partícula habra mayor infiltración (Chamorro-Castillo, 2016; Cordero-Vázquez, 2016).

Cordero-Vázquez (2018) menciona que la porosidad se refiere al porcentaje del volumen de suelo que se encuentra vacío con respecto al volumen total, esta propiedad se encuentra directamente relacionada con la textura, debido a que el tamaño es quien otorga los espacios vacíos entre partícula y partícula. Por ejemplo, las arcillas tienden a hidratarse con facilidad, hinchándose en algún grado, ocasionando una reducción en la porosidad y haciendo el sustrato impermeable, limitando la infiltración y la recarga (Chamorro-Castillo, 2016).

Por otra parte, la conductividad hidráulica es una propiedad importante del suelo, esta depende de la porosidad y a su vez de la textura; por ejemplo, un suelo que presente un porcentaje alto de arena tendrá una conductividad hidráulica alta a diferencia de un suelo altamente arcilloso (García *et al.*, 2010).

Estratigrafía geológica

La recarga hídrica puede verse afectada debido a la ordenación de los materiales geológicos en los distintos estratos hasta llegar a la zona saturada del acuífero (Chamorro-Castillo, 2016). Los términos *acuífero* y *capa de confinamiento* son descriptores relativos de zonas que contienen agua en el subsuelo (Fitts, 2013b).

Los *acuíferos* son unidades geológicas que pueden almacenar y transmitir agua, debido a ello presentan una mayor conductividad hidráulica ($>10^{-2}$) (arenas y gravas sin consolidar, dolomitas, rocas metamórficas fracturadas). Por lo tanto, son aprovechados a través pozos para abastecer de agua (Fetter, 2001; Fitts, 2013b).

Las *capas de confinamiento* son unidades geológicas con menor conductividad hidráulica ($<10^{-2}$), por lo que retardan el flujo y transmiten poca agua (Fetter, 2001; Fitts, 2013b). Estas capas de confinamiento usualmente se subdividen en acuitardos, acuicludos y acuífugos. Los *acuitardos* son capas que presentan una baja permeabilidad y que contienen agua en cantidad apreciable, la cual transmiten lentamente de un acuífero a otro (arenas arcillosas, areniscas, rocas compactadas y/o fracturación moderada). Los *acuicludos* son capas que contienen agua en cantidad apreciable y que no permite que el agua circule a través de ella (limos, arcillas). Los *acuífugos* son capas totalmente impermeables que no contienen agua y por ende no la transmiten (granito o esquito inalterados y no fracturados) (Fetter, 2001; Sánchez-San Román, 2009).

A su vez, los acuíferos son clasificados en *acuíferos no confinados o libres*, *acuíferos semiconfinados* y *acuíferos confinados*. Los *acuíferos libres* son aquellos donde la capa freática está a presión atmosférica. La recarga en estos acuíferos ocurre desde una infiltración hacia abajo a través de la zona no saturada así como por un flujo lateral profundo de agua subterránea o una filtración ascendente desde los estratos subyacentes. En los *acuíferos semiconfinados* alguna de las capas confinantes son semipermeables; es decir, acuitardos. Por último, los *acuíferos confinados* son aquellos que se encuentran cubiertos por una capa de confinamiento arriba, su recarga puede ocurrir ya sea en un área de recarga o por una fuga lenta hacia abajo a través de una capa de confinamiento con fugas (Fetter, 2001; Sánchez-San Román, 2009; Fitts, 2013b).

En diversos escenarios hidrogeológicos se pueden superponer unidades hidrogeológicas con infiltraciones hacia arriba entre capas, según las condiciones locales (Figura 14) (Foster *et al.*, 2007).

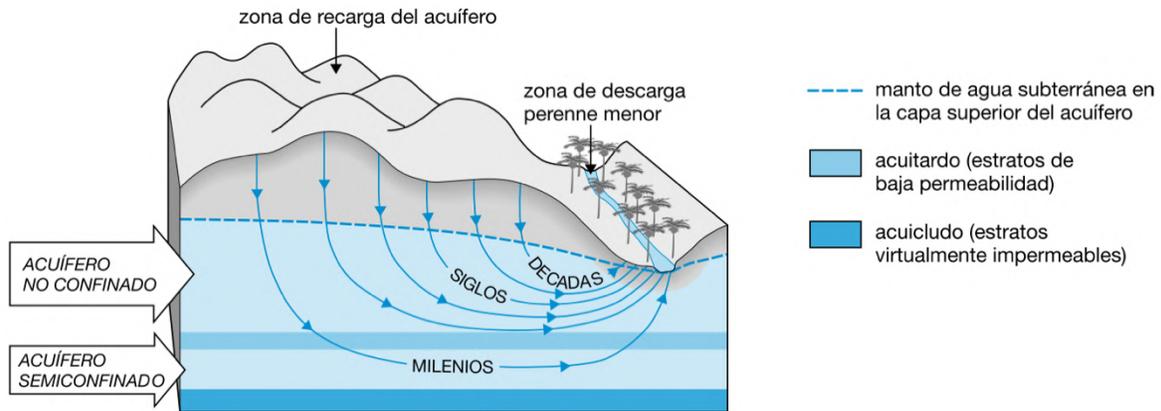


Figura 14. Regimen de flujo subterráneo y tiempos de residencia típicos de unidades hidrogeológicas importantes en regiones semiáridas

Fuente: Foster *et al.* (2007)

Tipo de roca

El tipo de roca determinará si habrá una infiltración superficial, subsuperficial o una recarga hídrica, dependiendo del grado de porosidad y permeabilidad. Existen dos fuerzas que controlan el movimiento del agua a través roca: 1) la gravedad, haciendo que el agua se infiltre hasta zonas impermeables y también pueda desplazarse lateralmente y 2) la atracción molecular, la cual puede retardar el flujo a través de pequeños poros de las rocas (Matus *et al.*, 2009; National Groundwater Association, 2010).

Las rocas sedimentarias abarcan una amplia gama con respecto a la permeabilidad; por ejemplo, las lutitas presentan una baja permeabilidad y usualmente son acuitardos (capa de confinamiento), mientras que las areniscas, calizas y dolomitas a menudo tienen una alta permeabilidad y conforman los acuíferos. La porosidad de estas rocas también es muy variable y depende del grado de compresión, compactación y recristalización que experimenten. Un ejemplo son las areniscas que tienen un rango de <1% a >25% mientras que las lutitas a menudo tienen una porosidad muy alta, hasta 20% o más. Así mismo, las calizas y dolomitas presentan una porosidad alta de hasta 50% (Fitts, 2013b).

En relación de las rocas ígneas y metamórficas, la porosidad es menor al 1% y gran parte de la misma está en forma de pequeños poros no conectados entre cristales. Por otro lado, la permeabilidad regularmente es controlada por una red irregular de pequeñas fracturas (articulaciones o fallas) que dependerán de la apertura y suavidad de las mismas (Fitts, 2013b).

6.3 Aspectos hidrogeológicos del Valle de San Luis Potosí (VSLP)

El VSLP se caracteriza por la presencia de dos sierras principales: SSM al Poniente y Sur Poniente y la SA al Oriente (Contreras-Servín & Galindo-Mendoza, s.f.) (Figura 15). Se han venido realizando investigaciones hidrogeológicas desde el año 1960 y entre sus características naturales se encuentran una baja precipitación anual (251 mm), una alta evapotranspiración anual (2251 mm) y corrientes superficiales intermitentes (Noyola-Medrano *et al.*, 2009; Hernández-Constantino, 2020).

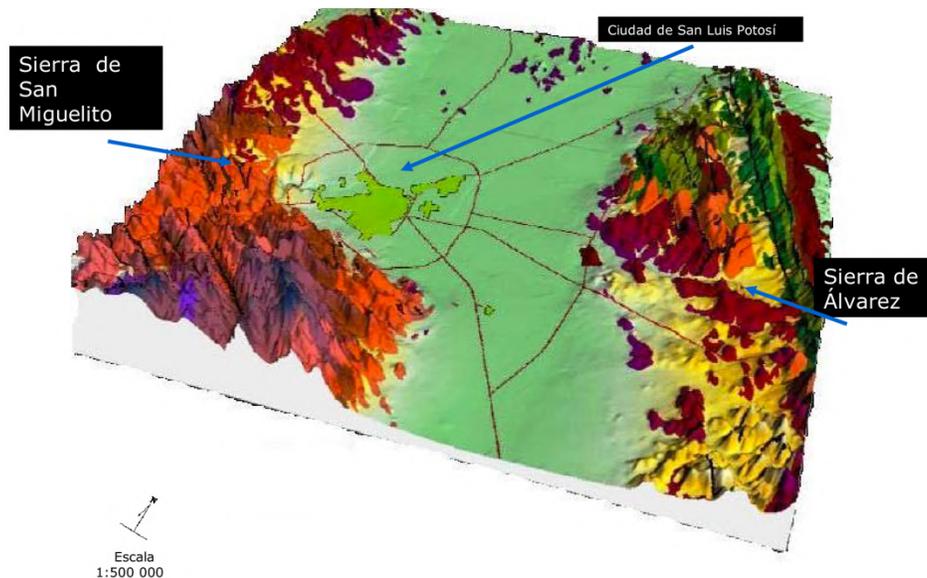


Figura 15. Valle de San Luis Potosí.
Fuente: Carrillo-Rivera *et al.*, 1996

En el valle se ha identificado la existencia de dos acuíferos: el acuífero somero (colgado) y el acuífero profundo (volcánico fracturado), los cuales se encuentran separados por un estrato compuesto de arena fina compacta con baja conductividad hidráulica (Carrillo-Rivera *et al.*, 1992; López-Álvarez *et al.*, 2013). A

continuación se describen las características de los acuíferos identificados en el VSLP:

- *Acuífero somero (colgado)*. Presenta una espesor aproximado de 5 a 40 metros siendo muy superficial. El material que compone este acuífero presenta variaciones texturales; por ejemplo, hacia la SSM predominan conglomerados inmersos en una matriz arenosa arcillosa y hacia el noreste del VSLP este material se adelgaza predominando limos y arenas (IPICYT, 2007; López-Álvarez *et al.*, 2013).

Es un estrato de baja conductividad hidráulica del orden de $\approx 2 \times 10^{-4}$ m/s. Se recarga dependiendo de la precipitación, evapotranspiración, escurrimiento, vegetación, pendiente del terreno y permeabilidad de las rocas (Carrillo-Rivera & Armienta, 1989; López-Álvarez *et al.*, 2013). Estudios previos mencionan que la principal recarga se da en el flanco oriente del VSLP así como al norte de la SSM hacia el Valle de Escalerillas; así mismo, tiene una recarga inducida por la fuga de agua potable y drenaje; así como por retornos de riego (Ramos-Leal *et al.*, 2007b; DOF, 2010; López-Álvarez *et al.*, 2013).

Debido a la poca profundidad a la que se encuentra, este acuífero es muy sensible a los efectos estacionales y su comportamiento es muy dinámico. Sus volúmenes de reserva son muy limitados debido al poco espesor del material sedimentario que lo alberga (Carrillo-Rivera & Armienta, 1989; IPICYT, 2007).

Por otra parte, se ha detectado la presencia de contaminación (metales, contaminantes orgánicos, inorgánicos y bacteriológicos) derivado de la irrigación de cultivos (Carrillo-Rivera & Armienta, 1989; Carrillo-Rivera, 2008; López-Álvarez *et al.*, 2013).

- *Acuífero profundo*. Se encuentra formado por roca volcánica fracturada y está confinado en el centro del VSLP por una capa sedimentaria poco permeable (IPICYT, 2007; López-Álvarez *et al.*, 2013). Su límite superior se encuentra aproximadamente de 100 a 150 m de profundidad (Noyola-Medrano *et al.*, 2009).

Lo limita por un lado la SSM y por el otro la SA, ambas sierras presentan una capacidad reducida para transmitir y almacenar agua por lo que restringen la recarga lateral, la conductividad hidráulica es en promedio del orden de $\approx 2 \times 10^{-4}$ (IPICYT, 2007; López-Álvarez *et al.*, 2013).

López-Álvarez *et al.* (2013) mencionan que este acuífero es de tipo confinado en la mayor parte de la planicie del VSLP y que la mayoría de los pozos perforados tienen profundidades del orden de 350-450 m aunque existen algunos de 800-1000 m aproximadamente.

Entre el acuífero somero y profundo se encuentra una capa granular, la cual está compuesta principalmente por materiales clásticos del Cuaternario. Las estructuras geológicas como las fallas, controlan la distribución y espesor de esta unidad, la cual va de 100 a 200 metros. Esta capa se encuentra confinada en el centro y es explotada por pozos con profundidades de hasta 350 metros (IPICYT, 2007; López-Álvarez *et al.*, 2013).

Sin embargo, Contreras-Servín & Galindo-Mendoza (2008) mencionan que el abatimiento de los niveles freáticos ha llevado a realizar perforaciones más profundas que alcanzan los 700 m y 1000 m. Ligado a lo anterior, el volumen de extracción de agua subterránea ha ido variando con el tiempo, tal y como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Volumen de extracción de agua subterránea en el VSLP

Año	Volumen de extracción (m³)
2014	98,655,448
2015	94,337,434
2016	86,175,859
2017	83,239,845
2018	79,759,750

Fuente: INTERAPAS, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018

Si bien los volúmenes de extracción han ido disminuyendo progresivamente, actualmente el abastecimiento de agua potable a la población del VSLP enfrenta una gran problemática: la cantidad insuficiente para satisfacer las necesidades (Noyola-Medrano *et al.*, 2009). Debido a lo anterior, es de suma importancia identificar y delimitar las zonas de recarga hídrica y los factores que favorecen o limitan un funcionamiento adecuado de las mismas con el fin de realizar un manejo sostenible de los recursos hídricos subterráneos.

En lo que respecta a zonas de recarga hídrica identificadas en el VSLP, se ha reportado una parte de los alrededores de la Presa San José, los límites de la subcuenca de Villa de Reyes, las proximidades del tanque Las Pilas y la Presa San Carlos como zonas de recarga (Contreras-Servín & Galindo-Mendoza, *s.f.*); sin embargo, autores como Noyola-Medrano *et al.* (2009); Peñuela-Arévalo & Carrillo-Rivera (2012) y Stevens-Vázquez (2014), mencionan que en el modelo tradicional se involucra a la SA y la SSM como partes importantes en la recarga a del acuífero profundo.

En dichas sierras, es posible encontrar algunas diferencias en cuanto a su funcionamiento como zonas de recarga. Las rocas volcánicas fracturadas que bordean el VSLP y componen la SSM se encuentran selladas por minerales de origen hidrotermal, lo que las hace casi impermeables, limitando la recarga hacia el acuífero profundo (Ramos-Leal *et al.*, 2007a). Así mismo, el material que compone el acuífero colgado presenta variaciones texturales, donde hacia la SSM

predominan conglomerados inmersos en una matriz arcillosa (López-Álvarez *et al.*, 2013).

En el caso de la SA, esta muestra un cambio de fases litológicas con características hidrogeológicas diferentes. Hacia el Golfo de México, las rocas son de origen arrecifal, teniendo buenas posibilidades para almacenar y transmitir agua. Hacia el VSLP, los sedimentos son principalmente de cuenca, presentando una capacidad reducida para transmitir y almacenar agua. La recarga local en el VSLP hacia el acuífero profundo depende de varias condiciones como: disponibilidad de la precipitación, escurrimiento, cubierta vegetal y la presencia de capas de baja permeabilidad debajo del acuífero colgado (Noyola-Medrano *et al.*, 2009).

6.4 Técnicas Estadísticas Multivariadas

Definidas como un conjunto de métodos estadísticos y matemáticos destinados a describir e interpretar datos procedentes de la observación de varias variables estudiadas de manera conjunta (Cuadras, 2004). Donde una variable se define como cualquier cualidad o característica de un objeto, fenómeno o individuo que contenga atributos que sirvan para clasificarlo(s) (Orellana, 2001; Cervantes-Martínez *et al.*, 2013).

Existen dos tipos de variables: 1) las variables categóricas o cualitativas y 2) las variables numéricas. Las variables categóricas son aquellas que no se expresan de manera numérica, sino como atributos y deben ser definidas de manera clara durante el diseño de la investigación (Orellana, 2001).

A través de las variables categóricas, es posible realizar un análisis cualitativo, que es definido como la investigación que produce la mayor cantidad de datos descriptivos como sean posibles; es decir, se observa detenidamente el objeto de estudio y se le otorga la mayor cantidad de cualidades como se puedan detallar (Calero, 2000). El análisis cualitativo tiene por objetivo identificar la naturaleza

profunda de las realidades, la relación y estructura dinámica (Cadena-Iñiguez *et al.*, 2017). Con base en Orellana (2001), los datos categóricos se clasifican en:

- *Dicotómicos (dos categorías)*. La unidad de estudio puede ser asignada a solo una de dos categorías: presencia o ausencia. Para su asignación es común codificar con 0 a la ausencia y 1 a la presencia. Por ejemplo: varón-mujer, vivo-muerto.
- *Nominales*. En esta clasificación no hay un orden obvio entre las categorías. Por ejemplo: país de origen, estado civil, lengua madre, etc.
- *Ordinales*. En esta clasificación si existe un orden entre las categorías. Por ejemplo: ausente/ leve/ moderado/ severo.

Se debe tener cuidado al trabajar variables categóricas, específicamente cuando se han codificado de manera numérica debido a que no pueden ser analizados como números, sino que deben ser analizados como categorías.

Por otra parte, las variables numéricas son aquellas que pueden expresarse numéricamente; es decir, cuando el resultado de la observación o medición es un número. Dichas variables nos permiten realizar un análisis cuantitativo, Calero (2000) lo describe como un proceso sistemático y ordenado que es llevado a cabo siguiendo determinados pasos, donde es posible obtener datos sólidos acerca del objeto de interés de manera que se pueda conseguir información más específica. Por lo general este análisis va complementado con herramientas estadísticas. Así mismo, Cadena-Iñiguez *et al.* (2017) mencionan que el análisis cuantitativo trata de determinar el grado de asociación o correlación entre variables. Las variables numéricas se clasifican en (Orellana, 2001):

- *Discretas*. La variable de estudio únicamente puede tomar un cierto conjunto de valores posibles; por lo general, aparecen por conteo. Por ejemplo: número de hermanos, número de familiares.

- *Continuas*. Son el resultado de una medición que se expresa en determinadas unidades. Teóricamente, las mediciones pueden tomar un conjunto infinito de valores posibles dentro de un determinado rango. Los valores se encuentran limitados por la precisión del método de medición o por el modo de registro. Por ejemplo: estatura y peso.

La distinción entre los datos discretos y continuos es importante a fin de decidir que método de análisis estadístico es más conveniente utilizar, ya que existen métodos que asumen que los datos son continuos. Los datos numéricos pueden ser transformados en categóricos y ser empleados como tales.

Análisis de Correlaciones

Las relaciones estadísticas se obtienen en una primera fase de exploración conocida como análisis de correlación. Se define como una medida de una asociación monotónica entre dos o más variables de una población. Una relación monotónica entre variables es aquella en la que a medida que incrementa el valor de una, también lo hace el valor de la otra, o a medida que incrementa el valor de una variable, disminuye el valor de la otra. El grado de correlación se expresa como un número comprendido entre -1 a +1 y es conocido como un Coeficiente de Correlación (Anónimo, *s.f.*; Restrepo & González, 2007; Schober & Schwarte, 2018).

La correlación se dice que es positiva o directa si un incremento en una variable está asociada con el correspondiente incremento en la otra variable. Mientras que una correlación negativa o inversa se refiere al caso donde un incremento en una variable se encuentra asociada con el decremento de otra. La correlación puede ser lineal, en este caso los cambios en ambas variables son proporcionales la una a la otra; por otra parte, puede ser no lineal, en la cual los cambios no son proporcionales (Ofungwu, 2014). Entre los coeficientes de correlación comúnmente empleados se encuentran:

- *Coefficiente de Correlación de Pearson.* Es el coeficiente más simple y la medida de correlación más usada. Se aplica a correlación lineal y requiere normalización de los datos para su prueba de significancia (Ofungwu, 2014). Su objetivo es medir el grado de asociación entre dos variables aleatorias cuantitativas que poseen una distribución normal bivariada conjunta.
- *Coefficiente de Correlación de Spearman.* Es un coeficiente no paramétrico alternativo al Coeficiente de Correlación de Pearson (Restrepo & González, 2007). Al ser una técnica no paramétrica es libre de distribución probabilística, evalúa que tan bien una función monótona arbitraria puede describir una relación entre dos variables sin hacer ninguna suposición sobre la distribución de frecuencias de las variables. No presenta los requerimientos de normalidad o la homocedasticidad del Coeficiente de Pearson (Hauke & Kossowski, 2011; Ofungwu, 2014).

Análogo al Coeficiente de Pearson, el Coeficiente de Spearman también presenta valores de -1 a 1. Puede ser interpretado como la descripción de cualquier cosa entre ninguna asociación ($p=0$) a una relación monótona perfecta ($p= -1$ o 1) (Schober & Schwarte, 2018).

Análisis de Clúster (CA)

El análisis de clúster identifica subgrupos significativos de unidades de estudio. El CA tiene como objetivo clasificar una muestra en un número pequeño de grupos basados en similitudes entre las unidades y diferencias entre los grupos. En el CA, los grupos se encuentran predefinidos. Este análisis implica como mínimo dos etapas: 1) realizar la medición de la similitud o asociación entre las entidades a fin de determinar cuántos grupos existen en

realidad y 2) describir las personas o variables con la finalidad de determinar su composición (Hair *et al.*, 1999).

Los métodos de CA se dividen en métodos jerárquicos (Ward, Centroide, Mediana) y no jerárquicos (algoritmo *K-medias*). Los primeros tienen como finalidad agrupar clusters para formar uno nuevo o bien separar alguno ya existente, dando origen a otros dos y minimizando alguna distancia o maximizando alguna medida de similitud, este procedimiento implica la construcción de dendrogramas. Por otra parte, los segundos se encuentran diseñados para clasificar individuos (no son válidos para variables) en una clasificación de K clusters, donde K se especifica a priori o bien se determina como una parte del proceso, en su lugar, asignan objetos a conglomerados una vez que el número de conglomerados está especificado (Hair *et al.*, 1999; Gallardo-San Salvador, 2011).

- *Método Ward*. En el método de Ward (método de suma de cuadrados incremental), la distancia entre dos conglomerados es la suma de los cuadrados entre dos conglomerados sumados para todas las variables. En el procedimiento de agrupación, la suma de los cuadrados dentro del conglomerado se minimiza para todas las particiones obtenidas mediante la combinación de dos conglomerados en un paso previo (Hair *et al.*, 1999; Rencher, 2002).
- *Método del Centroide*. En este método la similaridad entre dos grupos es la distancia entre sus centroides, lo cuales son los valores medios de las observaciones de las variables en el valor teórico del conglomerado. Cada vez que se agrupa a los individuos, se calcula un nuevo centroide y estos cambian a medida que se fusionan conglomerados (Hair *et al.*, 1999, Hair *et al.*, 2014). En ocasiones puede generarse confusión derivado de estos cambios, ya que existen casos donde la distancia

entre los centroides de un par puede ser menor que la distancia entre los centroides de otro par fusionado.

- *Método de la Mediana*. A través de este método, se evita la pérdida de las propiedades de los grupos pequeños derivados del método del centroide, esto a través de la suposición de que los grupos son de igual tamaño (CEACES, 2019). A través de esa estrategia, la distancia entre un individuo o grupo K de centroide k y el grupo formado por la fusión de los grupos I y J de centroides i y j viene dada por la mediana del triángulo i,j, k.
- *Algoritmo K-medias (K-means)*. Los procedimientos para agrupamientos no jerarquizados se denominan como agrupamiento K-medias. Donde el algoritmo divide las observaciones en un número de grupos especificado por el usuario y luego reasignando frecuentemente las observaciones hasta cumplir con algún objetivo numérico relacionado con el carácter distintivo del grupo (Jain, 2010; Hair *et al.*, 2014). Generalmente se usan una de las aproximaciones para asignar a las observaciones individuales de uno de los conglomerados (Hair *et al.*, 1999; Hancer & Karaboga, 2017):
 - 1) Como primer paso está seleccionar una semilla de conglomerado como centro de conglomerado inicial, y todas las unidades de estudio dentro de una distancia umbral (previamente especificada) se incluyen dentro de los conglomerados resultantes. Posteriormente, es necesario seleccionar otra semilla de conglomerados, continuando con esta asignación hasta que todos los objetos estén asignados.

- 2) *Umbral secuencial*: se comienza con la selección de una semilla de conglomerado, la cual incluye todos los objetos que caen dentro de una distancia que haya sido especificada con antelación.
- 3) *Umbral paralelo*: al principio se seleccionan varias semillas de conglomerado de manera simultánea y se asignan objetos dentro de la distancia umbral hasta la semilla más cercana. Al ir avanzando en este proceso, se puede ajustar las distancias para incluir más o menos objetos en los conglomerados.
- 4) *Optimización*: este procedimiento permite la reubicación de las unidades de estudio. Si durante la asignación de unidades una se acerca más otro conglomerado que no es el que tiene asignado en este momento, entonces un tratamiento de optimización cambia el objeto al conglomerado que se encuentre más cercano.

Análisis de Componentes Principales (PCA)

El análisis de PCA es una técnica multivariada que reduce la dimensión de una extensa base de datos, reduciendo el número de variables (componentes principales), las cuales sintetizan la mayor parte de la información contenida (Pérez-López, 2004). Produce varias combinaciones lineales de variables observadas, donde cada combinación lineal es un factor. Los factores resumen los patrones de correlaciones en la matriz de correlación observada (Tabachnick & Fidell, 2013).

El primer componente principal es la combinación lineal con la varianza máxima, esencialmente se busca una dimensión a lo largo de la cual las observaciones están separadas o extendidas al máximo. El segundo componente principal es la combinación lineal con la varianza máxima en una dirección ortogonal al primer componente principal y así sucesivamente. De manera general, los componentes principales definen diferentes dimensiones

de las definidas funciones discriminante o variables canónicas (Rencher, 2002).

6.5 Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)

La TRE es un método de resistividad multi-electrónica no destructivo que se utiliza en la geofísica para producir imágenes bidimensionales y tridimensionales que representan la variación espacial y temporal en la resistividad eléctrica del suelo y la roca, indicando la variación en el contenido de agua en estos medios (Cosentini *et al.*, 2012; Hernández-Díaz, 2019). También indica la dificultad que presenta la corriente eléctrica para pasar a través de un medio, en el suelo y roca, y varía según el contenido de agua, salinidad del agua y la distribución de los poros. Los rangos de valores van de 10^{-8} a $10^{15} \Omega \cdot m$, valores bajos indican bajo contenido de agua y valores altos indican vacíos que dificultan el paso de la corriente eléctrica (Díaz-Anaya, 2010; Rodríguez-Robles, 2016).

La TRE trabaja sobre perfiles, los cuales consisten en una serie de multielectrodos con una separación que estará en función del arreglo electrónico con el que se realizará el estudio y la profundidad que se busque alcanzar, a mayor separación de los electrodos, menor será la resolución de la imagen, pero se ganará mayor profundidad de prospección (Griffiths & Barker, 1993). Para realizar una TRE pueden utilizarse diferentes arreglos electrónicos, siendo los más utilizados Dipolo-Dipolo y Wenner-Schlumberger (Pérez-Hernández, 2019). Dependiendo del objetivo de la investigación, pueden sobreponerse diferentes mayados de arreglos y presentar una imagen TRE más robusta.

Las TRE comúnmente son usadas en la prospección geológica para representar las estructuras del subsuelo; sin embargo, también es aplicado a estudios hidrológicos, agrícolas y ambientales tanto en climas áridos, semiáridos y húmedos (Wang *et al.*, 1991; Sudha *et al.*, 2009; Rodríguez-Robles, 2016; Hernández-Ramos, 2019; Pérez-Hernández, 2019; Rizzo *et al.*, 2019).

En estudios hidrogeológicos las TRE son usadas para estimar los procesos de infiltración; por ejemplo, a través de la asociación directa entre la conductividad y el contenido de humedad del subsuelo que puede usarse para identificar las vías de infiltración en las rocas. Por otra parte, las TRE en series de tiempo han permitido estudiar los procesos de infiltración estacionales (Zaidi & Kassem, 2012; Rodríguez-Robles *et al.*, 2017; Hernández-Díaz, 2019; Tesfaldet & Puttiwongrak, 2019; Warsi *et al.*, 2019). Lo anterior, ayudaría a identificar y delimitar zonas de recarga hídrica, así como el entendimiento del proceso de recarga hacia un acuífero.

Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica, se define como la capacidad que presentan algunos materiales para transmitir una corriente eléctrica cuando es aplicado un voltaje. Es la magnitud inversa de la resistividad eléctrica; es decir, una alta resistividad es igual a una baja conductividad, y una baja resistividad es igual a una alta conductividad (Heaney, 2004; Hernández-Díaz, 2019) , su expresión es:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad Ec. (1)$$

Donde:

σ = Conductividad eléctrica

ρ = Resistividad Eléctrica

Díaz-Anaya (2010) menciona que la mayoría de las rocas no son buenas conductoras de corriente eléctrica, siendo prácticamente aislantes debido a que los minerales formadores de roca también lo son; no obstante, la presencia de poros y fracturas puede hacer que los valores de conductividad eléctrica se incrementen. En la Figura 16 se observan los valores típicos de conductividad eléctrica y resistividad de rocas.

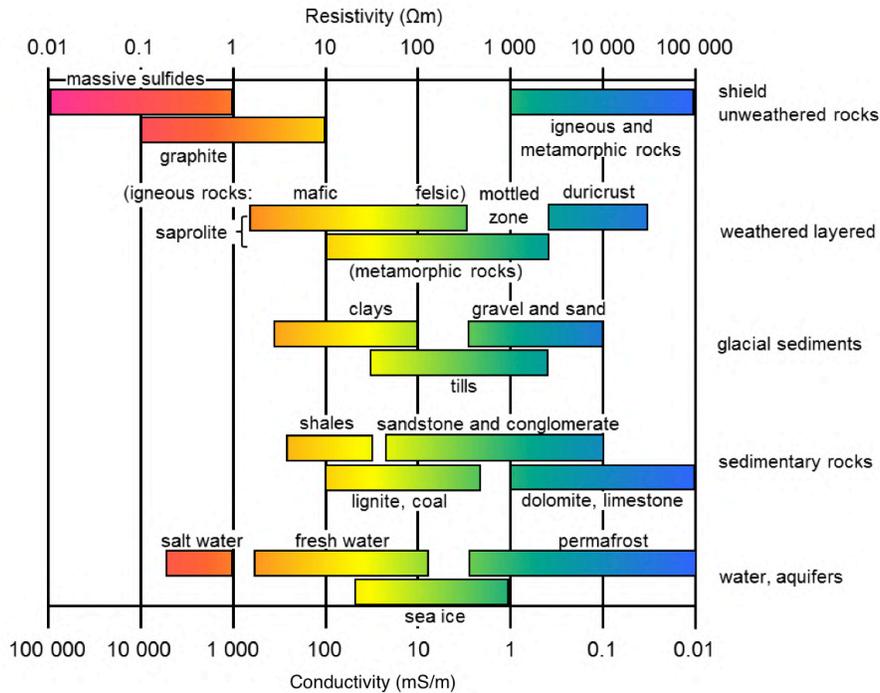


Figura 16. Conductividad eléctrica y resistividad de rocas comunes
Fuente: GeoSci (2020)

Conductividad Hidráulica

Como se mencionó anteriormente, la conductividad hidráulica (K), se define como la capacidad de infiltración, por medio del transporte de agua en un suelo permeable y es expresada por unidad de velocidad (Peinado-Guevara *et al.*, 2010).

Matemáticamente, la conductividad hidráulica es la constante de proporcionalidad lineal entre el caudal de agua que atraviesa un medio poroso saturado y el gradiente hidráulico ($\partial h/\partial l$) y se representa a través de la Ley de Darcy (Figura 17). La constante K es conocida como el coeficiente de conductividad hidráulica (Sánchez-San Román, 2009):

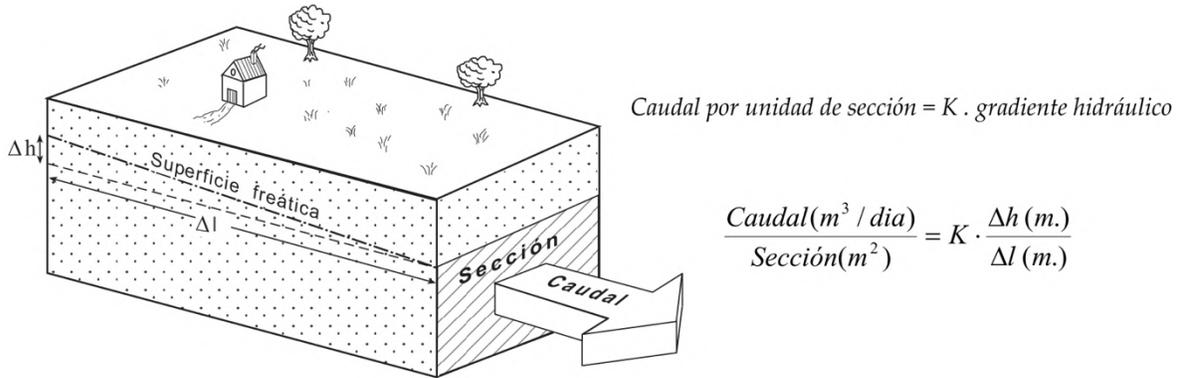


Figura 17. Esquema de la Ley de Darcy
Fuente: Sánchez-San Román (2009)

En rocas volcánicas la conductividad hidráulica por lo general es muy baja (10^{-12} a 10^{-8} m/s); sin embargo, depende de factores como la velocidad de enfriamiento, la viscosidad del magma y la desgasificación durante el enfriamiento así como del grado de fracturamiento e intemperismo que estas presenten (Singhal & Gupta, 2010; Fitts, 2013b; Earle, 2015). En la Figura 18 se pueden observar las conductividades hidráulicas para las rocas comunes y algunos materiales.

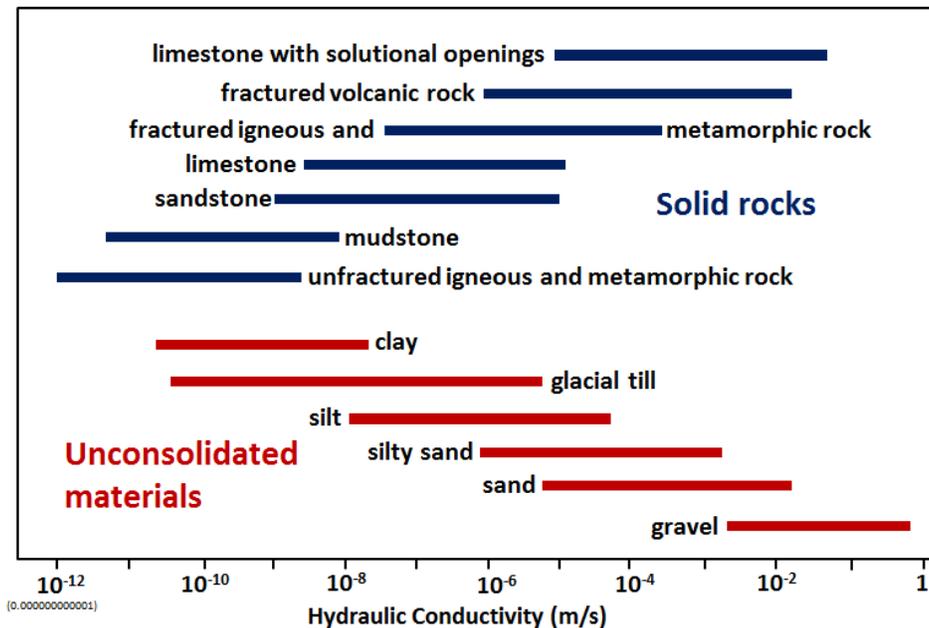


Figura 18. Conductividad hidráulica de rocas y materiales
Fuente: Earle (2015)

A partir de imágenes de resistividad eléctrica 2D es posible estimar el valor de la conductividad hidráulica a través del empleo de una ecuación de regresión tal y como se realizó en el estudio de Yasir *et al.* (2018).

La ecuación de regresión es la siguiente:

$$\bar{y} = a + bX \quad \text{Ec. (2)}$$

El Coeficiente de Regresión b es:

$$b = \frac{n \sum XY - \sum(X) \sum(Y)}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad \text{Ec. (3)}$$

La constante de gradiente a (fracción del eje vertical Y) es:

$$a = \frac{\sum Y - b \sum X}{n} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde:

X= Resistividad en Ohm/m

Y= Supuesta conductividad hidráulica (valor de K, estándar de Bouwer)

\bar{Y} = Conductividad hidráulica calculada de la ecuación de regresión

n= número de datos para cada variable

La relación entre la conductividad hidráulica y la resistividad eléctrica es uno de los enfoques más difíciles y desafiantes. Esta relación puede tener una correlación positiva y negativa, lo cual depende de las características de la roca como su porosidad, tipo de fracturamiento, permeabilidad, velocidad de flujo, etc. (Khalil & Monterio-Santos, 2009; Vázquez-Rodríguez, 2014).

Es posible observar una relación lineal directa entre la conductividad hidráulica y la resistividad de una roca de acuerdo con el tamaño de grano que presente, y será inversa cuando existan variaciones en la porosidad; así mismo, será posible

observar una relación no lineal debido a la heterogeneidad o variaciones de la composición litológica. La forma curvilínea o rectilínea se encontrará determinada por la dirección del flujo de agua, la estratificación y el tipo de roca (Vázquez-Rodríguez, 2014; Sattar *et al.*, 2016).

7 METODOLOGÍA

La realización de este estudio se llevó a cabo en cuatro fases. La **Fase I** consistió en la revisión de literatura, la selección de variables a emplear y la obtención de datos crudos. La **Fase II** consistió en el tratamiento de datos obtenidos en la primera fase. En la **Fase III** se realizó el análisis estadístico correspondiente y finalmente en la **Fase IV** la interpretación y análisis de resultados (Figura 19). Se describirán las fases en las que consistió este trabajo.

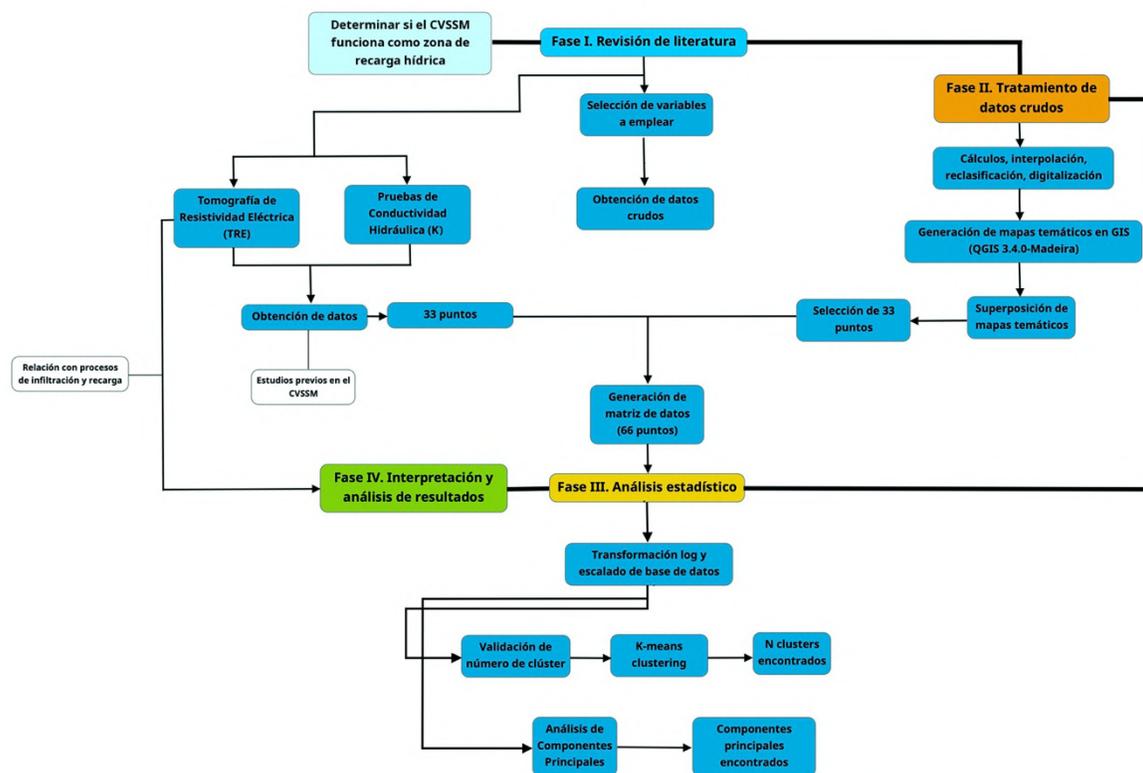


Figura 19. Esquema metodológico del estudio
Fuente: elaboración propia

7.1 Revisión de literatura

Selección de variables

Con base en la revisión de literatura descrita en el *Marco Teórico*, se seleccionaron aquellas variables más apropiadas para la realización de este estudio, teniendo en cuenta principalmente factores de tiempo y económicos. Se seleccionaron un total de 12 variables (Tabla 4):

Tabla 4. Variables seleccionadas para este estudio

Variable	Unidad
Altitud	msnm
Pendiente	%
Temperatura	°C
Tipo de suelo	Categórica
Tipo de vegetación	Categórica
Precipitación	mm/año
Geología	Categórica
Humedad relativa	%
Evapotranspiración potencial	mm/año
Uso de suelo	Categórica
Coefficiente de escurrimiento	Adimensional
Conductividad hidráulica	m/día

Obtención de datos crudos

Se obtuvieron los datos en formato Shapefile/ Ráster/ BIL de las bases de datos de acceso libre de INEGI con la cartografía temática a escala 1:250 000 así como datos climáticos (precipitación, viento, temperatura, humedad relativa, y radiación solar) en formato SWAT provenientes del Sistema de Reanálisis Predicción Climática (CFRS por sus siglas en inglés). Las variables se trabajaron en el SIG QGIS V. 3.4.0 *Madeira*.

Pruebas de Conductividad Hidráulica

Se realizó la búsqueda de estudios previos dentro del CVSSM que hayan hecho pruebas de conductividad hidráulica para obtener información más precisa y puntual dentro de la zona de estudio. Se encontraron los estudios de Puente-Castillo (2014) y Hernández-Ramos (2019). En la sección 7.2.11 *Identificación de los puntos de estudio* se abordarán más a detalle.

7.2 Tratamiento de datos crudos

Uso de suelo y tipo de vegetación

Se tomó como base el conjunto de datos vectoriales (SHP) de la carta de Uso de Suelo y Tipo de Vegetación Serie V, Conjunto Nacional (Claves F14-4 y F14-7) del Instituto Nacional de Estadística (INEGI) del año 2013 (Anexo 3).

Tipo de suelo

Se empleó el conjunto de datos vectoriales (SHP) de la carta edafológica Serie II, Conjunto Nacional (Claves F14-4 y F14-7) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) del año 2007 (Anexo 4).

Geología

Para dicha variable, se usó como base el mapa geológico empleado por Rodríguez-Robles *et al.* (2017), el cual se complementó con el mapa geológico generado por Tristán-González *et al.*, (2009) (Figura 7).

Cálculo de altitud

Se empleó el Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) en formato BIL para el Estado de San Luis Potosí con la finalidad de extraer las Curvas de Nivel del área de estudio. Las curvas se representaron en intervalos de 100 msnm con el objetivo de facilitar la visualización a nivel espacial (Anexo 5).

Cálculo de pendiente

Para la determinación de la pendiente del área de estudio, se empleó también el Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) en formato BIL para el Estado de San Luis Potosí, el cual fue convertido a un ráster de pendientes a través del complemento *Análisis de Terreno*. Posteriormente, se utilizó la función *r.reclass* para reclasificar el ráster de pendientes en función de los valores de categoría, de tal manera que se obtuvieron rangos de pendiente en porcentaje (Anexo 6).

Cálculo de precipitación

Para el cálculo de esta variable, se emplearon los datos obtenidos del CFSR procedentes de nueve Puntos de Referencia Climáticos aledaños al área de estudio durante un periodo de 34 años (1979-2013). Cada punto de referencia se encuentra a una distancia promedio de 31.54 km en línea recta (Figura 20).

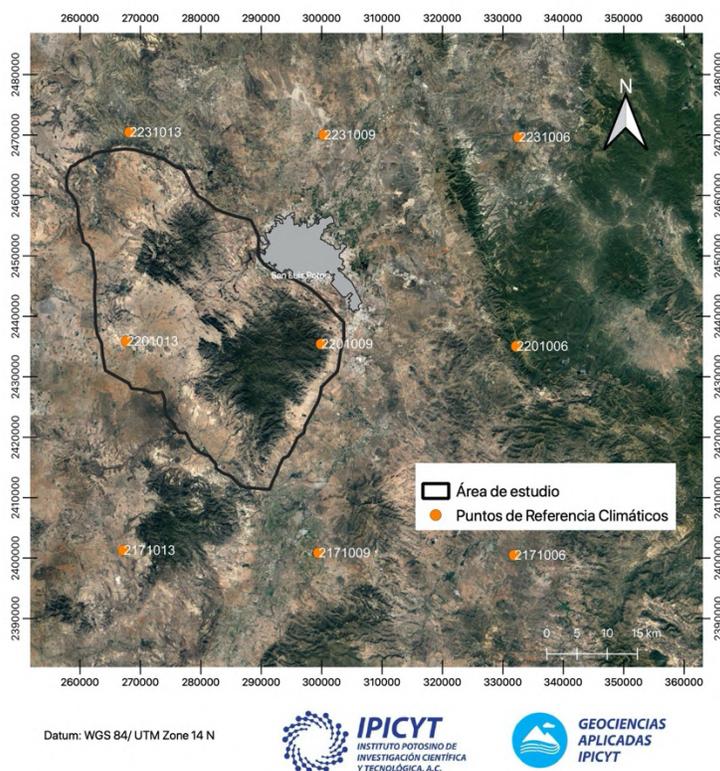


Figura 20. Localización de Puntos de Referencia Climáticos

Fuente: elaboración propia

Posteriormente, se procedió a determinar la precipitación acumulada anual en cada Punto de Referencia Climático, con la finalidad de obtener la respectiva precipitación promedio para el periodo de tiempo (Anexo 2A)

Con los datos obtenidos, se aplicó el Método de Interpolación Distancia Inversa Ponderada (IDW por sus siglas en inglés) en QGIS. Finalmente, se obtuvo el mapa de interpolación para la precipitación (Anexo 7).

Cálculo de Evapotranspiración Potencial

Se empleó el Método de Thornthwaite (1948) para hallar la Evapotranspiración Potencial (ETP) basándose en la temperatura media y la duración astronómica del día para una latitud específica.

Como describen Montaner-Salas & Sánchez-Almohalla (1988), este calcula un **índice de calor mensual** (i) a partir de las temperaturas medias diarias según la fórmula:

$$i = (t/5)^{1.514} \quad \text{Ec. (5)}$$

Obteniendo un índice de calor anual como la suma de los doce valores del índice de calor mensual para meses teóricos de 30 días y 12 horas diarias de sol. A partir de esos datos propone la siguiente fórmula:

$$ETP_0 = 16 (10t/I)^a \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde:

ETP₀= evapotranspiración potencial mensual no corregida en mm

t= temperatura media mensual en °C

I= índice de calor anual

a= función compleja de I igual a:

$$675x 10^{-9} I^3 - 771x 10^{-7} I^2 + 1972x 10^{-5} I + 0.49239 \quad \text{Ec. (7)}$$

Los valores de ETP_0 obtenidos fueron corregidos en función de la duración del mes y el número de horas sol, variables en relación a la latitud. Dichos datos fueron obtenidos de la Calculadora Solar NOAA. Se aplicó la siguiente fórmula para el cálculo de la **ETP corregida**:

$$ETP = ETP_0 * N/12 * d/30 \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde:

ETP= evapotranspiración potencial mensual

ETP₀= evapotranspiración mensual no corregida

N= es el número de horas luz para el día 15 de cada mes

d= número de días por mes

Se realizaron estos cálculos de forma mensual con la finalidad de obtener un promedio histórico del periodo 1979-2013. El procedimiento se realizó para los 9 Puntos de Referencia Climáticos (Anexo 2B). Finalmente, se obtuvo el mapa de interpolación para la ETP (Anexo 8).

Coeficiente de escurrimiento

Para el coeficiente de escurrimiento se decidió utilizar el Coeficiente de Prevert (Treviño-Garza *et al.*, 2002), este coeficiente contempla tres condiciones: uso de suelo, textura de suelo y pendiente del terreno (Tabla 5).

Tabla 5. Coeficientes de escurrimiento de Prevert

Uso de suelo	Pendiente	Textura		
		Gruoso	Media	Fina
Bosque	0-5	0.10	0.30	0.40
	5-10	0.25	0.36	0.50
	10-30	0.30	0.40	0.60
	>30	0.32	0.42	0.63

Pastizal	0-5	0.15	0.35	0.45
	5-10	0.30	0.40	0.55
	10-30	0.35	0.45	0.65
	>30	0.37	0.47	0.68
Agricultura	0-5	0.30	0.50	0.60
	5-10	0.40	0.66	0.70
	10-30	0.50	0.70	0.80
	>30	0.53	0.74	0.84

Tabla 5 (continuación)

Dicho coeficiente se complementó con el coeficiente determinado por Chow *et al.* (1993) (Tabla 6), debido a que el Coeficiente de Prevert no considera el uso de suelo para zona urbana.

Tabla 6. Coeficientes de escorrentía de Chow

Uso de suelo	Pendiente	Textura		
		Grueso	Media	Fina
Zona Urbana	0-5	0.70	0.81	0.92
	5-10	0.76	0.85	0.93
	10-30	0.88	0.91	0.94
	>30	0.95	0.95	0.95

Cálculo de humedad relativa

Para el cálculo de esta variable se emplearon datos del CFSR. Se determinó el promedio de humedad relativa anual en porcentaje, para obtener la respectiva humedad relativa promedio para el periodo de 1979-2013. Dicho procedimiento se realizó en cada Punto de Referencia Climático (Anexo 2C).

Con los datos obtenidos, se aplicó el método de IDW en QGIS. Finalmente, se obtuvo el mapa de interpolación para la humedad relativa (Anexo 9).

Cálculo de temperatura

Se emplearon datos del CFSR. Se determinó el promedio de temperatura anual en °C, con la finalidad de obtener la respectiva temperatura promedio para el

periodo de 1979-2013. Dicho procedimiento se realizó en cada Punto de Referencia Climático (Anexo 2D).

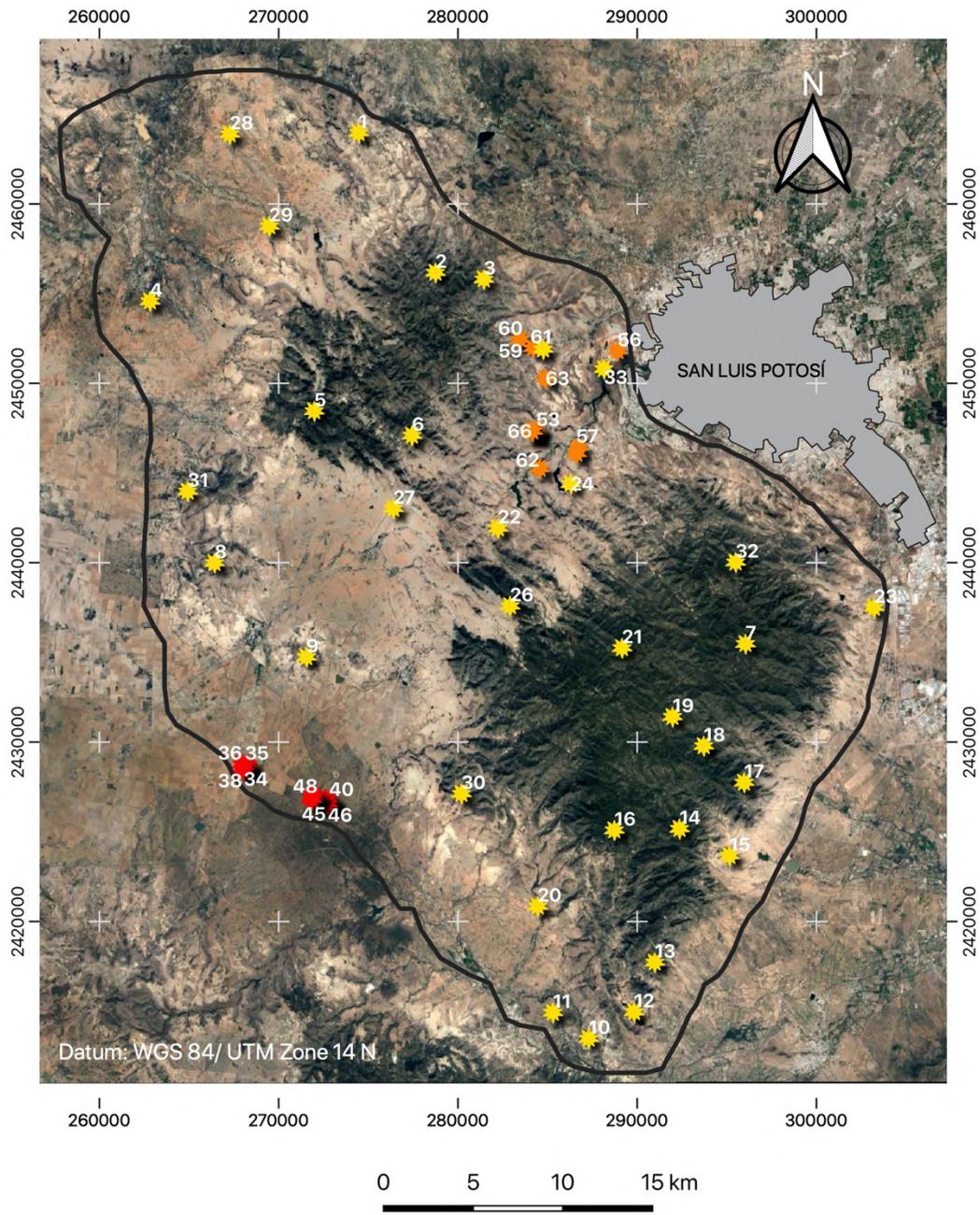
Con los datos obtenidos, se aplicó el método IDW en QGIS. Finalmente, se obtuvo el mapa de interpolación para la temperatura (Anexo 10).

Identificación de puntos de estudio

Se realizó la superposición de capas (geología, uso de suelo y tipo de vegetación, tipo de suelo, altitud y pendiente) en formato Shapefile con empleo del SIG QGIS 3.4.0 *Madreira* con la finalidad de definir los puntos de estudio. Se determinaron 33 puntos considerando características heterogéneas y de distribución espacial (ID 1 a 33).

Así mismo, se agregaron los puntos de trabajo realizados por Puente-Castillo (2014) y Hernández-Ramos (2019), los cuales fueron reetiquetados con ID 34 a 52 e ID 53 a 66 respectivamente. La localización exacta de estos puntos se encuentra en el Anexo 11.

En total, se obtuvieron 66 puntos distribuidos dentro del área de estudio (Figura 21).



LEYENDA

- Área de estudio
- ★ Puente-Castillo (2014)
- ★ Hernández-Ramos (2019)
- ★ Este estudio



Figura 21. Localización de puntos en el área de estudio

Determinación de la conductividad hidráulica (K)

Para la determinación de la conductividad hidráulica, primero se tomaron los datos obtenidos en los estudios de Puente-Castillo (2014) y Hernández-Ramos (2019), para transformarlos en metros por día (m/d).

En el caso de los puntos restantes (ID 1 a 33), se revisó literatura especializada y se optó por emplear valores reportados de pruebas de conductividad hidráulica realizadas en unidades geológicas similares; así mismo, se consideraron otras características (pendiente, altitud, cercanía a zona de fallas y fracturas, etc) al momento de asignar un valor con la finalidad de que sea más representativo a la zona de estudio. Dichos valores fueron transformados a metros por día (m/d). A continuación, se realiza una descripción de los estudios empleados.

Para la determinación de K de los puntos 1 y 2 se empleó el estudio de Geldon (2004), teniendo como criterio que dicho trabajo realizó pruebas de K en una unidad geológica (Riolita de Handley) con pendiente y altitud similar a la del área de estudio. Este mismo estudio se utilizó para asignar el valor del punto 4 debido a que realizaron una prueba sobre flujos de lava de riolita a riodacita, una composición similar se presenta en el punto 4 ya que se encuentra sobre la unidad geológica Latita Portezuelo, la cual químicamente se clasifica de riolita a riodacita como se mencionó anteriormente.

De los trabajos de White *et al.* (2008) y Ochoa-González *et al.* (2015) fueron asignados los valores de los puntos 3, 13, 19, 21, 27, 30 y 32, debido a que las pruebas de K realizadas se hicieron sobre una riolita fracturada cercana a zona de fallas, siendo similares a la ubicación de estos puntos dentro del área de estudio. Para el caso de los puntos 5, 6, 7 y 8, los valores asignados corresponden a pruebas de K realizadas sobre una riolita. Para el punto 9, se optó asignarle el mismo valor que el 8 debido a la relativa cercanía espacial y similitud en unidad geológica. El mismo criterio se usó para el punto 16, al cual se le asignó el valor del punto 7.

Los valores de K asignados a los puntos 10, 12, 14, 15 se asocian a depósitos de ignimbrita tal y como se determinó en el trabajo de White *et al.* (2008). Derivado del mismo estudio, para los puntos 17, 22, 24 y 26 el valor asignado se asocia a ignimbrita con presencia de fallas y fracturas. El valor del punto 18 fue el mismo que del 17 debido a la cercanía de estos y a que se encuentran en la misma unidad geológica.

En cuanto a los puntos 20, 23, los valores de K asignados corresponden a unidades geológicas similares reportados por CONAGUA (2018a). Al punto 31 se le asignó el mismo valor del 20 ya que se encuentran en la misma unidad geológica.

Para el punto 11 se asignó el valor determinado por Fitts (2013b), el cual corresponde a basalto. El valor asignado al punto 28 fue el calculado por Hart *et al.* (2006), correspondiente a una lutita con baja porosidad. Al punto 29 se le dio el valor calculado por Green *et al.* (2004) que se asocia con aluvión.

El valor asignado al punto 25 fue el mismo que determinó Puente-Castillo (2014) en el punto 66, lo anterior debido a la cercanía de estos puntos y a que ambos pertenecen a la misma unidad geológica. El mismo criterio se aplicó al punto 33, ya que tomó el valor determinado en el punto 64 de ese estudio.

Finalmente, se obtuvo la matriz de datos teniendo en cuenta todas las variables (altitud, pendiente, temperatura, tipo de suelo, tipo de vegetación, precipitación, geología, humedad relativa, ETP, uso de suelo, coeficiente de escurrimiento y conductividad hidráulica) para cada punto de estudio (Anexo 22).

7.3 Análisis Estadístico Multivariado

Se utilizó el software RStudio v. 1.3.959 (Copyright RStudio Inc., Boston, MA, USA) para realizar el pretratamiento de datos, la estadística descriptiva, la matriz de correlaciones, el CA y el PCA.

Pretratamiento de la base de datos

Para obtener resultados óptimos en la aplicación de las técnicas estadísticas multivariadas, se requirió que los datos tuvieran una distribución normal univariada y multivariada, además de una homogeneidad de varianzas (homocedasticidad) (Marín-Celestino *et al.*, 2019). Para ello, se empleó el siguiente preprocesamiento de datos:

Prueba de Shapiro-Wilk

Se empleó la prueba de Shapiro-Wilk (Shapiro & Wilk, 1965) con la finalidad de verificar las condiciones de prueba de normalidad univariada. La estadística de la prueba se define como:

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)}\right)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Ec. (9)}$$

Donde:

$x_{(i)}$ = número que ocupa la i -ésima posición en la muestra (con la muestra ordenada de menor a mayor).

$\bar{x} = (x_1 + \dots + x_n) / n$ es la media muestral

Las variables a_i se calculan con la siguiente ecuación:

$$(a_1, \dots, a_n) = \frac{m^T V^{-1}}{(m^T V^{-1} V^{-1} m)^{1/2}} \quad \text{Ec. (10)}$$

Donde:

$m = (m_1, \dots, m_n)^T$

Siendo m_1, \dots, m_n son los valores medios del estadístico ordenado, de variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas, muestreadas de distribuciones normales. V es la matriz de covarianzas de ese estadístico en orden. El valor de W puede oscilar entre 0 y 1.

Prueba de Royston

Se empleó la prueba de Royston con la finalidad de verificar las condiciones de prueba de normalidad multivariada (Royston, 1983).

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S)

La mayoría de los métodos estadísticos multivariados requieren una distribución de datos logarítmica normal (Marín-Celestino *et al.*, 2018). Por lo tanto, se aplicaron las estadísticas de K-S para evaluar la bondad de ajuste de los datos a una distribución logarítmica normal.

La estadística de Kolmogorov-Smirnov se define como (Canavos, 1988):

$$D_n = \max_x |S_n(x) - F_0(x)| \quad \text{Ec. (11)}$$

Donde x es el i -ésimo valor observado en la muestra, cuyos valores se han ordenado previamente de menor a mayor. $S_n(x)$ es un estimador de probabilidad de observar valores menores o iguales que x . $F_0(x)$ es la probabilidad de observar valores menores o iguales que x cuando H_0 es verdadera. D_n es la mayor diferencia absoluta observada entre la frecuencia acumulada observada $S_n(x)$ y la frecuencia acumulada teórica $F_0(x)$, obtenida a partir de la distribución de probabilidad que se especifica como hipótesis nula.

Finalmente, se comprueba el nivel de significancia, si es *menor* que 0.05 la distribución no es normal, si es *mayor* que 0.05 la distribución es normal.

Estandarización

El escalado de características en la base de datos se realizó mediante la estandarización para abordar las condiciones óptimas del análisis multivariado. La estandarización reduce la diferencia en las variaciones en las variables y evita que las medidas de disimilitud como la distancia euclidiana se ve gravemente afectada (Marín-Celestino *et al.*, 2019). Cada variable se estandarizó a sus puntajes Z correspondientes, que se calcularon a través de la siguiente ecuación:

$$Z_i = \frac{(X_i - mean)}{S} \quad Ec. (12)$$

Donde Z_i es el puntaje Z estandarizado, X_i es el valor de cada variable. *mean* y *S* son el valor medio y la desviación estándar de cada variable, respectivamente.

Prueba de Esfericidad de Bartlett (homocedasticidad)

Esta prueba tiene por objetivo evaluar la homocedasticidad, el cual se refiere al supuesto de que las variables dependientes exhiban iguales niveles de varianza a lo largo del rango predictor de variables (Hair *et al.*, 1999).

La prueba de esfericidad de Barlett se emplea para verificar que las variables analizadas se correlacionan de manera satisfactoria o, en otras palabras, si la matriz de correlación es también la matriz de identidad (Shrestha & Kazama, 2007; Marín-Celestino *et al.*, 2019). Valores pequeños (menos de 0.05) del nivel de significancia indican una gran relación entre variables.

Kaiser Meyer Olkin (KMO)

Se realizó la estadística de Kaiser Meyer Olkin (KMO) para probar la precisión e idoneidad de los datos para PCA, en la matriz de correlación de parámetros.

KMO se utiliza para medir la adecuación del muestreo, lo que indica la proporción de la varianza compartida; es decir, lo que podría ser causado por factores desconocidos. Un valor alto (cercano a 1) comúnmente indica que PCA puede ser útil (Marín-Celestino *et al.*, 2018). La prueba de KMO se expresa a través de la siguiente ecuación (Pérez-López, 2004):

$$KMO = \frac{\sum_j \sum_{h \neq j} r_{jh}^2}{\sum_j \sum_{h \neq j} r_{jh}^2 + \sum_j \sum_{h \neq j} a_{jh}^2} \quad \text{Ec. (13)}$$

Donde r_{jh} son los coeficientes de correlación observados entre las variables X_j y X_h y a_{jh} son los coeficientes de correlación parcial entre las variables X_j y X_h .

Valores de KMO más grandes que 0.9 indican una alta validez para aplicar un PCA, valores entre 0.5 y 0.9 indican validez suficiente y valores menores a 0.5 son considerados no válidos.

Análisis de Correlación

Con base en los resultados obtenidos en la prueba de Shapiro-Wilk se determinó el método de correlación más adecuado. Si el valor de significancia (*p-value*) es >0.05 , la distribución se considera normal y se recomienda el coeficiente de correlación de Pearson. Por otra parte, si el valor de significancia es <0.05 los datos tienen una distribución no normal y se debe utilizar la correlación de Spearman (Rodríguez-Rodríguez, 2020).

Análisis de Clúster

Se empleó el método de K-medias. El proceso de agrupación inició con la elección inicial de observaciones y numeración del grupo deseado para crear centros iniciales (centros de grupo), estableciendo a partir de algunos valores

iniciales conocidos puntos iniciales. Cada observación se colocó al azar en el grupo más cercano, creando grupos temporales. La agrupación de K-medias se formuló como la suma de los errores al cuadrado como se muestra en la siguiente ecuación (Marín-Celestino *et al.*, 2019):

$$K = \sum_{l=1}^k \sum_{x \in C_l} ||x - m_l||^2 \quad \text{Ec. (14)}$$

Donde $X = (x_1, \dots, x_n)$ son los datos; $m_l = \sum_{x \in C_l} \frac{x}{n_l}$ se conoce como el centroide del clúster C_l , $1 \leq l \leq K$; n_l es el número de objetos de datos en el clúster y K es el número de clústeres.

Se calcularon los centros de gravedad de cada grupo temporal y estos se convierten en los nuevos centros de grupo. Los datos se dividieron aleatoriamente e iterativamente fueron reasignados a otro grupo en función de la distancia más cercana al centro del grupo. El procedimiento finaliza cuando no hay reasignación a ningún dato de un clúster a otro (Steinley, 2006).

Análisis de Componentes Principales

El propósito principal de PCA es explicar la varianza dentro del conjunto de datos mientras se reduce la dimensionalidad de la estructura de datos. PCA se llevó a cabo para transformar las variables correlacionadas originales en un conjunto más pequeño de variables no correlacionadas llamadas Componentes Principales (PC_s) (Marín-Celestino *et al.*, 2018; Marín-Celestino *et al.*, 2019).

Los PC_s son las variables no correlacionadas (ortogonales) obtenidas multiplicando las variables correlacionadas originales con el vector propio, y se expresan mediante cargas. Las cargas indican la contribución relativa de una variable dada a cada una de los PC_s extraídos (Majkić-Dursun *et al.*, 2018).

Los componentes principales (PC_s) se expresan por la siguiente ecuación (Juahir *et al.*, 2011):

$$Z_{ij} = a_{i1}x_{1j} + a_{i2}x_{2j} + a_{i3}x_{3j} + \dots + a_{im}x_{mj} \quad \text{Ec. (15)}$$

Donde donde Z es el puntaje del componente; a es la carga del componente; x es el valor medido de la variable; i es el número de componente, j es el número de muestra y r indica el número total de variables.

7.4 Análisis de Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE)

Para el análisis y asociación de las TRE con los procesos de infiltración superficial, subsuperficial y/o de recarga hídrica, se emplearon datos ya existentes para la zona de estudio.

Se analizaron imágenes 2D resultantes de las TRE, a las cuales se les realizó un mallado considerando el espacio entre electrodos (eje X) y la profundidad (eje Y), para obtener cuadrantes con una determinada dimensión (m²). Posteriormente, se ubicó el centroide para cada cuadrante y se obtuvo el valor de resistividad ($\Omega \cdot m$) correspondiente.

En cada centroide se calculó la conductividad hidráulica (eje Z) correspondiente a partir de su valor de resistividad, esto se realizó empleando la Ecuación 2 mostrada en la sección 6.5.2. Una vez obtenidos los valores correspondientes de cada centroide se procedió a aplicar la ecuación de regresión inversa:

$$B = \frac{n(\sum X^1 Y) - (\sum X^1)(\sum Y)}{n\sum X^{12} - (\sum X^1)^2} \quad \text{Ec. (16)}$$

El coeficiente B se encuentra dado por:

$$\text{Ec.} \quad Y_k = A + \frac{B}{X} \quad (17)$$

El coeficiente A se encuentra dado por:

$$A = \bar{Y} - BX' \quad \text{Ec.(18)}$$

Donde:

X= Resistividad en Ohm/m

X'= 1/X

Y_k= conductividad hidráulica calculada de la ecuación de regresión inversa

Y = Conductividad hidráulica calculada de la ecuación de regresión

n= número de datos para cada variable

Los valores obtenidos de K fueron presentados en una figura de imagen 2D con su respectiva equivalencia de resistividad. Finalmente, se contrastó la correlación entre la conductividad hidráulica (eje X) y la resistividad eléctrica (eje Y). Las características de los estudios previos empleados para estos cálculos se describen a continuación.

TRE en la Sierra de San Miguelito

En el estudio realizado por Rodríguez-Robles *et al.* (2017) se hicieron 3 TRE en la SSM con un arreglo Wenner-Switch. La descripción y localización de los puntos se observan en la Tabla 7 y en la Figura 22, respectivamente.

Tabla 7. Descripción de los perfiles geoelectricos realizados

Perfil	Coordenada (UTM)		Descripción
	X	Y	
SM10-2	293172.7	2435966.3	Ubicada cerca de un arroyo intermitente, con escasa vegetación y mucha roca expuesta
SM09-2	287650.1	2432960	Ubicada en las faldas de una lomita con presencia de un manchón de encinos
SM08-2	285907.8	2427617.9	Presencia de un tunar de cardonas que va adentrándose hacia el bosque de pinos

Tabla 7 continuación

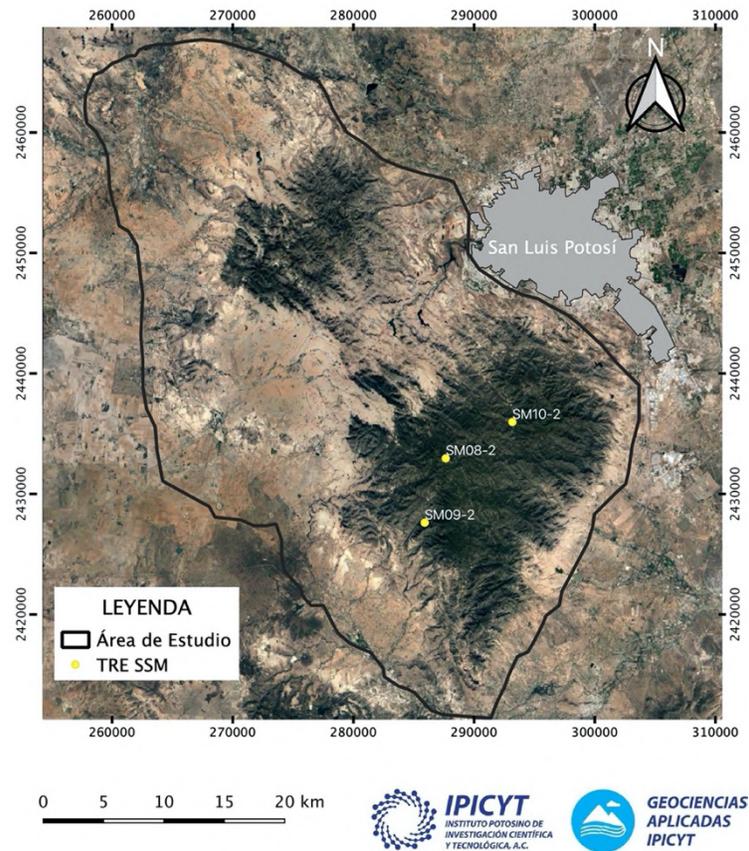


Figura 22. Localización de TRE en la SSM
Fuente. Elaboración propia a partir de Rodríguez-Robles (2017)

Así mismo, se realizaron otras 12 TRE (3 por mes) en diferentes fechas (octubre de 2013, diciembre de 2013, febrero de 2014 y mayo de 2014) con un equipo SYSCAL KID SWITCH-24. Se empleó un arreglo de 24 electrodos con un metro de espacio entre ellos y una configuración Wenner-Switch, lo cual permitió obtener información de la resistividad a una profundidad aproximada de 2.5 metros. Debido a que estas últimas TRE fueron realizadas en el mismo lugar solo que en meses diferentes, se optó por emplear únicamente tres, las cuales se encuentran relacionadas con el tipo de vegetación presente (bosque de pino, bosque de encino y bosque mixto).

TRE en Mexquitic de Carmona, S.L.P.

Se realizaron dos TRE en el Cañón Pericos, empleando los arreglos Dipolo-Dipolo con electrodos equidistantes cada 3 m. La tomografía A-A' tuvo una dirección N 37 °O y la tomografía B-B' una dirección N 30° E (Ramos-Leal & Torres-Gaytan, 2020) (Tabla 8 y Figura 23).

Tabla 8. Descripción de los perfiles geoelectricos realizados

Perfil	Longitud (m)	Coordenada inicial (UTM)		Coordenada final (UTM)		Arreglo cuadripolar
		X	Y	X	Y	
A-A'	105	258404.9	2463603.8	258467	2463519.1	Dipolo-Dipolo
B-B'	69	258464	2463590	258425	2463535	Dipolo-Dipolo

Fuente: Ramos-Leal & Torres-Gaytan, 2020

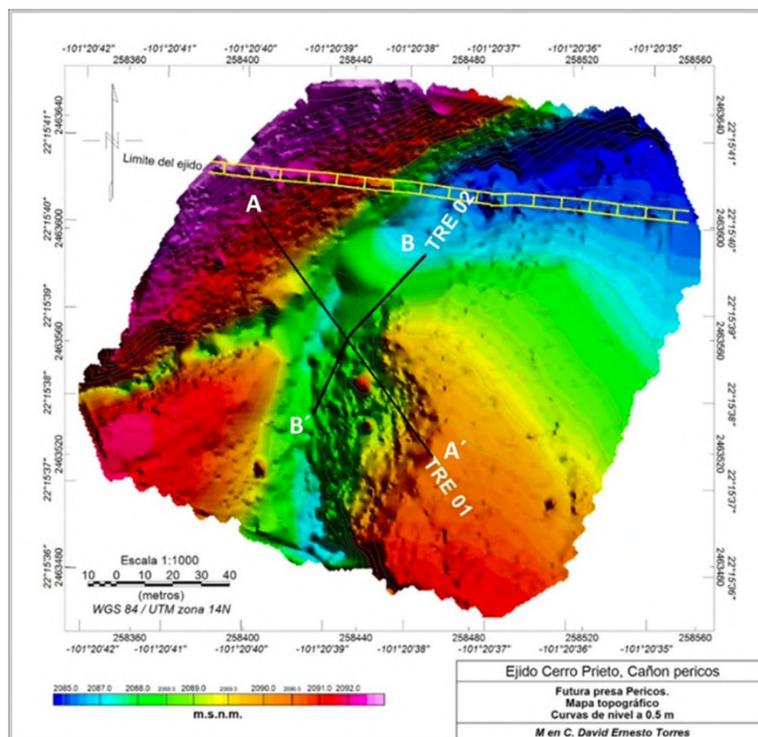


Figura 23. Localización de las TRE en Mexquitic de Carmona
Fuente: Ramos-Leal & Torres-Gaytan, 2020

8 RESULTADOS Y DISCUSIONES

En esta sección se realizará la interpretación y análisis de resultados de manera detallada y su relación con el proceso de recarga hídrica dentro del CVSSM.

8.1 Conductividad hidráulica (K)

Con los datos de conductividad hidráulica estimados para los 66 puntos de estudio se realizó una interpolación IDW para conocer la distribución espacial de esta variable dentro del área de estudio. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 24.

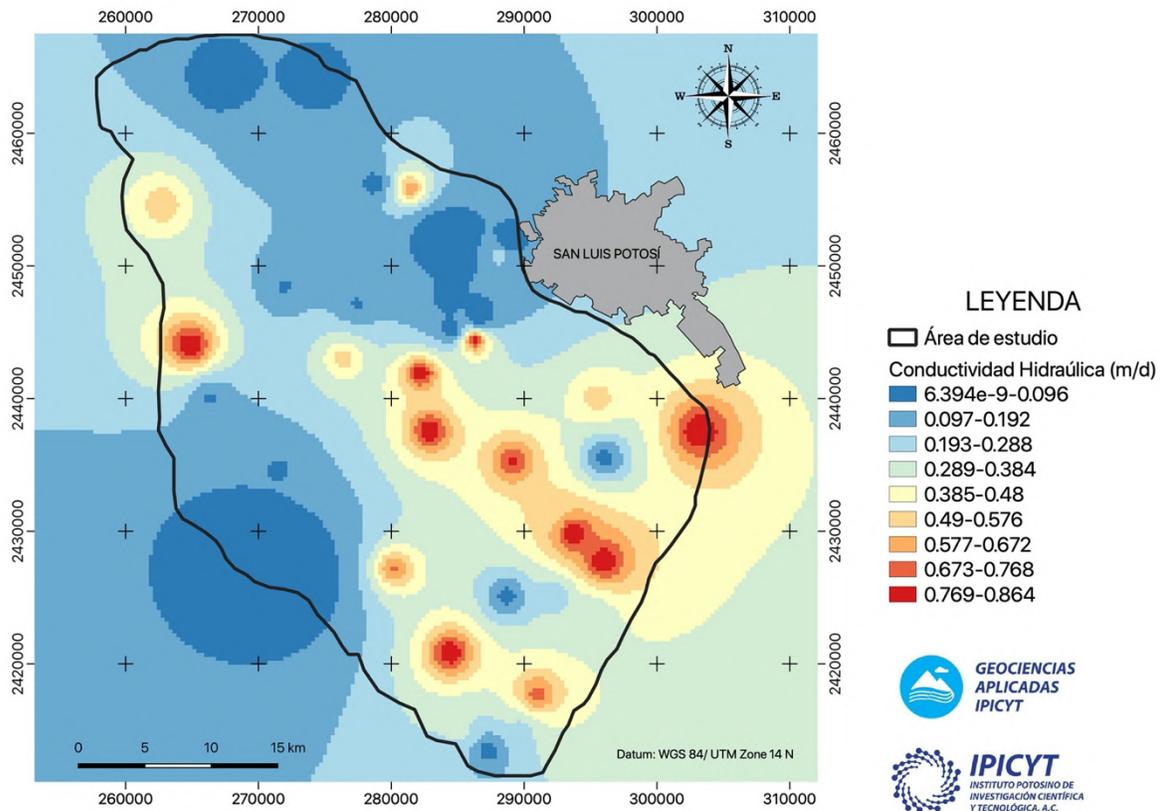


Figura 24. Distribución de la conductividad hidráulica dentro del área de estudio

Se puede observar que la K mínima es de 6.394×10^{-9} m/d, mientras que la K máxima es de 0.864 m/d. Estos valores son considerados bajos y propios de una geología de origen volcánico (Singhal & Gupta, 2010; Earle, 2015).

Las mayores conductividades hidráulicas se distribuyen en la parte sur y sureste y podrían ser asociadas al sistema de fallas normales presentes en el CVSSM. Se ha documentado que las fallas puede originar variaciones en las propiedades hidráulicas de las unidades geológicas, ocasionando un aumento en la conductividad hidráulica (Geldon, 2004; Fitts, 2013b; Ochoa-González *et al.*, 2015). Estudios en el VSLP han asociado las mayores conductividades hidráulicas a fallas tal y como se menciona en los estudios de Carrillo-Rivera *et al.* (1992) y Hernández-Constantino (2020).

Si bien dentro de un sistema de fallas es común encontrar fracturamiento de rocas, en algunas partes del CVSSM estas podrían selladas por minerales de origen hidrotermal, limitando la conductividad hidráulica y por ende la recarga hacia el acuífero profundo (Ramos-Leal *et al.*, 2007b).

De manera general los valores de K obtenidos son considerados bajos, limitando la recarga hídrica, esto coincide con las descripciones hidrogeológicas del CVSSM realizadas en otros estudios (IPICYT, 2007; Noyola-Medrano *et al.*, 2009; López-Álvarez, 2012). Uno de los factores a tomar en cuenta al explicar los bajos valores de K es la edad geológica, ya que se ha reportado una tendencia decreciente en la conductividad hidráulica de las rocas volcánicas con el aumento de la edad geológica desde varios lugares (Singhal & Gupta, 2010), cabe resaltar que las unidades geológicas del CVSSM van de 20.5 ± 0.5 a 31 ± 0.7 Ma tal y como se describió en el *Marco Físico*.

Debido a la baja conductividad hidráulica de las rocas, la zona ha sido propicia para la construcción de presas (Noyola-Medrano *et al.*, 2009), dentro del área de estudio es posible encontrar cuatro presas: Presa San José, Presa Cañada de Lobo, Presa el Peaje y Presa El Potosino (Anexo 12).

No obstante, a pesar de que la recarga hídrica es limitada, se han detectado zonas de infiltración. El estudio realizado por Hernández-Díaz (2019) demostró la

existencia de zonas de infiltración en la Presa el Peaje, en concordancia con la morfología y los patrones de fallas de la región. De igual manera, el estudio realizado por Rodríguez-Robles *et al.* (2017) detectó a través de métodos geofísicos una infiltraciones derivados de la interacción vegetación-medio geológico en la parte más alta de la SSM.

8.2 Análisis Estadístico Multivariado

Pretratamiento de la base de datos

Prueba de Shapiro-Wilk

Los resultados de la prueba de Shapiro-Wilk (Tabla 9) revelaron que todas las variables de estudio presentan valores de significancia (*p-value*) <0.05, lo que sugiere que cuentan con una distribución no normal univariada; por lo tanto, se empleó el método de correlación de Spearman.

Tabla 9. Resultados de la prueba Shapiro-Wilk

Variable	Shapiro-Wilk	
	W	<i>p-value</i>
Altitud	0.814	1.16E-07
Pendiente	0.611	6.22E-12
Temperatura	0.861	2.79E-06
Tipo de suelo	0.850	1.22E-06
Tipo de vegetación	0.666	5.83E-11
Precipitación	0.665	5.52E-11
Humedad	0.803	5.78E-08
ETP	0.904	9.09E-05
Uso de Suelo	0.614	6.99E-12
Coefficiente de Escurrimiento	0.824	2.09E-07
K	0.701	2.76E-10
Geología	0.805	6.52E-08

Prueba de Royston

Una distribución no normal multivariada fue observada en la base de datos basada en la prueba de Royston, con un valor de H de 192.78 y un *p-value* de 4.87E-39.

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

La prueba de Kolmogorov-Smirnov evaluó el ajuste de las variables transformadas a una distribución logarítmica normal. El valor obtenido de D fue de 0.544 con un *p-value* de 2.20E-16.

Prueba de Esfericidad de Bartlett

La prueba de esfericidad de Bartlett validó que las variables analizadas se correlacionan adecuadamente, presentó un valor D igual a 0.544 con un *p-value* de 7.44E-15, indicando una gran relación entre variables.

Kaiser Meyer Olkin (KMO)

La prueba de KMO reveló que la base de datos tuvo una validez suficiente para la aplicación de un PCA, ya que presentó una medida de adecuación del muestreo (MSA por sus siglas en inglés) de 0.77 de manera general (Tabla 10).

Tabla 10. Resultados de la prueba KMO

Variables	KMO MSA
Altitud	0.60
Pendiente	0.74
Temperatura	0.82
Tipo de suelo	0.69
Tipo de vegetación	0.38
Precipitación	0.71
Humedad	0.84
ETP	0.81
Uso de Suelo	0.83
Coefficiente de Escurrimiento	0.38
K	0.79
Geología	0.84
General	0.77

Análisis de Correlación

El Coeficiente de correlación de Spearman fue calculado para medir y establecer la interrelación entre dos variables. Los resultados del análisis de correlación son mostrados en la Tabla 11. Para clasificar los niveles de asociación entre variables, se tomó como criterio el establecido por Marín-Celestino *et al.*, (2019), un valor de r mayor a 0.7 indica una alta correlación y un valor de r en el rango de >0.5 a ≤ 0.7 indica una correlación moderada, siendo el mismo criterio para las correlaciones inversas.

Se encontró una correlación muy alta (0.93) entre la temperatura y la ETP, esto puede ser explicado por el aumento de la temperatura del aire debido a la radiación solar absorbida por la atmósfera y el flujo de calor emitido por el planeta, lo que genera que el aire transfiera energía a la vegetación ejerciendo un cierto control sobre la evapotranspiración. Fang *et al.* (2016) obtuvieron una correlación similar (0.92) a la de este estudio entre estas dos variables, atribuyendo este hecho a lo antes mencionado. En la zona de estudio la evapotranspiración ha ido en aumento en los últimos años derivado del aumento de temperatura (Mata-Martínez, 2011).

Así mismo, se observó una alta correlación (0.86) entre la humedad y el uso de suelo. Esto debido a que los mayores porcentajes de humedad se encuentran en suelos cercanos a cuerpos de agua superficial como presas, además de suelos con cierta actividad. En regiones áridas uno de los principales usos del suelo es la producción agrícola, la cual tiene como factor limitante la precipitación pluvial tanto en cantidad como en distribución; por lo tanto, el contenido de humedad del suelo determinará en gran medida la productividad de los sistemas agrícolas (López-Martínez & Guerrero-Alvarado, 1999; Shaxson & Barber, 2005; Salcedo-Pérez *et al.*, 2007). Como se mencionó anteriormente, en la SSM se presenta tanto agricultura temporal como de riego, dando preferencia a cultivos anuales cuyas variedades tienen requerimientos mínimos de agua, tales como: sorgo, maíz, chícharo y pastos (García de Alba V., 2008; IPICYT & SEGAM, 2018).

Se observó una asociación moderada (0.66) entre la precipitación y la humedad. Estas variables se correlacionan debido a que la cantidad máxima de precipitación está en función de mayores cantidades de humedad; por lo tanto, el contenido de humedad es un indicativo de la cantidad de lluvia que puede ocurrir en una región y por lo tanto el potencial de infiltración que pudiera ocurrir. En la Huasteca Potosina las altas cantidades de humedad corresponden con las altas precipitaciones (>2000 mm anuales), mientras que en el VSLP las bajas cantidades de humedad corresponden con las bajas precipitaciones (350-400 mm anuales) presentes en esa zona (IPICYT, 2007). Estudios previos en otras regiones, obtuvieron correlaciones similares de 0.46 y 0.59 entre estas dos variables (Owoade *et al.*, 2012; Huang *et al.*, 2019).

Igualmente se encontró una correlación moderada (0.62) entre la pendiente y el coeficiente de escurrimiento. Diversas investigaciones han analizado el efecto significativo de la pendiente sobre el escurrimiento. De manera general, con el aumento de la pendiente, habrá un mayor escurrimiento y por ende la infiltración será menor; por otra parte, una menor pendiente ocasionará una disminución en el escurrimiento lo cual permitirá una mayor infiltración (Nassif & Wilson, 1975; Flores-López *et al.*, 2003; Fang *et al.*, 2015; Morbidelli *et al.*, 2015; Mu *et al.*, 2015). En algunas zonas del CVSSM se observaron mayores altitudes que corresponden a mayores coeficientes de escurrimiento, por lo que confirmaría lo anteriormente mencionado.

Por otro lado, también se observó una correlación moderada (0.52) entre la temperatura y la geología. Esto podría ser explicado por los cambios de temperatura que pueden meteorizar las rocas y fragmentarlas. La alteración de las rocas en el CVSSM podría ser el resultado de las variaciones diarias y estacionales de temperatura y humedad relativa. (Tarbuck & Lutgens, 2005; Puente-Castillo, 2014). Se ha reportado que las variaciones de temperatura en los afloramientos de las unidades del CVSSM dan lugar a una erosión en las esquinas de los bloques de las unidades volcánicas, lo que implica que pierdan la

angulosidad, siendo susceptibles a deslizamientos y escorrentía (Puente-Castillo, 2014). En términos de recarga hídrica, una roca volcánica meteorizada presenta una baja capacidad de infiltración, lo que resulta en una alta escorrentía y al mismo tiempo en algunas zonas alta infiltración debido a las fragmentaciones formadas (Singhal & Gupta, 2010; Urrutia *et al.*, 2019).

Se observó una correlación moderada (0.53) entre la ETP y la geología, esto podría ser explicado por la meteorización. La evapotranspiración es gobernada por diversas variables como radiación solar, velocidad del viento, humedad atmosférica, humedad del suelo y la temperatura. Esta última variable al incrementar, incrementa la evapotranspiración, mientras que también puede alterar, erosionar o fragmentar las rocas, lo que podría explicar que en algunas zonas hubiera mayor o menor infiltración (Tarbuck & Lutgens, 2005; Segura-Castruita & Ortiz-Solorio, 2017).

Finalmente, se encontró una correlación moderada de 0.52 entre la precipitación y el uso de suelo. Esta asociación se debe a que los cambios en el uso del suelo pueden modificar los patrones de lluvia y al mismo tiempo disminuir la cantidad de infiltración y/o recarga. Por ejemplo, en zonas urbanas la cantidad de humedad es menor debido a la falta de cobertura vegetal, por ende las precipitaciones disminuirán a comparación de otras zonas donde hay mayor cobertura vegetal, ocasionando una disminución en la infiltración (Jáuregui, 2004; Pabón *et al.*, 2014; Picone & M. Campo, 2014).

Por otro lado es importante mencionar que se observó una correlación inversa alta (-0.89) entre la temperatura y la humedad. Esto se debe a que al aumentar la temperatura, disminuye la humedad y viceversa (Ayllón, 2003). En el Altiplano Potosino, donde se encuentra el área de estudio, se han reportado valores de humedad bajos y temperaturas altas (IPICYT, 2007). Esto significa que la temperatura podría ser un indicador importante de áreas con potencial de infiltración y/o recarga en la zona de estudio.

También se encontró una correlación inversa alta (-0.88) entre la humedad y la ETP. Esto significa que la humedad disminuye por el aumento de la ETP y viceversa. En la región se tiene un gradiente de humedad en la atmósfera que va de la Huasteca (más húmeda por la influencia del Golfo de México) hacia el Altiplano donde la humedad tiene dificultad en llegar, ligado a las altas temperaturas presentes en esta zona (40 °C) provocan que la capacidad de evaporación exceda la precipitación en el Altiplano y por ende el aumento de la ETP, lo cual se verá reflejado en bajos niveles infiltración hacia el suelo (IPICYT, 2007; Hernández-Constantino, 2020).

Igualmente, se observó una correlación inversa alta de -0.78 y -0.82 entre el uso de suelo y la ETP y el uso de suelo y la temperatura, respectivamente. Esto se puede explicar porque con un uso de suelo agrícola, la ETP se ve afectada por las características del cultivo (altura, densidad, cobertura, etc.) y por el método de riego, pudiendo alterar el microclima, las características del cultivo o la capacidad de absorción de agua del suelo y por ende la ETP (FAO, 2006a). Así mismo, la temperatura juega un papel importante debido a que afecta la tasa de desarrollo de la planta, si la temperatura es muy alta puede ocasionar una disminución del crecimiento del cultivo mientras que temperaturas muy bajas ocasionan un crecimiento más lento (FAO, 2001; Chaves-Barrantes & Gutiérrez-Soto, 2016). En el caso de un uso de suelo urbano, comúnmente se presentan parches de temperatura muy alta en las zonas urbanas (isla de calor urbano), Sharifi & Lehmann (2015) obtuvieron una correlación inversa de -0.78 entre el efecto de la isla de calor y la relación de vegetación urbana, sugiriendo que a mayor presencia de vegetación en la mancha urbana la temperatura disminuirá.

De igual manera, se observó una correlación inversa alta (-0.82) entre la precipitación y la ETP. Esto se puede explicar porque en zonas áridas y semiáridas, aproximadamente 90% de la precipitación se puede perder por la evapotranspiración disminuyendo la recarga y la descarga de los acuíferos en los

ecosistemas (Glenn *et al.*, 2007). Estudios en otras regiones han encontrado correlaciones negativas similares (-0.80) entre estas dos variables (Vergopolan & B. Fisher, 2016).

Así mismo, se encontró una correlación inversa alta (-0.75) entre la temperatura y la precipitación. Esto significa que la precipitación disminuye por el aumento de la temperatura. En un estudio se reporta que altas temperaturas están relacionadas a déficits de agua, lo cual explicaría que estas dos variables pueden ser indicadores de la disminución o aumento de la infiltración y/o recarga (He *et al.*, 2015). Otros estudios también han obtenido correlaciones negativas similares (-0.71) entre estas dos variables, atribuyendo que los años húmedos redujeron la insolación solar y disminuyeron la temperatura y con en ello el aumento de la precipitación (Nicholls *et al.*, 2004).

También se encontró una correlación inversa moderada (-0.69) entre el uso de suelo y la geología. Es bien sabido que la planificación del uso de suelo debe ser antecedida por estudios geológicos y geomorfológicos previos en una determinada zona, esto con la finalidad de realizar las evaluaciones de riesgos a fin de determinar el uso de suelo más adecuado (Lee *et al.*, 1988; Wiggering, 2014). El estudio realizado por Bartelletti *et al.* (2017) indicó que las áreas agrícolas en terrazas son más propensas a los deslizamientos que las zonas boscosas, siendo determinado por el grado de mantenimiento de estas, con lo cual se provocaría una mayor escorrentía y con ello menor infiltración y/o recarga en esas zonas.

Por otro lado una correlación inversa moderada de -0.61 fue observada entre el tipo de suelo y el uso de suelo. Esto puede ser explicado debido a que las actividades agrícolas, ganaderas y la urbanización alteran las propiedades del suelo y al mismo tiempo los procesos de infiltración. Por ejemplo, el cultivo continuo, afecta las propiedades físicas de muchos suelos, disminuyendo el contenido de materia orgánica (Nanganoa *et al.*, 2019). Los suelos con menor

contenido de materia orgánica tienden a retener menor humedad, que se ve reflejado en menor infiltración hacia el subsuelo.

Se observó una correlación inversa de -0.59 entre la humedad y la geología. La influencia de la humedad sobre las unidades geológicas aún no se ha explorado completamente; sin embargo, se ha reportado que la resistencia a la fractura en la roca disminuye cuando la humedad relativa es alta, con lo cual la infiltración tendería a aumentar (Nara *et al.*, 2012).

Finalmente, se encontró una correlación inversa (-0.53) entre la pendiente y la geología. Esta correlación puede ser entendida desde un punto de vista geomorfológico, esto a través de la estabilidad de la pendiente en función de los macizos rocosos presentes en una determinada zona (Okubo, 2004; Pantelidis, 2009; Puente-Castillo, 2014). Dentro del CVSSM, Puente-Castillo (2014) realizó un estudio de peligro geomorfológico con la finalidad de determinar la estabilidad de las unidades volcánicas presentes, encontrando que algunos bloques formados por las unidades volcánicas de la Riolita de San Miguelito y la Ignimbrita Cantera se encuentran inestables y susceptibles a deslizamientos, principalmente en las zonas de Escalerillas, Mesa de Los Conejos y Cañada de Lobo.

Fernández *et al.* (2008) realizaron un análisis de correlación entre las pendientes y la fuerza de los macizos rocosos. En este estudio se encontraron correlaciones positivas que van desde 0.058 a 0.717, lo cual atribuyen al efecto de los procesos de disolución en las rocas de carbonato, así como la elevación tectónica y la actividad erosiva que ha resultado en pendientes demasiado empinadas.

Tabla 11. Matriz de correlación de Spearman para las variables de estudio

Variable	Altitud	Pendiente	Temperatura	Tipo de suelo	Tipo de vegetación	Precipitación	Humedad	ETP	Uso de suelo	CoefEsc	K	Geología
Altitud	1											
Pendiente	0.12	1										
Temperatura	0.05	-0.34	1									
Tipo de suelo	0.16	-0.2	0.48	1								
Tipo de vegetación	-0.15	-0.06	0.07	0	1							
Precipitación	-0.12	0.28	-0.75	-0.12	0.07	1						
Humedad	0.06	0.32	-0.89	-0.45	-0.11	0.66	1					
ETP	0.03	-0.38	0.93	0.39	0.14	-0.82	-0.88	1				
Uso de suelo	0.01	0.43	-0.82	-0.61	-0.06	0.52	0.86	-0.78	1			
CoefEsc	0.3	0.62	-0.11	0.31	-0.29	0.27	0.09	-0.27	0.05	1		
K	0.48	0.27	-0.3	-0.05	-0.09	0.22	0.4	-0.31	0.32	0.32	1	
Geología	-0.44	-0.53	0.52	0.45	0.16	-0.18	-0.59	0.53	-0.69	-0.3	-0.41	1

Nota: Las correlaciones positivas (> 0.5) se resaltan en rojo y las negativas (< -0.5) en negra

Análisis de Clúster (CA)

Se aplicó un CA usando el algoritmo K-medias con la finalidad de identificar y delimitar grupos de puntos de muestreo con base en sus similitudes y diferencias entre cada clúster. Los puntos de muestreo se clasificaron en tres clústers principales como se muestra en la Figura 25.

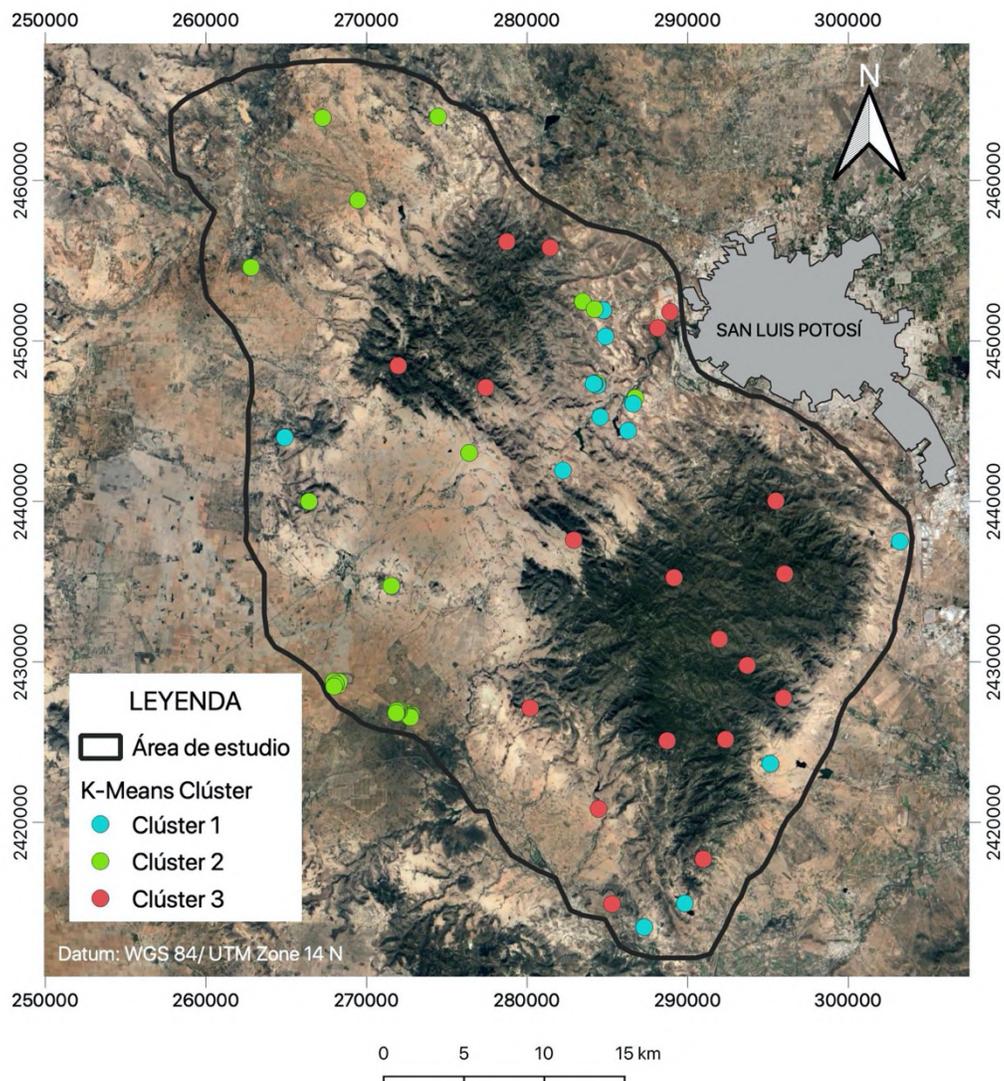


Figura 25. Distribución espacial de los clústers

Así mismo, las características de cada clúster encontrado son descritas en la siguiente tabla (Tabla 12).

Tabla 12. Estadísticas de los tres clústers encontrados en el análisis de agrupamiento de K-medias.

Variables		VARIABLES NUMÉRICAS		
		Clúster		
		1 (n= 15)	2 (n=32)	3 (n=19)
Altitud (msnm)	Mínimo	1900	2000	1900
	Media	2046.67	2100	2368.42
	Máximo	2200	2300	2800
	S.D.	74.32	71.84	260.45
Temperatura (°C)	Mínimo	13.30	13.40	13.30
	Media	13.60	13.58	13.42
	Máximo	13.41	13.70	13.60
	S. D.	0.07	0.07	0.09
Precipitación (mm)	Mínimo	500	440	490
	Media	513.33	501.25	514.21
	Máximo	520	520	520
	S. D.	6.17	18.27	9.61
Humedad (%)	Mínimo	58	56	57
	Media	58.3	56.41	58.21
	Máximo	59.00	58	59
	S.D.	0.46	0.80	0.79
ETP (mm)	Mínimo	668	671	668
	Media	671.27	675.47	670.47
	Máximo	677	678	675
	S.D.	2.017	2.06	2.20
Coeficiente de escurrimiento	Mínimo	0.15	0.15	0.30
	Media	0.20	0.31	0.44
	Máximo	0.4	0.6	0.88
	S.D.	0.09	0.09	0.15
K (m/d)	Mínimo	0.005	6.3936E-09	0.004
	Media	0.297	0.07	0.44
	Máximo	0.864	0.54	0.864
	S.D.	0.37	0.13	0.34
		VARIABLES CATEGÓRICAS		
Pendiente (%)	0-5	86.67	84.38	36.84
	5-10	13.33	15.63	36.84
	10-30	0	0	21.05
	>30	0	0	5.26
Tipo de suelo	Regosol	73.33	28.13	10.53
	Feozem	20	0	78.95
	Planosol	0	65.63	0
	Litosol	0	3.13	10.53
	Fluvisol	6.67	0	0
Tipo de vegetación	Matorral crasicaule	6.67	9.38	5.26
	Chaparral	0	0	42.11
	Bosque encino	0	0	10.53
	Pastizal natural	93.33	90.63	21.05
	Bosque pino	0	0	21.05
Uso de suelo	Suelo desnudo	100	21.88	100
	Agrícola temporal	0	78.13	0
Geología	Riolita	0	12.50	57.89
	Ignimbrita	100	21.88	36.84
	Basalto	0	0	5.26
	Aluvión	0	62.50	0
	Lutita	0	3.13	0

Clúster 1

El clúster 1 se localiza en el noreste y sureste del área de estudio e incluye el 23% del total de puntos analizados. Este clúster se caracteriza por presentar pendientes poco pronunciadas (0-5%) en la mayor parte del terreno, lo cual puede explicar que se observe el menor valor promedio del coeficiente de escurrimiento (0.20). Respecto a la recarga hídrica, se afirma que pendientes de menor grado maximizarán el contacto del agua con la superficie, disminuyendo el escurrimiento e incrementando la infiltración al subsuelo, favoreciendo la recarga (Matus *et al.*, 2009).

Se caracteriza por tener en su totalidad una composición geológica de ignimbritas, rocas que presentan una baja porosidad y conductividad hidráulica. No obstante, se observó una K promedio mayor (0.297 m/d) en comparación con el clúster 2, esto debido a que en la parte sureste del área de estudio algunos puntos se encuentran cercanos a zonas de fallas, lo cual podría aumentar la conductividad hidráulica (Geldon, 2004; Ochoa-González *et al.*, 2015). Por otro lado, en la parte central existen zonas de infiltración en la Presa El Peaje derivadas del sistema de fallas presentes, como fue determinado por Hernández-Díaz (2019), y que podrían aumentar la K en este grupo.

Aunque la vegetación dominante es el pastizal natural, y es asociada a zonas de recarga hídrica, en este clúster no se dan las condiciones para favorecer la infiltración, ya que solo ocurre en regiones con elevación topográfica mayor a 2300 msnm (Peñuela-Arévalo & Carrillo-Rivera, 2012), mientras que en este clúster la altitud promedio es de 2046.67 msnm.

Clúster 2

El clúster 2 se localiza en la parte suroeste y noroeste del área de estudio e incluye el 48% del total de puntos analizados. Se caracteriza por tener en su mayoría una composición geológica de aluvión, que tiende a presentar una alta conductividad hidráulica (Green *et al.*, 2004; Rukundo & Doğan, 2019). También favorecido porque la mayor parte de la superficie es plana, con pendientes de 0-5% y un coeficiente de escurrimiento menor (0.30) a diferencia del clúster 3 (0.44).

Por lo antes mencionado, se esperaría una mayor conductividad hidráulica; sin embargo, se observó la menor K promedio (0.07 m/d) a diferencia del clúster 1 (0.29 m/d) y del clúster 3 (0.44 m/d). Esto se podría explicar porque en la superficie donde se ubican estos puntos, los suelos predominantes son planosoles, suelos de baja K que se desarrollan en planicies (INEGI, 2002; IPICYT & SEGAM, 2018). Por lo tanto se puede confirmar que solo hay infiltración superficial.

En temporadas húmedas dichos suelos se inundan y esa agua es aprovechada para el riego de cultivos (INEGI, 2002; IPICYT & SEGAM, 2018), cabe resaltar que el uso de suelo predominante es el agrícola. Si bien estudios han reportado que las zonas agrícolas tienen una alta capacidad de recarga (Ansari *et al.*, 2016; Rukundo & Doğan, 2019), esto depende de patrones climáticos como: temperatura, humedad, precipitación y evapotranspiración.

Tal es el caso del clúster 2, donde la recarga se ve limitada por los altos niveles de ETP presentes, a diferencia de los clústers 1 y 3. Lo que también explicaría la menor presencia de humedad (56%), a diferencia de los otros grupos.

A pesar de que en el clúster 2 la composición geológica (aluvión) tiene la capacidad de infiltrar agua, factores como el tipo de suelo y la ETP lo limitan a una infiltración superficial, impidiendo una recarga hídrica al acuífero profundo.

Clúster 3

El clúster 3 se localiza en la parte sur y noreste del área de estudio e incluye el 29% del total de puntos analizados. Se caracteriza por presentar la mayor altitud promedio (2368 msnm) a diferencia del clúster 1 (2046 msnm) y 2 (2100 msnm). El terreno es más complejo por grandes pendientes de 10-30 y >30%, rangos que no estaban presentes en los clústers 1 y 2. Estudios previos han reportado que las pendientes más pronunciadas reducen el contacto del agua con la superficie, aumentando el escurrimiento y reduciendo la infiltración y por lo tanto la recarga hacia el acuífero (Fang *et al.*, 2015; Morbidelli *et al.*, 2015; Mu *et al.*, 2015; Ansari *et al.*, 2016; Rukundo & Doğan, 2019). Esto se puede confirmar al observar que en este grupo hay el valor promedio más alto del coeficiente de escurrimiento (0.44), en comparación con el clúster 1 (0.20) y 2 (0.31).

La composición geológica dominante es la riolita, seguido de la ignimbrita. Estas unidades geológicas de origen volcánico presentan una muy baja porosidad y la K generalmente está controlada por una red irregular de pequeñas fracturas, que vienen de un sistema de fallas presente localizadas en el CVSSM (Carrillo-Rivera *et al.*, 1992; Geldon, 2004; Fitts, 2013b; Ochoa-González *et al.*, 2015). Lo anterior, podría explicar que en este clúster se observa la mayor K promedio (0.44 m/d) (Tabla 12) a diferencia de los clústeres 1 (0.29 m/d) y 2 (0.07 m/d), debido a que la mayoría de los puntos dentro de este grupo se localizan cerca de fallas y fracturas.

A diferencia de los clústers 1 y 2, en el clúster 3 hay vegetación de chaparral, bosque de pino y bosque de encino, los cuales han sido asociados con zonas de recarga hídrica (Peñuela-Arévalo & Carrillo-Rivera, 2012). No obstante, en el caso de los bosques de encino, estudios previos han reportado infiltraciones superficiales hasta 50 cm de profundidad en el área de estudio, derivado de la interacción vegetación-roca (Rodríguez-Robles *et al.*, 2017).

Análisis de Componentes Principales (PCA)

Se realizó un PCA para establecer las variables que determinan los diferentes procesos de infiltración y/o de recarga en el CVSSM. El PCA fue aplicado a la matriz de datos que consistió en 66 observaciones y 12 variables con el objetivo de. Los resultados del PCA se muestran en la Tabla 13 y en la Figura 26.

Se extrajeron 4 Componentes Principales (PC1, PC2, PC3, PC4) con un eigenvalue >1, lo que representa el 77.88% de la varianza total en el conjunto de datos (Tabla 13). Los valores en negrita representan la carga más alta y la contribución de las variables al componente principal correspondiente.

Tabla 13. Resumen de las cargas del Análisis de Componentes Principales

Variables	Matriz de componentes			
	PC1	PC2	PC3	PC4
Altitud	0.328	0.444	-0.259	0.644
Pendiente	0.520	0.570	0.140	-0.278
Temperatura	-0.909	0.185	-0.136	0.104
Tipo de suelo	-0.491	0.395	0.440	0.306
Tipo de vegetación	-0.107	-0.415	0.588	0.280
Precipitación	0.568	-0.156	0.704	0.127
Humedad	0.936	-0.141	-0.004	0.030
ETP	-0.928	0.073	-0.102	0.103
Uso de Suelo	0.916	-0.181	-0.099	-0.057
Coefficiente de Escurrimiento	0.140	0.783	0.363	-0.317
K	0.530	0.206	-0.056	0.452
Geología	-0.798	-0.138	0.317	-0.075
Eigenvalue	5.293	1.642	1.395	1.017
Varianza (%)	44.106	13.683	11.626	8.471
Acumulado (%)	44.106	57.789	69.415	77.886

El primer componente (PC1) explica el 44.10% de la varianza total. Se observó una fuerte correlación negativa de -0.92, -0.90 y de -0.79 entre la ETP, la temperatura y la geología y una alta correlación positiva entre la humedad (0.93), uso de suelo (0.91), precipitación (0.56), conductividad hidráulica (0.53) y la pendiente (0.52). El PC1 indica que las principales variables como la conductividad hidráulica, la precipitación y la humedad pueden favorecer la

infiltración, mientras que la recarga se ve limitada por las unidades geológicas presentes en la zona de estudio, los altos niveles de ETP y de temperatura. La correlación inversa indica que a medida que baje la ETP, la temperatura y cambien las unidades geológicas la conductividad hidráulica, la precipitación, y la humedad aumentarían y con ello la infiltración y la recarga.

Estudios previos confirman lo antes mencionado, pues reconocen que en regiones semiáridas como en el CVSSM existen déficits hídricos por la alta evapotranspiración y temperatura, y por los bajos contenidos de humedad, provocando baja infiltración de agua y limitando la recarga de los acuíferos (Montenegro & Ragab, 2010; Coelho *et al.*, 2017). Lo anterior se pudo corroborar en el Clúster 2, que si bien presentó características (uso de suelo y geología) que permitirían una alta capacidad de infiltración y recarga, las condiciones de alta ETP y temperatura, y baja humedad no permiten la infiltración al subsuelo, reflejando la más baja K en este grupo.

Cabe resaltar que en cuanto al uso de suelo, en años recientes se ha visto un alto crecimiento urbano en las faldas del CVSSM (Grupo Sierra de San Miguelito A.C., 2009), otros estudios han reportado que la recarga generalmente aumenta dentro de las áreas urbanas. (Sharp, 2010; Wakode *et al.*, 2018); sin embargo, no hay investigaciones que confirmen lo anterior en el área de estudio.

Así mismo, las unidades geológicas del CVSSM juegan un papel importante en los procesos de infiltración y recarga. Estas unidades geológicas se caracterizan por presentar una baja conductividad hidráulica, lo cual limita la infiltración y la recarga; sin embargo, el sistema de fallas en algunas zonas del CVSSM puede ocasionar un aumento en la conductividad hidráulica (Ochoa-González *et al.*, 2015; Matsumoto & Shigematsu, 2018). Tal y como se observó en el Clúster 1, en donde se han detectado zonas de infiltración en la Presa El Peaje derivado de este sistema de fallas (Hernández-Díaz, 2019).

El segundo componente (PC2) explica el 13.68% de la varianza total. En este componente se observaron correlaciones positivas entre el coeficiente de escurrimiento (0.783) y la pendiente (0.570), y cabe mencionar que también resultaron asociados significativamente en el análisis de correlaciones (Tabla 11). Esto puede ser explicado porque la pendiente juega un papel primordial en el escurrimiento, pendientes de menor grado maximizarán el contacto del agua con la superficie, disminuyendo el escurrimiento y aumentando la infiltración y la recarga (Matus *et al.*, 2009). Esto se pudo observar en el análisis de clúster, donde los clústers 1 y 2, con pendientes menos pronunciadas presentaron un menor coeficiente de escurrimiento, mientras que el clúster 3 con mayor pendiente presentó un mayor coeficiente de escurrimiento.

El tercer componente (PC3) explica el 11.62% de la varianza, presenta correlaciones positivas entre la precipitación (0.704) y el tipo de vegetación (0.588). En el área de estudio la precipitación es limitada y la mayor parte de ella se pierde por la evapotranspiración (Noyola-Medrano *et al.*, 2009; López-Álvarez *et al.*, 2013), siendo esta última variable la que tiene mayor peso al encontrarse en el PC1. Sin embargo, en las partes más elevadas de la SSM donde el promedio de precipitación llega a ser de 500 mm, la vegetación juega un papel importante para la captación de agua y su canalización e infiltración superficial, hecho que se ha reportado en los estudios de Rodríguez-Robles *et al.* (2015) y Rodríguez-Robles *et al.* (2017), por lo que el agua que se infiltra podría estar contribuyendo al llenado de bordos, presas o a otros vasos captadores de agua. Por otro lado, cabe señalar que el agua que no logra infiltrarse puede ocasionar problemas de deslaves e inundaciones (López-Álvarez *et al.*, 2013) debido a los excesivos escurrimientos que se presentan, característica que se observó en el clúster 3, donde se presentó el mayor coeficiente de escurrimiento.

El cuarto componente (PC4) explica el 8.47% de la varianza total y presenta una correlación positiva de 0.644 con la Altitud. Se ha mencionado que las áreas con menor altitud tienen un mayor potencial de recarga (Lamichhane & Shakya, 2019); sin embargo, en el área de estudio se presentan altitudes de hasta 2800 msnm, que aumentan el escurrimiento y disminuyen la infiltración, como es el caso del clúster 3 que tiene las mayores altitudes a diferencia de los clústers 1 y 2.

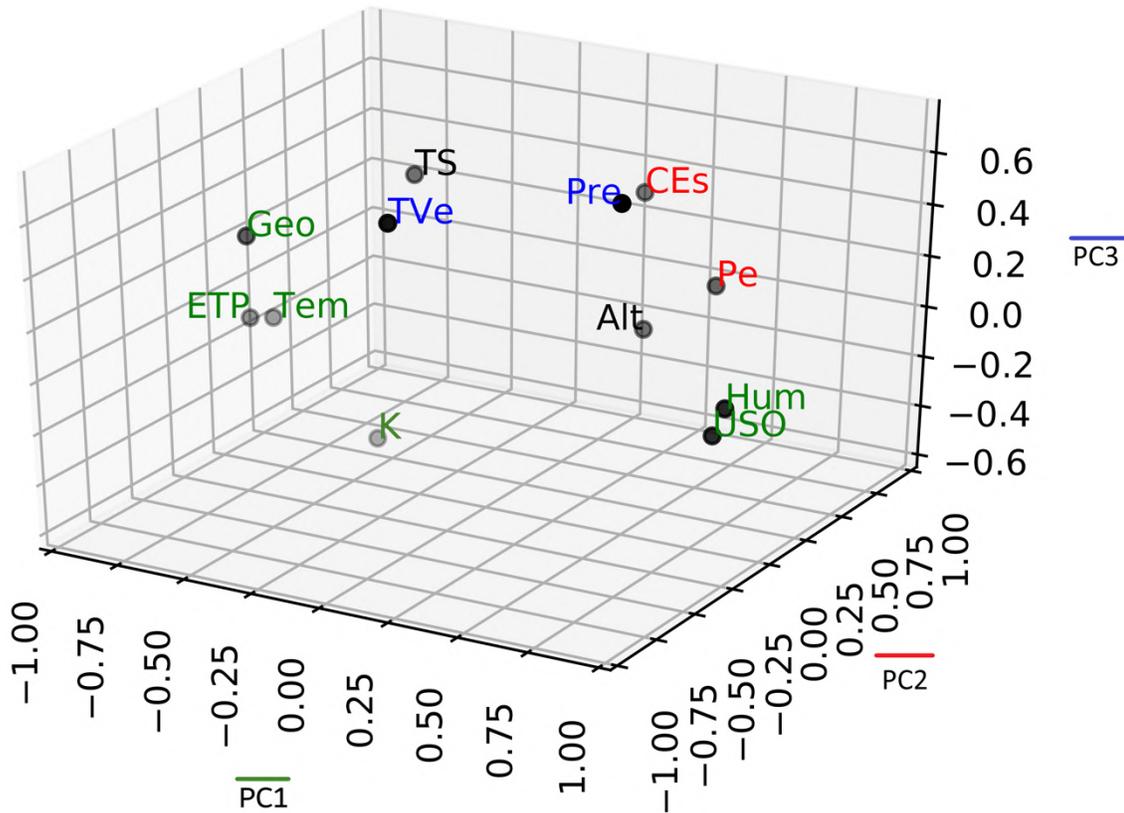


Figura 26. Gráfico del Análisis de Componentes Principales

8.3 Análisis de Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE)

Khalil & Monterio-Santos (2009), indican que la relación entre la conductividad hidráulica y la resistividad de la formación es generalmente una relación no lineal y podría resumirse en tres tipos de características según la condición de saturación:

1. Una relación de potencia inversa en acuíferos completamente saturados y cuando la porosidad es igual a la saturación de agua.

2. Una relación polinomial inversa en acuíferos insaturados, cuando la saturación de agua es superior al 50%, superior a la porosidad.
3. Una relación polinomial directa en acuíferos poco saturados, cuando la saturación de agua es inferior al 50%, inferior a la porosidad.

Por otro lado, la presencia de arcillas influye en la relación directa de resistividad de la roca y su conductividad hidráulica.

TRE en la Sierra de San Miguelito

Los resultados obtenidos a partir de la TRE SM08-2 mostraron una relación polinomial directa ($R^2= 0.99$) entre la conductividad hidráulica estimada y la resistividad eléctrica (Figura 27A). Resultados similares se obtuvieron en el estudio de Vogelgesang (2020), en donde encontró una relación de $R^2 = 0.90$ bajo un modelo lineal. Cabe resaltar que esta TRE es la que se encuentra más cercana a una zona de fallas, se ha reportado que bajo estas condiciones la anisotropía del medio puede aumentar derivado de la presencia de fracturas ocasionando una relación no-lineal entre las propiedades hidráulicas y geofísicas, aunado a que en este tipo de relación la saturación del agua es inferior al 50%, inferior a la porosidad (Khalil & Monterio-Santos, 2009; Sattar *et al.*, 2016).

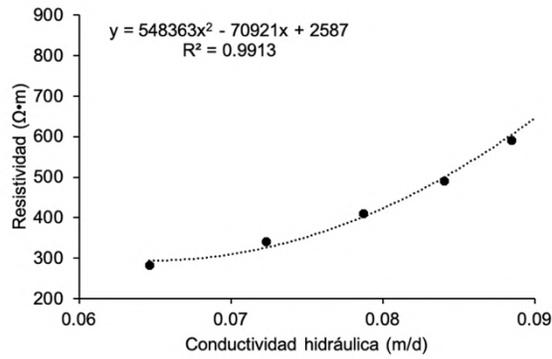
En la Figura 28A se observa la distribución espacial de la conductividad hidráulica y su equivalencia en resistividad. A medida que aumenta la K la resistividad también aumenta, los primeros nueve metros del transecto muestran las K menores (0.06-0.07 m/d), mientras que a partir de los diez metros las K son mayores resaltando que la mayor K (0.10 m/d) se encuentra en los primeros 25 cm de profundidad. Esta zona se caracteriza por la presencia de un tunar de carbonas que va adentrándose hacia el bosque de pino, probablemente la presencia de ese rodal ocasione un aumento en la K , estudios han demostrado que el pino obtiene la mayor parte del agua de la superficie del suelo (Rodríguez-Robles *et al.*, 2020), pudiendo asociarse a una infiltración superficial.

Por otra parte, se observó una relación polinomial inversa ($R^2=0.99$) en la TRE SM09-2, a medida que la K aumenta la resistividad disminuye (Figura 27B). Esto está relacionado con el supuesto de que la resistividad eléctrica disminuye al aumentar el contenido de agua o humedad, en este tipo de relación la saturación de agua es superior al 50%, siendo esta superior a la porosidad (Khalil & Monterio-Santos 2009; Rodríguez-Robles *et al.*, 2017).

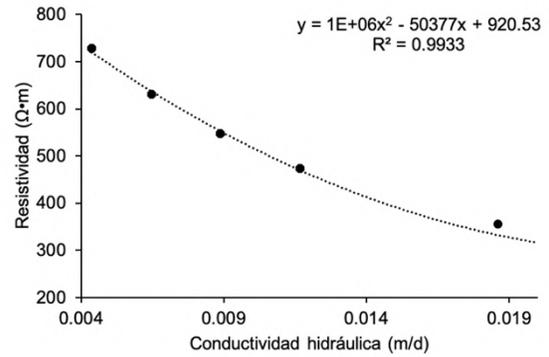
Esta TRE fue realizada en las faldas de una loma con presencia de un manchón de encinos, los mayores valores (0.02 m/d) se encuentran en los primeros 25 cm de profundidad (Figura 28B), lo cual puede ser atribuido a la presencia de materia orgánica acumulada en las grietas y en las “bolsas del suelo” (*soil pockets* por su traducción en inglés) (Pérez-Suárez *et al.*, 2014). Los perfiles litológicos muestran una alta densidad de raíces verticales distribuidas en fracturas de rocas y en las bolsas del suelo, lugares que exhiben capacidades potenciales de almacenamiento de agua y humedad (Rodríguez-Robles *et al.*, 2015).

En el caso de la TRE SM10-2, se observó una relación polinomial directa ($R^2=0.99$) (Figura 27C). A lo largo de todo el transecto se presentan las mayores conductividades hidráulicas (0.08 a 0.09 m/d), mientras que las menores se encuentran a mayor profundidad (Figura 28C). En esta zona la vegetación es escasa y hay mucha roca expuesta (riolita); así como un arroyo intermitente en las cercanías, lo cual podría explicar esta relación directa debido a que es común encontrar material arcilloso relleno los arroyos intermitentes y cercanías, reportándose que en estos materiales la conductividad hidráulica aumenta con la resistividad (Khalil & Monterio-Santos, 2009; Okiongbo & Oborie, 2015, Hernández-Constantino, 2020). Los mallados y cálculos de K correspondientes a las TRE SM08-2, SM09-2 y SM10-2 se observan en los anexos 13, 14 y 15, respectivamente.

A) SM08-2



B) SM09-2



C) SM10-2

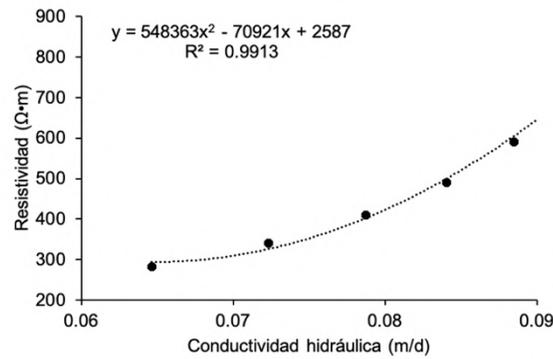


Figura 27. Relación entre la conductividad hidráulica y la resistividad eléctrica en la TRE SM

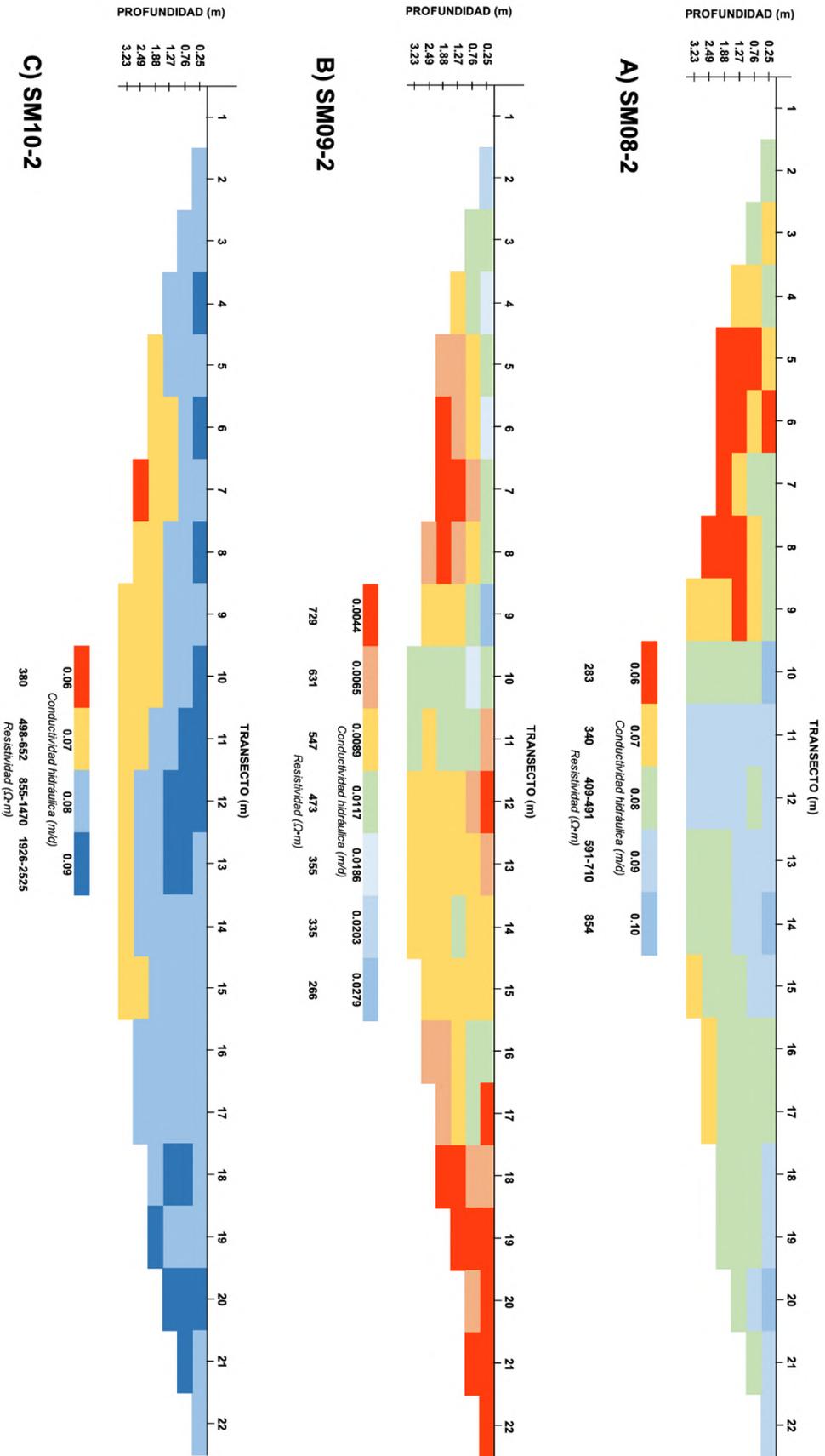


Figura 28. Imágenes de conductividad hidráulica calculada a partir de TRE SM

TRE y vegetación

Se observó una relación polinomial directa ($R^2= 0.99$) entre la conductividad hidráulica estimada y la resistividad eléctrica para los tres tipos de bosques: pino, encino y mixto (Figuras 29A, 29B y 29C, respectivamente). Cabe señalar que estos bosques se desarrollan sobre perfiles heterogéneos de suelo/roca que consisten en suelos someros sobre material rocoso granulado (regolito), rocas volcánicas impermeables con fracturas pronunciadas y fisuras así como roca erosionada y exfoliada (Figuras 30A, 30B y 30C) (Rodríguez-Robles *et al.*, 2020). En las Figuras 31A, 31B y 31C se observaron las mayores conductividades hidráulicas más allá de los 0.80 m de profundidad aproximadamente. Dicha relación podría deberse a la presencia de fracturas, debido a la exfoliación de la roca.

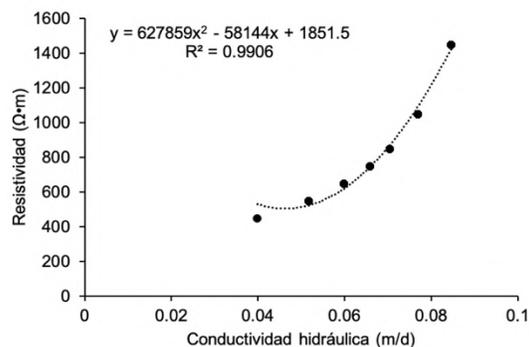
En la Figura 31A la distribución de la K para el bosque de pino mostró valores de 0.05 a 0.08 m/d a los 0.5 m de profundidad, dichos valores se pueden asociar a que los rodales de pino se produjeron en sitios con suelos más profundos (hasta 60 cm) sobre rocas exfoliadas poco fragmentadas (Figura 30D) (Figura (Rodríguez-Robles *et al.*, 2017, Rodríguez-Robles *et al.*, 2020), suelos que como se mencionó anteriormente, pueden presentar materia orgánica acumulada en las grietas (Figura 30E), favoreciendo una infiltración superficial a través del almacenamiento de agua y humedad.

En el caso del bosque de encino (Figura 31B), estos se encontraron mayormente anclados sobre rocas riolíticas exfoliadas que han sufrido un grado de fracturación y fisuración, lo cual controla la porosidad del medio. Lo anterior puede contribuir a lo que se denomina “porosidad secundaria del sustrato”, permitiendo el flujo de agua y el almacenamiento dentro del lecho de roca volcánica, comportamiento que ha sido evidenciado en el encino al acceder con sus raíces al agua retenida en esas fracturas y fisuras (Figura 30F) (Fitts, 2013b; Rodríguez-Robles *et al.*, 2017). Esto da como resultado la existencia de flujos subhipodérmicos originados por

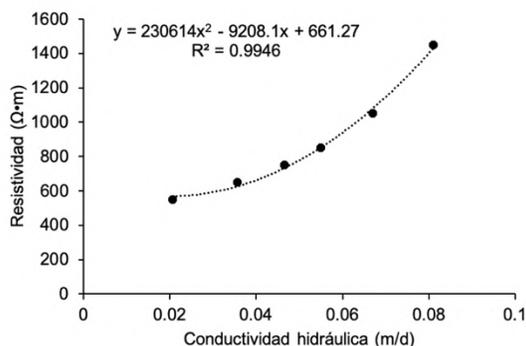
exudados de raíces, sugiriendo un proceso de infiltración superficial (Figura 32) (Rodríguez-Robles *et al.*, 2015), lo cual podría permitir el llenado de bordos o presas.

En el bosque mixto se aprecian características del bosque de encino y pino, con conductividades hidráulicas de 0.07 m/d hasta nulas en el primer metro de profundidad a lo largo del transecto (Figura 31C). Los mallados y cálculos de K correspondientes a las TRE del bosque de pino, bosque de encino y bosque mixto se observan en los anexos 16, 17 y 18, respectivamente.

A) TRE BOSQUE DE PINO



B) TRE BOSQUE DE ENCINO



C) TRE BOSQUE MIXTO

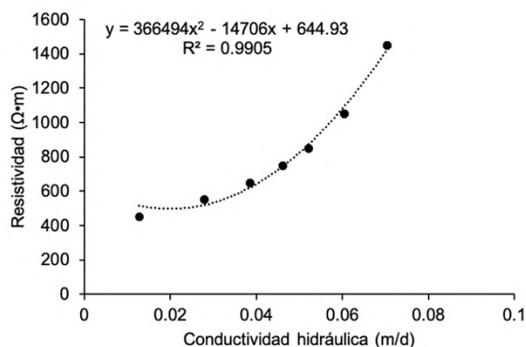


Figura 29. Relación entre conductividad hidráulica y resistividad eléctrica en cada bosque

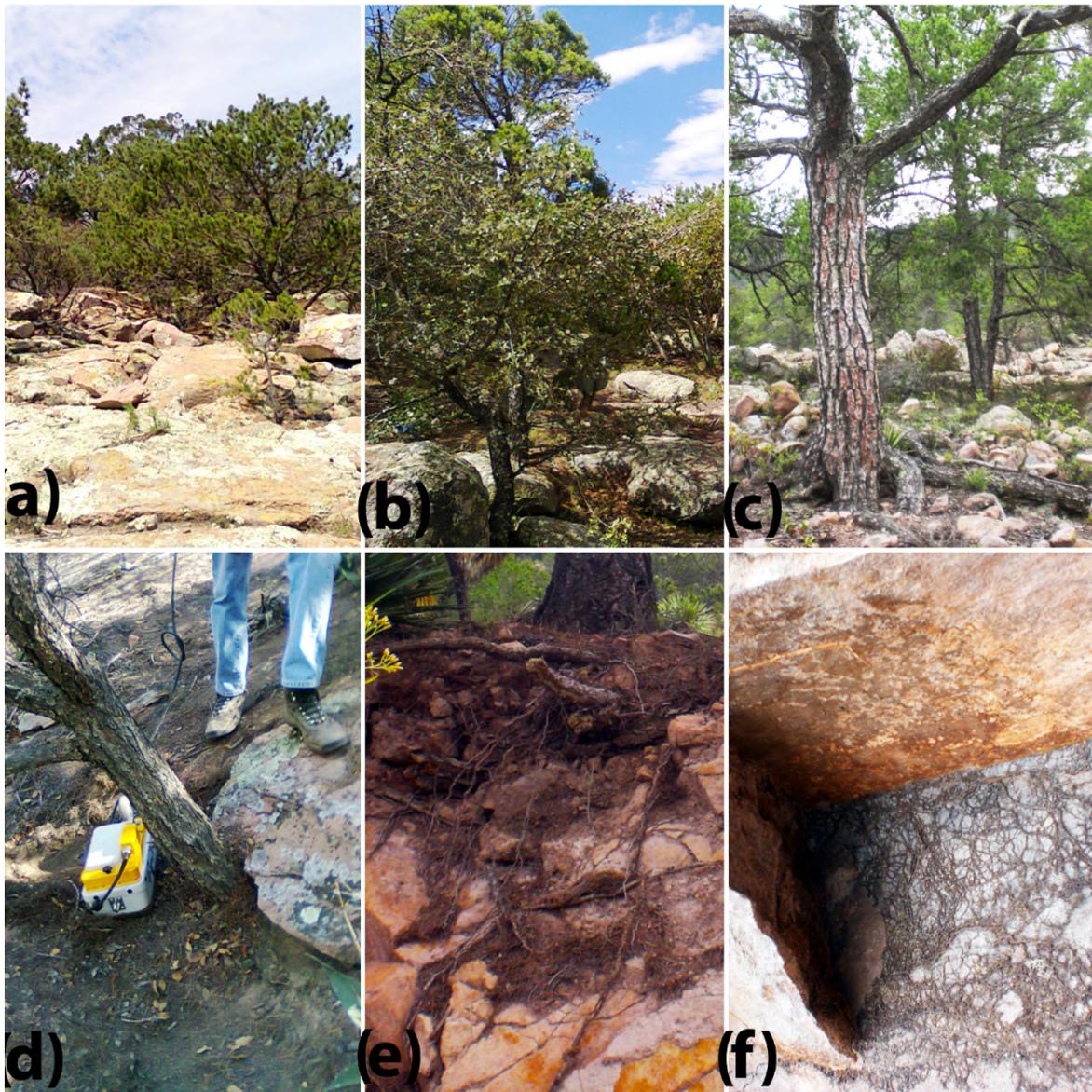


Figura 30. Características de la vegetación en el área de estudio. **A)** Lecho de roca riolítica erosionada en rodales de Pino, **B)** Roca exfoliada en un rodal de pino-encino, **C)** Raíces gruesas expuestas en suelo rocoso poco profundo, **D)** Pino anclado en roca exfoliada, **E)** Densidad de raíces en suelo-roca y **F)** Raíces finas colonizando el lecho rocoso fracturado

Fuente: Rodríguez-Robles *et al.*, 2017

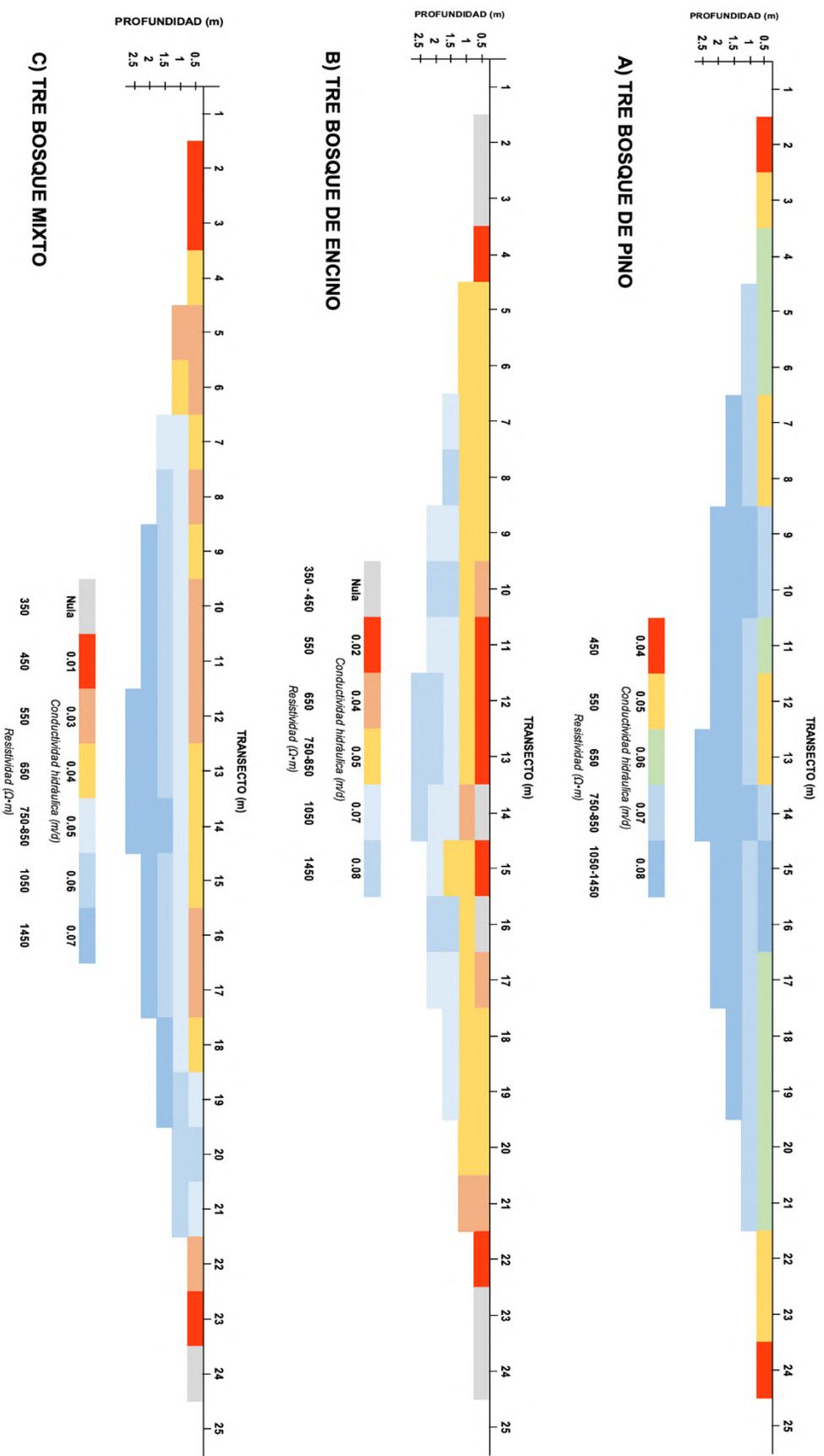


Figura 31. Imágenes de conductividad hidráulica calculada a partir de TRE de bosques

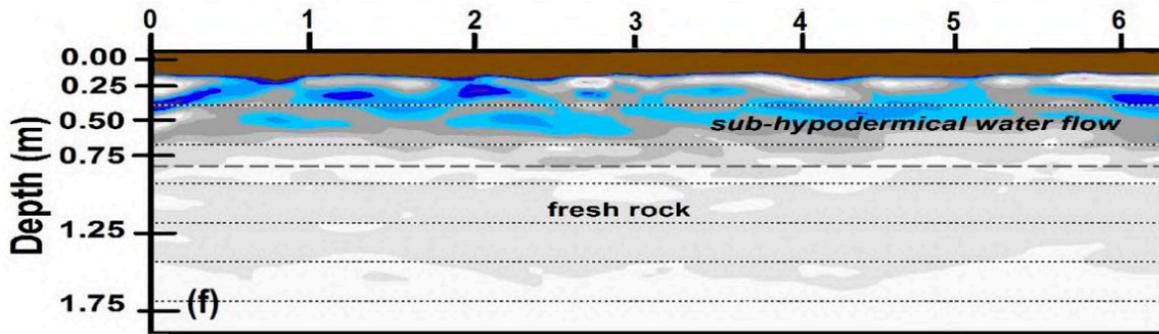


Figura 32. Representación gráfica del flujo subhipodérmico
Fuente: Rodríguez-Robles, 2016

TRE en Mexquitic

Se observó una relación potencial inversa entre la conductividad hidráulica y la resistividad eléctrica en las TRE A-A' ($R^2= 0.99$) y B-B' ($R^2= 0.72$), (Figuras 33A y 33B, respectivamente). En ambos casos se observa que la conductividad hidráulica aumenta a medida que la resistividad eléctrica disminuye.

Las conductividades hidráulicas obtenidas en la TRE A-A' mostraron una relación con la composición geológica del CVSSM. Desde la superficie hasta una máxima profundidad en el flanco izquierdo los valores de K son en su mayoría nulos y corresponden a resistividades de hasta $1050 \Omega \cdot m$ (Figura 34A), valores típicos asociados a rocas volcánicas sin meteorización y fracturamiento (Fitts, 2013b; Earle, 2015; GeoSci, 2020). Por otra parte, en el flanco derecho los valores de K aumentan correspondiendo a valores de resistividad menores, cabe resaltar que este hecho podría deberse a la presencia de minerales como óxidos de hierro en la matriz de rocas como la riolita y la ignimbrita o bien rellenando las fracturas de estas (Fitts, 2013b; IPICYT & SEGAM, 2018). Valores de K de hasta 1.1 m/d , pueden corresponder a material de arenas y limos con base en lo descrito por Ramos-Leal & Torres-Gaytan (2020).

Estructuralmente es posible encontrar dos contactos litológicos donde se infiere una falla geológica. El primero se encuentra a nivel somero llegando desde la superficie hasta los 4 metros de profundidad, aproximadamente a los 42 metros de

longitud sobre el perfil. El segundo contacto se encuentra a los 70 m con una profundidad aproximada de 5 metros (Ramos-Leal & Torres-Gaytan 2020). Ligado a lo mencionado anteriormente, este hecho también podría explicar que en el flanco izquierdo se encuentren valores de K nulos y en el derecho sean mayores, debido a que se ha reportado que las fallas pueden separar unidades con diferente conductividad hidráulica (Mayer *et al.*, 2007; Ochoa-González *et al.*, 2015).

Respecto a la TRE B-B', en la superficie se observan las mayores conductividades hidráulicas (0.083 a 0.086 m/d) (Figura 34B), y se puede relacionar con fracturas presentes, sugiriendo pequeñas infiltraciones superficiales. Así mismo, a los 4 metros de profundidad a lo largo del transecto, es posible encontrar intercalaciones en los valores de K , probablemente este hecho se deba a la litología de arena-limo que se encuentra de manera discordante entre las capas de la riolita presentes (Ramos-Leal & Torres-Gaytan, 2020). Los mallados y cálculos de K correspondientes a las TRE A-A' y B-B' de Mexquitic se observan en los anexos 19 y 20, respectivamente.

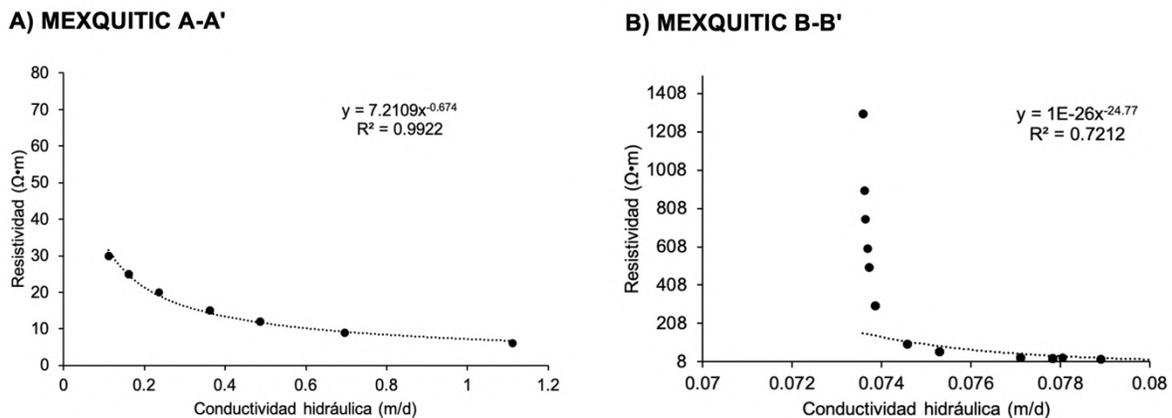


Figura 33. Relación entre conductividad hidráulica y resistividad eléctrica de las TRE Mexquitic

De manera general, la conductividad hidráulica estimada en todas las TRE es baja e incluso nula a comparación de otros estudios (Mondal *et al.*, 2016; Sattar *et al.*, 2016; Vogelgesang *et al.*, 2020), lo cual es reflejo de la composición geológica de

origen volcánico que predomina en el área de estudio y por ende no permite una recarga óptima hacia el acuífero profundo. No obstante, el análisis de las TRE permitió contrastar los resultados obtenidos en el PCA, donde la vegetación se encontró en el PC3; sin embargo, a una escala más específica la interacción de los bosques con el medio geológico permite el flujo de agua subhipodérmico así como su almacenamiento (Rodríguez-Robles *et al.*, 2020), lo cual puede contribuir al llenado de bordos y presas o a otros vasos captadores así como a brindar soporte a los servicios ecosistémicos que se generan, como la captura de carbono, la retención de humedad, la prevención de erosión, etc.

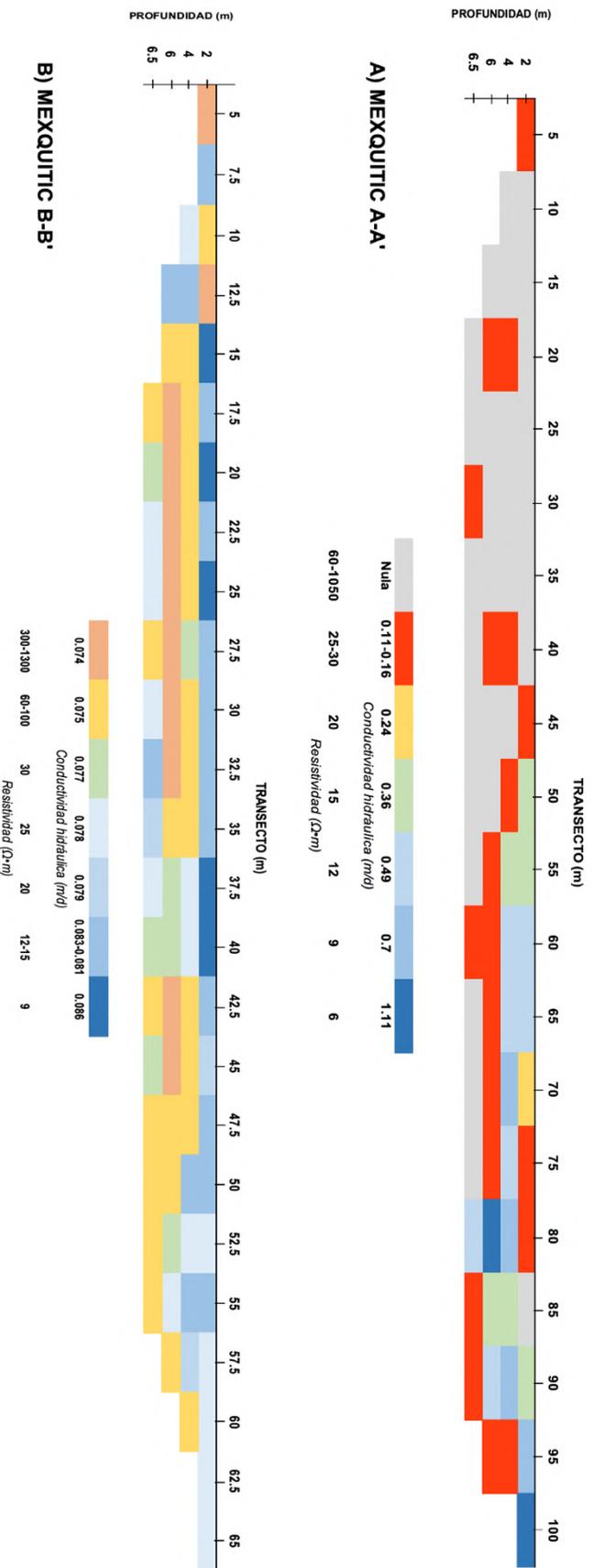


Figura 34. Imágenes de conductividad hidráulica calculada a partir de TRE A-A' y B-B' en Mexquitic

9 CONCLUSIONES

Se observaron altas correlaciones tanto positivas como negativas entre las variables climáticas: ETP, temperatura, humedad y precipitación. Así mismo, la geología fue la variable no climática que más se correlacionó, resaltando su importancia en el área de estudio.

El análisis de clúster dio como resultado 3 grupos (clúster 1, clúster 2 y clúster 3). Se encontró que el clúster 2 presenta un potencial de recarga debido a la composición geológica (aluvión) y al uso de suelo (agrícola); sin embargo, factores como la alta evapotranspiración, altas temperaturas y bajos contenidos de humedad limitarían este hecho. Mientras que en el clúster 1 y 3 la recarga se encuentra limitada por variables como la geología, el escurrimiento y la pendiente; sin embargo, las infiltraciones en algunas zonas pueden verse favorecidas por las fallas geológicas presentes en el área.

El análisis de componentes principales reveló que las principales variables que controlan los procesos de infiltración y que limitan la recarga hídrica en el CVSSM son: la humedad, el uso del suelo, la temperatura, la ETP y la geología (PC1) lo cual coincide con lo mostrado en el análisis de correlaciones y el análisis de clúster. En el PC2 la pendiente y el coeficiente de escurrimiento controlan esos procesos mientras que en el PC3 el tipo de vegetación y la precipitación.

El análisis de las TRE permitió reafirmar la existencia de un flujo subhipodérmico derivado de la interacción vegetación-geología en la parte alta de la SSM, lo cual refleja una intiltración superficial.

Dadas las condiciones climáticas y geológicas mostradas en este estudio, el CVSSM no se encuentra funcionando de manera óptima como zona de recarga hídrica hacia el acuífero profundo de San Luis Potosí; sin embargo, cumple con

otros procesos ecológicos de importancia como la existencia de un flujo subhipodérmico en las partes altas de la SSM.

Los resultados de este estudio contribuirán a la óptima identificación y delimitación de zonas de recarga hídrica en San Luis Potosí; así como a la gestión sostenible del recurso hídrico.

10 PERTINENCIA SOCIOAMBIENTAL DESDE LA INVESTIGACIÓN

La Sierra de San Miguelito (SSM) conforma un área de vital importancia para los habitantes de San Luis Potosí y las comunidades que confluyen alrededor de este macizo montañoso, por los servicios ambientales que en ella se generan. La combinación de su vegetación, relieve y geología juegan un papel importante para la captación de agua de lluvia y su canalización e infiltración superficial contribuyen al llenado de bordos y presas o a otros vasos captadores que abastecen a las ciudades de Villa de Reyes, Mexquitic de Carmona, Soledad de Graciano Sánchez y San Luis Potosí, situación que permite valorar a la Sierra de San Miguelito como parte vital en la sustentabilidad, donde el uso del agua es el pilar de la economía regional.

La SSM está sujeta a diferentes procesos de perturbación antrópica en la que destaca los cambios de uso de suelo e incendios forestales para expansión de zonas residenciales y mega carreteras, los cuales han ocasionado una alteración en el régimen hidrológico de la SSM. En el presente estudio e investigaciones subyacentes hemos identificado la importancia de un flujo subhipodérmico; resultado por el funcionamiento ecológico del bosque en interacción con el medio geológico en la parte alta de la sierra. Este flujo de agua intermitente mantiene activo el pulmón forestal de la capital potosina y da soporte a los servicios ecosistémicos que en ella se generan, como la captura de carbono, la retención de humedad, la prevención de erosión, la conservación de la biodiversidad, la regulación del clima, entre otros servicios.

Tras 15 años de comunicación horizontal entre instituciones federales, de gobierno y academia, con las aportaciones de estudios científicos, artículos y de investigación y tesis, así como la invaluable participación social para la construcción de consensos con los propietarios de las tierras, en mayo del presente año la Sierra de San Miguelito se decretó como una nueva Área Natural Protegida. Por lo anterior, la participación de los diferentes sectores, coadyuban al

fortalecimiento comunitario, capacitación, desarrollo de actividades productivas y de conservación de la biodiversidad y permanencia de los servicios ecosistémicos en beneficio de las comunidades aledañas y los ciudadanos, como son la captación y abastecimiento de agua, así como la preservación del patrimonio biocultural y paisajístico del Estado de San Luis Potosí.

11 RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos en este estudio se recomienda lo siguiente:

- Se requieren más pruebas de conductividad hidráulica con la finalidad de obtener datos más precisos de este parámetro y obtener más información ya que estos datos son muy escasos en el CVSSM.
- Considerar otras variables que influyen en la recarga hídrica con el objetivo de obtener resultados más robustos.
- Aplicar otras técnicas estadísticas multivariadas que permitan evaluar los resultados obtenidos en este estudio y determinar que métodos estadísticos son más convenientes.
- Realizar un balance hidrológico en el área de estudio con la finalidad de cuantificar la recarga-descarga hídrica y dar mayor soporte a los resultados obtenidos.
- Aplicar otros modelos para estimar la conductividad hidráulica a partir de la resistividad a fin de asegurar el modelo mejor calibrado y que más se adapte a la zona de estudio.
- Continuar realizando más estudios enfocados a las otras funciones ecológicas que posee la sierra ya que es una parte vital en la sustentabilidad de la región.
- Continuar realizando estudios que permitan la identificación y delimitación óptima de zonas de infiltración y/o recarga en San Luis Potosí a fin de mejorar y actualizar los planes de manejo hídrico.

12 REFERENCIAS

- Aguillón-Robles, A., & Aranda-Gómez, J. J. (1996). Geología y características geoquímicas del Centro Volcánico de Pinos. *Actas INAGEQ*, 2, 3–8.
- Aguillón-Robles, A., Aranda-Gómez, J. J., & Solorio-Munguía, J. G. (1994). Geología y tectónica de un conjunto de domos riolíticos del Oligoceno medio en el sur del Estado de San Luis Potosí, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 11(1), 29–42.
- Anónimo. (s.f.). Análisis de correlación y regresión. McGraw-Hill Education. Disponible en: https://www.academia.edu/15308697/An%C3%A1lisis_de_correlaci%C3%B3n_y_regresi%C3%B3n
- Ansari, T. A., Katpatal, Y. B., & Vasudeo, A. D. (2016). Spatial evaluation of impacts of increase in impervious surface area on SCS-CN and runoff in Nagpur urban watersheds, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(18), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2702-5>
- Arela-Mayta, R. W. (2014). *Manejo y protección de zonas de recarga hídrica y fuentes de agua para consumo humano en la microcuenca del río Huayllani, Lampa. ITesis UNA*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional del Altiplano. 96 p.
- Ayllón, T. (2003). *Elementos de meteorología y climatología* (2da edición). México: Trillas. 211 pp.
- Bartelletti, C., Giannecchini, R., D'Amato Avanzi, G., Galanti, Y., & Mazzali, A. (2017). The influence of geological-morphological and land use settings on shallow landslides in the Pogliaschina T. Basin (northern apennines, Italy). *Journal of Maps*, 13(2), 142–152. <https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1279082>
- Blanco-Rojas, H. (2017). Áreas de recarga hídrica de la parte media-alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito, San Carlos, Costa Rica. *UNED Research Journal*, 2(2), 181–204. <https://doi.org/10.22458/urj.v2i2.157>
- Braasch, M. (2012). *Modelación de la Producción Primaria Neta en un bosque semiárido con disturbio antropogénico en San Luis Potosí, México*. Tesis de Maestría. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. 105 p.
- Brown, C. E. (1998). *Applied Multivariate Statistics in Geohydrology and Related Sciences* (First Edit). Virginia, USA: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1198/tech.2001.s566>
- Bueso-Campos, M. L. (2010). *Identificación y caracterización de las zonas con mayor potencial de recarga hídrica en las subcuencas de los ríos Tacó y Shusho, Municipio de Chiquimula*. Guatemala.
- Cadena-Iñiguez, P., Rendón-Medel, R., Aguilar-Ávila, J., Salinas-Cruz, E., De la Cruz-Morales, F. D. R., & Sangerman-Jarquín, D. M. (2017). Métodos cuantitativos, métodos cualitativos o su combinación en la investigación: un acercamiento en las ciencias sociales. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(7), 1603–1617. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i7.515>

- Calero, J. L. 2000. Investigación cualitativa y cuantitativa. Problemas no resueltos en los debates actuales. *Rev. Cubana End.* 3: 192-198.
- Cardona, B. A., Martínez, H. J., Castro, L. J & Alcalde, A. R. (2006). La edad del agua subterránea que abastece la región de San Luis Potosí. *Revista Universitarios Po- tosinos*, Año 2, No 2, 20-25
- Canavos, G. C. (1988). *Probabilidad y estadística: aplicaciones y métodos*. (E. G. Urbina-Medal, Ed.) (1ra Edició). Edo. de México: McGraw-Hill/Interamericana de México, S.A. de C.V.
- Carrillo-Rivera, J. J., & Armienta, M. A. (1989). Diferenciación de la contaminación inorgánica en las aguas subterráneas del Valle de la Ciudad de San Luis Potosí, SLP, México. *Geofísica Internacional*.
- Carrillo-Rivera, J. J., Cardona, A., & Moss, D. (1996). Importance of the vertical component of groundwater flow: A hydrogeochemical approach in the valley of San Luis Potosí, Mexico. *Journal of Hydrology*, 185(1-4), 23-44. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03014-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03014-4)
- Carrillo-Rivera, J. J., Cardona, A., Huizar-Alvarez, R., & Graniel, E. (2008). Response of the interaction between groundwater and other components of the environment in Mexico. *Environmental Geology*, 55(2), 303-319. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-1005-2>
- Carrillo-Rivera, J. J., D. Clark, I., & Fritz, P. (1992). Investigating Recharge Of Shallow And Paleo-Groundwaters In The Villa De Reyes Basin , SLP , Mexico , With Environmental Isotopes. *Hydrogeology Journal*, 1(4), 35-48. <https://doi.org/10.1007/s100400050025>
- CEACES. (15 de noviembre de 2019). Análisis de Clúster. Disponible en: <https://www.uv.es/ceaces/multivari/cluster/CLUSTER.htm>
- Cervantes-Martínez, A., Jacobson, B. J., Delgado-Blas, V. H., Gutiérrez-Aguirre, M. A., & Arroyo-Castro, J. L. (2013). *Manual de Limnología y Ecología*. Cozumel, Quintana Roo.
- Chamorro-Castillo, K. M. (2016). *Identificación y caracterización de las zonas de recarga hídrica mediante herramientas SIG de los acuíferos La Carbonería, Guaraczapas, Yuyucocha y Santa Clara para la protección de las fuentes de aprovisionamiento de agua en la zona urbana de Ibarra*. Tesis de Licenciatura. Universidad Técnica del Norte, Ecuador. 149 p.
- Chaves-Barrantes, N. F., & Gutiérrez-Soto, M. V. (2016). Respuestas al estrés por calor en los cultivos. II. Tolerancia y tratamiento agronómico. *Agronomía Mesoamericana*, 28(1), 255. <https://doi.org/10.15517/am.v28i1.21904>
- Chávez-Gómez, J. D., Flores-Martínez, J. A., & Paiz-Saravia, E. J. (2017). *Caracterización de zonas potenciales de recarga acuífera en el Municipio de San Jorge, San Miguel, El Salvador*. Universidad de El Salvador.
- Chow, J. C., Watson, J. G., Lowenthal, D. H., Solomon, P. A., Magliano, K. L., Ziman, S. D., & Richards, L. W. (1993). PM10 and PM2.5 Compositions in California's San Joaquin Valley. *Aerosol Science and Technology*, 18(2), 105-128. <https://doi.org/10.1080/02786829308959588>
- Coelho, V. H. R., Montenegro, S., Almeida, C. N., Silva, B. B., Oliveira, L. M., Gusmão, A. C. V., & Montenegro, A. A. A. (2017). Alluvial groundwater recharge estimation in semi-arid environment using remotely sensed data. *Journal of Hydrology*, 548, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.054>

- CONAGUA. (2018a). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Ocampo (1103), Estado de Guanajuato*. Ciudad de México. Comisión Nacional del Agua
- CONAGUA. (2018b). *Estadísticas del Agua en México 2018* (Edición 20). Ciudad de México. Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2018c). *Atlas del Agua en México 2018* (Edición 20). Ciudad de México. Comisión Nacional del Agua.
- Contreras-Servín, C., & Galindo-Mendoza, M. G. (s.f.). *Análisis espacial y vulnerabilidad de la ciudad de San Luis Potosí-México, al abasto futuro de agua potable*. San Luis Potosí.
- Contreras-Servín, C., & Galindo-Mendoza, M. G. (2008). Abasto futuro de agua potable , análisis espacial y vulnerabilidad de la ciudad de San Luis Potosí, México. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 17, 127–137.
- Cordero-Vázquez, C. Y. (2016). *Determinación de granulometría y textura de suelos de Matehuala, San Luis potosí contaminados con arsénico*. Tesis de Licenciatura. Universidad Tecnológica de Tabasco. 94 p.
- Cordero-Vázquez, C. Y. (2018). *Caracterización geoquímica y geofísica de suelos agrícolas en el área de Cerrito Blanco, Matehuala, San Luis Potosí*. Tesis de Maestría. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. 142 p.
- Cosentini, R. M., Della Vecchia, G., Foti, S., & Musso, G. (2012). Estimation of the hydraulic parameters of unsaturated samples by electrical resistivity tomography. *Geotechnique*, 62(7), 583–594. <https://doi.org/10.1680/geot.10.P.066>
- Cuadras, C. M. (2004). *Análisis Multivariante*. (EUNIBAR, Ed.). Barcelona. 245 p.
- Demlie, M., Wohnlich, S., Wisotzky, F., & Gizaw, B. (2007). Groundwater recharge, flow and hydrogeochemical evolution in a complex volcanic aquifer system, central Ethiopia. *Hydrogeology Journal*, 15(6), 1169–1181. <https://doi.org/10.1007/s10040-007-0163-3>
- Díaz-Anaya, E. P. (2010). *Implementación del código zonndres2D para la modelación directa e inversa de datos de tomografía de resistividad eléctrica 2D*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. 110 p.
- Díaz-Padilla, G., Sánchez-Cohen, I., Guajardo-Panes, R. A., Del Ángel-Pérez, A. L., Ruíz-Corral, A., Medina-García, G., & Ibarra-Castillo, D. (2011). Mapeo del índice de aridez y su distribución poblacional en México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, XVII(Edición Especial), 267–275. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.09.069>
- Díaz-Pulido, A., Chingaté Hernández, N., Muñoz-Moreno, D., Olaya-González, W., Perilla-Castro, C., Sánchez-Ojeda, F., & Sánchez-González, K. (2009). Desarrollo sostenible y el agua como derecho en Colombia. *Revista Estudios Socio-Jurídicos*, 11(1), 84–116.
- DOF (2010). Acuerdo por el cual se dan a conocer los estudios técnicos del acuífero 2411 San Luis Potosí, en el Estado de San Luis Potosí. 7 de Julio de 2010. Diario Oficial de la Federación.

- Donis-Caceres, L. F. (2015). *Identificación de zonas de recarga hídrica en la microcuenca del Río Negro, ciudad de Guatemala*. Tesis de Licenciatura. Universidad Rafael Landívar. 71 p.
- Earle, S. (2015). *Physical Geology. Physical geology*. (First Edit). Victoria, B.C., Canada: B.C. Open Textbook Collection. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(70\)90008-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(70)90008-7)
- Estrela, T. (1992). Metodología y Recomendaciones para la Evaluación de Recursos Hídricos. Centro de Estudios Hidrográficos. Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Gabinete de Formación y Documentación, Madrid, España. 52 p.
- Fang, H., Sun, L., & Tang, Z. (2015). Effects of rainfall and slope on runoff, soil erosion and rill development: An experimental study using two loess soils. *Hydrological Processes*, 29(11), 2649–2658. <https://doi.org/10.1002/hyp.10392>
- Fang, Y., Sun, G., Caldwell, P., McNulty, S. G., Noormets, A., Domec, J. C. & Chen, J. (2016). Monthly land cover-specific evapotranspiration models derived from global eddy flux measurements and remote sensing data. *Ecohydrology*, 9(2), 248–266. <https://doi.org/10.1002/eco.1629>
- FAO (2001). Trigo regado: manejo del cultivo. 1ra edición. Roma, Italia. Disponible en: <http://www.fao.org/3/x8234s/x8234s00.htm#Contents>
- FAO. (2006a). *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (1ra edición). Roma, Italia: Estudio FAO Riego y Drenaje.
- FAO. (2006b). *World Reference Base for Soil Resources 2006 (WRB): a Framework for international classification, correlation and communication. World Soil Resources Reports*. Rome, Italy. <https://doi.org/10.4135/9781446247501.n4190>
- Fernández, T., Irigaray, C., El Hamdouni, R., & Chacón, J. (2008). Correlation between natural slope angle and rock mass strength rating in the Betic Cordillera, Granada, Spain. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(2), 153–164. <https://doi.org/10.1007/s10064-007-0118-x>
- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology* (Fourth Edition). New Jersey: Prentice Hall. 615 p.
- Fitts, C. R. (2013a). Groundwater: The Big Picture. In *Groundwater Science* (First Edit, pp. 1–22). Scarborough, Maine: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384705-8.00001-7>
- Fitts, C. R. (2013b). Hydrology and Geology. In *Groundwater Science* (First Edit, pp. 123–186). Scarborough, Maine: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-384705-8.00005-4>
- Flores-López, H. E., Ramírez-Vega, H., Byerly-Murphy, K. F., Ruiz-Corral, J. A., Martínez-Sifuentes, J. A., Díaz-Mederos, P., & Alemán-Martínez, V. (2003). Estimación de escurrimiento superficial en la cuenca El Jihuite, México. *Terra Latinoamericana*, 21(3), 389–400.
- Foster, S., Tuinhof, A., Kemper, K., Garduño, H., & Nanni, M. (2007). *Caracterización de Sistemas de Agua Subterránea: conceptos clave e ideas erróneas frecuentes*. Washington, D.C. Disponible en: www.worldbank.org/gwmate

- Galindo-Castillo, E. (2011). *Simulación dinámica: predicción de escenarios en el acuífero Cuautitlan-Pachuca*. Tesis de Doctorado Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. 226 p.
- Gallardo-San Salvador, J. Á. (2011). Ampliación de Análisis de Datos Multivariantes. Granada, España. Disponible en: <https://www.ugr.es/~gallardo/>
- García de Alba V., J. E. (2008). *Aplicación del paradigma de desarrollo de las zonas seca (DDP), examinando el uso del agua en un sistema humano-ambiental: estudio de caso en La Amapola, México*. Tesis de Maestría. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica.
- García, I., Rodríguez, J. G., López, F., & Tenorio, Y. M. (2010). Transporte de contaminantes en aguas subterráneas mediante Redes Neuronales Artificiales. *Informacion Tecnologica*, 21(5), 79–86. <https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.4349it.09>
- Gaytan-Martínez, R., Noyola-Medrano, C., & Rojas-Beltrán, M. A. (2017). Análisis espectral y petrográfico del Complejo Volcánico Sierra de San Miguelito , S.L.P. México. *Serie Correlación Geológica*, 33(1–2), 49–60.
- Geldon, A. L. (2004). Hydraulic tests of Miocene volcanic rocks at Yucca Mountain and Pahute Mesa and implications for groundwater flow in the Southwest Nevada Volcanic Field, Nevada and California. *Geological Society of America*, (381), 94.
- GeoSci. (19 de Junio de 2020). Typical Values for Rocks. Disponible en: https://em.geosci.xyz/content/physical_properties/electrical_conductivity/electrical_conductivity_values.html#typical-values-for-rocks
- Glenn, E. P., Huete, A. R., Nagler, P. L., Hirschboeck, K. K., & Brown, P. (2007). Integrating remote sensing and ground methods to estimate evapotranspiration. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 26(3), 139–168. <https://doi.org/10.1080/07352680701402503>
- González-Cervantes, G., Estrada-Ávalos, J., González-Barrios, J. L., Cueto-Wong, J. A., Sánchez-Cohen, I., & Castillo-Santillán, G. (2006). Análisis de factores que afectan la relación precipitación-escurrimiento en una zona semiárida del norte de México. *Terra Latinoamericana*, 24(3), 337–345.
- González-Naranjo, G. A., Molina-Garza, R. S., Aranda-Gomez, J. J., & Tristán-González, M. (2012). Paleomagnetismo y edad de la Ignimbrita Panalillo Superior, Campo Volcánico de San Luis Potosí, Mexico. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 64(3), 387–409.
- Green, J. M., Henkelman, K. K., & Caskey, R. M. (2004). *Hydraulic Conductivity of Near-Surface Alluvium in the Vicinity of Cattlemans Detention Basin , South Lake Tahoe , California*. Carson, Canada.
- Griffiths, D.H. y Barker, R.D., (1993). Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *J. Appl. Geophys.* 29, 211–226
- Grupo Sierra de San Miguelito A.C. (2009). *Estudio Técnico Justificativo para la solicitud al ejecutivo del Estado de inscribir a la Sierra de San Miguelito como Área Natural Protegida en el Sistema Estatal de Áreas Naturales Protegidas de San Luis Potosí*. Disponible en: <https://beta.slp.gob.mx/SEGAM/Documentos%20compartidos/OTROS/ESTUDIO%20TECNICO%20JUSTIFICATIVO%20DE%20LA%20SIERRA%20DE%20SAN%20MIGUELITO.pdf>

- Guerrero-Martínez, L., Hernández-Marín, M., & Burbey, T. J. (2018). Estimation of natural groundwater recharge in the Aguascalientes semiarid valley, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 35(3), 268–276. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2018.2.1022>
- Guevara, E. y Cartaya, H. 1991. Hidrología. Una introducción a la Ciencia Hidrológica Aplicada. GUECA EDICIONES. Valencia, Venezuela, 358 p.
- Hair, J. F. J., Anderson, R. E., Tatham, R. L., & Black, W. C. (1999). *Análisis Multivariante*. (E. Pretince, D. Cano, & M. Gómez-Suárez, Eds.) (Quinta Edición). Madrid, España: PRETINCE HALL IBERIA. 832 p.
- Hair, J. F. J., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2014). *Multivariate Data Analysis. Exploratory Data Analysis in Business and Economics* (Seventh Ed). London, UK: Pearson Education Limited. 739 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-01517-0_3
- Hancer, E., & Karaboga, D. (2017). A comprehensive survey of traditional, merge-split and evolutionary approaches proposed for determination of cluster number. *Swarm and Evolutionary Computation*, 32, 49–67. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2016.06.004>
- Hart, D. J., Bradbury, K. R., & Feinstein, D. T. (2006). The vertical hydraulic conductivity of an aquitard at two spatial scales. *Ground Water*, 44(2), 201–211. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00125.x>
- Hauke, J., & Kossowski, T. (2011). Comparison of values of pearson's and spearman's correlation coefficients on the same sets of data. *Quaestiones Geographicae*, 30(2), 87–93. <https://doi.org/10.2478/v10117-011-0021-1>
- He, B., Wang, H. L., Wang, Q. F., & Di, Z. H. (2015). A quantitative assessment of the relationship between precipitation deficits and air temperature variations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 5951–5961. <https://doi.org/10.1038/175238c0>
- Heaney, M. B. (2004). Electrical Conductivity and Resistivity. In J. Webster (Ed.), *Electrical Measurement, Signal Processing, and Displays* (pp. 1–14). Boca Raton: CRC Press.
- Hernández-Constantino, N. A. (2020). *Evaluación la Disponibilidad y Demanda de Agua, en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí*. Tesis de Maestría Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.
- Hernández-Díaz, M. C. (2019). *Aplicación de métodos geoelectricos para la detección de zonas de filtración en la presa Gonzalo N. Santos, San Luis Potosí*. Tesis de Maestría. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.
- Hernández-Ramos, J. O. (2019). *Determinación propiedades de suelos agrícolas a partir de mediciones eléctricas realizadas en campo y en laboratorio*. Tesis de Maestría. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. 151 p.
- Huang, D., Yan, P., Xiao, X., Zhu, J., Tang, X., Huang, A., & Cheng, J. (2019). The tri-pole relation among daily mean temperature, atmospheric moisture and precipitation intensity over China. *Global and Planetary Change*, 179(March 2018), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.04.016>

- Huang, P., & Han, S. (2016). Assessment by multivariate analysis of groundwater-surface water interactions in the coal-mining exploring district, China. *Earth Sciences Research Journal*, 20(1), 1–8. <https://doi.org/10.15446/esrj.v20n1.37601>
- INAB. (2003). Metodología para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural: manual técnico. Guatemala.
- INAB. (2005). Identificación de las tierras forestales de captación y regulación hidrológica, de la subcuenca Los Vados, cuenca río Los Esclavos. Guatemala, INAB/CEFE. 70. 93 p.
- INEGI. (2008). Guía para la interpretación de cartografía. Edafología. Aguascalientes, Ags. México.
- INEGI. (2002). *Estudio Hidrológico del Estado de San Luis Potosí*. Aguascalientes, Aguascalientes.
- INEGI. (2010). Censo general de población y vivienda 2010. México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INTERAPAS. (2013). *Gestión del Agua en la zona metropolitana de San Luis Potosí, Cerro de San Pedro y Soledad de Graciano Sánchez*. San Luis Potosí, San Luis Potosí. Disponible en: <http://www.interapas.mx/index.php/component/content/article/10-interapas/59-agua-en-mexico-y-san-luis-potosi>
- INTERAPAS. (2014). *Informe Anual 2014*. San Luis Potosí. Disponible en: <http://interapas.mx/nosotros/informesanuales/>
- INTERAPAS. (2015). *Informe Anual 2015*. San Luis Potosí. Disponible en: <http://interapas.mx/nosotros/informesanuales/>
- INTERAPAS. (2016). *Informe Anual 2016*. San Luis Potosí. Disponible en: <http://interapas.mx/nosotros/informesanuales/>
- INTERAPAS. (2017). *Informe Anual 2017*. San Luis Potosí. Disponible en: <http://interapas.mx/nosotros/informesanuales/>
- INTERAPAS. (2018). *Informe Anual 2018*. San Luis Potosí. Disponible en: <http://interapas.mx/nosotros/informesanuales/>
- IPICYT. (2007). *Estudio hidrogeológico de la porción Oriental del Valle de San Luis Potosí*. San Luis Potosí, San Luis Potosí.
- IPICYT, & SEGAM. (2018). *Estudio Técnico de Factibilidad para el establecimiento del Área Natural Protegida Reserva Estatal “ Sierra de San Miguelito ” San Luis Potosí*. San Luis Potosí.
- Jain, A. K. (2010). Data clustering: 50 years beyond K-means. *Pattern Recognition Letters*, 31(8), 651–666. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2009.09.011>
- Jáuregui, E. (2004). Impact of land-use changes on the climate of the Mexico City Region. *Investigaciones Geográficas, UNAM*, 55, 46–60.
- Juahir, H., Zain, S. M., Yusoff, M. K., Hanidza, T. I. T., Armi, A. S. M., Toriman, M. E., & Mokhtar, M. (2011). Spatial water quality assessment of Langat River Basin (Malaysia) using environmetric techniques. *Environmental Monitoring and Assessment*, 173(1–4), 625–641. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1411-x>
- Khalil, M. A., & Monterio-Santos, F. A. (2009). Influence of degree of saturation in the electric resistivity-hydraulic conductivity relationship. *Surveys in Geophysics*, 30(6), 601–615. <https://doi.org/10.1007/s10712-009-9072-4>

- Lamichhane, S., & Shakya, N. M. (2019). Alteration of groundwater recharge areas due to land use/cover change in Kathmandu Valley, Nepal. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 26(October 2019), 100635. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100635>
- Lee, E. M., Doornkamp, J. C., Griffiths, J. S., & Tragheim, D. G. (1988). Environmental geology mapping for land use planning purposes in the Torbay area. *Geoscience in South-West England*, 7(1), 18–25.
- López-Álvarez, B. (2012). *Cambios de uso de suelo y su impacto en el sistema acuífero en el Valle de San Luis Potosí, aplicando modelación numérica*. Tesis de Doctorado. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. 130 p.
- López-Álvarez, B., Ramos-Leal, J. A., Moran-Ramírez, J., Cardona-Benavides, A., & Hernández-García, G. (2013). Origen de la calidad del agua del acuífero colgado y su relación con los cambios de uso de suelo en el Valle de San Luis Potosí. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 65(1), 9–26.
- López-Álvarez, B., Ramos-Leal, J. A., Santacruz, G., Morán-Ramírez, J., Carranco-Lozada, S. E., Noyola-Medrano, M. C., & Pineda-Martínez, L. F. (2013). Cálculo del índice de pobreza del agua en zonas semiáridas: caso Valle de San Luis Potosí. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 4(29), 249–260.
- López-Doncel, R. (2003). La Formación Tamabra del Cretácico medio en la porción central del margen occidental de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, centro-noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20(1), 1–19.
- López-Loera, H., & Tristán-González, M. (2013). Geología y magnetometría aérea del Graben de Villa de Reyes, San Luis Potosí, Mesa Central de México: implicaciones tectónicas y geohidrológicas. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 65(1), 137–156. <https://doi.org/10.18268/bsgm2013v65n1a11>
- López-Martínez, J. D., & Guerrero-Alvarado, J. (1999). Contenido de humedad del suelo para decidir la siembra en agricultura de zonas áridas. *Terra Latinoamericana*, 17(1), 51–57.
- Majkić-Dursun, B., Oros, I., & Boreli-Zdravković, Đ. (2018). Spatial distribution of groundwater quality parameters in the Velika Morava River Basin, central Serbia. *Environmental Earth Sciences*, 77(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7224-x>
- Marín-Celestino, A. E., Martínez-Cruz, D. A., Otazo-Sánchez, E. M., Gavi-Reyes, F., & Vásquez-Soto, D. (2018). Groundwater quality assessment: An improved approach to K-means clustering, principal component analysis and spatial analysis: A case study. *Water (Switzerland)*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/w10040437>
- Marín-Celestino, A. E., Ramos-Leal, J. A., Martínez-Cruz, D. A., Tuxpan-Vargas, J., De Lara-Bashulto, J., & Morán-Ramírez, J. (2019). Identification of the Hydrogeochemical Processes and Assessment of Groundwater Quality, Using Multivariate Statistical Approaches and Water Quality Index in a Wastewater Irrigated Region. *Water*, 11(8), 1–24. <https://doi.org/10.3390/w11081702>
- Martínez-Valdés, Y., & Villalejo-García, V. (2018). La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(1), 58–72.

- Mata-Martínez, M. A. (2011). *Estimación de la Evapotranspiración en el Valle de San Luis Potosí y zonas aledañas por medio de Imágenes de Satélite*. Tesis de Maestría. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. 154 p.
- Matsumoto, N., & Shigematsu, N. (2018). In-situ permeability of fault zones estimated by hydraulic tests and continuous groundwater-pressure observations. *Earth, Planets and Space*, 70(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0765-5>
- Matus, O., Faustino, J., & Jiménez, F. (2009). *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica*. Nicaragua.
- Mayer, A., May, W., Lukkarila, C., & Diehl, J. (2007). Estimation of fault-zone conductance by calibration of a regional groundwater flow model: Desert Hot Springs, California. *Hydrogeology Journal*, 15(6), 1093–1106. <https://doi.org/10.1007/s10040-007-0158-0>
- Mendoza-Chávez, Y. J. (2016). *Especies de zooplancton presentes en agua contaminada con arsénico en Matehuala, San Luis Potosí, México*. Tesis de Maestría. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. 96 p.
- Mondal, N. C., Devi, A. B., Raj, P. A., Ahmed, S., & Jayakumar, K. V. (2016). Estimation of aquifer parameters from surficial resistivity measurement in a granitic area in Tamil Nadu. *Current Science*, 111(3), 524–534. <https://doi.org/10.18520/cs/v111/i3/524-534>
- Montaner-Salas, M. E., & Sánchez-Almohalla Serrano, E. (1988). Aproximación, por el Método de Thornthwaite, al cálculo de la infiltración de la lluvia útil. *Papeles de Geografía*, 14, 223–235.
- Montenegro, A., & Ragab, R. (2010). Hydrological response of a Brazilian semi-arid catchment to different land use and climate change scenarios: A modelling study. *Hydrological Processes*, 24(19), 2705–2723. <https://doi.org/10.1002/hyp.7825>
- Morbidelli, R., Saltalippi, C., Flammini, A., Cifrodelli, M., Corradini, C., & Govindaraju, R. S. (2015). Infiltration on sloping surfaces: Laboratory experimental evidence and implications for infiltration modeling. *Journal of Hydrology*, 523, 79–85. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.041>
- Mu, W., Yu, F., Li, C., Xie, Y., Tian, J., Liu, J., & Zhao, N. (2015). Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and soil moisture content on different growing stages of spring maize. *Water (Switzerland)*, 7(6), 2990–3008. <https://doi.org/10.3390/w7062990>
- Nanganoa, L. T., Okolle, J. N., Missi, V., Tueche, J. R., Levai, L. D., & Njukeng, J. N. (2019). Impact of different land-use systems on soil physicochemical properties and macrofauna abundance in the humid tropics of Cameroon. *Applied and Environmental Soil Science*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5701278>
- Nara, Y., Morimoto, K., Hiroyoshi, N., Yoneda, T., Kaneko, K., & Benson, P. M. (2012). Influence of relative humidity on fracture toughness of rock: Implications for subcritical crack growth. *International Journal of Solids and Structures*, 49(18), 2471–2481. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.05.009>

- Naranjo-Fernández, N., Guardiola-Albert, C., Aguilera, H., Serrano-Hidalgo, C., & Montero-González, E. (2020). Clustering Groundwater Level Time Series of the Exploited Almonte-Marismas Aquifer in Southwest Spain. *Water*, 12(00), 21. <https://doi.org/10.3390/w12041063>
- Nassif, S. H., & Wilson, E. M. (1975). The influence of slope and rain intensity on runoff and infiltration. *Hydrological Sciences Bulletin*, 20(4), 539–553. <https://doi.org/10.1080/02626667509491586>
- National Groundwater Association. (2010). Forces Controlling Water in Rocks. Recuperado de: [//www.ngwa.org/what-is-groundwater/About-groundwater/forces-controlling-water-in-rocks](http://www.ngwa.org/what-is-groundwater/About-groundwater/forces-controlling-water-in-rocks)
- Nicholls, N., Della-Marta, P., & Collins, D. (2004). 20th century changes in temperature and rainfall in New South Wales. *Australian Meteorological Magazine*, 53(4), 263–268.
- Nieto-Samaniego, Ángel F., Ferrari, L., Alaniz-Alvarez, S. A., Labarthe-Hernández, G., & Rosas-Elguera, J. (1999). Variation of Cenozoic extension and volcanism across the southern Sierra Madre Occidental volcanic province, Mexico. *Bulletin of the Geological Society of America*, 111(2–3), 347–363. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1999\)111<0347:voceav>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1999)111<0347:voceav>2.3.co;2)
- Nieto-Samaniego, Ángel Francisco, Alaniz-Álvarez, S. A., & Camprubí í Cano, A. (2005). La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. *Boletín De La Sociedad Geológica Mexicana*, 3, 285–318.
- Noriega-Arriaga, J. P. (2005). *Determinación de las áreas principales de recarga hídrica natural en la microcuenca del Río Sibacá, Chinique, Quiché*. Tesis de Licenciatura. Universidad de San Carlos de Guatemala. 83 p.
- Noyola-Medrano, M. C., Ramos-Leal, J. A., Domínguez-Mariani, E., Pineda-Martínez, L. F., López-Loera, H., & Carbajal, N. (2009). Factores que dan origen al minado de acuíferos en ambientes áridos: Caso Valle de San Luis Potosí. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(2), 395–410.
- Ochoa-González, G. H., Carreón-Freyre, D., Cerca, M., & López-Martínez, M. (2015). Assessment of groundwater flow in volcanic faulted areas. A study case in Queretaro, Mexico. *Geofísica Internacional*, 54(3), 199–220. <https://doi.org/10.1016/j.gi.2015.04.016>
- Ofungwu, J. (2014). *Statistical Applications for Environmental Analysis and Risk Assessment*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Oh, J., Kim, H.-R., Yu, S., Kim, K.-H., & Yun, S.-T. (2020). Delineating the impacts of poultry burial leachate on shallow groundwater in a reclaimed agro-livestock farming area, using multivariate statistical analysis of hydrochemical data. *Environmental Science and Pollution Research*, 00(00), 14. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08178-5>
- Okiongbo, K. S. & Oborie, E. (2015). Investigation of relationships between geoelectric and Hydraulic parameters in a quaternary alluvial aquifer in Yenagoa, Southern Nigeria. *Ife Journal of Science*, 17(1), 163-172.
- Okubo, C. H. (2004). Rock mass strength and slope stability of the Hilina slump, Kīlauea volcano, Hawai'i. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 138, 43–76. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.06.006>

- Orellana, L. (2001). *Estadística descriptiva*. Recuperado de: [http://www.dm.uba.ar/materias/estadistica_Q/2011/1/modulo descriptiva.pdf](http://www.dm.uba.ar/materias/estadistica_Q/2011/1/modulo%20descriptiva.pdf)
- Orozco-Esquivel, M. T., Nieto-Samaniego, A. F., & Alaniz-Alvarez, S. A. (2002). Origin of rhyolitic lavas in the Mesa Central, Mexico, by crustal melting related to extension. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 118(1–2), 37–56. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(02\)00249-4](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00249-4)
- Owoade, O. K., Olise, F. S., Ogundele, L. T., Fawole, O. G., & Olaniyi, H. B. (2012). Correlation between particulate matter concentrations and meteorological parameters at a site in Ile-Ife, Nigeria. *Correlation between Particulate Matter Concentrations and Meteorological Parameters at a Site in Ile-Ife, Nigeria*, 14(1), 83–93.
- Pabón, J. D., Rodríguez, N., Bernal, N. R., Castiblanco, M. A., & Sánchez, Y. V. (2014). Modelamiento del efecto del cambio en el uso del suelo en el clima local-regional sobre los Andes colombianos. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 37(144), 379–391. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.16>
- Pagano, T. C., & Sorooshian, S. (2002). Hydrologic Cycle. *Encyclopedia of Global Environmental Change*, 1, 450–464.
- Palacio, P., & Betancur, T. (2007). Identificación de fuentes y zonas de recarga a partir de isótopos estables del agua (caso de estudio Bajo Cauca antioqueño). *Investigación*, 10(4), 93p.
- Pantelidis, L. (2009). Rock slope stability assessment through rock mass classification systems. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(2), 315–325. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.06.003>
- Peinado-Guevara, H. J., Green-Ruiz, C. R., Delgado-Rodríguez, O., Herrera-Barrientos, J., Belmonte-Jiménez, S., Ladrón de Guevara-Torres, M. de los Á., & Shevvin, V. (2010). Estimación de la conductividad hidráulica y contenido de finos a partir de leyes experimentales que relacionan parámetros hidráulicos y eléctricos. *Ra Ximhai*, 6, 469–478. <https://doi.org/10.35197/rx.06.03.2010.14.hp>
- Peñuela-Arévalo, L. A. (2007). *Proceso de recarga-descarga de agua subterránea en zonas receptoras de pago por servicio ambiental hidrológico, Sierras Nevada y Las Cruces-México*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. 207 p.
- Peñuela-Arévalo, L. A., & Carrillo-Rivera, J. J. (2012). Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: Centro-sur de la Mesa Central, México. *Investigaciones Geográficas*, 81, 18–32. <https://doi.org/10.14350/rig.30518>
- Pérez, G. (s.f.). Reservorios de agua y tiempos de residencia. Disponible en: https://www.ciclohidrológico.com/reservorios_de_agua_y_tiempos_de_residencia
- Pérez-Cutillas, P., Martínez-Pagán, P., Rodríguez-Estrella, T., Conesa-García, C., & Navarro-Hervás, F. (2015). La tomografía eléctrica como técnica de apoyo para la identificación y reconocimiento de meandros abandonados., 1833–1842.

- Pérez-Hernández, K. de J. (2019). *Estudio geofísico para la prospección de fuentes alternativas de agua libre de arsénico en el área de Cerrito Blanco, Matehuala, SLP*. Tesis de Maestría. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. 105 p.
- Pérez-López, C. (2004). *Técnicas de Análisis Multivariante de Datos: Aplicaciones con SPSS* (Primera Edición). Madrid, España: PEARSON EDUCACIÓN, S.A. 672 p.
- Pérez-Suárez, M., Arredondo-Moreno, J. T., Huber-Sannwald, E., & Serna-Pérez, A. (2014). Forest structure, species traits and rain characteristics influences on horizontal and vertical rainfall partitioning in a semiarid pine-oak forest from Central Mexico. *Ecohydrology*, 7(2), 532–543. <https://doi.org/10.1002/eco.1372>
- Picone, N., & M. Campo, A. (2014). Comparación urbano-rural de parámetros meteorológicos en la ciudad de Tandil, Argentina. *Revista de Climatología*, 14, 13–23.
- Pidwirny, M. (2006). "The Hydrologic Cycle". *Fundamentals of Physical Geography*, 2nd Edition. Disponible en: <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/8b.html>
- Pineda-Martínez, L. F., Carbajal, N., & Medina-Roldán, E. (2007). Regionalization and classification of bioclimatic zones in the central-northeastern region of México using principal component analysis (PCA). *Atmosfera*, 20(2), 133–145.
- Puente-Castillo, W. L. (2014). *Estudio geotécnico y de peligro geomorfológico de una porción de la Sierra de San Miguelito, S.L.P.* Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 199 p.
- Ramos-Leal, J. A., Martínez-Ruiz, V. J., Rangel-Mendez, J. R., & Alfaro De La Torre, M. C. (2007a). Hydrogeological and mixing process of waters in aquifers in arid regions: A case study in San Luis Potosi Valley, Mexico. *Environmental Geology*, 53(2), 325–337. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0648-3>
- Ramos-Leal, J. A., & Torres-Gaytan, D. E. (2020). *Métodos geoelectricos en Mexquitic de Carmona , SLP. Con fines de aprovechamiento*. San Luis Potosí.
- Ramos-Leal, J. A., López-Loera, H., Martínez-Ruiz, V. J., & Aranda-Gómez, J. J. (2007b). Sucesión de eventos y geometría de la parte central del acuífero del graben de Villa de Reyes (San Luis Potosí , México) inferida a partir de datos geoelectricos. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24(1), 31–46.
- Rencher, A. C. (2002). *Methods of Multivariate Analysis: Book* (Second Edition). Canada: Wiley-Interscience. 727 p. <https://doi.org/10.1080/07408170500232784>
- Restrepo, B. L., & González, L. J. (2007). De Pearson a Spearman. *Rev Col Cienc Pec*, 20(2), 183–192. Retrieved from Martínez Ortega, Rosa María; Tuya Pendás, Leonel C.; Martínez Ortega, Mercedes; Pérez Abreu, Alberto; Cánovas, Ana María
- Reyes-Nava, M. (2005). *Programa De Manejo Sustentable Sierra De San Miguelito, San Luis Potosí*. San Luis Potosí.

- Rizzo, E., Giampaolo, V., Capozzoli, L., & Grimaldi, S. (2019). Deep electrical resistivity tomography for the hydrogeological setting of muro lucano mounts aquifer (Basilicata, Southern Italy). *Geofluids*, 2019, 11. <https://doi.org/10.1155/2019/6594983>
- Rodríguez-Lugo, D. M., & Pérez-Álvarez, P. (2014). Determinación de la recarga hídrica potencial en la cuenca hidrográfica Guara, de Cuba. *Aqua-LAC*, 6, 58–70.
- Rodríguez-Ríos, R., Tristán-González, M., & Aguillón-Robles, A. (2013). Estructura y geoquímica de un grupo de domos dacíticos del norponiente del campo volcánico de San Luis Potosí, México. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 65(1), 109–122. <https://doi.org/10.18268/bsgm2013v65n1a9>
- Rodríguez-Robles, U. (2011). *Relaciones hídricas en dos especies forestales simpátricas de un bosque semirrido: potencial hídrico, transpiración, conductancia estomática y eficiencia del uso del agua como indicadores del estado hídrico*. Tesis de Maestría. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C. 74 p.
- Rodríguez-Robles, U. (2016). *Geoecohydrological mechanisms in semiarid tropical forest: spatial and temporal use of water of two coexisting forest tree species*. Tesis de Doctorado. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C. 171 p.
- Rodríguez-Robles, U., Arredondo, J. T., Huber-Sannwald, E., & Vargas, R. (2015). Geoecohydrological mechanisms couple soil and leaf water dynamics and facilitate species coexistence in shallow soils of a tropical semiarid mixed forest. *New Phytologist*, 207(1), 59–69. <https://doi.org/10.1111/nph.13344>
- Rodríguez-Robles, U., Arredondo, J. T., Huber-Sannwald, E., Yépez, E. A., & Ramos-Leal, J. A. (2020). Coupled plant traits adapted to wetting/drying cycles of substrates co-define niche multidimensionality. *Plant Cell and Environment*, (April), 1–15. <https://doi.org/10.1111/pce.13837>
- Rodríguez-Robles, U., Arredondo, T., Huber-Sannwald, E., Ramos-Leal, J. A., & Yépez, E. A. (2017). Technical note: Application of geophysical tools for tree root studies in forest ecosystems in complex soils. *Biogeosciences*, 14(23), 5343–5357. <https://doi.org/10.5194/bg-14-5343-2017>
- Rodríguez-Rodríguez, R. M. (2020). *Elementos potencialmente tóxicos en el polvo urbano de la zona metropolitana de San Luis Potosí*. Tesis de Maestría. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. 102 p.
- Royston, J. P. (1983). Some Techniques for Assessing Multivariate Normality Based on the Shapiro-Wilk W. *Applied Statistics*, 32(2), 121–133. <https://doi.org/10.2307/2347291>
- Rukundo, E., & Doğan, A. (2019). Dominant influencing factors of groundwater recharge spatial patterns in Ergene river catchment, Turkey. *Water (Switzerland)*, 11(4), 1–25. <https://doi.org/10.3390/w11040653>
- Salcedo-Pérez, E., Galvis-Spinola, A., Hernández-Mendoza, T. M., Rodríguez-Macias, R., Zamora-Natera, F., Bugarin-Montoya, R., & Carrillo-González, R. (2007). La humedad aprovechable y su relación con la materia orgánica y superficie específica del suelo. *Terra Latinoamericana*, 25(4), 419–425.
- Sánchez-San Román, J. F. (2009). *Conceptos fundamentales de Hidrogeología*. Salamanca, España. Disponible en: <http://hidrologia.usal.es>

- Sattar, G. S., Keramat, M., & Shahid, S. (2016). Deciphering transmissivity and hydraulic conductivity of the aquifer by vertical electrical sounding (VES) experiments in Northwest Bangladesh. *Applied Water Science*, 6(1), 35–45. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0203-9>
- Schober, P., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesthesia and Analgesia*, 126(5), 1763–1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>
- Segura-Castruita, M. Á., & Ortiz-Solorio, C. A. (2017). Modelación de la evapotranspiración potencial mensual a partir de temperaturas máximas-mínimas y altitud. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 8(3), 93–110. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-03-06>
- Setiawan, O., Sartohadi, J., Hadi, M. P., & Mardiatno, D. (2019). Infiltration characterization using principal component analysis and K-means cluster analysis on quaternary volcanic landscape at the southern flank of Rinjani Volcano, Lombok Island, Indonesia. *Physical Geography*, 00(00), 21. <https://doi.org/10.1080/02723646.2019.1620526>
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3–4), 591–611.
- Sharda, V. N., Kurothe, R. S., Sena, D. R., Pande, V. C., & Tiwari, S. P. (2006). Estimation of groundwater recharge from water storage structures in a semi-arid climate of India. *Journal of Hydrology*, 329(1–2), 224–243. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.015>
- Sharifi, E., & Lehmann, S. (2015). Correlation analysis of surface temperature of rooftops, streetscapes and urban heat island effect: Case study of central Sydney. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 9(1), 3–11. <https://doi.org/10.4090/juee.2015.v9n1.003011>
- Sharp, J. M. (2010). The impacts of urbanization on groundwater systems and recharge. *Aquamundi*, 1, 51–56. <https://doi.org/10.4409/Am-004-10-0008>
- Shaxson, F., & Barber, R. (2005). *Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal: El significado de la porosidad del suelo*. Roma, Italia: Boletín de Suelos de la FAO 79. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/008/y4690s/y4690s00.htm>
- Shrestha, S., & Kazama, F. (2007). Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin, Japan. *Environmental Modelling and Software*, 22(4), 464–475. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.02.001>
- Singhal, B. B. S., & Gupta, R. P. (2010). *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks* (Second Edition). Berlín, Alemania: Springer, Dordrecht. 415 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Steinley, D. (2006). K-means clustering: A half-century synthesis. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 59(1), 1–34. <https://doi.org/10.1348/000711005X48266>
- Stevens-Vázquez, G. S. (2014). La vulnerabilidad hídrica en la ciudad de San Luis Potosí. Un análisis espacial. *Revista de El Colegio de San Luis*, (4), 130. <https://doi.org/10.21696/rcsl042012530>

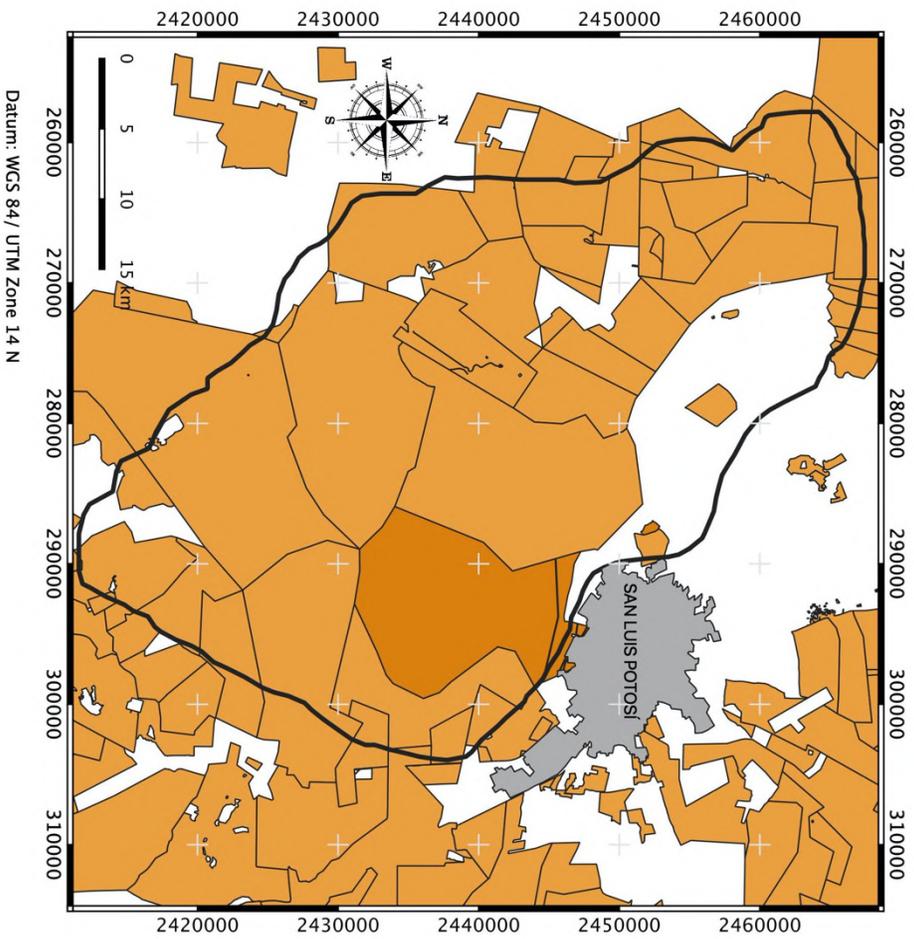
- Sudha, K., Israil, M., Mittal, S., & Rai, J. (2009). Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations. *Journal of Applied Geophysics*, 67(1), 74–79. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2008.09.012>
- Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2013). *Using Multivariate Statistics* (Sixth Edition). United States: Pearson Education, Inc. 1018 p.
- Tarbut, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física* (8va Edición). Madrid, España: Pearson Prentice Hall. 712 p. [https://doi.org/10.1016/0196-0709\(91\)90073-O](https://doi.org/10.1016/0196-0709(91)90073-O)
- Tardy, M., Longoria, J. F., Martínez-Reyes, J., Miltre, L. M., Patiño, M., Podilla, R., & Ramírez R., C. (1975). Observaciones generales sobre la estructura de la Sierra Madre Oriental; la aloctonía del conjunto Cadena Alta-Altiplano Central, entre Torreón, Coah. y San Luis Potosí, S.L.P. México. *Revista Inst. Geol. U.N.A.M.*, 75(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.365>
- Tardy, M., Ramírez R., C., & Patiño, M. (1976). El frente de la Napa de Parras (Conjunto Cadena Alta-Altiplano Central) en el área de Aramberri, N.L., Sierra Madre Oriental, México. *Revista Del Instituto de Geología*, 2, 1–12.
- Tesfaldet, Y. T., & Puttiwongrak, A. (2019). Seasonal groundwater recharge characterization using time-lapse electrical resistivity tomography in the thepkasattriwatershed on Phuket Island, Thailand. *Hydrology*, 6(2). <https://doi.org/10.3390/hydrology6020036>
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *American Geographical Society* 38(1): 55-94.
- Tóth, J. (2000). Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones. *Boletín Geológico y Minero*, 111(4), 9–26.
- Treviño-Garza, E., Muñoz R., C., Cavazos C., C., & Barajas-Chávez, L. (2002). Evaluación del flujo hídrico superficial en la Sierra de San Carlos, Tamaulipas. *Ciencia UANL*, 5(4), 525–530.
- Tristán-González, M., Aguillón-Robles, A., Barboza-Gudiño, J. R., Torres-Hernández, J. R., Bellon, H., López-Doncel, R., & Labarthe-Hernández, G. (2009). Geocronología y distribución espacial del vulcanismo en el Campo Volcánico de San Luis Potosí. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 61(3), 287–303. <https://doi.org/10.18268/bsgm2009v61n3a1>
- Tsai, J. P., Chen, Y. W., Chang, L. C., Chen, W. F., Chiang, C. J., & Chen, Y. C. (2014). The assessment of high recharge areas using DO indicators and recharge potential analysis: a case study of Taiwan's Pingtung plain. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 29(3), 815–832. <https://doi.org/10.1007/s00477-014-0941-0>
- Urrutia, J., Herrera, C., Custodio, E., Jódar, J., & Medina, A. (2019). Groundwater recharge and hydrodynamics of complex volcanic aquifers with a shallow saline lake: Laguna Tuyajto, Andean Cordillera of northern Chile. *Science of the Total Environment*, 697, 134116. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134116>
- Vázquez-Rodríguez, B. A. (2014). *Análisis de imágenes resistivas para determinar la conductividad hidráulica*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. 95 p.

- Vélez-Otálvaro, M. V., & Vásquez-Ariza, L. M. (2004). Métodos para determinar la recarga en acuíferos. *Primer Congreso Colombiano de Hidrogeología*, 20.
- Vergopolan, N., & B. Fisher, J. (2016). The impact of deforestation on the hydrological cycle in Amazonia as observed from remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 37(22), 5412–5430. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1232874>
- Vogelgesang, J. A., Holt, N., Schilling, K. E., Gannon, M., & Tassier-Surine, S. (2020). Using high-resolution electrical resistivity to estimate hydraulic conductivity and improve characterization of alluvial aquifers. *Journal of Hydrology*, 580(July 2019), 123992. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123992>
- Wakode, H. B., Baier, K., Jha, R., & Azzam, R. (2018). Impact of urbanization on groundwater recharge and urban water balance for the city of Hyderabad, India. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(1), 51–62. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.10.003>
- Wang, T., Stodt, J. A., Stierman, D. J., & Murdoch, L. C. (1991). Mapping hydraulic fractures using a borehole-to-surface electrical resistivity method. *Geoexploration*, 28(3–4), 349–369. [https://doi.org/10.1016/0016-7142\(91\)90041-A](https://doi.org/10.1016/0016-7142(91)90041-A)
- Warsi, T., Kumar, V. S., Dhakate, R., Manikyamba, C., Rao, T. V., & Rangarajan, R. (2019). An integrated study of electrical resistivity tomography and infiltration method in deciphering the characteristics and potentiality of unsaturated zone in crystalline rock. *HydroResearch*, 2, 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2019.11.009>
- White, P. A., Meilhac, C., Zemansky, G., & Kilgour, G. (2008). *Groundwater resource investigations of the Western Bay of Plenty area stage 1 – conceptual geological and hydrological models and preliminary allocation assessment. GNS Client report 2008/240.*
- Wiggering, H. (2014). The geology - land use - nexus. *Environmental Earth Sciences*, 71, 5037–5044. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2908-8>
- Xu, S.-S., Nieto-Samaniego, A. F., & Alaniz-Álvarez, S. A. (2004). Tilting mechanisms in domino faults of the Sierra de San Miguelito, central Mexico. *Geologica Acta*, 2(3), 189–201.
- Xu, S., Nieto-Samaniego, A. F., & Alaniz-Álvarez, S. A. (2013). Origin of superimposed and curved slickenlines in San Miguelito range, Central México. *Geologica Acta*, 11(1), 103–112. <https://doi.org/10.1344/105.000001760>
- Yadav, I. C., Devi, N. L., Mohan, D., Shihua, Q., & Singh, S. (2014). Assessment of groundwater quality with special reference to arsenic in Nawalparasi district, Nepal using multivariate statistical techniques. *Environmental Earth Sciences*, 72(1), 259–273. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2952-4>
- Yasir, S. F., Jani, J., & Mukri, M. (2018). Geophysical measurement for estimation of groundwater hydraulic properties. *Data in Brief*, 21, 907–910. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.10.057>
- Zaidi, F. K., & Kassem, O. M. K. (2012). Use of electrical resistivity tomography in delineating zones of groundwater potential in arid regions: A case study from Diriyah region of Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*, 5(2), 327–333. <https://doi.org/10.1007/s12517-010-0165-7>

13 ANEXOS

13.1 Anexos de figuras

Anexo 1. Tierras de Uso Común en el Estado de San Luis Potosí



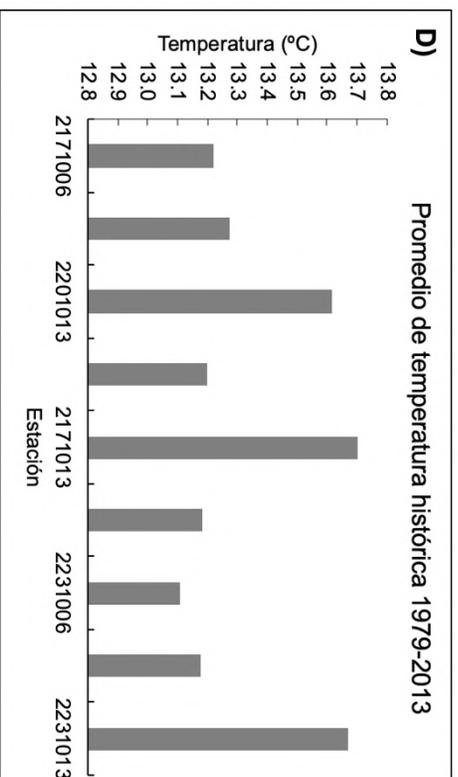
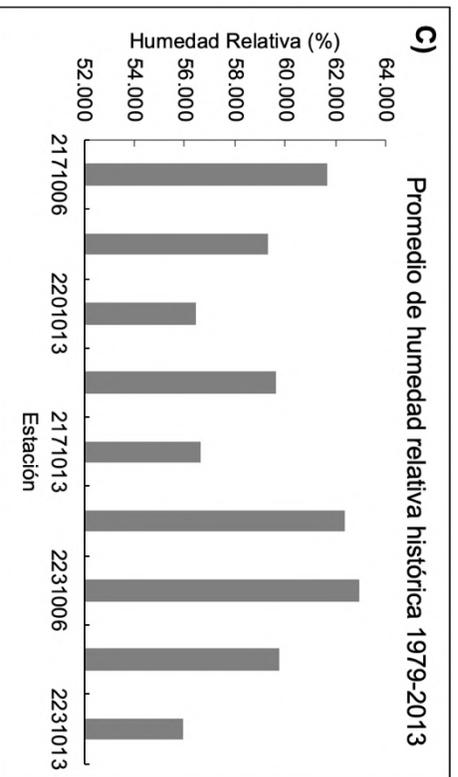
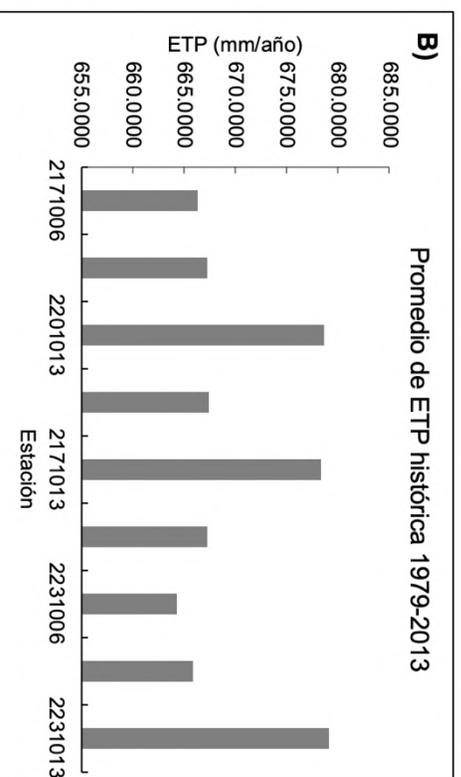
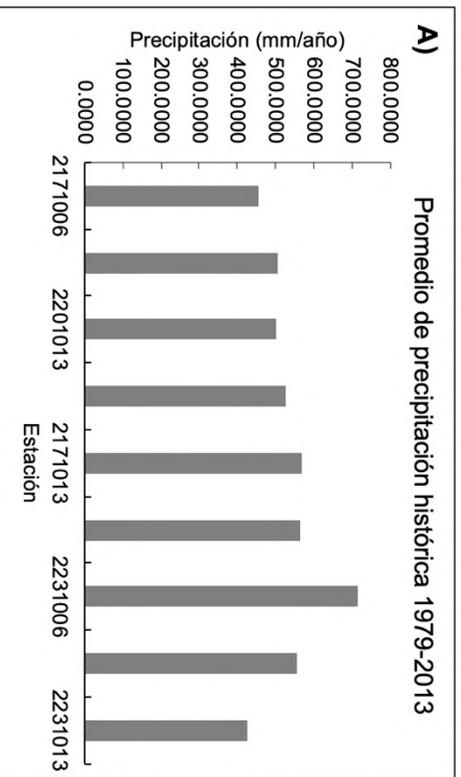
Datum: WGS 84 / UTM Zone 14 N

LEYENDA

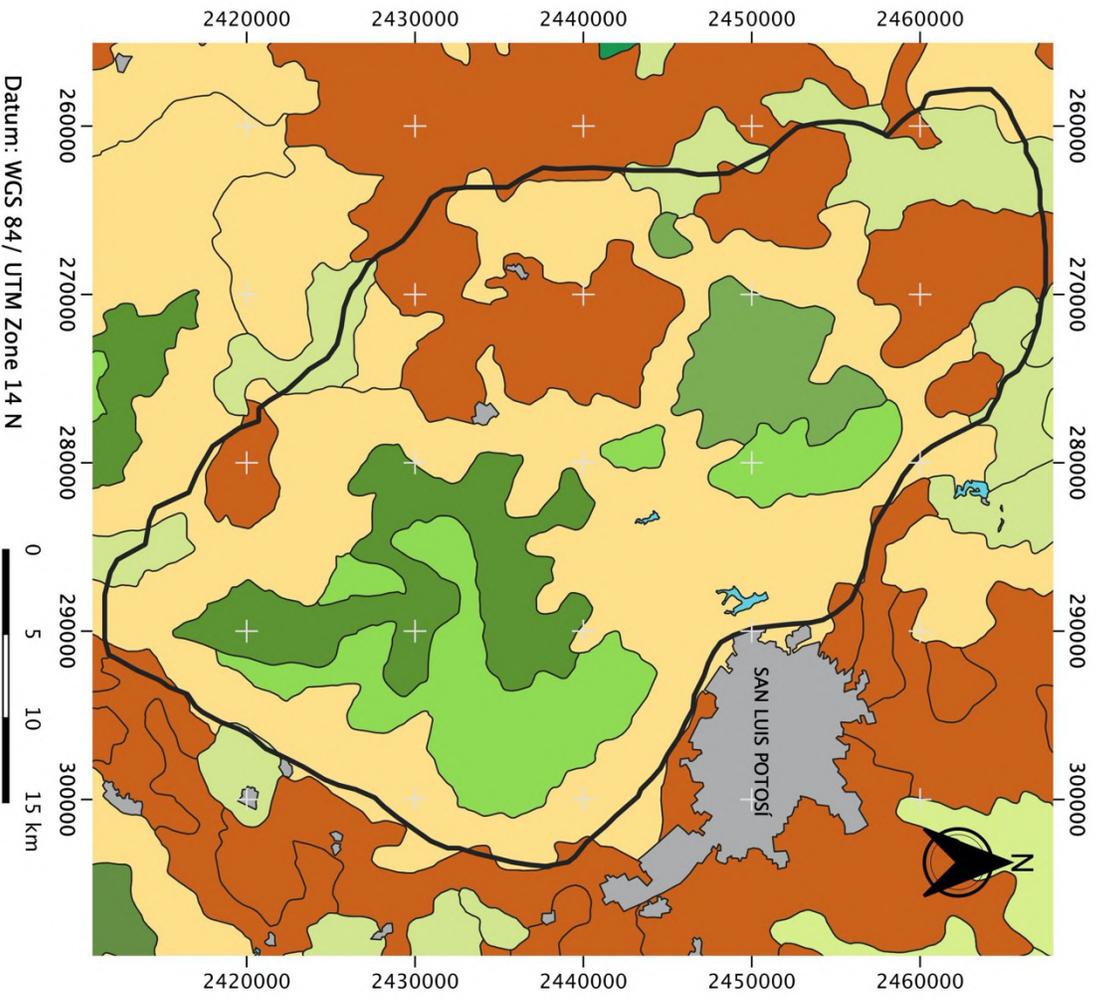
-  Área de estudio
-  Tierras de Uso Común
-  Comunidad
-  Ejido



Anexo 2. Gráficas de precipitación, ETP, humedad relativa y temperatura de los 9 puntos de Referencia Climáticos.



Anexo 3. Uso de suelo y tipo de vegetación en el área de estudio

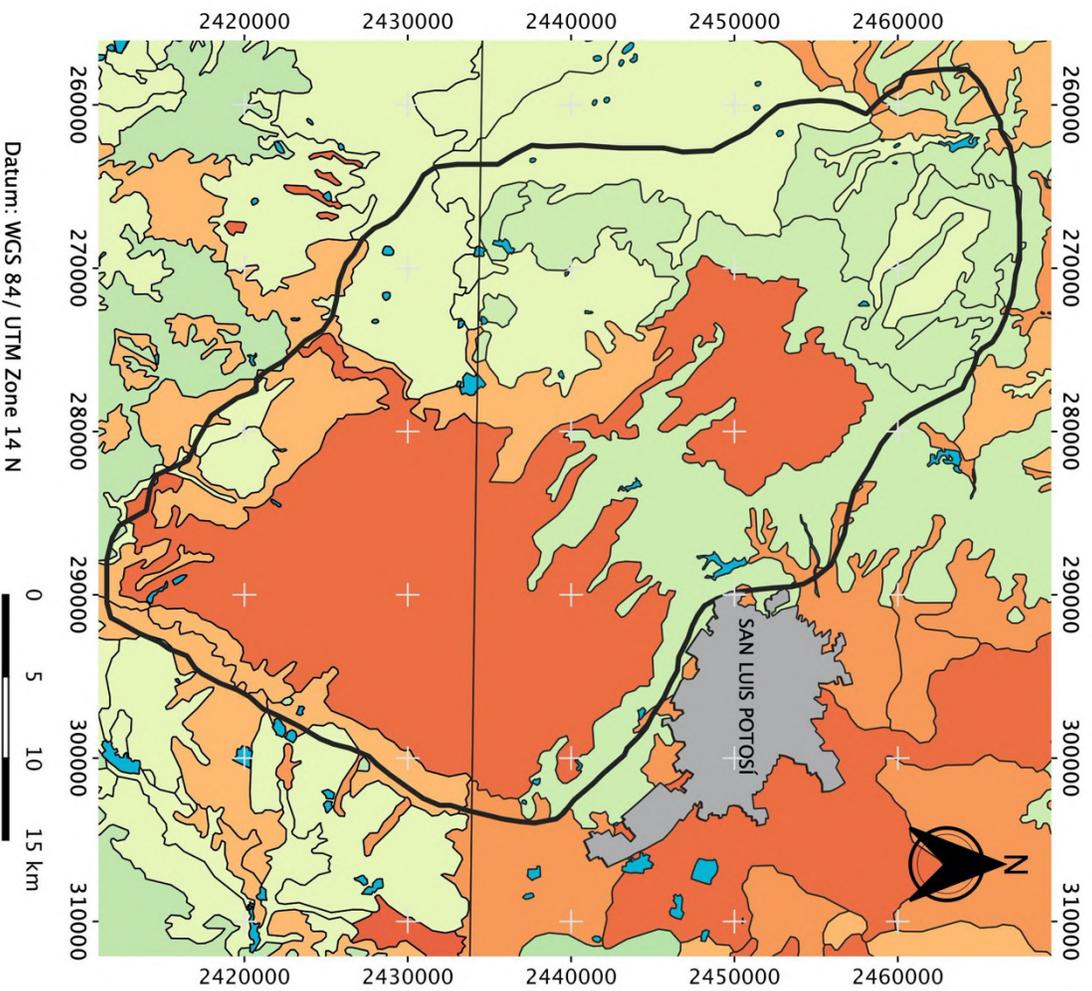


LEYENDA

- Área de estudio
- Uso del suelo y vegetación**
- Agricultura de Temporal
- Área Urbana
- Bosque de Encino
- Bosque de Pino
- Chaparral
- Cuerpo de Agua
- Matorral Crasicaule
- Pastizal Natural



Anexo 4. Tipo de suelo en el área de estudio

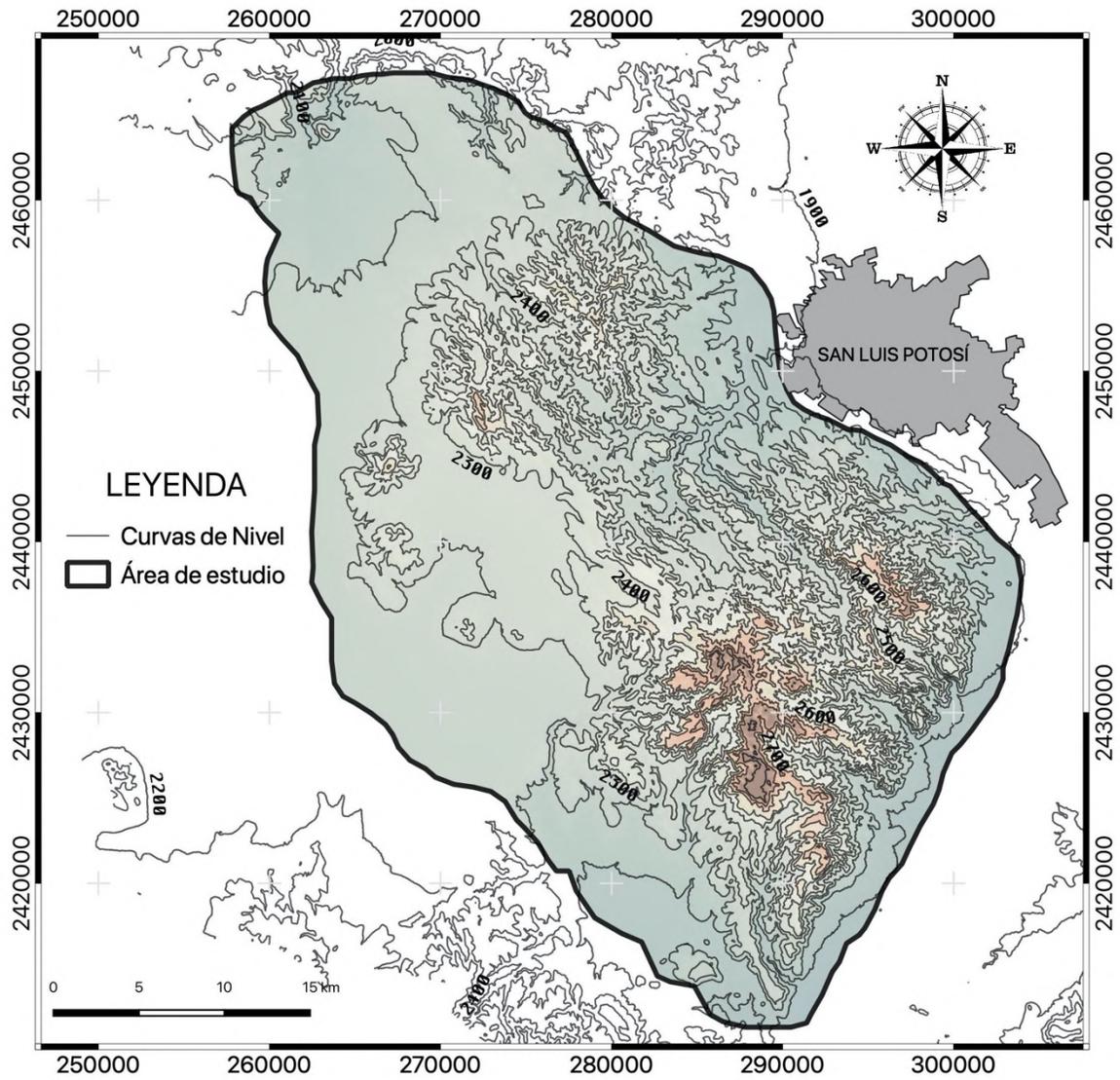


LEYENDA

- Área de estudio
- Tipo de suelo**
- Feozem
- Fluvisol
- Litosol
- Luvisol
- Cuerpo de agua
- Planosol
- Regosol

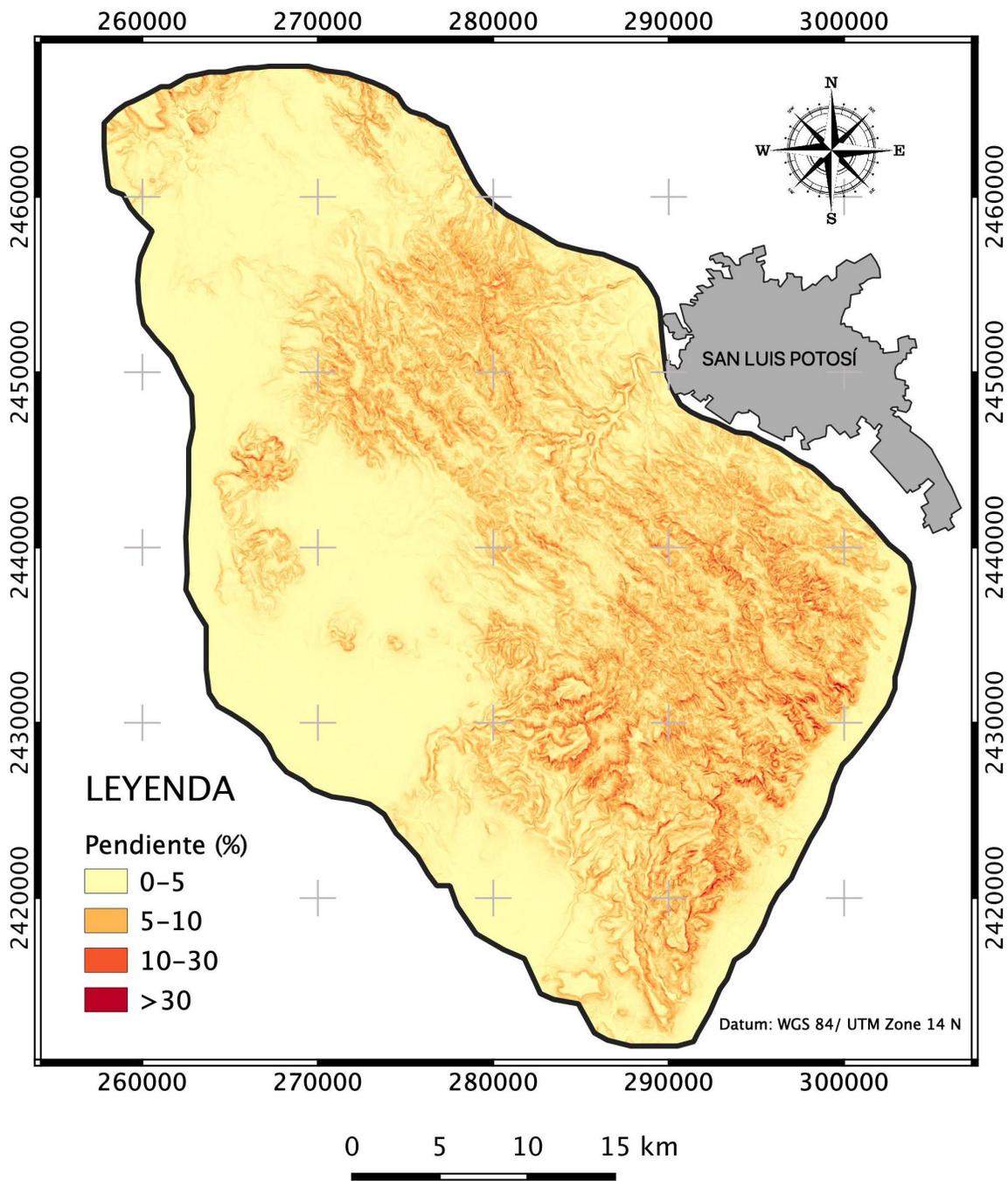


Anexo 5. Altitud (msnm) en el área de estudio

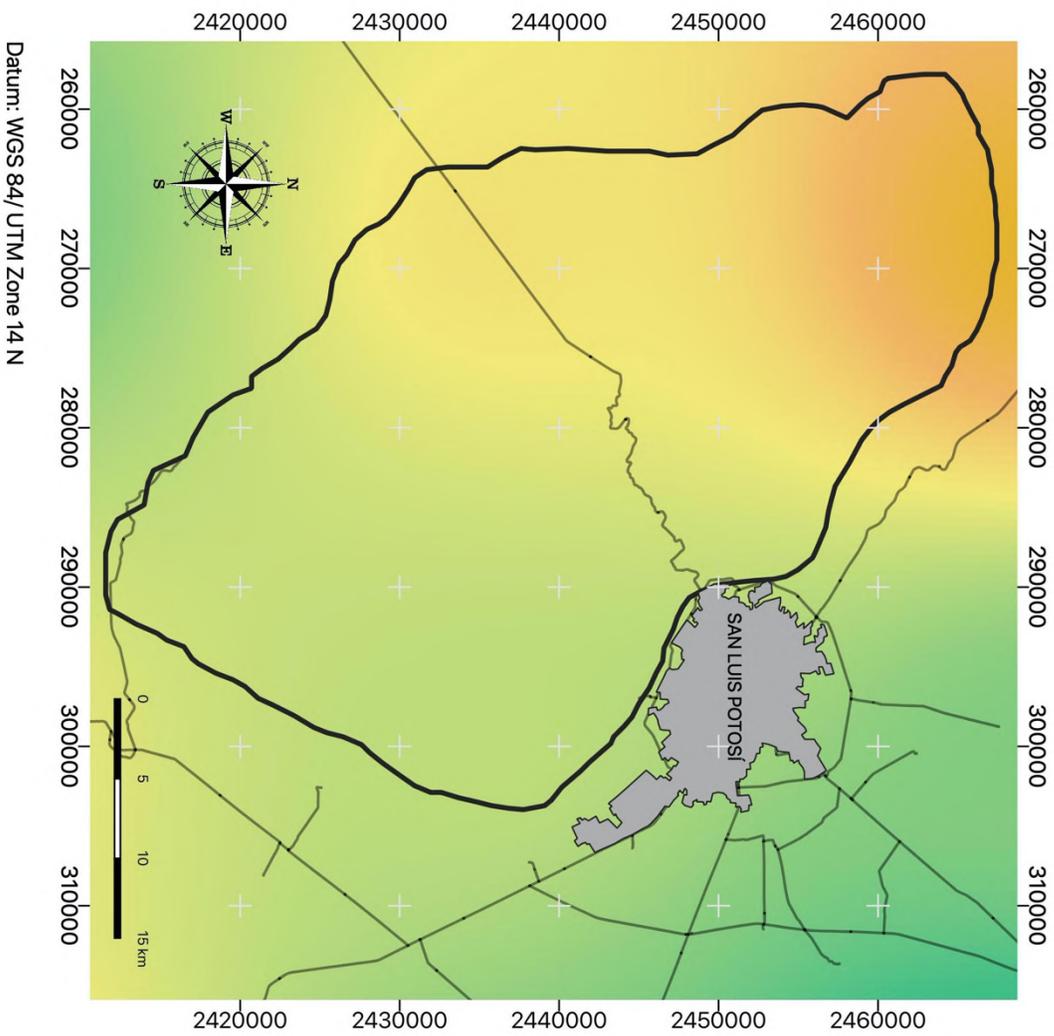


Datum: WGS 84/ UTM Zone 14 N

Anexo 6. Rangos de pendiente en el área de estudio



Anexo 7. Mapa de precipitación en el área de estudio



LEYENDA

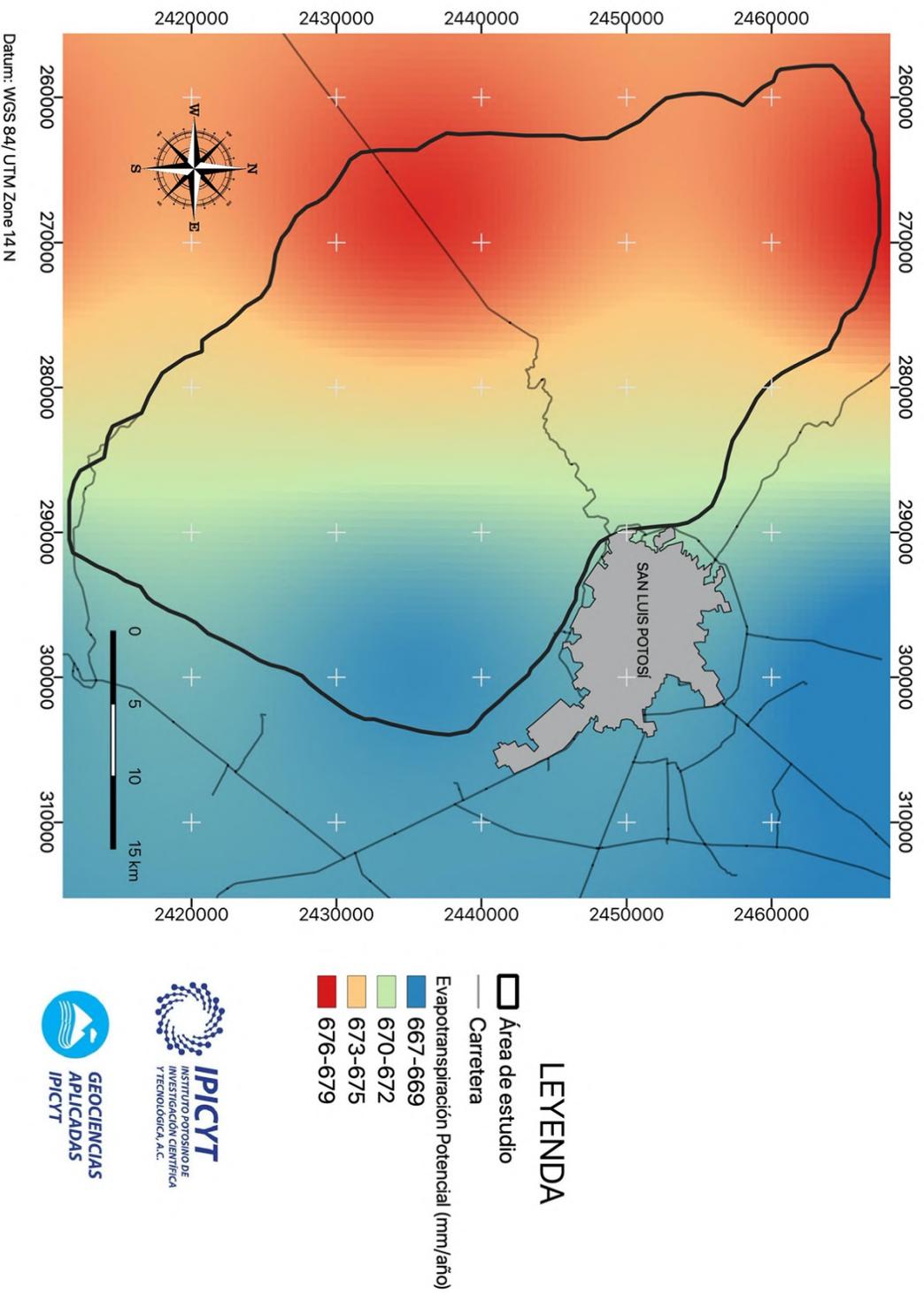
- Área de estudio
- Carretera

Precipitación (mm/año)

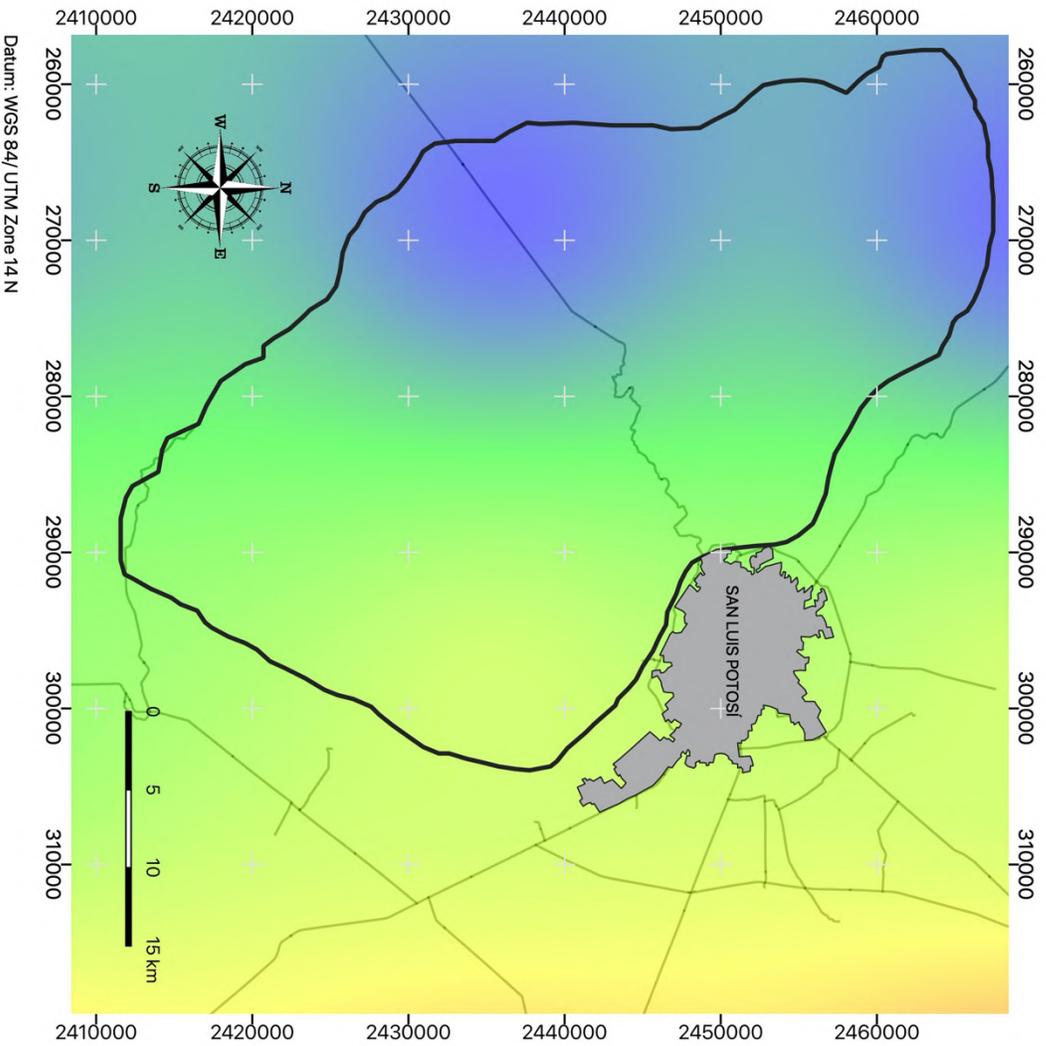
- 424-465
- 466-505
- 506-548
- 549-587
- 588-630
- 631-671
- 672-713



Anexo 8. Mapa de evapotranspiración potencial en el área de estudio



Anexo 9. Mapa de humedad relativa en el área de estudio

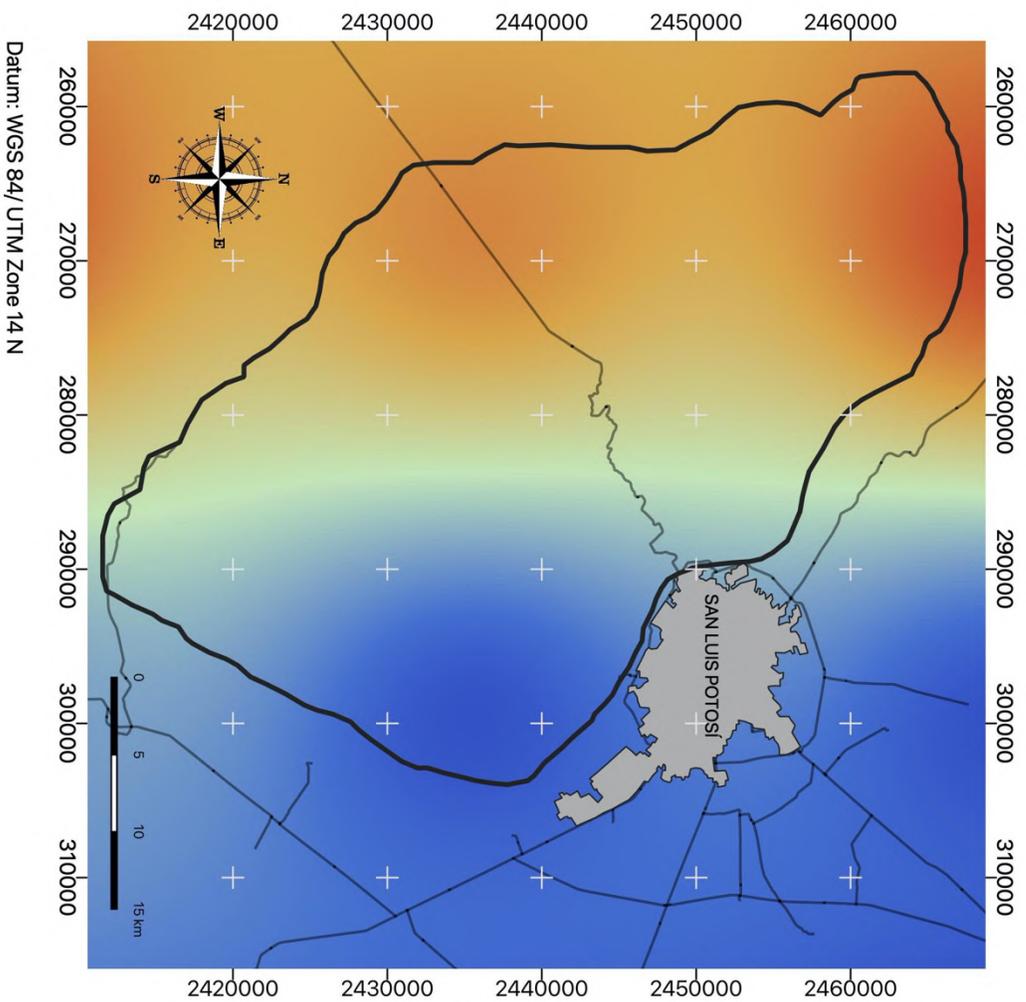


LEYENDA

-  Área de estudio
-  Carretera
- Humedad Relativa (%)
 -  56-57
 -  58-59
 -  60-61
 -  62-63



Anexo 10. Mapa de temperatura en el área de estudio



LEYENDA

Área de estudio

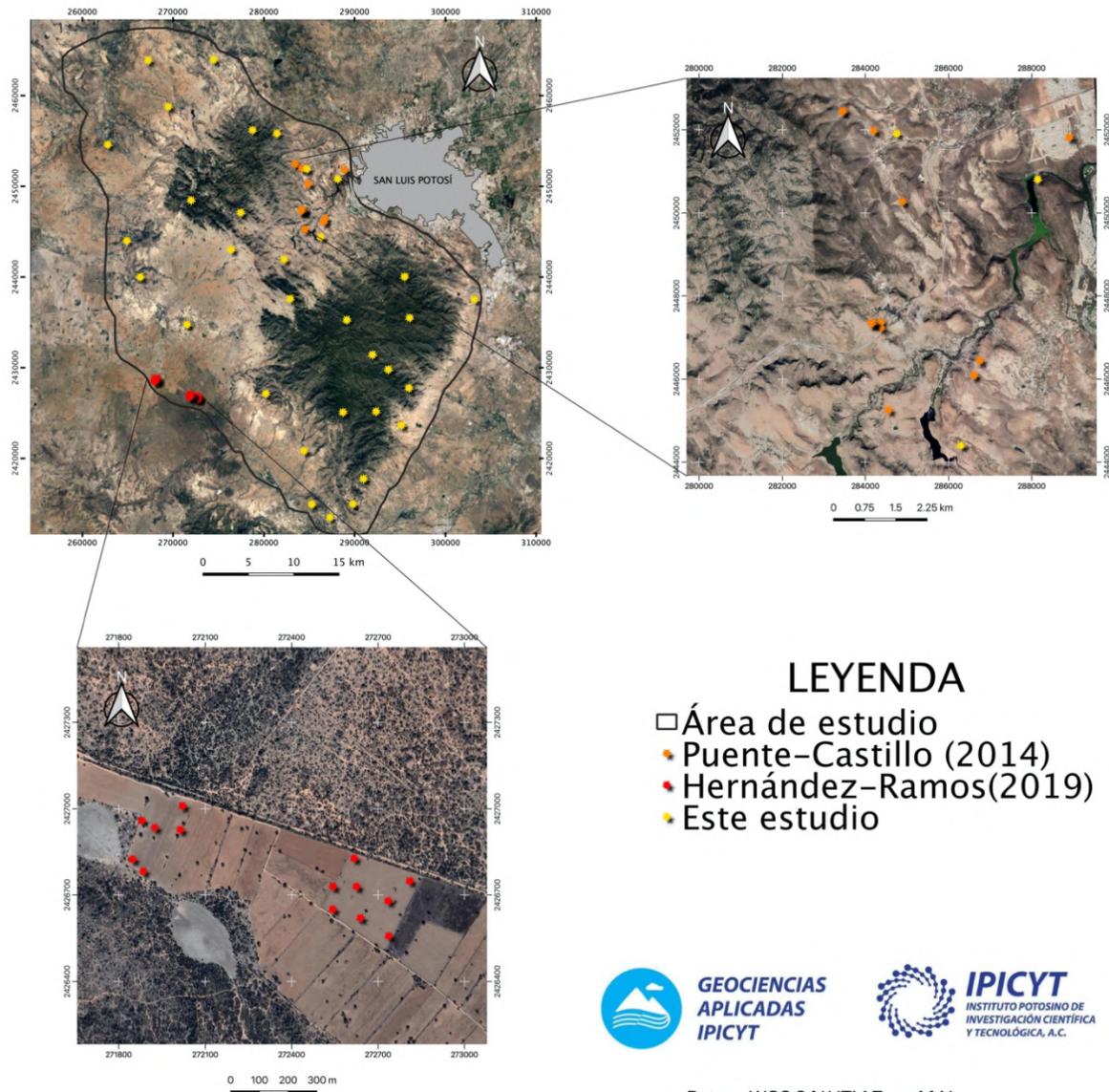
— Carretera

Temperatura (°C)

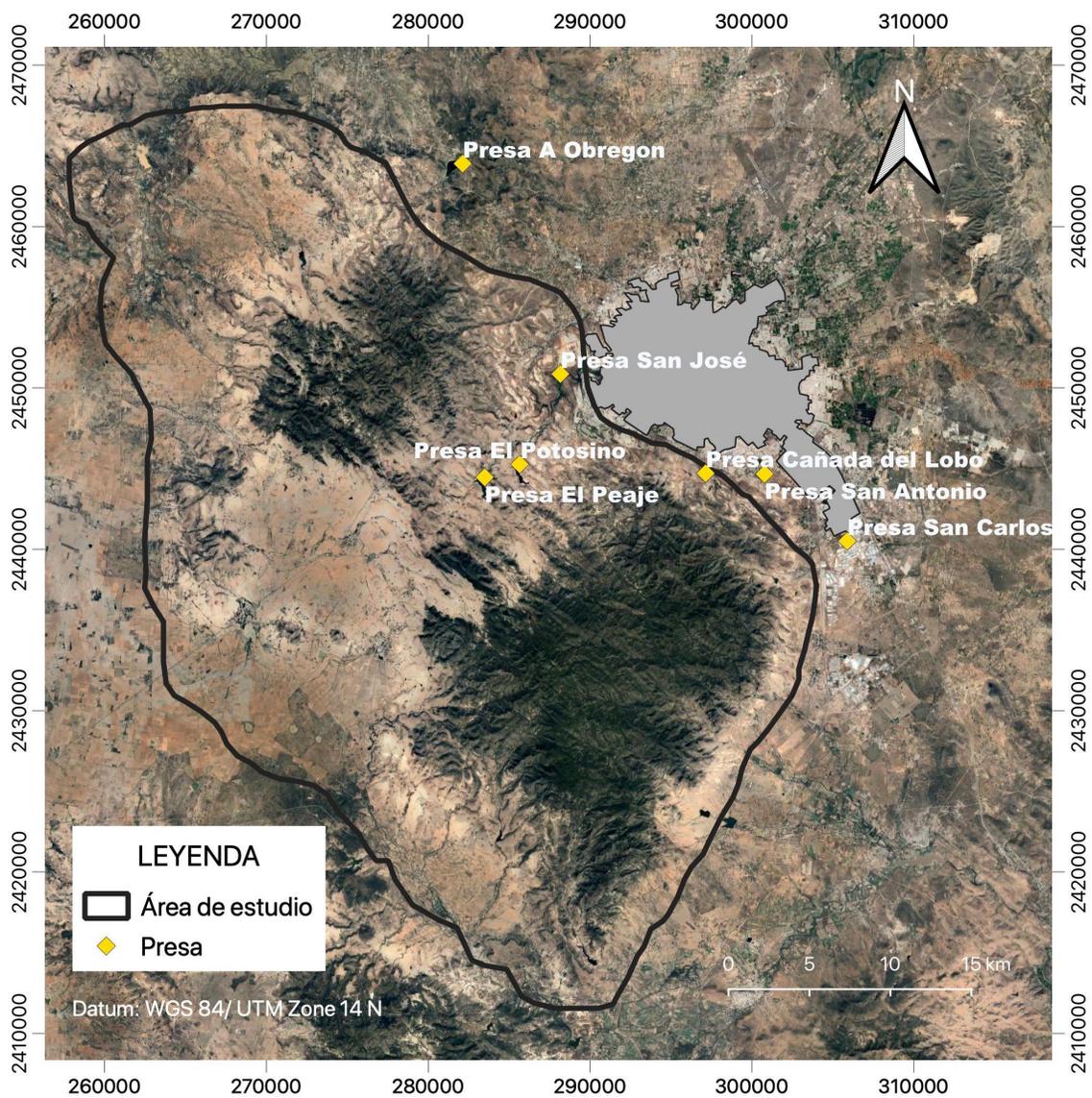
- $\leq 13,1$
- 13,25-13,39
- 13,40-13,54
- 13,55-13,7
- $> 13,7$



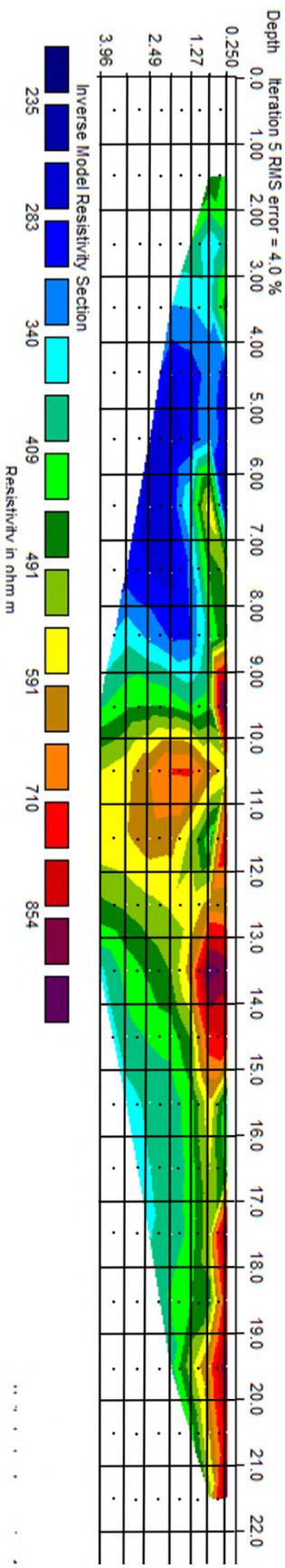
Anexo 11. Localización de los puntos de trabajo de Puente-Castillo (2014) y Hernández-Ramos (2019)



Anexo 12. Presas presentes en el área de estudio



Anexo 13. Cálculos de K para la TRE SM08-2



A)

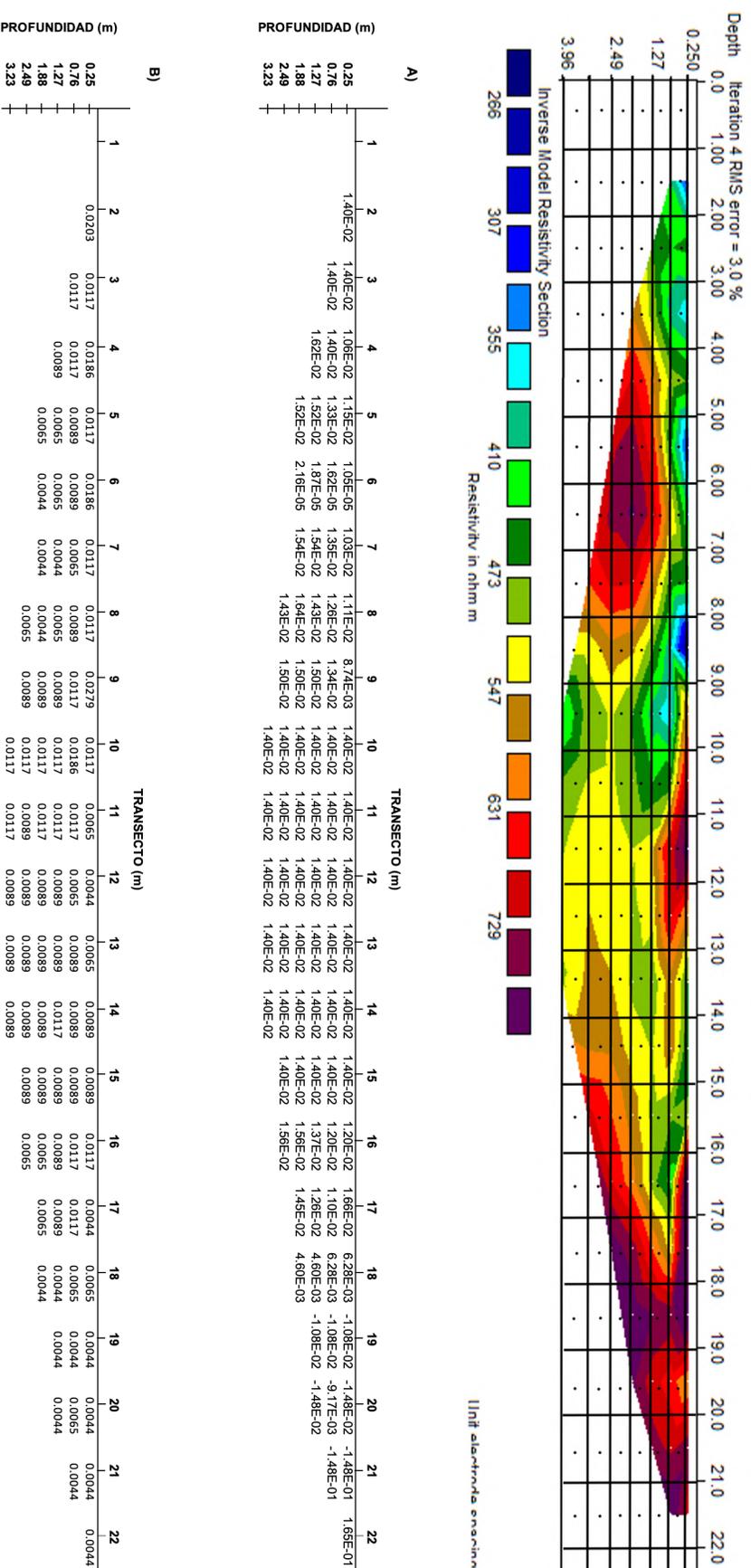
PROFUNDIDAD (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
0.25		8.64E-02	7.78E-02	9.35E-02	9.80E-02	9.41E-05	8.88E-02	1.12E-01	8.64E-02	9.65E-02	9.65E-02	1.12E-01	1.04E-01	1.08E-01	9.87E-02	1.05E-05							
0.76			9.35E-02	8.03E-02	8.18E-02	1.13E-04	1.05E-01	8.33E-02	8.64E-02	9.65E-02	9.65E-02	8.15E-02	8.15E-02	8.15E-02	8.15E-02	8.15E-02	8.15E-02						
1.27				8.03E-02	8.18E-02	9.41E-05	7.50E-02	7.26E-02	8.64E-02	8.15E-02													
1.88					8.18E-02	9.41E-05	6.35E-02	7.26E-02	8.64E-02	8.15E-02													
2.49								7.26E-02	8.64E-02	8.15E-02													
3.23									8.64E-02	8.15E-02													

B)

PROFUNDIDAD (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
0.25		0.08	0.07	0.08	0.07	0.06	0.08	0.08	0.08	0.10	0.09	0.09	0.09	0.10	0.09	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09
0.76			0.08	0.07	0.06	0.07	0.08	0.07	0.08	0.08	0.09	0.08	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09
1.27				0.07	0.06	0.06	0.07	0.06	0.08	0.08	0.09	0.08	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09
1.88					0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09	0.08	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09
2.49						0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09	0.08	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09
3.23								0.06	0.07	0.08	0.09	0.08	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09

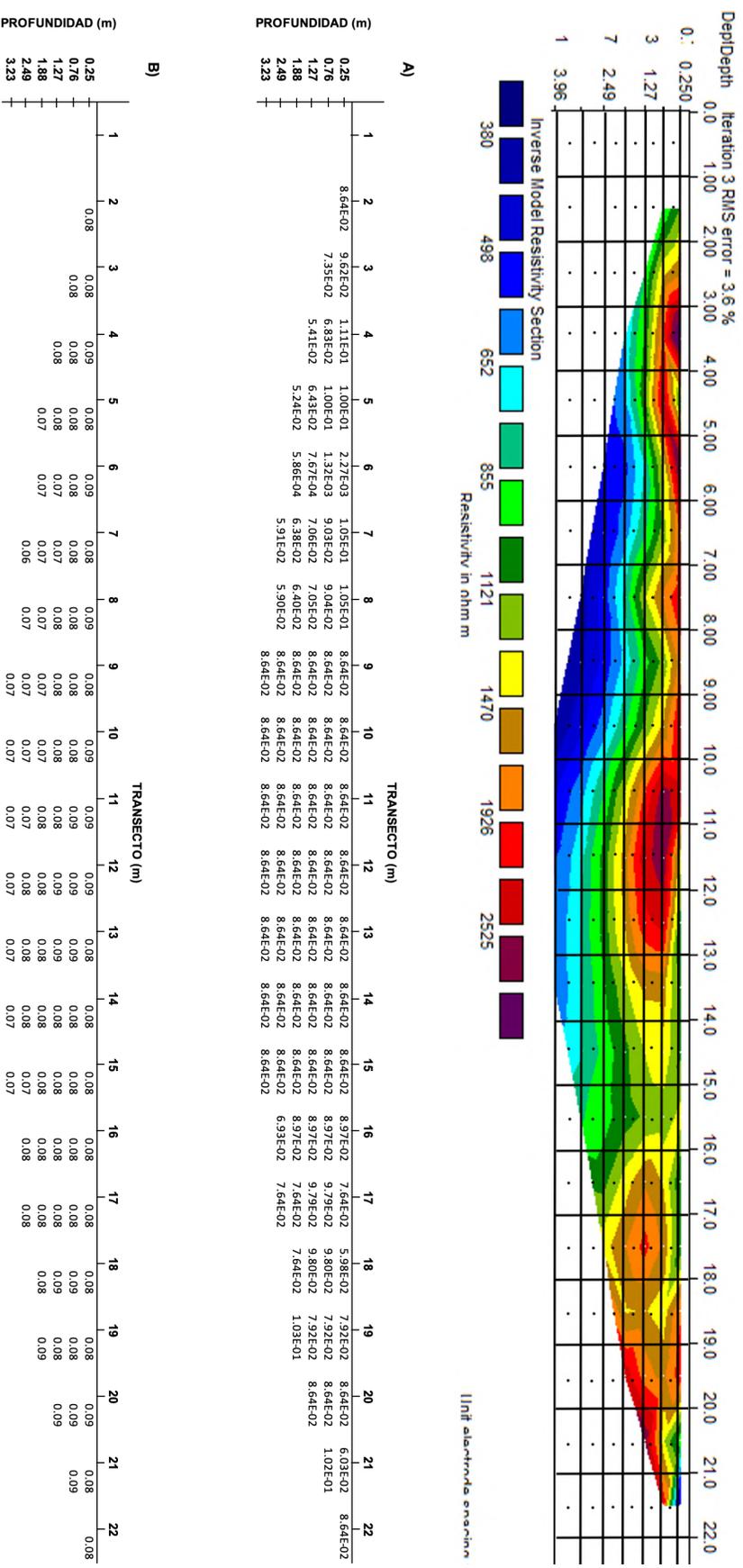
A) K calculada a partir de la ecuación de regresión. B) K calculada a partir de la ecuación de regresión inversa.

Anexo 14. Cálculos de K para la TRE SM09-2



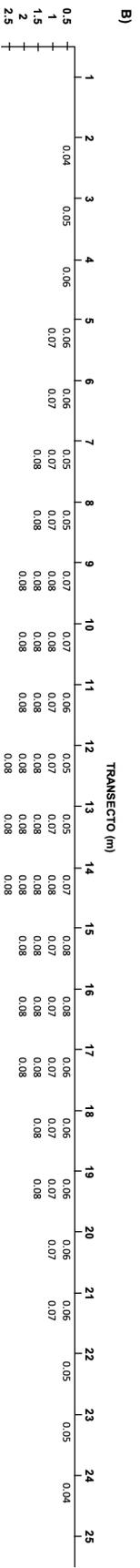
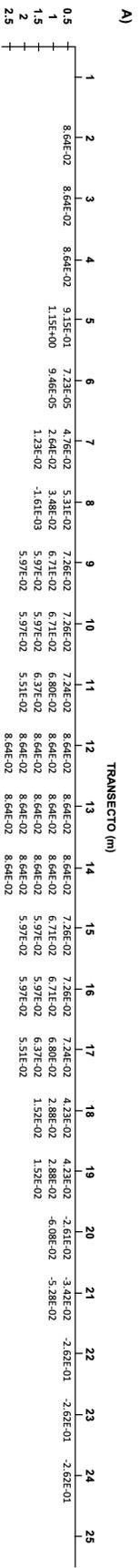
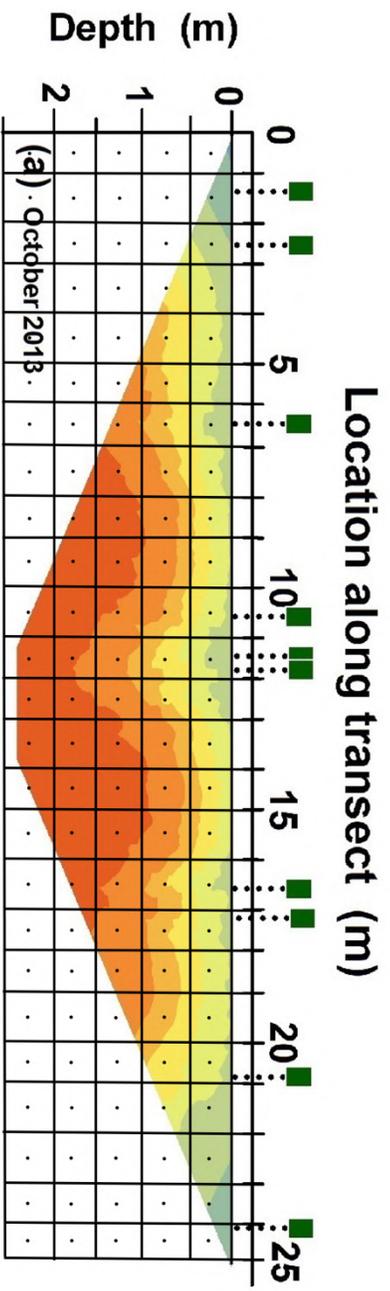
A) K calculada a partir de la ecuación de regresión. B) K calculada a partir de la ecuación de regresión inversa.

Anexo 15. Cálculos de K para la TRE SM10-2



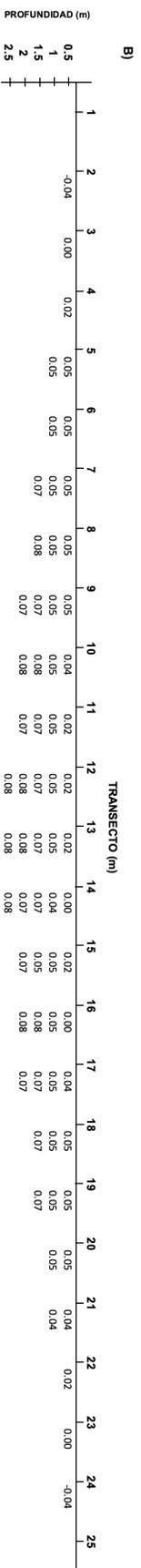
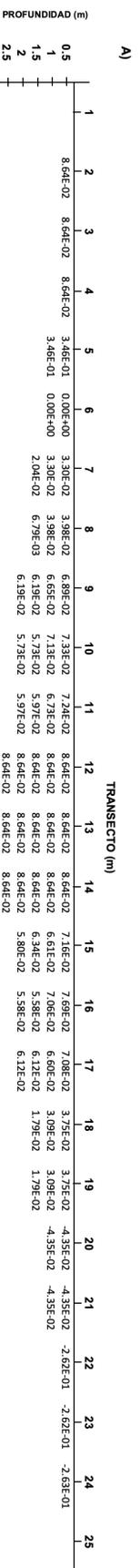
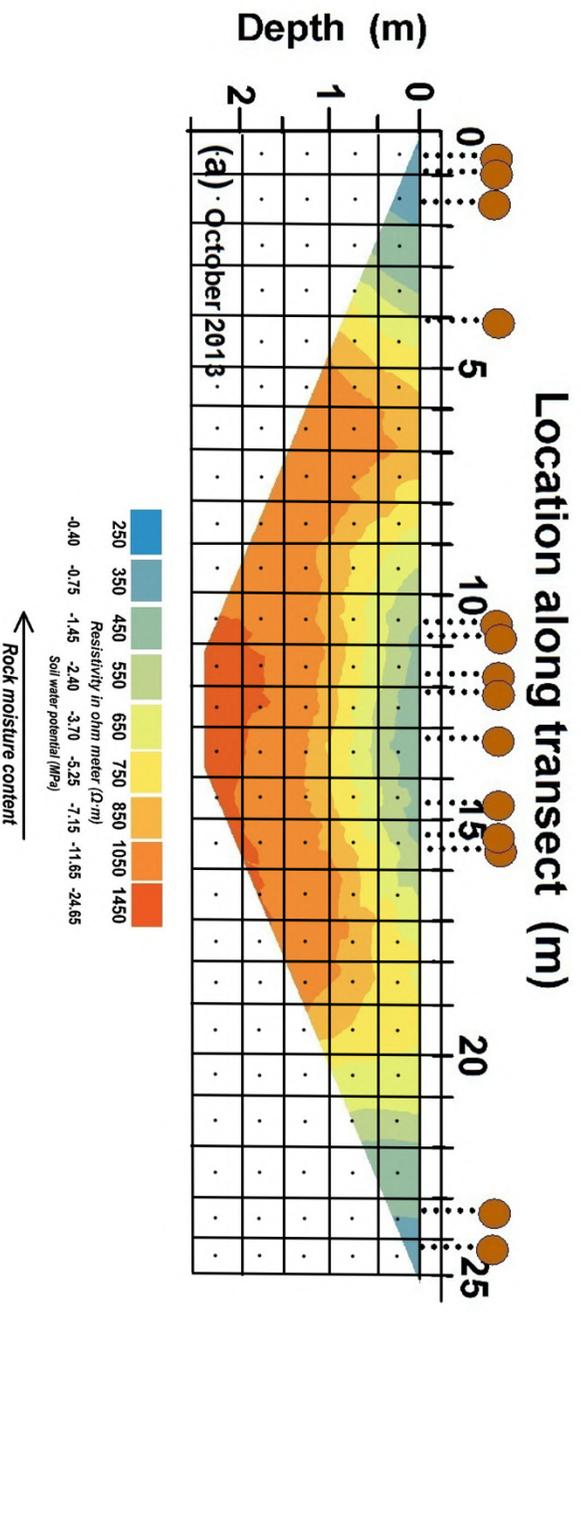
A) K calculada a partir de la ecuación de regresión. B) K calculada a partir de la ecuación de regresión inversa.

Anexo 16. Cálculos de K para la TRE de bosque de pino



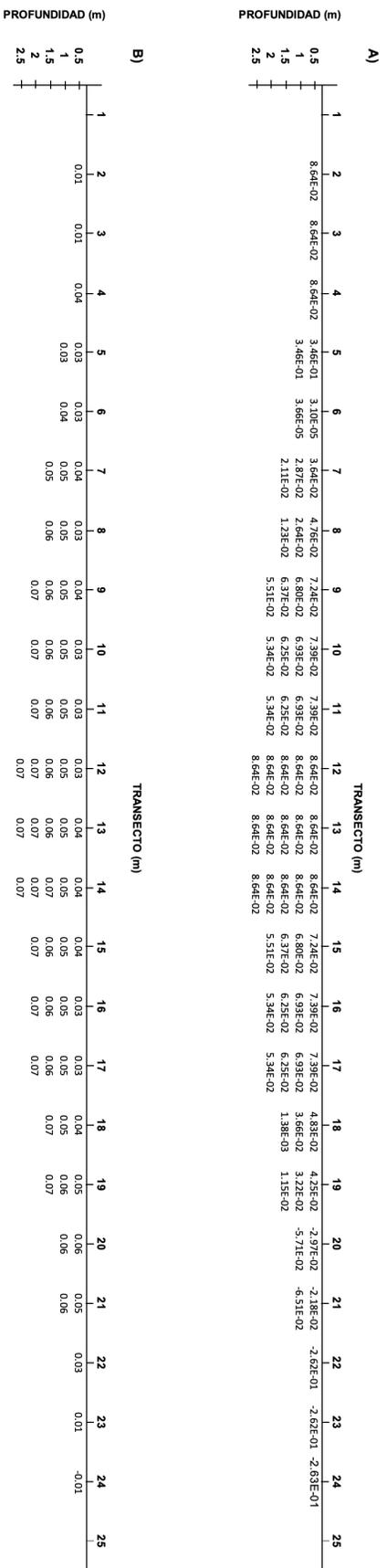
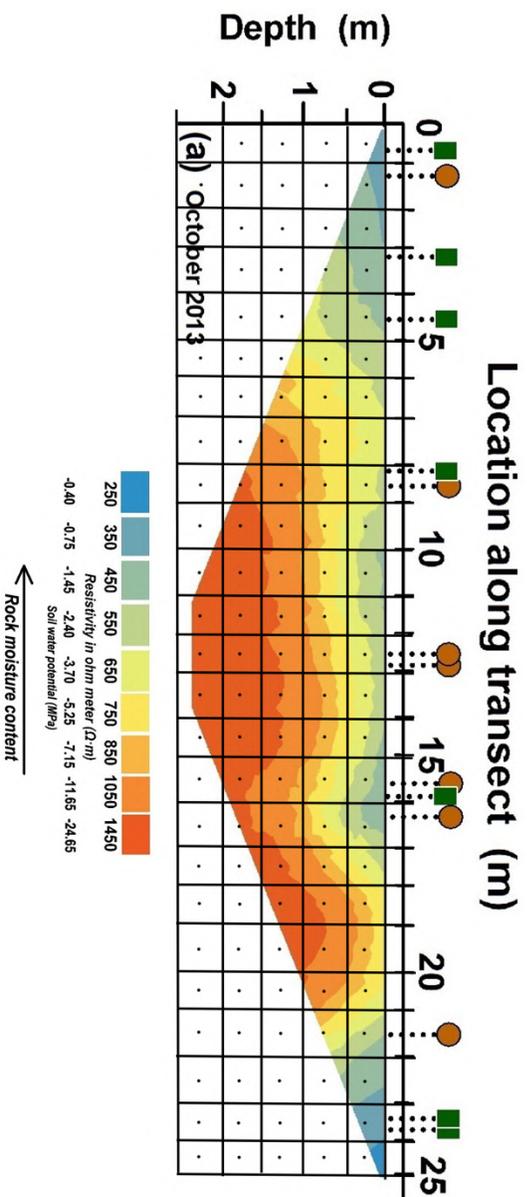
A) K calculada a partir de la ecuación de regresión. B) K calculada a partir de la ecuación de regresión inversa

Anexo 17. Cálculos de K para la TRE del bosque de encino



A) K calculada a partir de la ecuación de regresión. B) K calculada a partir de la ecuación de regresión inversa

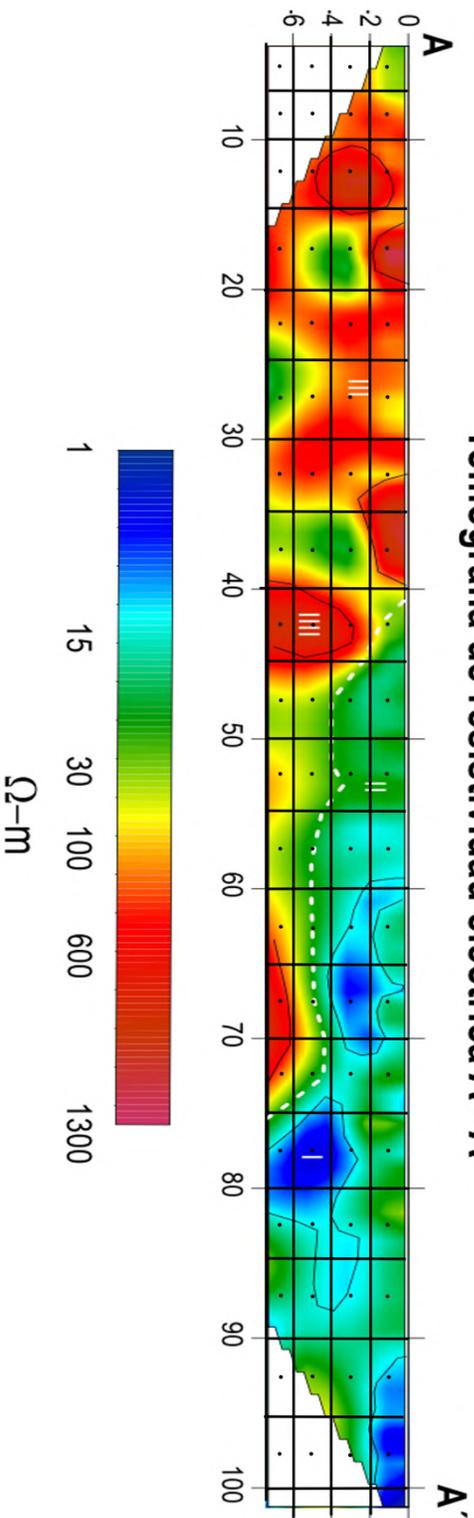
Anexo 18. Cálculos de K para la TRE del bosque de mixto



A) K calculada a partir de la ecuación de regresión. B) K calculada a partir de la ecuación de regresión inversa

Anexo 19. Cálculos de K para la TRE A-A' de Mexquitic

Tomografía de resistividad eléctrica A - A'



A)

PROFUNDIDAD (m)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
2	6.05E-02	6.48E-02	2.88E-02	4.87E-02	8.64E-02	5.05E-02	8.64E-02	3.67E-02	4.95E-02	8.64E-02	8.64E-02	8.64E-02	8.73E-02	8.29E-02	8.64E-02	9.36E-02	8.82E-02	8.64E-02	6.17E-02	6.02E+00
4		6.48E-02	3.20E-02	8.05E-02	8.64E-02	4.12E-02	8.64E-02	7.93E-02	2.63E-02	8.64E-02	8.64E-02	8.64E-02	8.73E-02	8.36E-02	8.64E-02	9.76E-02	9.05E-02	8.64E-02	7.66E-02	
6			2.88E-02	8.05E-02	8.64E-02	5.05E-02	8.64E-02	7.93E-02	2.63E-02	8.64E-02	8.64E-02	8.64E-02	8.10E-02	8.26E-02	8.64E-02	9.83E-02	9.05E-02	8.64E-02	8.12E-02	
6.5				6.34E-02	8.64E-02	5.86E-02	8.64E-02	7.79E-02	2.63E-02	8.64E-02	8.64E-02	8.64E-02	4.48E-02	3.77E-02	8.64E-02	9.68E-02	9.00E-02	8.64E-02	8.64E-02	

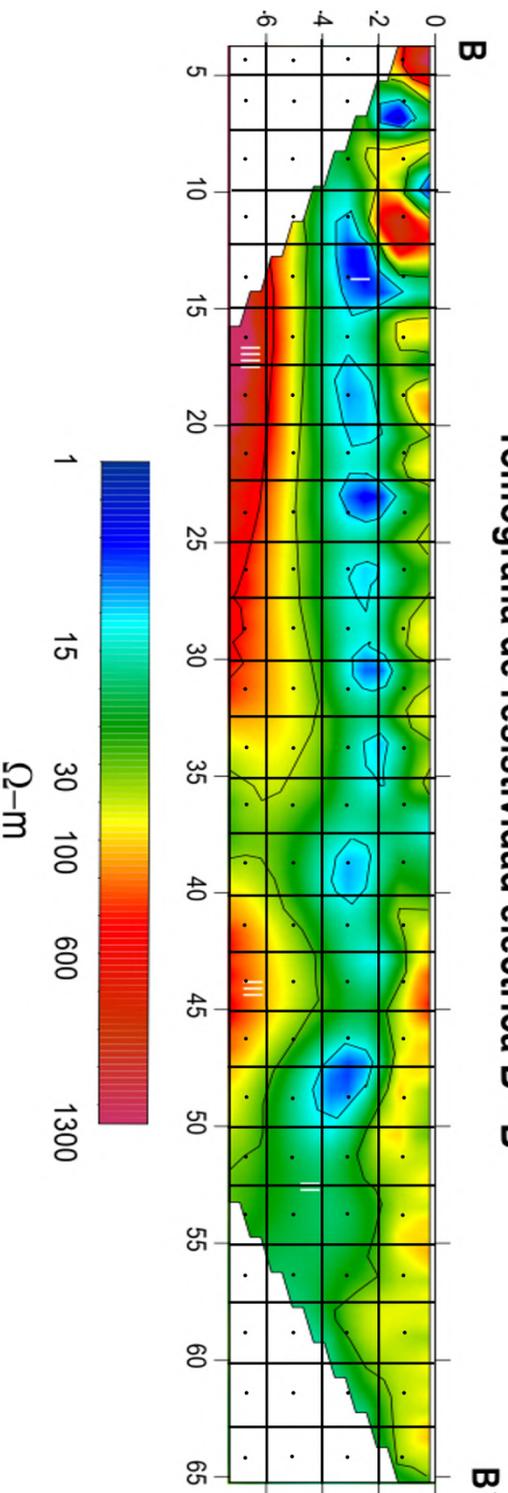
B)

PROFUNDIDAD (m)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
2	0.11	0	0	0	0	0	0	0.16	0.11	0.36	0.36	0.49	0.49	0.24	0.16	0.16	0	0.36	0.70	1.11
4		0	0	0.11	0	0	0	0.16	0	0.16	0.36	0.49	0.49	0.70	0.49	0.70	0	0.36	0.70	0.16
6			0	0.11	0	0	0	0.16	0	0.11	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	1.11	0.36	0.49	0.11	
6.5				0	0	0.16	0	0	0	0.11	0.11	0.11	0	0	0	0.49	0.16	0.16	0.16	

A) K calculada a partir de la ecuación de regresión. B) K calculada a partir de la ecuación de regresión inversa.

Anexo 20. Cálculos de K para la TRE B-B' de Mexquitic

Tomografía de resistividad eléctrica B - B'



A)

PROFUNDIDAD (m)	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20	22.5	25	27.5	30	32.5	35	37.5	40	42.5	45	47.5	50	52.5	55	57.5	60	62.5	65		
2	9.80E-03	7.00E-02	7.46E-02	2.04E-02	6.49E-02	8.13E-02	7.83E-02	7.90E-02	8.32E-02	8.64E-02	8.64E-02	8.64E-02	8.64E-02	8.64E-02	8.94E-02	8.64E-02	8.31E-02	7.46E-02	6.05E-02	6.05E-02							
4			4.62E-02	3.11E-02	6.37E-02	8.45E-02	8.00E-02	7.99E-02	8.45E-02	8.64E-02	8.64E-02	8.64E-02	8.64E-02	8.64E-02	9.15E-02	8.64E-02											
6					8.23E-02	8.28E-02	7.83E-02	7.72E-02	8.05E-02	8.64E-02	8.64E-02	8.64E-02	8.64E-02	8.64E-02	8.94E-02	8.64E-02											
6.5						3.82E-02	3.67E-02	3.71E-02	3.85E-02	8.64E-02	8.64E-02	8.64E-02	8.64E-02	8.64E-02	8.88E-02	8.64E-02											

B)

PROFUNDIDAD (m)	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20	22.5	25	27.5	30	32.5	35	37.5	40	42.5	45	47.5	50	52.5	55	57.5	60	62.5	65		
2	0.074	0.083	0.075	0.074	0.086	0.083	0.086	0.081	0.086	0.083	0.083	0.081	0.081	0.086	0.086	0.081	0.079	0.081	0.083	0.078	0.081	0.081	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078
4			0.078	0.083	0.075	0.075	0.074	0.075	0.074	0.077	0.075	0.075	0.075	0.075	0.078	0.078	0.075	0.075	0.075	0.075	0.078	0.081	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078
6				0.081	0.075	0.074	0.074	0.074	0.074	0.074	0.074	0.074	0.074	0.074	0.077	0.074	0.074	0.074	0.075	0.075	0.077	0.081	0.079	0.078	0.078	0.078	0.078
6.5					0.075	0.074	0.074	0.078	0.078	0.075	0.078	0.081	0.079	0.078	0.077	0.075	0.077	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075

A) K calculada a partir de la ecuación de regresión. B) K calculada a partir de la ecuación de regresión inversa.

13.2 Anexos de tablas

Anexo 21. Ejidos pertenecientes al área de estudio

Los datos fueron obtenidos del Registro Agrario Nacional (RAN)

Nombre	Tipo	Nombre	Tipo
Alberto Carrera Torres	Ejido	Ignacio Allende (El Picacho)	Ejido
Bledos	Ejido	La Tapona	Ejido
Carranco	Ejido	Mexquitic de Carmona	Ejido
Cerro Prieto	Ejido	Miguel Hidalgo	Ejido
El Aguaje	Ejido	Milpillas	Ejido
El Jaral	Ejido	Morelos	Ejido
El Mezquital	Ejido	Obregon	Ejido
El Porvenir (Rincón del Porvenir)	Ejido	Ojo de Gato	Ejido
El Tepetate	Ejido	Ojo Zarco de Arista	Ejido
El Terrero	Ejido	Puerto Espino	Ejido
Emiliano Zapata	Ejido	Ranchería de Guadalupe	Ejido
Emiliano Zapata-Jesús María	Ejido	Rincón de San José	Ejido
Escalerillas	Ejido	Rodrigo	Ejido
Estancia de Calderon	Ejido	San Antonio	Ejido
Estancia del Saucillo	Ejido	San Francisco	Ejido
Estancita	Ejido	San José de la Purísima	Ejido
Francisco I. Madero	Ejido	San Juan de Guadalupe	Ejido
Guadalupe Victoria y la Cruz (antes San Marcos)	Ejido	San Juan de Guadalupe y Anexos Tierra Blanca y San Miguelito	Comunitario
Guadalupe Victoria-El Trompillo	Ejido	Temaxcalillo	Ejido
San Luis Gonzaga	Ejido		

Anexo 22. Matriz de datos construida para los 66 puntos de estudio

ID	X (UTM)	Y (UTM)	Altitud (nsnm)	Pendiente (%)	Temperatura (°C)	Tipo de suelo	Tipo de vegetación	Precipitación (mm)	Humedad (%)	ETP (mm)	Uso de suelo	Coeffesc	K (m/d)	Geología
1	274458	2463972	2200	0-5	13.7	Regosol	Matorral crasicale	450	56	676	Agrícola temporal	0.3	0.014	Roñlla
2	276746	2456182	2500	0-5	13.5	Feozem	Chaparral	490	57	673	Suelo desnudo	0.35	0.054	Roñlla
3	281445	2456908	2300	5-10	13.5	Feozem	Chaparral	500	58	672	Suelo desnudo	0.4	0.639	Roñlla
4	282819	2454586	2100	0-5	13.6	Regosol	Matorral crasicale	480	56	676	Agrícola temporal	0.3	0.540	Ignimbria
5	271982	2448460	2600	10-30	13.6	Feozem	Bosque encino	500	57	675	Suelo desnudo	0.4	0.086	Roñlla
6	277436	2447102	2300	5-10	13.5	Feozem	Bosque encino	500	57	674	Suelo desnudo	0.36	0.086	Roñlla
7	296041	2435486	2400	10-30	13.3	Feozem	Chaparral	520	59	668	Suelo desnudo	0.45	0.051	Roñlla
8	296421	2439988	2300	5-10	13.6	Regosol	Pastizal natural	500	56	678	Suelo desnudo	0.3	0.086	Roñlla
9	271545	2434747	2300	5-10	13.6	Planosol	Pastizal natural	500	56	678	Agrícola temporal	0.4	0.086	Roñlla
10	287295	2413478	2000	0-5	13.4	Feozem	Matorral crasicale	520	58	670	Suelo desnudo	0.35	0.051	Ignimbria
11	285293	2414926	2100	0-5	13.5	Litosol	Matorral crasicale	520	58	671	Suelo desnudo	0.45	0.304	Basalto
12	289827	2414922	1900	5-10	13.4	Feozem	Pastizal natural	520	58	670	Suelo desnudo	0.4	0.259	Ignimbria
13	290979	2417727	2300	10-30	13.4	Feozem	Pastizal natural	520	59	670	Suelo desnudo	0.45	0.708	Roñlla
14	292382	2425177	2700	0-5	13.4	Feozem	Chaparral	520	59	669	Suelo desnudo	0.35	0.216	Ignimbria
15	295148	2423670	2100	0-5	13.3	Feozem	Pastizal natural	520	59	669	Suelo desnudo	0.35	0.3	Ignimbria
16	288726	2425098	2800	5-10	13.4	Feozem	Bosque pino	520	58	670	Suelo desnudo	0.36	0.051	Roñlla
17	295666	2427756	2400	>30	13.3	Feozem	Chaparral	520	59	668	Suelo desnudo	0.47	0.864	Ignimbria
18	293712	2429794	2200	0-5	13.3	Feozem	Chaparral	520	59	668	Suelo desnudo	0.35	0.864	Ignimbria
19	291988	2431420	2500	5-10	13.3	Feozem	Chaparral	520	59	668	Suelo desnudo	0.4	0.527	Roñlla
20	284452	2420852	2000	5-10	13.5	Litosol	Pastizal natural	520	58	671	Suelo desnudo	0.55	0.864	Ignimbria
21	289155	2432556	2700	0-5	13.4	Feozem	Bosque pino	520	59	669	Suelo desnudo	0.3	0.777	Roñlla
22	289234	2441933	2100	0-5	13.5	Regosol	Pastizal natural	510	58	673	Suelo desnudo	0.15	0.864	Ignimbria
23	303214	2437505	2000	5-10	13.3	Regosol	Pastizal natural	520	59	668	Suelo desnudo	0.3	0.864	Ignimbria
24	286292	2444398	2100	0-5	13.4	Regosol	Pastizal natural	520	58	671	Suelo desnudo	0.15	0.864	Ignimbria
25	284756	2451907	2000	0-5	13.4	Fluvisol	Pastizal natural	510	59	671	Suelo desnudo	0.15	0.011	Ignimbria
26	282908	2437595	2500	0-5	13.5	Feozem	Bosque pino	510	58	672	Suelo desnudo	0.3	0.864	Ignimbria
27	276385	2443927	2200	0-5	13.6	Litosol	Pastizal natural	500	57	675	Agrícola temporal	0.6	0.527	Roñlla
28	287289	2463900	2000	0-5	13.7	Planosol	Matorral crasicale	440	56	678	Agrícola temporal	0.3	6.39E-09	Lutita
29	289479	2458773	2100	0-5	13.6	Regosol	Pastizal natural	460	56	676	Agrícola temporal	0.152	0.152	Aluvión
30	280197	2427131	2400	5-10	13.5	Feozem	Bosque pino	510	57	673	Suelo desnudo	0.36	0.691	Roñlla
31	284919	2443987	2200	0-5	13.6	Regosol	Pastizal natural	500	59	677	Suelo desnudo	0.15	0.864	Ignimbria
32	296541	2440032	2500	0-5	13.3	Feozem	Chaparral	520	59	668	Suelo desnudo	0.35	0.527	Roñlla
33	288143	2450807	1900	10-30	13.4	Regosol	Pastizal natural	520	58	670	Suelo desnudo	0.88	0.244	Ignimbria
34	268227	2428561	2100	0-5	13.6	Planosol	Pastizal natural	500	56	677	Agrícola temporal	0.3	0.041	Aluvión
35	268234	2428770	2100	0-5	13.6	Planosol	Pastizal natural	500	56	677	Agrícola temporal	0.3	0.043	Aluvión
36	267967	2428775	2100	0-5	13.6	Planosol	Pastizal natural	500	56	677	Agrícola temporal	0.3	0.034	Aluvión
37	268085	2429834	2100	0-5	13.6	Planosol	Pastizal natural	500	56	677	Agrícola temporal	0.3	0.034	Aluvión
38	267980	2428471	2100	0-5	13.6	Planosol	Pastizal natural	500	56	677	Agrícola temporal	0.3	0.034	Aluvión
39	272617	2426827	2100	0-5	13.6	Planosol	Pastizal natural	510	56	676	Agrícola temporal	0.3	0.04	Aluvión
40	272810	2426748	2100	0-5	13.6	Planosol	Pastizal natural	510	56	676	Agrícola temporal	0.3	0.03	Aluvión
41	272735	2426679	2100	0-5	13.6	Planosol	Pastizal natural	510	56	676	Agrícola temporal	0.3	0.035	Aluvión
42	272625	2426729	2100	0-5	13.6	Planosol	Pastizal natural	510	56	676	Agrícola temporal	0.3	0.038	Aluvión
43	272644	2426729	2100	0-5	13.6	Planosol	Pastizal natural	510	56	676	Agrícola temporal	0.3	0.04	Aluvión
44	272543	2426650	2100	0-5	13.6	Planosol	Pastizal natural	510	56	676	Agrícola temporal	0.3	0.035	Aluvión
45	272639	2426620	2100	0-5	13.6	Planosol	Pastizal natural	510	56	676	Agrícola temporal	0.3	0.045	Aluvión
46	272737	2426557	2100	0-5	13.6	Planosol	Pastizal natural	510	56	676	Agrícola temporal	0.3	0.042	Aluvión
47	272021	2427010	2100	0-5	13.6	Planosol	Pastizal natural	510	56	676	Agrícola temporal	0.3	0.027	Aluvión
48	272014	2426927	2100	0-5	13.6	Planosol	Pastizal natural	510	56	676	Agrícola temporal	0.3	0.037	Aluvión
49	271925	2426934	2100	0-5	13.6	Planosol	Pastizal natural	510	56	676	Agrícola temporal	0.23	0.023	Aluvión
50	271880	2426959	2100	0-5	13.6	Planosol	Pastizal natural	510	56	676	Agrícola temporal	0.3	0.02	Aluvión

51	271885	2426782	2100	0-5	13.6	Pianosol	Pastizal natural	510	56	676	Agrícola temporal	0.6	0.015	Auvión
52	271848	2426824	2100	0-5	13.6	Pianosol	Pastizal natural	510	56	676	Agrícola temporal	0.3	0.018	Auvión
53	284370	2447370	2000	5-10	13.4	Regosol	Pastizal natural	510	58	671	Suelo desnudo	0.3	0.05	Ignimbria
54	284375	2447231	2000	0-5	13.4	Regosol	Pastizal natural	510	58	671	Suelo desnudo	0.15	0.086	Ignimbria
55	284179	2447337	2100	0-5	13.4	Regosol	Pastizal natural	510	58	672	Suelo desnudo	0.15	0.11	Ignimbria
56	288803	2451817	1900	5-10	13.4	Regosol	Pastizal natural	520	58	670	Suelo desnudo	0.76	0.004	Ignimbria
57	286749	2446446	2000	5-10	13.4	Regosol	Pastizal natural	520	58	671	Suelo desnudo	0.4	0.004	Ignimbria
58	286611	2446090	2000	0-5	13.4	Regosol	Pastizal natural	520	58	671	Suelo desnudo	0.15	0.005	Ignimbria
59	283450	2452438	2000	0-5	13.5	Regosol	Pastizal natural	510	58	672	Suelo desnudo	0.15	0.005	Ignimbria
60	283461	2452451	2000	0-5	13.5	Regosol	Pastizal natural	510	58	672	Suelo desnudo	0.15	0.004	Ignimbria
61	284200	2451979	2000	5-10	13.5	Regosol	Pastizal natural	510	58	671	Suelo desnudo	0.3	0.005	Ignimbria
62	284561	2445254	2000	0-5	13.4	Regosol	Pastizal natural	510	58	671	Suelo desnudo	0.15	0.006	Ignimbria
63	284689	2450275	2000	0-5	13.4	Regosol	Pastizal natural	510	58	671	Suelo desnudo	0.15	0.005	Ignimbria
64	284179	2447337	2100	0-5	13.4	Regosol	Pastizal natural	510	58	672	Suelo desnudo	0.15	0.244	Ignimbria
65	284179	2447337	2100	0-5	13.4	Regosol	Pastizal natural	510	58	672	Suelo desnudo	0.15	0.014	Ignimbria
66	284145	2447337	2100	0-5	13.4	Regosol	Pastizal natural	510	58	672	Suelo desnudo	0.15	0.011	Ignimbria

Anexo 22. Continuación