



**Universidad Autónoma de San Luis Potosí**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Centro de Investigación y Estudios de Posgrado**

**Análisis de la dinámica espacio-temporal y distribución potencial  
de los manantiales en el Valle de Rioverde, San Luis Potosí.**

**T E S I S**

Que para obtener el grado de:

Maestro en Tecnología y Gestión del Agua

Presenta:

Ing. Juan Carlos Díaz Rivera

Co-Asesores:

Dr. Hilario Charcas Salazar

Dr. Carlos Arturo Aguirre Salado

San Luis Potosí, S. L. P.

Febrero de 2018



20 de julio de 2017

**ING. JUAN CARLOS DÍAZ RIVERA  
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Hilario Charcas Salazar y Carlos Arturo Aguirre Salado** Asesor y Co-asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Tecnología y Gestión del Agua**. Me es grato comunicarle que en la Sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 20 de julio del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

**TEMARIO:**

**"Análisis de la dinámica espacio-temporal y distribución potencial de los manantiales en el Valle de Rioverde, San Luis Potosí".**

Introducción

1. Dinámica espacio-temporal de los manantiales en el Valle de Rioverde, San Luis Potosí.
2. Estimación de zonas potenciales de la presencia de manantiales en el Valle de Rioverde, San Luis Potosí.
3. Discusión.  
Conclusiones.  
Referencias.

**"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"**

**A T E N T A M E N T E**

  
**M. I. JORGE ALBERTO PÉREZ GONZÁLEZ**  
**DIRECTOR.**

  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE SAN LUIS POTOSÍ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCIÓN



**FACULTAD DE  
INGENIERÍA**

Av. Manuel Nava 8  
Zona Universitaria - CP 78290  
San Luis Potosí, S.L.P.  
tel. (444) 826 2330 al 839  
fax (444) 826 2330  
www.uaslp.mx

Copia. Archivo.  
\*etn.

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por haber financiado mis estudios de maestría con el convenio 588496.

A la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y a la Facultad de Ingeniería, por darme la oportunidad de formarme como maestro en Tecnología y Gestión del Agua, dentro del Centro de Investigación y Estudios de Posgrado (CIEP).

Al Dr. Hilario Charcas Salazar, por todo el apoyo brindado tanto académico como económico para la realización de este trabajo y estar siempre pendiente de las necesidades que se presentaban. También me siento muy agradecido con usted, ya que gracias a su apoyo, conocí de manera más amplia mi región de origen (Rioverde y Ciudad Fernández).

Al Dr. Carlos Arturo Aguirre Salado, le agradezco por todo el apoyo y confianza que ha depositado siempre en mí desde hace 7 años que ingresé a la Licenciatura, siendo mi director de tesis en licenciatura. Y ahora en la maestría, estoy inmensamente agradecido, ya que siempre ha tenido disponibilidad de apoyarme en todo momento y prueba de ello es que este trabajo pudo culminarse. Conocer personas con gran calidad humana como usted, es toda una fortuna.

Al Dr. Rodolfo Cisneros Almazán, Por el gran apoyo que siempre mostró desde que comencé los estudios de maestría, también agradezco por las observaciones realizadas a este trabajo, las cuales fueron de gran ayuda.

Al Dr. Jorge Aceves de Alba, ya que desde siempre ha tenido la disponibilidad de brindarme su apoyo cuando lo he requerido.

A mi amigo Miguel Ángel Pachicano Hernández, quien me brindó su sincera amistad a lo largo de toda mi formación profesional y ahora en posgrado, muchas gracias por haber sido parte clave para la realización de este trabajo, aportándome conocimiento, observaciones y sugerencias. Gracias por escucharme siempre y por tus palabras de aliento en los momentos más difíciles. Agradezco tus consejos, los cuales siempre he tomado en cuenta. Muchas gracias por tu amistad.

A mi amiga Susana Díaz del Ángel, quien siempre me ha apoyado y me ha brindado su sincera amistad. Gracias por todos tus consejos y apoyo en momentos difíciles. Agradezco tus sinceros y oportunos comentarios en pro de que sea una mejor persona y profesional.

A mi amigo Miguel Ángel Chavarría Cruz, por su sincera amistad, la cual ha sido muy valiosa en mi vida. Gracias por todo el apoyo que siempre me has brindado.

A mi amiga Blanca Ovalle, gracias por tu amistad, tus consejos y el gran apoyo que siempre me diste durante la realización de este trabajo.

A mis amigas y compañeras Yajaira y Kiara, primero que nada por el apoyo brindado para la realización de este trabajo y también por todos los momentos gratos que compartimos en nuestra formación de maestría.

A mis amigos, Arturo, Robe, Pablo, Eduardo, Gabriel, Coral, Brabra, Fernando, Maricela, Monse y Lorena por su gran amistad y por los buenos momentos que compartimos mediante la realización de este trabajo.

A todas las personas de las diferentes localidades de Rioverde, Ciudad Fernández y Villa Juárez que nos apoyaron durante la visita a los manantiales.

## DEDICATORIA

A Dios padre por la vida, por ser siempre una esperanza, un apoyo divino y por llenarme de bendiciones cada día.

A mis padres Amelia Rivera Reséndiz y Carlos Díaz Díaz, a quienes les debo todo lo que soy, porque desde que nací han dedicado su vida para darme lo mejor y formarme como un hombre de bien. Ellos son las personas más sabias que conozco, y las más maravillosas que conoceré en esta vida, este logro es de ustedes. Gracias por darme la oportunidad de vivir.

A mi hijo Carlos Noé Díaz Barrientos, Lo más maravilloso que me ha pasado en la vida es conocerte. Desde el momento en que naciste, tu vida se convirtió en mi prioridad, por encima de la mía. Cuando empecé este trabajo tu aún no nacías, pero tu llegada ya nos llenaba de alegría a tu madre y a mí. Ahora al escribir las últimas palabras de este trabajo volteo a ver como con una hermosa sonrisa me dices papá. Fuiste el motor que me impulsó a terminar este trabajo, eres y siempre serás el motor que impulse mi vida.

A mi esposa Ana Cristina Barrientos Rodríguez, gracias por ser mi compañera de vida, por compartir buenos y malos momentos conmigo, por apoyarme incondicionalmente durante la realización de este trabajo y sobre todo por darme la dicha de ser padre. Te amo.

A mi hermano Marco Antonio Díaz Rivera quien ha sido un gran apoyo en mi vida en todos los aspectos, compañero incansable quien ha estado conmigo en las buenas y en las malas, por trabajar siempre en equipo conmigo para conseguir nuestras metas.

A la familia Correa Díaz, por ser una familia para mí y abrirme las puertas de su hogar y de su corazón; este logro es en gran parte por ustedes, a mi tía Rosario Díaz Díaz y mi tío Carlos Correa Sandoval por ser como unos padres para mí, a Carlomagno y Karla Sofía Correa Díaz por ser, más que mis primos, mis hermanitos menores.

A mis abuelitos Leodegario Díaz, Felisa Díaz, Tomas Rivera y en especial a mi abuelita Aurelia Rivera que con tu partida me diste el momento más amargo durante la realización de este trabajo. Jamás olvidare todo el apoyo que siempre me brindaste, gracias por ser mi abuelita, con gran cariño te dedico este trabajo. Siempre en mis recuerdos vivirás.

A la familia Díaz Díaz, por apoyarme siempre y por compartir conmigo buenos y malos momentos.

A la familia Rivera Reséndiz, por estar siempre conmigo apoyándome en lo que he necesitado.

## CONTENIDO GENERAL

	Página
ÍNDICE DE FIGURAS .....	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
Resumen general.....	viii
Abstract.....	ix
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1

### CAPÍTULO 1. Dinámica espacio-temporal de los manantiales en el Valle de Rioverde, San Luis Potosí

Resumen.....	23
Abstract.....	24
1.1. Introducción.....	25
1.2. Métodos de clasificación de píxeles.....	30
1.2.1. Clasificación supervisada.....	30
1.2.1. Clasificación supervisada.....	30
1.3. Fuentes de información de percepción remota para el estudio de cuerpos de agua.....	32
1.3.1. Landsat.....	33
1.3.2. MODIS.....	34
1.3.3. GEOEYE-1.....	38
1.3.4. Fotografía Aérea.....	41
1.4. Materiales y métodos.....	44
1.4.1. Descripción de la zona de estudio.....	44
1.4.1.1. Localización de la zona de estudio.....	44
1.4.1.2. Clima.....	45
1.4.1.3. Fisiografía.....	49
1.4.1.4. Edafología.....	51
1.4.1.5. Hidrología superficial.....	55
1.4.1.6. Hidrología subterránea.....	57
1.4.1.7. Funcionamiento geohidrológico.....	58
1.4.1.8. Acuífero administrativo de Rioverde.....	60
1.4.1.9. Veda.....	61
1.4.1.10. Geología estructural.....	62
1.5. Antecedentes en la zona de estudio.....	64
1.6. Metodología.....	65
1.6.1. Manantiales presentes en el Valle de Rioverde.....	65

1.6.2.	Manantiales Seleccionados para estimar la dinámica en el espejo de agua.....	66
1.6.2.1.	Manantial La Media Luna.....	68
1.6.2.1.1.	Especies Animales.....	69
1.6.2.1.2.	Especies Vegetales.....	70
1.6.2.1.3.	Turismo.....	70
1.6.2.1.4.	Agricultura.....	71
1.6.2.2.	Manantial Puerta del Río.....	71
1.6.2.3.	Manantial Laguna de Jocolixtle.....	72
1.6.3.	Imágenes utilizadas para el análisis.....	73
1.6.4.	Métodos utilizados para el trazado automático de la extensión de agua de los manantiales.....	75
1.6.4.1.	Máxima Verosimilitud (ML).....	75
1.6.4.2.	Vecino más cercano (K-nn).....	77
1.6.5.	Selección del algoritmo de clasificación.....	78
1.7.	Resultados.....	83
1.7.1.	Modelación de los cambios de agua en los manantiales.....	83
1.7.1.1.	Modelación del manantial Puerta del Río.....	83
1.7.1.2.	Modelación del manantial La Media Luna.....	86
1.7.1.3.	Modelación del manantial Laguna de Jocolixtle.....	90
1.7.2.	Errores de Clasificación del algoritmo.....	93
1.7.3.	Comparación del espejo de agua del manantial de La Media Luna en 1970 y 2011.....	93
1.8.	Validación.....	95
	Discusión.....	98
	Conclusiones.....	100

## **CAPÍTULO 2. Estimación de zonas potenciales de la presencia de manantiales en el Valle de Rioverde, San Luis Potosí**

	Resumen.....	104
	Abstract.....	105
2.1.	Introducción.....	106
2.2.	Métodos utilizados para la modelación del potencial de manantiales de agua subterránea basados en sistemas de información geográfica.....	110
2.2.1.	Modelo Relación de Frecuencia (FR).....	110
2.2.2.	Modelo Regresión Logística (LR).....	111

2.2.3	Árbol de clasificación y regresión (CART).....	112
2.3.	Materiales y métodos.....	114
2.3.1.	Descripción de la zona de estudio.....	114
2.3.1.1.	Ubicación.....	114
2.3.1.2.	Aspectos socioeconómicos de la zona.....	115
2.3.1.3.	Clima.....	116
2.3.1.4.	Fisiografía.....	118
2.3.1.5.	Edafología.....	120
2.3.1.5.	Hidrología superficial.....	123
2.3.1.6.	Hidrología subterránea.....	125
2.3.1.7.	Geología.....	126
2.3.1.8.	Descripción geohidrológica.....	127
2.4.	Metodología.....	129
2.4.1.	Generación de la base de datos de los manantiales.....	129
2.4.2.	Factores que favorecen la ocurrencia de manantiales.....	131
2.4.3.	Factores seleccionados para el modelo del potencial de ocurrencia de manantiales.....	132
2.4.3.1.	Elevación.....	132
2.4.3.2.	Pendiente.....	133
2.4.3.3.	Longitud de Pendiente.....	133
2.4.3.4.	Aspecto de la Pendiente.....	134
2.4.3.5.	Curvatura.....	135
2.4.3.6.	Índice de Humedad Topográfico (TWI).....	135
2.4.3.7.	Litología.....	135
2.4.3.8.	Precipitación.....	136
2.4.3.9.	Densidad de Drenaje.....	136
2.4.3.10.	Índice de potencia de las corrientes (SPI).....	137
2.4.3.11.	Distancia a los Ríos.....	137
2.4.3.12.	Uso de Suelo y Vegetación.....	138
2.4.4.	Método de Relación de Frecuencia (FR).....	141
2.5.	Resultados.....	144
2.5.1.	Generación del modelo de GSP.....	152
2.6.	Validación de los resultados.....	154
	Discusión.....	162
	Conclusión.....	166
	<b>Discusión general y Conclusiones.....</b>	<b>167</b>
	<b>Referencias.....</b>	<b>171</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Introducción</b>	<b>Página</b>
Figura 1.	Disminución de agua en el Mar Aral en los últimos 40 años.....	11
<b>Capítulo 1</b>		
Figura 1.	Diagrama de flujo del funcionamiento de la clasificación supervisada y no supervisada.....	31
Figura 2.	Localización de la zona de estudio.....	45
Figura 3.	Temperatura media mensual de la zona de estudio.....	46
Figura 4.	Precipitación mensual de la zona de estudio.....	47
Figura 5.	Evaporación media mensual de la zona de estudio.....	47
Figura 6.	Suelos presentes en el área de estudio.....	55
Figura 7.	Principales ríos y arroyos de la Subcuenca Rioverde.....	57
Figura 8.	Zonas de veda presentes en el acuífero Rioverde.....	62
Figura 9.	Manantiales seleccionados para el análisis espacio-temporal en el Valle de Rioverde, S.L.P.....	67
Figura 10.	Manantial La Media Luna.....	71
Figura 11.	Manantial Puerta del Río.....	72
Figura 12.	Manantial Laguna de Jocolixtle.....	73
Figura 13.	Manantial Puerta del Río, correspondiente a la fecha 21/02/2011.....	79
Figura 14.	Resultados de la clasificación de algoritmo de clasificación para a) kNN y b) ML, Para ambos casos se aplicó una transparencia para la capa de las clases.....	80
Figura 15.	Cantidad de pixeles obtenida por clase para los algoritmos kNN y ML.....	81
Figura 16.	Resultados de clasificación de los algoritmos a) kNN y b) ML solo para la clase agua.....	82
Figura 17.	imágenes usadas para la clasificación de pixeles con el algoritmo ML (a,c,e y g) y resultados de la clasificación (b,d,f y h).....	84
Figura 18.	Comparación del total de pixeles obtenidos por la clasificación ML para cada año del manantial Puerta del Río.....	85
Figura 19.	imágenes usadas para la clasificación de pixeles con el algoritmo ML (a,c,e y g) y resultados de la clasificación (b,d,f y h).....	87



Figura 20.	Comparación del total de pixeles obtenidos por la clasificación ML para cada año del manantial La Media Luna.....	89
Figura 21.	. imágenes usadas para la clasificación de pixeles con el algoritmo ML (a,c y e) y resultados de la clasificación (b,d y f).....	91
Figura 22.	Comparación del total de pixeles obtenidos por la clasificación ML para cada año del manantial Laguna de Jocolixtle.....	92
Figura 23.	Comparación realizada con la imagen área de 1970, las imágenes están el siguiente orden a) Fotografía de 1970, b) imagen de Google Earth con fecha de 2016 montada sobre la fotografía aérea, c) ML 2016 y d) comparación de ML 2016 y delineado manual de 1970.....	94
Figura 24.	Comparación entre el delineado manual y los resultados automáticos de la clasificación de agua por el algoritmo ML.....	96

## Capítulo 2

Figura 1.	Localización de la zona de estudio.....	115
Figura 2.	Manantiales de entrenamiento y validación utilizados para la modelación Relación de Frecuencia del potencial de ocurrencia de manantiales de agua subterránea.....	131
Figura 3.	Factores utilizados para la modelación del potencial de zonas potenciales de manantiales: a) Elevación, b) Pendiente, c) Longitud de Pendiente, d) Aspecto de la Pendiente, e) Curvatura, f) TWI.....	139
Figura 4.	Factores utilizados para la modelación del potencial de zonas potenciales de manantiales: g) Litología, h) Precipitación, i) Densidad de Drenaje, j) SPI, k) Distancia a Ríos, l) Uso de Suelo y Vegetación.....	140
Figura 5.	Diagrama representativo para el cálculo de los valores de FR.....	142
Figura 6.	Diagrama de flujo de la metodología.....	143
Figura 7.	Factores reclasificados con los valores FR: a) Elevación FR, b) Pendiente FR, c) Longitud de Pendiente FR, d) Aspecto de la Pendiente FR, e) Curvatura FR, f) TWI FR.....	147
Figura 8.	Factores reclasificados con los FR: g) Litología FR, h) Precipitación FR, i) Densidad de Drenaje FR, j) SPI, k) Distancia a Ríos FR, l) Uso de Suelo y Vegetación FR.....	148
Figura 9.	Mapa de estimación del potencial de ocurrencia de manantiales en el Valle de Rioverde, SLP.....	153

Figura 10.	Manantiales utilizados para la validación del modelo: A) San Sebastián, B) Puerta de Piedra, C) La Virgen, D) El Ojito de Agua, E) Atarjea de en Medio, F) Guaxcamá, G) La Lagunita y H) Ojo de León.....	155
Figura 11.	Capa de GSP cargada en el software Google Earth.....	157
Figura 12.	Cuerpo de agua encontrado cerca de la comunidad el paso, la imagen “a” muestra la capa del modelo GSP encendida y la imagen “b” se observa el panorama con la capa apagada.....	158
Figura 13.	Cuerpos de agua localizados cerca del manantial de San Sebastián, la imagen “a” muestra la capa del modelo GSP encendida y la imagen “b” se observa el panorama con la capa apagada.....	159
Figura 14.	Cuerpo de agua localizado cerca del manantial extinto de la Poza Quintareña, la imagen “a” muestra la capa del modelo GSP encendida y la imagen “b” se observa el panorama con la capa apagada.....	160
Figura 15.	Formación compuesta por varios cuerpos de agua localizado en la comunidad de Las Tablas, la imagen “a” muestra la capa del modelo GSP encendida y la imagen “b” se observa el panorama con la capa apagada.....	161

## ÍNDICE DE TABLAS

		Página
<b>Introducción</b>		
Tabla 1.	Relación de los lagos más grandes de México y el área de su cuenca.....	14
Tabla 2.	Acuíferos con problemas de sobreexplotación e intrusión marina.....	15
Tabla 3.	Agrupamiento de los usos de agua en México.....	17
Tabla 4.	Cantidad de agua usada por cada grupo consuntivo.....	18
<b>Capítulo 1</b>		
Tabla 1.	Comparación de las características principales de los sensores.....	41
Tabla 2.	Estaciones climatológicas usadas para estimar las características climatológicas más importantes de la zona de estudio.....	48
Tabla 3.	Coordenadas geográficas de los vértices del acuífero administrativo de Rioverde.....	60
Tabla 4.	Manantiales y su información obtenida en campo.....	66
Tabla 5.	Fechas de las imágenes obtenidas.....	75
<b>Capítulo 2</b>		
Tabla 1.	Estaciones climatológicas usadas para estimar las características climatológicas más importantes de la zona de estudio.....	117
Tabla 2.	Manantiales aportadores al río Verde más importantes del Valle de Rioverde.....	125
Tabla 3.	Columna estratigráfica de Labarthé (1989).....	128
Tabla 4.	Manantiales visitados en campo.....	129
Tabla 5.	Datos generales de la información recolectada para la generación del modelo FR.....	134
Tabla 6.	Relación de frecuencia de los factores seleccionados y los manantiales utilizando el modelo FR.....	144
Tabla 7.	Clases más favorables y desfavorables de FR para cada factor efectivo utilizado.....	151
Tabla 8.	Porcentaje de área ocupada por cada una de las clases del modelo de relación de frecuencia.....	154
Tabla 9.	Efectividad del modelo FR para cada uno de los manantiales utilizados para la validación.....	156

## Resumen general

Los manantiales de agua subterránea son extremadamente importantes en muchas regiones del mundo, tanto por la calidad de sus aguas, como por los diferentes usos consuntivos. El Valle de Rioverde, en el estado de San Luis Potosí, es una de las regiones más notables de México, por la cantidad de manantiales que presenta, los cuales poseen un gran valor histórico y económico. En este sentido, este trabajo se realizó para conocer tanto la dinámica espacio-temporal, así como estimar las zonas potenciales de ocurrencia de los manantiales (GSP, por sus siglas en inglés) en el Valle de Rioverde. Particularmente, para analizar la dinámica espacio-temporal de los manantiales se seleccionaron tres de los más representativos: 1) Puerta del Río, 2) Media Luna y 3) Laguna de Jocolixtle. Para ello, se procesaron imágenes de alta resolución espacial obtenidas de la plataforma de Google Earth, con el propósito de estimar los cambios en el espejo de agua. El análisis reveló que los manantiales localizados en la zona norte y sur son más susceptibles a cambios, mientras que los ubicados en la zona centro tienden a ser más estables. La Laguna de Jocolixtle fue la que presentó la mayor cantidad de cambios, teniendo periodos de desecación total; en menos de 10 años, el espejo de agua alcanzó una superficie de hasta 10,000 m<sup>2</sup>, con profundidades mayores de 2 m. El manantial de la Media Luna ha mantenido su extensión durante los últimos 100 años. Por otro lado, se estimó el potencial de ocurrencia de manantiales de agua subterránea mediante el método Frequency Ratio, empleando datos de observación de manantiales en campo, así como una base de datos cartográfica de doce factores relacionados con la aparición de manantiales. Los resultados obtenidos mostraron que 154,418 ha (20%) del área de estudio se encuentra en una zona de alta probabilidad de ocurrencia de manantiales; mientras que 377,469 ha (49%) se encuentra en un grado de probabilidad muy bajo. Estos resultados fueron validados empleando una muestra independiente, obteniendo un 87.5% de efectividad en la predicción. Tanto la investigación relacionada con la dinámica espacio-temporal de los manantiales, como la determinación del potencial de ocurrencia de manantiales, generó conocimiento importante y necesario para impulsar de una manera informada, una diversidad de proyectos relacionados con el estudio y aprovechamiento sustentable de los recursos hídricos en la zona de estudio.

**Palabras clave:** agua subterránea, frequency ratio, análisis espacial.

## Abstract

Groundwater springs are very important in many regions of the world, both for the quality of their waters, and for the different consumptive uses. The Rioverde Valley, in the state of San Luis Potosí, is one of the most remarkable regions of Mexico, due to the number of springs in the area, with a great historical and economic value. In this sense, this work was carried out to know both the spatio-temporal dynamics, as well as, to estimate the groundwater spring potential (GSP) in the Rioverde Valley, San Luis Potosí, México. Particularly, in order to analyze the spatiotemporal dynamics of springs, three of the most representatives were selected: 1) Puerta del Río, 2) Media Luna and 3) Laguna de Jocolixtle. To do this, high spatial resolution imagery obtained from the Google Earth platform was processed, with the only purpose of estimating spatiotemporal changes in water bodies. The analysis revealed that, the springs located in the north and south are more susceptible to changing, while those located in the central zone are more stable overtime. The Laguna de Jocolixtle had the most prominent changes. *i.e.* from total-desiccation periods to a 10,000-square meters' water body size with 2 meters' depth. While the spring named "Media Luna" has been experienced the same size during the last 100 years. The second research carried out in this study, was on the groundwater spring potential by using map and field data into the Frequency Ratio model. The results pinpoint that 154,418 ha (20%) of the study area is within the status of high degree of groundwater spring potential; while, 377,469 ha (49%) presented a very low degree groundwater spring potential. These results were validated using an independent sample, obtaining an 87.5% of effectiveness in the prediction. Both, the research related to the spatiotemporal dynamics of springs, as well as the determination of springs potential, are important and necessary knowledge to propel a diversity of projects related to the sustainable use of water resources in the study area.

**Keywords:** groundwater, frequency ratio, spatial analysis

## Introducción General

El agua es vital para nuestro planeta y se encuentra de manera omnipresente; se puede ver en todos los procesos naturales y antrópicos que suceden en la faz de la Tierra. Se emplea para el riego de cultivos, para uso doméstico, industrial así como para la generación de energía eléctrica, por lo que su presencia es fundamental para el desarrollo de cualquier economía (Molinos-Senante y Donoso, 2016; Manju y Sagar, 2017; Liu et al., 2017). A pesar de que la mayor parte de la superficie del planeta está cubierta de agua, el 97% del agua está contenida en océanos (agua salada), mientras que casi el 70% del agua dulce se encuentra en forma de hielo en los polos. Por su parte, el agua subterránea dulce (0.76%) abastece aproximadamente a un tercio de la población mundial (Manju y Sagar, 2017).

El crecimiento de la población mundial involucra un mayor desgaste de los recursos naturales y el agua no es la excepción. Las Naciones Unidas estiman una cifra record de 9.5 mil millones de habitantes para el año 2050, por lo que muy pronto, el uso de los recursos hídricos aumentará considerablemente en todo el mundo (Singh, 2014). En la actualidad, un tercio de la población mundial vive en países con escasez de agua dulce, por lo que se estima que para el año 2025 dos tercios de la población se enfrentarán al mismo problema (Shatat et al., 2013; Zaidi et al., 2015; Manju y Sagar, 2017).

La escasez de agua tiene múltiples causas. De manera natural, los cambios en el régimen de precipitación han sido provocados por el cambio climático. Sin embargo, los humanos han influido de manera más directa para agravar este fenómeno. El crecimiento demográfico, la industria y la agricultura son las causas principales. No obstante, las grandes obras de almacenamiento y conducción de agua, han cambiado el curso de las corrientes de grandes ríos y arroyos, e incluso han llegado a desaparecer cuerpos de agua. Esto ha sido la causa del agotamiento de los recursos hídricos, generando alteraciones a los ecosistemas y efectos negativos sobre la salud humana (Fasel et al., 2016).

Cada día el abastecimiento de agua potable de buena calidad a la población es más difícil. Según la Organización Mundial de la Salud más de mil millones de personas no tienen acceso a agua potable de buena calidad. Las personas que viven en zonas rurales son las más afectadas. Los factores más importantes que propician el desabasto de agua potable son: 1) poblaciones con baja densidad que han sido olvidadas por sus respectivos gobiernos, 2) poblaciones localizadas lejos de la mancha urbana, encareciendo la instalación de sistemas de agua potable, 3) poblaciones asentadas donde el agua escasea de manera natural y finalmente 4) la desigual distribución geográfica de los recursos de agua dulce (Shatat et al., 2013; Liu et al., 2017; Sun et al., 2017). Sin embargo, las grandes ciudades no se salvan de los problemas de abastecimiento de los recursos hídricos. La rápida urbanización de algunas zonas en todo el mundo provoca contaminación al medio ambiente y con ello una mayor contaminación del agua, además el crecimiento urbano generalmente se acompaña de un crecimiento económico lo cual genera mayor demanda de agua, esto a su vez provoca una presión sobre el uso de recursos hídricos disponibles (Molinos-Senante y Donoso, 2016).

Ante el problema de abastecimiento y escasez de agua en todo el mundo, los investigadores han propuesto diversas soluciones. Entre las propuestas más importantes destacan: 1) técnicas para la purificación del agua de los océanos, 2) mejora de los métodos de tratamiento de agua contaminada, así como fomentar el uso de ésta, 3) el aumento de las tarifas a los usuarios del agua, 4) mantenimiento a las redes de distribución para evitar pérdidas por fugas, 5) incremento en las campañas mediáticas dirigidas a reducir la utilización de agua en las diferentes actividades, entre otros. Por lo que para lograr su uso sustentable, se requerirá abordar el problema desde diferentes perspectivas, a fin de optimizar el uso racional del vital líquido (Shatat et al., 2013; Fasel et al., 2016; Molinos-Senante y Donoso, 2016).

El cambio climático registrado durante los últimos años ha tenido una fuerte influencia en el medio ambiente y la sociedad. La escasez de precipitación y el aumento en la demanda de agua ha generado consecuencias negativas directas a

los almacenes del agua subterránea v.gr. la disminución de los niveles naturales, propiciando hundimientos del terreno, e incluso en lugares cercanos al mar, la invasión de agua marina al manto acuífero (Bekesi et al., 2009; López-Bermúdez y Sánchez-Fuster, 2010; Gemitzi y Stefanopoulos, 2011).

Una de las consecuencias más notorias del cambio climático en los últimos años es el calentamiento global. El incremento de la temperatura ha sido notorio en muchas regiones del mundo. Por ejemplo, en la región ártica se ha observado el aumento de la cantidad de cuerpos de agua, así como el nivel de los cuerpos que ya existían, comprobándose así la fusión del hielo de esa zona (Carrol y Loboda, 2017).

Por otro lado, el uso indiscriminado de agua subterránea en el mundo ha generado consecuencias de alto impacto, entre las que destacan la acelerada disminución de los niveles freáticos, intrusiones de agua salina hacia el agua dulce aprovechable, hundimientos de terreno, la difícil perforación de algunos materiales geológicos y finalmente la escasez de agua en muchas regiones del planeta (Bhuiyan, 2015; Zhou y Li, 2014; Zaidi et al., 2015). Por ejemplo, en Arabia Saudita durante 2012 se extrajeron aproximadamente 21,1 mil millones de metros cúbicos de agua subterránea, de los cuales se utilizó aproximadamente el 81% del agua en la agricultura. Lo alarmante de la situación, es el hecho de que la mayoría de estos recursos hídricos se derivan de las reservas de aguas subterráneas no renovables. La extracción excesiva de agua subterránea de estos acuíferos sedimentarios los hace más vulnerables a la contaminación de origen antropogénico (MoWE 2014; Zaidi et al., 2015).

Las consecuencias del uso indiscriminado del agua subterránea también se pueden observar en la disminución de la presencia de manantiales, así como el bajo rendimiento de recarga de los mantos acuíferos (Bekesi et al., 2009). Un manantial es un afloramiento de agua formado en la superficie del terreno de modo natural, el cual está constituido por agua subterránea proveniente de un acuífero (López-Bermúdez y Sánchez-Fuster, 2010; Moghaddam et al., 2015; Silva-García et al., 2016). Desde el origen de la vida los manantiales han sido



pieza clave para el desarrollo exitosa de esta. Por mucho tiempo los manantiales han condicionado la existencia y asentamiento de núcleos poblacionales, sobre todo aquellos en los que el caudal es tan grande como para formar un cuerpo de agua. Prueba de ello son los vestigios arqueológicos de civilizaciones antiguas, que demuestran que los humanos eligen para su asentamiento lugares cercanos a cursos de agua o manantiales para asegurar la disponibilidad de agua (López-Bermúdez y Sánchez-Fuster, 2010).

Los manantiales tienen una relevancia importante en el mundo, ya que además de ser piezas claves para la sustentabilidad de algunos ecosistemas, también representan una fuente para el consumo humano así como para actividades económicas como riego de cultivos, ganadería, turismo entre otras (Rodríguez-García et al., 2003; López-Bermúdez y Sánchez-Fuster, 2010; Moghaddam et al., 2015). Es conocido por la ciencia que los volúmenes de agua en los manantiales tienden a variar, con lo que pueden aumentar o disminuir su tamaño, esta situación depende principalmente de las actividades humanas, los cambios ambientales y la variabilidad meteorológica (Klein et al., 2015). Sin embargo, en las últimas décadas algunos manantiales han perdido volúmenes considerables de agua, incluso algunos han desaparecido en su totalidad debido a la sobreexplotación de los recursos hídricos, generando problemas ambientales (Bekesi et al., 2009; López-Bermúdez y Sánchez-Fuster, 2010; Klein et al., 2015). La degradación de manantiales puede tener consecuencias graves para el desarrollo de poblaciones, sobre todo en comunidades rurales que a falta de sistemas de abastecimiento de agua potable como lo hay en poblaciones urbanas, los manantiales son claves para tener una calidad de vida aceptable (López-Bermúdez y Sánchez-Fuster, 2010; Moghaddam et al., 2015; Silva-García et al., 2016). Las actividades humanas que dependen de extracciones de agua subterránea para satisfacer sus necesidades como la agricultura, ganadería, industria entre otros, tienen consecuencias directas sobre el rendimiento de manantiales así como ecosistemas que dependen en gran medida de aguas subterráneas (Bekesi et al., 2009; López-Bermúdez y Sánchez-Fuster, 2010). Algunos ecosistemas que están ligados a los manantiales son los humedales.

Además estos ecosistemas tienen una gran biodiversidad en la cual influye la dinámica hidrológica. Esta dinámica depende en gran medida de las precipitaciones y del caudal del manantial (Halabisky et al., 2016).

En otro contexto, la calidad natural del agua subterránea, depende de las condiciones geológicas de la zona por donde circula, ya que esta atraviesa por varios procesos naturales antes de emerger a la superficie, primero la infiltración de la superficie al subsuelo, además una vez en el subsuelo recorre largas distancia atravesando por distintos materiales geológicos. De esta manera atrapa minerales que son necesarios en los seres humanos, pero también puede recaudar algún mineral en exceso que perjudique su calidad, inclusive algunas sustancias que pueden resultar dañinas (Silva-García et al., 2016). Un aspecto importante de los manantiales es que por su naturaleza subterránea generalmente tiene una mejor calidad que el agua superficial almacenada, ya que el agua almacenada depende principalmente de las precipitaciones, pero además de los escurrimientos que se generan a partir de estas. Dichos escurrimientos a través de su paso por el suelo hasta el lugar de su almacenamiento, atrapa minerales que le dan características particulares, además también atrapa materia orgánica así como gases o microorganismos (Rodríguez-García et al., 2003; Silva-García et al., 2016). Sin embargo, la calidad del agua en general de los recursos hídricos ha decaído en las últimas décadas, por lo cual se han buscado medidas que faciliten el monitoreo espacio temporal de calidad del agua (Bonansea et al., 2015).

Los manantiales son de gran importancia para los periodos hídricos de la zona que los rodea, sin embargo la dinámica de estos es poco conocida ya que estudiar los cambios periódicos no es fácil. Monitorear manantiales requiere de mucho tiempo y recursos cuando se hacen mediciones en campo ya que por lo general para hacer este tipo de trabajo se instala equipo de control caro y sofisticado, además de realizar visitas muchas veces al año durante varios años (Bonansea et al., 2015; Halabisky et al., 2016).

Aún con toda la problemática existente, el agua subterránea no se administra correctamente, esto ocasiona que el recurso no esté garantizado a largo plazo.

Esto sucede inclusive en países desarrollados. El problema en la administración de las aguas subterráneas no solo se observa en las extracciones no regularizadas, sino que además la contaminación de acuíferos es otro de los grandes retos para dependencias que manejan la administración de las aguas subterráneas. Dentro de las principales fuentes de contaminación de las aguas subterráneas destacan, 1) aguas residuales sin tratar, 2) efluentes químicos y 3) productos químicos agrícolas. Un problema grave en las regiones áridas y semiáridas de todo el mundo es la extracción en acuíferos profundos que no se recuperan (Singh, 2014).

Se pueden sugerir variadas soluciones para afrontar problemas de gestión que afrontan las aguas subterráneas, tanto en el ámbito de cantidad y calidad. Sin embargo para tener certeza en los resultados de las posibles soluciones, generalmente se requiere de trabajo en campo y equipo costoso así como de periodos prolongados de observación. Los modelos de simulación resultan una alternativa atractiva por su capacidad de predicción para ayudar a solucionar problemas de gestión de aguas subterráneas, además de no tener que pagar elevados costos que implica el trabajo en campo y equipo de monitoreo (Singh, 2014).

## **Historia del conocimiento del agua subterránea**

El nacimiento de un manantial se debe a que el agua subterránea brota de entre las rocas, debido a que encuentra capas impermeables por los suelos en los que fluye. Las aportaciones al agua subterránea se dan principalmente por la filtración de agua de lluvia, aunque en algunas zonas la nieve al derretirse también actúa como otra fuente importante. Estas filtraciones se dan en un área de captación y surgen en zonas de menor altitud formando así los manantiales. Sin embargo, cuando la sociedad tuvo la necesidad de explicar el origen del agua subterránea y la aparición de manantiales, se tenían ideas totalmente erróneas (Rodríguez-García et al., 2003; Ozdemir, 2009).

Las primeras teorías acerca del origen de los manantiales las dieron los filósofos griegos. Tales de Mileto vivió alrededor del año 650 a. de C. y opinaba que los manantiales eran alimentados por los océanos, de donde las aguas de éstos corrían por las entrañas de la Tierra y por presión de las rocas emergían a la superficie. Platón (427-347 a. de C.) atribuía el origen de todas las aguas superficiales incluyendo los mares a una caverna llamada "Tartarus". Por otra parte Aristóteles (384-322 a. de C.) profundizó un poco más, afirmando que el agua de mar podría llegar a perder su salinidad y aparecer en los manantiales. Esto lo llevo a pensar que la procedencia no sería del mar, sino una emanación permanente de vapor del interior de la Tierra. Aristóteles llego a suponer también, que el agua de lluvia influía de alguna manera en la alimentación de manantiales, a través de la infiltración y la percolación hasta llegar a ellos. Sin embargo, su postura hacía referencia a que la mayor fuente de agua subterránea procedía de vapores internos de la Tierra. Tuvo algunas nociones acerca del ciclo hidrológico al describir que el sol convertía al agua en aire, el cual al enfriarse, se convertía nuevamente en agua para caer en forma de lluvia a la Tierra.

En los tiempos de la cultura romana pensaban que los manantiales eran alimentados por agua de mar e incluso de la condensación de vapores del interior de la Tierra. Lucrecio (99-55 a. de C.) autor del libro "De Rerum Natura" idealizó también un ciclo hidrológico al afirmar que las precipitaciones eran el producto de

la evaporación de aguas superficiales y del mar. Sin embargo también opinaba que el origen de los manantiales era el agua de mar.

Marco Vitruvio (s. I a. de C) tuvo una de las primeras concepciones correctas del origen de las aguas subterráneas al describir de una buena manera el ciclo hidrológico. Vitruvio concebía la idea de que los árboles tenían un papel importante al acumular nieve, y posteriormente cuando ésta se derretía, se infiltraba y de esa manera la nieve ya en forma de agua corría hasta el pie de las montañas y daba lugar a los manantiales. Además describe algunas plantas que indican la presencia de agua subterránea. Otros personajes como Plinio el Viejo (23-79 d. de C.) y Casiodoro en el siglo VI, también describen una serie de plantas que son indicadores del agua subterránea, además este último cita a un experto procedente un país árido africano que le enseña el arte de descubrir manantiales. En general estos tres últimos personajes revelan algunos indicadores de la presencia de aguas subterráneas, además de las plantas, se incluía el color y humedad de suelos, las nieblas locales y el método de hundimiento de esponjas, etc.

Es decir, desde que se buscó dar explicación al origen de los manantiales, se aceptó la idea de que el mar los alimentaba directamente, lo cual estuvo presente hasta el siglo XVII. La idea predilecta era que, el agua de mar perdía su salinidad y ascendía hasta los manantiales. Existían varias teorías que explicaban, cómo el agua que llegaba desde el mar al subsuelo lograba elevarse hasta los manantiales, entre las que destacan: 1) evaporación y ascensión del vapor para posteriormente condensarse en los manantiales, 2) presión de las rocas, 3) efecto de succión del viento, 4) acción capilar de las rocas, 5) acción del oleaje, 6) curvatura de la tierra y diferencia de elevaciones entre el mar y manantiales, entre otros.

En general, durante la Edad Media se seguía dando por válida la idea que las aguas subterráneas tenían su origen de las aguas de los mares. Sin embargo el ceramista francés Bernard Palissy (1510-1590) escribió su obra "Discours admirable de la Nature des Eaux et Fontaines", en la cual expone sus teorías

acerca del origen del agua subterránea. Fue el primero en defender que toda el agua de los manantiales y de pozos provenía directamente de las lluvias. Él explicó que el agua de las precipitaciones se infiltraba, y de esta manera corría hasta encontrar una roca impermeable canalizándola y dando origen a los manantiales.

A pesar de lo mencionado anteriormente, las ideas erróneas del origen de las aguas subterráneas aún siguieron como las aceptadas, incluso grandes científicos de la época como Johannes Kepler (1571-1630), Atanasius Kircher (1602-1680) y René Descartes (1596-1650) estaban de acuerdo con estas falsas teorías, llegando a realizar ilustraciones y aportaciones. Un claro ejemplo de ello, es la aportación inaudita que Kepler describió, comparando a la Tierra con un animal gigante que tragaba agua del mar, para después procesarla teniendo como resultado de ese proceso los manantiales. Kircher creía que los manantiales eran desagües naturales de sistemas de cavernas que existían debajo de todas las cavernas de la Tierra. Sus pensamientos fueron plasmados en su obra "Mundus Subterraneus", la cual constituyó un tratado de geología para los estudiantes de la época. Para Descartes, las ideas de que el agua de los manantiales provenía de vapores tenía validez, pero además sugirió que existían cavidades llenas de agua la cual se evaporaba y llegaba hasta los manantiales. Sostenía que estas cavidades nunca se agotaban porque eran alimentadas por las aguas del mar.

Finalmente hacia finales del siglo XVII pueden encontrarse las primeras ideas claras y con demostraciones cuantitativas del origen del agua subterránea y manantiales. Dichas ideas son obra de los franceses Pierre Perrault (1608-1680) y Edmé Mariotte (1620-1684) y del astrónomo inglés Edmund Halley (1656-1742). Perrault realizó trabajo de campo recopilando datos pluviométricos durante tres años en la cuenca del Sena, al mismo tiempo realizó algunos aforos en el río. Al analizar los datos encontró que las aportaciones de las lluvias habían sido seis veces más que las aportaciones de los ríos, con lo que desmintió las antiguas teorías que aseguraban, que las aportaciones de lluvias eran insuficientes para justificar las aportaciones de los ríos. Sin embargo opinaba que las aguas de lluvia

pasaban primeramente a ríos para engrosar su cauce, y de ahí se infiltraba la mayor parte del agua hacia los manantiales. No asumía la idea de que las aguas de lluvia pudieran alcanzar directamente las partes más profundas del suelo, sino que se lo atribuía mayoritariamente a la capacidad de infiltración de los ríos. No obstante, Mariotte repitió el trabajo en la misma cuenca aunque en un punto diferente. Mariotte logró demostrar con experimentos concretos dos grandes novedades, 1) que el agua de lluvia lograba alcanzar una infiltración profunda y 2) que el caudal de los manantiales estudiados en sus experimentos correspondía a las precipitaciones y extensión en la cuenca de estudio. Además logró hacer una buena descripción del ciclo hidrológico. El inglés Halley complementó el trabajo de los dos anteriores añadiendo el índice de evaporación. Con ello se creó la primera doctrina acerca del origen de las aguas subterráneas además de su desplazamiento, caudal de ríos y el ciclo hidrológico (Martínez-Gil, 1972).

### **Mar Aral: un gran cuerpo de agua que ha ido desapareciendo en los últimos años.**

El Mar Aral ( $45^{\circ} 05' 22.92''$  N,  $60^{\circ} 11' 23.44''$  E) se ubica al noreste del desierto de Kyzyl Kum entre Uzbekistán y Kazajistán. Es un lago interior de aguas saladas que no está unido a ningún mar u océano. En la década de los 50's, era el cuarto lago más grande del mundo con un área cubierta de  $68,000 \text{ km}^2$  aproximadamente. Pero en 1959, la Unión Soviética realizó algunas obras para abastecer cultivos por lo cual desvió los grandes ríos Amu Daría y el Sir Daria, piezas claves para el sustento del Mar Aral, por esta razón el Mar Aral comenzó a reducirse aceleradamente (Figura 1). En 1987, el nivel del Mar Aral era tan bajo que se dividió en dos partes: la parte norte y la parte sur, que a su vez esta última se dividió en la parte central y sur. En 2005 y 2008 el Mar Aral alcanzó niveles críticos con  $3,500 \text{ km}^2$  en la parte sur y  $3,300$  en la parte norte, estimándose en total una pérdida del 90% de su volumen de agua en los últimos 50 años (Singh et al., 2012; Indoitu et al., 2015; GeoEnciclopedia, 2017).

El Mar Aral es uno de los mayores desastres ecológicos causados por el hombre, ya que en el afán de convertir la región central de Asia en una importante

productora de algodón, se disminuyó de forma dramática la extensión y volumen del Mar Aral. Además con este hecho los niveles de salinidad de este lago aumentaron, con lo cual la mayoría de los peces no soportaron las nuevas condiciones y comenzaron a morir. La salud de los habitantes cercanos al Mar Aral se ve afectada debido a las sustancias tóxicas provenientes del polvo del mismo Mar Aral (Indoitu et al., 2015; GeoEnciclopedia, 2017; McDermid y Winter, 2017).

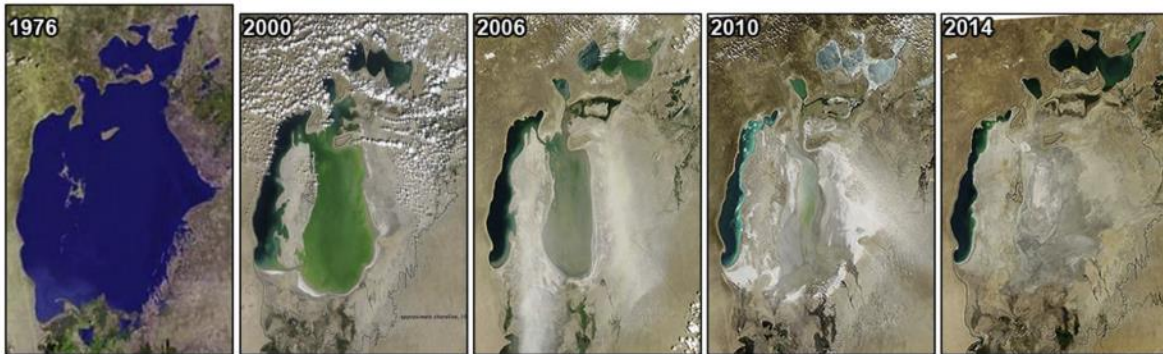


Figura 1. Disminución de agua en el Mar Aral en los últimos 40 años. Fuente: Opp et al., 2017.

Las variaciones espaciotemporales del nivel y extensión de los cuerpos de agua pueden ser monitoreadas por diferentes técnicas, entre ellas la percepción remota. Las imágenes satelitales tienen la gran ventaja de reducir o eliminar campañas de trabajo en campo para la recolección de datos. En este caso, la altimetría satelital que fue diseñada para medir la altura de la superficie del agua oceánica ha demostrado tener un amplio potencial para detectar y estimar cambios de nivel en cuerpos de agua (Singh et al., 2012).

Varios investigadores han realizado estudios de este fenómeno, con diferentes técnicas y datos. En el 2012, Singh et al. realizaron un cálculo de las variaciones del nivel de agua del Mar Aral para un periodo de diez años (2002-2011) utilizando información de percepción remota como lo fue altimetría por satélite de radar y laser, imágenes Landsat y gravimetría por satélite. Obtuvieron muy buenos



resultados, ya que los resultados de la gravimetría por satélite coincidieron con los cambios geométricos determinados por altimetría y Landsat.

La desecación del Mar Aral ha incrementado la frecuencia de aparición de tormentas de polvo afectando las zonas circundantes. En el 2017, Opp et al., realizaron un estudio de la distribución espacio-temporal de la deposición de polvo proveniente del Mar Aral sobre la República de Karakalpakstan y Oblast. Dentro de las variables analizadas se encontró la cantidad mensual de polvo, tamaño de grano, mineralogía y la composición química, también se analizaron tormentas individuales de polvo.

Otro impacto negativo que ha generado la pérdida de agua del lago es el cambio climático regional, principalmente en el aumento de la temperatura superficial. En este sentido en el 2017, McDermid y Winter realizaron modelos predictivos acerca del cambio del clima por acciones antropogénicas en el Mar Aral. Puntualmente estudiaron el aumento de concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero y el uso intensivo de los recursos hídricos. Se plantearon modelos de 30 años en condiciones de pre-desecado y completamente desecado del Mar Aral, además de los aumentos de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Concluyeron que, si el Mar Aral se llegara a secar por completo se podría provocar una alteración en la humedad del suelo regional y aumento de la temperatura superficial y así, tener un cambio climático violento. Sin embargo, por el contrario, también se demuestra que la restauración del Mar Aral podría revertir los efectos regionales negativos.

### **Situación del agua y manantiales en México**

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), es el órgano administrativo, normativo, técnico y consultivo encargado de la gestión del agua en México (CONAGUA, 2013). La CONAGUA ha definido 731 cuencas distribuidas en 37 regiones hidrológicas las cuales a su vez se agrupan en las 13 regiones hidrológico-administrativas. Mientras que para administrar el agua subterránea, la República Mexicana se ha dividido en 653 acuíferos. México recibe

aproximadamente 1, 489 mil millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación al año. De ese volumen, el 6% se distribuye como escurrimiento superficial a los ríos arroyos, presas, lagos entre otros, mientras que un 6% se infiltra al subsuelo y recarga los acuíferos.

La red hidrográfica de México se estima en 630 km de longitud. El 90% del escurrimiento superficial se concentra en cincuenta ríos, de los cuales sus respectivas cuencas cubren un 65% de la superficie continental. Los ríos más destacados por su longitud son el río Bravo y el río Grijalva-Usumacinta. México tiene la peculiaridad de compartir cuencas con países vecinos. Con Estados Unidos de América comparte tres cuencas: Bravo, Colorado y Tijuana, con Guatemala comparte cuatro cuencas: Grijalva-Usumacinta, Suchiate, Coatán y Candelaria, en tanto que la cuenca del río Hondo es compartida con Belice y Guatemala. Debido a esta situación existen ríos que se comparten con estos países. Por tanto se establecieron algunos tratados para gestión de sus aguas, por ejemplo en el caso del río Colorado, Estados Unidos debe entregar anualmente a México 1,850.2 m<sup>3</sup>. En el caso del río Tijuana ambos países trabajan en conjunto para la repartición equitativa de sus aguas, obras de almacenamiento, control de avenidas entre otros y todo ello vigilado por la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA). Para el caso del río Bravo, México debe proporcionar un caudal no fijo, el cual varía dependiendo de ciertas situaciones, las cuales se aclaran en el "Tratado de Aguas" firmado en Washington, D.C. en 1944.

Los cuerpos de agua más grandes del país sin duda son los lagos. El lago de Chapala es el más grande del país. Un embalse natural ubicado en el estado de Jalisco. El lago cuenta con tres islas interiores, una longitud de 80 km, una superficie de 1,112 km<sup>2</sup>, volumen de 8.1 km<sup>3</sup>, profundidad máxima de 20.5 m. En la Tabla 1, se muestra la relación de los lagos más grandes de México.

Tabla 1. Relación de los lagos más grandes de México y el área de su cuenca.  
Fuente: Tomado y adaptado de CONAGUA, 2013.

<b>Nombre</b>	<b>Estado (s)</b>	<b>Cuenca (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Capacidad (hm<sup>3</sup>)</b>
Lago de Chapala	Jalisco	1116	8126
Laguna de Cuitzeo	Michoacán- Guanajuato	306	920
Lago de Pátzcuaro	Michoacán	97	550
Lago de Yuriria	Guanajuato	80	188
Laguna de Catemaco	Veracruz	75	454
Dr. Nabor Carrillo	Estado de México	10	12
Tequesquitengo	Morelos	8	160

### **Agua Subterránea**

En los últimos cincuenta años, el agua subterránea ha sido explotada en todo el mundo a un ritmo acelerado, siendo pieza clave para el desarrollo socioeconómico de muchos países. El mejoramiento de las técnicas para su extracción ha ayudado a abastecer directamente a la población, al desarrollo industrial y agrícola. El agua subterránea normalmente tiene un grado de contaminación mucho menor que las aguas superficiales, debido a que el suelo y la vegetación funcionan como un filtro purificador, además que almacenan agua durante todo el año así como la fácil extracción en cualquier punto del acuífero.

En México tan solo en el 2012, 31.8 mil millones de m<sup>3</sup> de agua subterránea fueron destinados para usos consuntivos (diferentes tipos de consumo). En México, los acuíferos han sido delimitados políticamente para su administración, en un total de 653 acuíferos, para los cuales existe organismo local que se encarga de regularlos, quienes monitorean la disponibilidad media anual de agua en el acuífero para tomar decisiones en su manejo.

En 2001, se inició un programa para la identificación, delimitación, estudio y cálculo de la disponibilidad de agua en México, donde se encontró que, más de cien acuíferos presentan un desequilibrio negativo entre la recarga y la extracción. Lo preocupante es que, de dichos acuíferos con déficit hídrico se extrae alrededor del 55% de agua subterránea para todos los usos. En la tabla 2 se muestran los acuíferos por región hidrológica-administrativa con problemas de sobreexplotación en el 2012.

Tabla 2. Acuíferos con problemas de sobreexplotación e intrusión marina. Fuente: Tomado y adaptado de CONAGUA, 2013.

Región	Número de acuíferos				Recarga media (hm <sup>3</sup> ) 2012
	Total	Sobreexplotados	Porcentaje sobreexplotados	Con intrusión marina	
I Península de Baja California	88	15	17.0	10	1633
II Noroeste	62	10	16.1	5	3235
III Pacífico Norte	24	2	8.3		3263
IV Balsas	45	1	2.2		5793
V Pacífico Sur	36		0.0		1569
VI Río Bravo	102	18	17.6		5728
VII Cuencas Centrales del Norte	65	23	35.4		2404
VIII Lerma-Santiago-Pacífico	128	32	25.0		9706
IX Golfo Norte	39	1	2.6		3532
X Golfo Centro	22		0.0		4730
XI Frontera Sur	23		0.0		22718
XII Península de Yucatán	4		0.0		25316
XIII Aguas del Valle de México	15	4	26.7		2403
<b>Total Nacional</b>	<b>653</b>	<b>106</b>	<b>16.2</b>	<b>15</b>	<b>92030</b>

Aunque las aguas subterráneas normalmente presentan una alta calidad, ya que el suelo y vegetación fungen como un filtro natural, existen diversos factores y agentes contaminantes que la contaminan. Una de las problemáticas más notorias en los acuíferos mexicanos es la salinización de suelos y la presencia de aguas subterráneas salobres. Este tipo de problema tiene varias fuentes, principalmente: altos índices de evaporación en zonas de niveles poco profundos de aguas subterráneas, disolución de minerales evaporíticos, y presencia de aguas con un

origen salino. No obstante los acuíferos con este tipo de características solo se localizan en: 1) provincias geológicas caracterizadas por formaciones sedimentarias antiguas 2) acuíferos someros, 3) de origen marino y evaporítico y 4) en aquellos donde la interacción del agua subterránea con el material geológico propicia el enriquecimiento de sales. En México, este fenómeno se puede percibir puntualmente en la península de Baja California y el altiplano mexicano.

### **Calidad de agua superficial, subterránea y de playas en México**

México también se ha preocupado por estudiar la calidad de sus aguas, para salvaguardar la salud de la población. La Red Nacional de Monitoreo cuenta con 5,150 sitios de monitoreo distribuidos en todo el territorio, tanto de aguas superficiales, subterráneas y costeras. En algunas regiones del país se realizan monitoreos biológicos. La evaluación de calidad de agua se lleva a cabo utilizando tres indicadores: 1) Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días ( $DBO_5$ ), 2) la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y 3) los Sólidos Suspendidos Totales (SST). Las primeras dos determinan la cantidad de materia orgánica presente en los cuerpos de agua, y se utilizan principalmente en la evaluación de aguas provenientes de descargas residuales. La  $DBO_5$  determina la cantidad de materia orgánica biodegradable y la DQO mide la cantidad total de materia orgánica.

Cuando se trata de evaluar la calidad del agua subterránea, comúnmente se evalúa la salinidad. Los sólidos disueltos totales permiten evaluar este parámetro. la clasificación de las aguas subterráneas queda como sigue: a) aguas dulces ( $<1,000$  mg/l), b) ligeramente salobres (1,000 a 2,000 mg/l), c) salobres (2,000 a 10,000 mg/l) y d) salinas ( $>10,000$  mg/l). La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 establece los límites máximos permisibles que el agua debe cumplir para que pueda ser distribuida para el consumo humano.

Mientras que para las playas se sigue el protocolo del programa "Playas Limpias", en el cual se incluye el cuidado y saneamiento de las playas así como de su cuenca y acuíferos asociados. Este programa tiene como objetivo prevenir y revertir la contaminación en las playas, y de esta manera, conservar la ecología

nativa, elevar la calidad y el nivel de vida de la población local y del turismo. Este programa tiene la participación de varias instancias administrativas como, el gobierno local, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), Secretaría de Marina (SEMAR), Secretaría de Turismo (SECTUR), Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), también tiene participación la iniciativa privada. Para medir la calidad del agua en playas para uso recreativo de contacto con los seres humanos se emplea el indicador bacteriológico de enterococos fecales. Los niveles de enterococos fecales permisibles para playas aptas para uso recreativo es <200 NMP/100 ml.

### Usos del Agua en México

El agua es fundamental para la subsistencia humana, forma parte de todo tipo de actividades en la producción de bienes y servicios. El Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) ha agrupado los usos del agua y su clasificación para México (Tabla 3).

Tabla 3. Agrupamiento de los usos de agua en México. Fuente: Tomado y adaptado de CONAGUA, 2013.

<b>USO</b>	<b>Consuntivo/ No Consuntivo</b>	<b>Rubros de clasificación REPDa</b>
Agrícola	Consuntivo	Agrícola, acuacultura, pecuario, usos múltiples, otros usos
Abastecimiento público	Consuntivo	Doméstico, público urbano
Industria autoabastecida	Consuntivo	Agroindustrial, servicios, industrial, comercio
Energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad	Consuntivo	Industrial
Hidroeléctrico	No consuntivo	Hidroeléctricas

El REPDA es la institución más importante en cuanto a registros de volúmenes concesionados a los usuarios de las aguas nacionales. En México predomina el uso consuntivo de aguas superficiales (61.6%) sobre el uso de aguas subterráneas (38.4%). Sin embargo la concesión de agua subterránea ha aumentado de manera más acelerada que el agua superficial. En todo el mundo predomina el uso de agua para uso agrícola, de igual manera lo es en México que acapara más del 70%, algo a destacar es que México es uno de los países con mayor infraestructura de riego en el mundo. En la tabla 4 se aprecia la cantidad de agua que es destinada a cada tipo de uso.

Tabla 4. Cantidad de agua usada por cada grupo consuntivo. Fuente: Tomada y adaptada de CONAGUA, 2013.

Uso	origen		Volumen total (mil millones)	Porcentaje de extracción
	Superficial (mil millones de m <sup>3</sup> )	Subterráneo (mil millones de m <sup>3</sup> )		
Agrícola	41.3	22.2	63.3	76.6
Abastecimiento público	4.7	7.3	12	14.5
Industria autoabastecida	1.4	1.9	3.3	4
Energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad	3.6	0.4	4.1	4.9
<b>Total</b>	<b>51</b>	<b>31.8</b>	<b>82.7</b>	<b>100</b>

### Uso Agrícola

Según datos del VII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal, la superficie en unidades agrícolas de producción fue de 30.22 millones de hectáreas, de estas solo el 18% fue de riego y el resto fue de régimen temporal. A pesar que el porcentaje de hectáreas de riego es menor al de temporal, el rendimiento de toneladas por hectárea en la superficie bajo riego es hasta 3.6 veces mayor que el régimen temporal. Se estima que la superficie sembrada anualmente en el periodo 2008-2012 varió entre 21.8 y 22.1 millones de hectáreas. La agricultura representa

una importante fuente de ocupación en México. Según datos de la Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo (ENOE), las actividades de agricultura, ganadería, caza y pesca representa 14.2% de ocupación de la población económicamente activa. México es el sexto país en el mundo con mejor infraestructura de riego en superficie (6.5 millones de hectáreas). El 35% del agua concesionada al uso agrícola es agua subterránea.

### **Uso para Abastecimiento Público**

El uso del agua para abastecimiento público refiere a la entrega de agua potable a través de la infraestructura pública, para abastecer a los usuarios domésticos, comerciales y de servicios. Este rubro se ha incrementado de manera acelerada debido al crecimiento de la población a lo largo de todo el país. Sin embargo, actualmente se viven severos problemas de abastecimiento de agua, desde las grandes ciudades que no tienen la suficiente cantidad para abastecer, hasta las pequeñas comunidades rurales donde se dificulta la instalación de la infraestructura adecuada para su distribución. Es básico en cualquier núcleo poblacional contar con agua en cantidad y calidad suficiente para consumo, ya que incide directamente en el bienestar y salud de la población. En este tipo de uso la fuente de agua predominante es la subterránea (60.7%), principalmente por su fácil distribución y mejor calidad. Esto ha desencadenado la sobreexplotación de algunos mantos acuíferos, ya que la asignación de agua superficial ha aumentado en un 40%.

### **Uso Industrial**

La industria es muy importante en muchas zonas del país ya que es generadora de fuentes de empleo para la población. La industria minera, eléctrica, construcción, entre otras, requiere grandes cantidades de agua para su funcionamiento. Inicialmente, las aguas predominantes en la industria eran las superficiales, sin embargo, desde 2008 las aguas subterráneas superaron en uso a las superficiales.



## **El papel que desempeña la Percepción Remota y los Sistemas de Información geográfica en el estudio de recursos hídricos.**

Los registros a largo plazo sobre el uso y disponibilidad del agua son necesarios para identificar los regímenes hidrológicos en manantiales y su entorno (Halabisky et al., 2016). La información hidrológica sobre la dinámica de manantiales es esencial para realizar las gestiones políticas que permitan proteger y mantener las fuentes naturales de agua, mantener el hábitat natural de especies animales y vegetales además de una correcta administración del agua y la sostenibilidad del suelo (Klein et al., 2015).

La teledetección permite estudiar los cuerpos de agua a través del procesamiento de imágenes obtenidas mediante sensores remotos, con la ventaja de reducir tiempo y costos (Bonansea et al., 2015; Carrol y Loboda, 2017). Sin embargo, aún es complicado contar con imágenes con la resolución espacial y temporal adecuada para poder estudiar los cambios y patrones a través del tiempo (Carrol y Loboda, 2017). El no contar con suficientes observaciones de un cuerpo de agua puede generar falsas detecciones, como por ejemplo sombras de nubes y superficies marcadas por incendios, lo cual podría confundirse con máximos o mínimos históricos del cuerpo de agua (Carrol y Loboda, 2017). Las imágenes con resolución espacial alta, son tecnología relativamente nueva, por lo cual en algunos casos no se cuenta con un suficiente historial de imágenes para hacer un análisis de cambio en cuerpos de agua pequeños y que no son tan dinámicos (Halabisky et al., 2016).

Para realizar un análisis de la dinámica de los cuerpos de agua es indispensable contar con la información de la extensión normal de los cuerpos de agua y contar con las suficientes imágenes para representar una serie temporal, y así poder detectar los cambios reales a corto y a largo plazo así como las posibles causas que los han producido (Carrol y Loboda, 2017).

El monitoreo de los cuerpos de agua ha servido para conocer las condiciones pasadas y presentes, para poder estimar su comportamiento futuro. Ello ha

resultado de gran valor para poder diseñar programas que fomenten su conservación y manejo, lo cual incide en el proceso de toma de decisiones relacionadas con la gestión del agua (Klein et al., 2015).

### **Objetivo general**

Estimar los cambios espacio-temporales de los manantiales presentes en el Valle de Rioverde y delimitar las zonas de mayor potencial de ocurrencia, mediante el uso de percepción remota y sistemas de información geográfica.

### **Objetivos Particulares**

- 1) Analizar la dinámica espacio-temporal de los manantiales en el Valle de Rioverde, San Luis Potosí.
- 2) Estimar las zonas potenciales de la presencia de manantiales en el Valle de Rioverde, San Luis Potosí.

### **Hipótesis nula**

- 1) Los manantiales presentes en el Valle de Rioverde no presentan cambios de tamaño en periodos de tiempo cortos.
- 2) La presencia de manantiales en el Valle de Rioverde no están asociados a factores físicos y ambientales.

### **Hipótesis alterna**

- 1) Los manantiales presentes en el Valle de Rioverde presentan cambios de tamaño en periodos de tiempo cortos.
- 2) La presencia de manantiales en el Valle de Rioverde están asociada a factores físicos y ambientales.

## **Capítulo 1**

# **Dinámica espacio-temporal de los manantiales en el Valle de Rioverde, San Luis Potosí**

## Resumen

Los manantiales poseen una gran importancia ecológica y económica en todo el mundo. Sin embargo, a pesar de ello, los estudios enfocados a analizar su comportamiento espacio-temporal aún son escasos. Las razones son varias. Una de ellas es, la imposibilidad de contar con un archivo histórico de imágenes satelitales de alta resolución espacial que se adapte tanto a la resolución temporal deseada, como al tamaño del área de estudio. En este trabajo, se analizó la dinámica espacio-temporal de los tres manantiales más representativos en el Valle de Rioverde, San Luis Potosí (México) los cuales son como sigue: zona sur (Laguna de Jocolixtle 21° 43' 31.66" N, 99° 51' 41.58" O), zona centro (La Media Luna 21° 51' 39.50" N, 100° 1' 41.23" O) y zona norte (Puerta del Río 22° 14' 25.33" N, 100° 15' 31.67" O). Para realizar este trabajo se emplearon imágenes de la plataforma Google Earth con resolución espacial de 2 m. Se emplearon técnicas de clasificación supervisada para estimar el espejo de agua de los manantiales de forma automática. Posteriormente, se analizó la dinámica espacio-temporal de los manantiales comparando el área del espejo de agua dentro de los diferentes años de análisis. Los tres manantiales mantuvieron su tamaño en términos del espejo de agua, sin embargo, su comportamiento temporal fue diferente entre ellos. Por lo que la realización de estudios hidrogeológicos será necesario para averiguar con mayor detalle, los factores que gobiernan el comportamiento espacio temporal de dichos manantiales.

**Palabras clave:** agua subterránea, dinámica del espejo de agua, clasificación supervisada

## **Abstract**

Groundwater springs have a great ecological and economic importance worldwide. However, despite this, studies focused on analyzing their spatio-temporal behavior are still scarce. The reasons are several. One of them is the impossibility of having a historical archive of satellite images of high spatial resolution that adapts to both the desired temporal resolution and the size of the study area. In this work, we analyzed the spatio-temporal dynamics of the three most representative groundwater springs in the Rioverde Valley, San Luis Potosí (Mexico), which are as follows: southern zone (Laguna de Jocolixtle 21° 43' 31.66" N, 99° 51' 41.58" O), central zone (Media Luna 21° 51' 39.50" N, 100° 1' 41.23" O) and northern zone (Puerta del Río 22° 14' 25.33" N, 100° 15' 31.67" O). To carry out this work, images of the Google Earth platform with a spatial resolution of 2 m were used. Supervised classification techniques were used to automatically determine the groundwater spring surface water. Subsequently, the spatio-temporal dynamics of the groundwater spring surface water was analyzed by comparing the area of the surface water within the different years of analysis. The three groundwater spring surface water maintained their size, however, their temporal behavior was different between them. So, hydrogeological studies will be necessary to find out in more detail, the factors that govern the spatiotemporal behavior of these groundwater springs.

**Keywords:** groundwater, surface water, supervised classification

## 1.1. Introducción

Los manantiales son una de las fuentes más importantes de aguas subterráneas en el mundo. Las zonas áridas y semiáridas son las que mayor beneficio obtienen de estos, debido a varios factores como: a) fuentes escasas de agua superficial, b) mejor calidad que el agua superficial, c) ayudan a afrontar los periodos de sequía (Abdalla, 2012). La demanda constante de recursos naturales ha causado tensiones sociales y conflictos violentos en algunas zonas del mundo. Es por ello que, la evaluación y monitoreo de los recursos hídricos así como el desarrollo de metodologías que mejoren la calidad del mapeo del agua pueden servir como una herramienta que ayude a la protección de valores sociales como económicos y biológicos (Campos et al., 2012). Sin embargo, llevar a cabo un monitoreo de los periodos hídricos de los manantiales a través del tiempo resulta muy costoso y tardado ya que los trabajos tradicionales involucran aparatos costosos así como personal que labore en campo en la recolección de datos o manipulación de equipos (Campos et al., 2012; Halabisky et al., 2016). No obstante, los trabajos en campo difícilmente cubren la cantidad y calidad de información en el sentido de tiempo y espacio, para comprender los patrones generales en el cambio del llenado o secado de los manantiales y de esta manera saber si dichos cambios son por naturaleza de los hidroperíodos o por causas anormales (Halabisky et al., 2016). De acuerdo a los términos usados por Halabisky et al., 2016, los hidroperíodos para los manantiales se pueden definir como el patrón de inundación o secado. Por otro lado sin la referencia de los cambios en el espacio-tiempo no es posible saber cómo los cambios climáticos o ambientales afectan la estructura de los manantiales (Halabisky et al., 2016). En todas las regiones del mundo donde se realizan mapeos o inventarios de cuerpos de agua superficiales, generalmente los cuerpos de agua superficiales medianos y pequeños (donde algunos son manantiales) que presentan variabilidades interanuales de agua, pueden ser omitidos debido a su apariencia corta y errática (Campos et al., 2012).

La percepción remota resulta una herramienta útil para estudiar y analizar los cambios en el tamaño de los manantiales. Las dos principales ventajas en este

tipo de investigaciones son la reducción significativa de tiempo y costos (Campos et al., 2012; Kumar-Gautam et al., 2015; Halabisky et al., 2016; Kelly y Gontz, 2018). Analizar la dinámica espacio-temporal de los manantiales no es un desafío fácil ya que en la zona de estudio los manantiales son pequeños por tanto es complicado compensar la resolución espacial y temporal de las imágenes obtenidas mediante percepción remota. En la actualidad no existe ningún sensor espectral con la suficiente capacidad de resolución espacial y temporal para detectar de manera detallada los patrones de cambio en los manantiales, por lo que los investigadores recurren a diferentes técnicas para tratar de analizar y explicar cambios en llenado y secado de pequeños cuerpos de agua (Campos et al., 2012; Halabisky et al., 2016).

En los últimos años las imágenes de satélite han tomado fuerza en cuanto a estudios hidrológicos se refiere, principalmente para el mapeo de aguas superficiales, detectando cambios o patrones de cambios en el espejo de agua, calidad y turbidez, cabe hacer mención que es muy complicado estimar profundidades en cuerpos de agua pequeños con percepción remota (Kumar-Gautam et al., 2015; Halabisky et al., 2016; Kelly y Gontz, 2018). Dentro los trabajos que se han realizado para estudiar los hidroperíodos en pequeños cuerpos de agua destacan: Beerli y Phillips, 2007; Gómez-Rodríguez et al., 2010; Huang et al., 2011; Collins et al., 2014; Huang et al., 2014; Reschke and Huttich, 2014.

Las investigaciones hidrológicas con ayuda de imágenes satelitales más recurrentes son las clasificaciones difíciles, destacando aquellas en las que los píxeles se clasifican como agua o no-agua. La clasificación multi-banda permite generar índices que muestran mejor la distribución de los píxeles con agua en una zona de estudio determinada, el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI, por sus siglas en inglés) es uno de los métodos más utilizados para buscar píxeles de agua (Halabisky et al., 2016). Varios investigadores que utilizaron percepción remota para obtener el NDWI fueron: Gao, 1996; Campos et al., 2012; Kumar-Gautam et al., 2015; Ahmed y Akter, 2017; Ding et al., 2017; Kelly y Gontz, 2018.

De las investigaciones mencionadas, destacan las realizadas por por Kumar-Gautam et al., 2015 y Halabisky et al., 2016, ya que ambas mostraron una relación estrecha con los objetivos de esta investigación. Por un lado Kumar-Gautam et al., 2015, realizaron una investigación en la ciudad de Bangalore en la India, para detectar los cambios en la extensión de los cuerpos de agua para un periodo de 13 años (2002 a 2014), para ello utilizaron tres métodos: Índice de proporción de agua (WRI, por sus siglas en inglés), Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) y el Índice de agua de diferencia normalizada modificada (MNDWI, por sus siglas en inglés). Mientras que Halabisky et al., 2016 realizaron una investigación en el condado de Douglas, estado de Washington, EE.UU. para la reconstrucción de hidrogramas de agua superficial de 750 humedales para un período de 28 años (1984 a 2011). Estos investigadores utilizaron el análisis de mezcla espectral (SMA, por sus siglas en inglés), el cual consiste en la estimación de la abundancia fraccionaria de espectros que representan materiales físicamente significativos, los cuales comprenden un pixel mixto. De esta manera representaron estimaciones subpixel de la extensión del agua superficial. Para ambas investigaciones se utilizaron imágenes Landsat de resolución espacial moderada.

Las imágenes aéreas han sido utilizadas para el mapeo de alta resolución de cuerpos de agua, ya que poseen resoluciones espaciales hasta de 1 m. (Halabisky et al., 2016). Sin embargo, para realizar análisis de la dinámica del espejo de agua la resolución temporal resulta una limitante ya que los vuelos aéreos son muy costosos y se complica el obtener imágenes de diferentes fechas. A pesar de que las imágenes aéreas proporcionan una excelente detección de los niveles en el espejo de agua aún en cuerpos pequeños, es difícil obtener patrones que ayuden a comprender la dinámica del agua (Campos et al., 2012; Halabisky et al., 2016).

En la actualidad existen satélites de observación de la tierra equipados con sensores ópticos de muy alta resolución (VHR, por sus siglas en inglés), alcanzando resoluciones espaciales inclusive por debajo de los 2 m, con las que se puede tener un detalle muy fino de la superficie, la resolución es tan buena que se pueden distinguir árboles individuales, lo cual ha atraído cada vez a más



usuarios por su alto potencial de mapear y monitorear recursos sobre la superficie terrestre. Es tal la calidad de estas imágenes que se pueden comparar con imágenes aéreas en cuanto calidad radiométrica, geométrica y resolución espacial (Poli et al., 2015). Las imágenes de los satélites comerciales GeoEye-1 y WorldView-2 presentan muy alta resolución espacial, en la actualidad además de ser innovadores han sido poco explorados (Aguilar et al., 2013). Las imágenes GeoEye-1 manejan resoluciones de 0.5 m en la banda pancromática y 2 m en las bandas multiespectrales. Investigadores de diferentes partes del mundo han utilizado imágenes GeoEye para realizar investigaciones de distintos ámbitos, a continuación se mencionan algunos: Dennison et al., 2010, usaron imágenes GeoEye-1 para monitorear plagas que afectaban a pinos de montaña en el oeste de los Estados Unidos de América. En el 2015 Poli et al., utilizaron imágenes GeoEye-1 y WorldView-2 para extraer información 2D y 3D del terreno en Trento Italia. En el 2016 Rajendran et al., realizaron un estudio de vegetación en la Universidad Sultan Qaboos (SQU) en Muscat, Omán. En la cual concluyen que con las bandas RGB es posible obtener componentes de la vegetación a una escala muy grande en función de las variaciones espectrales. En el 2017 Sritarapat y Takeuchi utilizaron las imágenes Stereo GeoEye para un estudio urbano en la ciudad de Yangon en el cual obtuvieron alturas de edificios y apoyaron la gestión urbana y el desarrollo de diversos aspectos.

Las imágenes de alta resolución espacial (VHR) han sido poco utilizadas para estudiar manantiales. Sin embargo, este tipo de imágenes han sido poco exploradas por lo cual se cree que pueden tener aplicación para el monitoreo de la dinámica espacio-temporal de los manantiales presentes en el Valle de Rioverde, San Luis Potosí. Debido a lo extenso que es el Valle de Rioverde y la limitada información que se tiene disponible, se seleccionaron tres manantiales, Procurando que estuvieran distribuidos geográficamente en la extensión del valle. Por tanto, se seleccionó un manantial de cada zona geográfica representativa del Valle en el Norte, Centro y Sur. Los manantiales seleccionados para cada zona fueron: para el norte, Puerta del Río (22° 14' 25.33" N, 100° 15' 31.67" O), para el

centro La Media Luna (21° 51' 39.50" N, 100° 1' 41.23" O) y para el sur "Laguna de Jocolixtle" (21° 43' 31.66" N, 99° 51' 41.58" O).

El clasificador de máxima verosimilitud (ML, por sus siglas en inglés) es un algoritmo ampliamente utilizado para la clasificación de píxeles de imágenes de satélite. El proceso consiste en utilizar algún método de clasificación para la creación de firmas espectrales de las imágenes por medio de entrenamientos. Posteriormente, a partir de estas firmas el algoritmo ML asigna a los píxeles en las clases ya conocidas, que para este caso serían píxeles de agua y no agua (Hagner y Reese, 2007; Liu et al., 2011). Este método resulta útil para cuantificar de manera rápida y con buena exactitud la extensión del espejo de agua de los manantiales.

En este sentido el objetivo principal de este trabajo fue analizar la dinámica espacio-temporal de tres manantiales seleccionados del Valle de Rioverde utilizando el algoritmo de clasificación de píxeles de máxima verosimilitud, aplicado en imágenes de alta resolución espacial VHR.

## **1.2. Métodos de clasificación de píxeles**

### **1.2.1. Clasificación supervisada**

La clasificación supervisada enfocada en sistemas de información geográfica, utiliza firmas espectrales generadas a partir del entrenamiento de puntos o polígonos para clasificar una imagen. En la clasificación supervisada de antemano se conoce la etiqueta o clase y el número de estas para cada instancia o zona (píxeles) de datos, en el conjunto de datos de prueba se predicen en función del modelo inducido del conjunto de datos de capacitación. La precisión de la asignación de las clases o predicción indica la eficiencia del modelo (Das et al., 2017). De forma puntual, el objetivo de una clasificación supervisada es que nuevas muestras se clasifiquen de manera automática, tomando en cuenta la información extraída de un conjunto de objetos (imágenes) divididas en clases, posteriormente la clasificación se asigna por medio de la decisión de una regla de clasificación (Das et al., 2017). Los algoritmos usados para la clasificación supervisada se basan generalmente en la información suministrada por un conjunto de muestras, patrones o prototipos (entrenamiento) que representan las clases, para el caso de los sistemas de información geográfica dichos patrones se generan a través de polígonos o puntos. Al conjunto de polígonos o puntos etiquetados se les llama "conjunto de entrenamiento, los cuales son usados para la clasificación de nuevas muestras. El objetivo de la clasificación supervisada es determinar a cual clase de las que ya se tiene conocimiento, debe pertenecer una nueva muestra.

### **1.2.2. Clasificación no supervisada**

En una clasificación no supervisada, las firmas espectrales se generan de forma automática por las herramientas del software utilizado para dicho fin. La función que realiza el software en una clasificación no supervisada es crear clústeres (grupos o cúmulos) y no clases, a partir de propiedades estadísticas de los píxeles de la imagen analizada. Todos aquellos píxeles que tienen propiedades estadísticas similares son agrupados en los clústeres, los cuales no generan

categorías a diferencia de la clasificación supervisada en donde se generan polígonos para clasificar cada clase de interés. A partir de estos clústeres se crean las firmas espectrales que posteriormente son usadas en algún algoritmo multivalente para generar la representación de las agrupaciones de píxeles (generalmente archivos raster) (ESRI, disponible en <https://desktop.arcgis.com>).

En la figura 1. Se describen los procesos que realiza la clasificación supervisada y no supervisada.

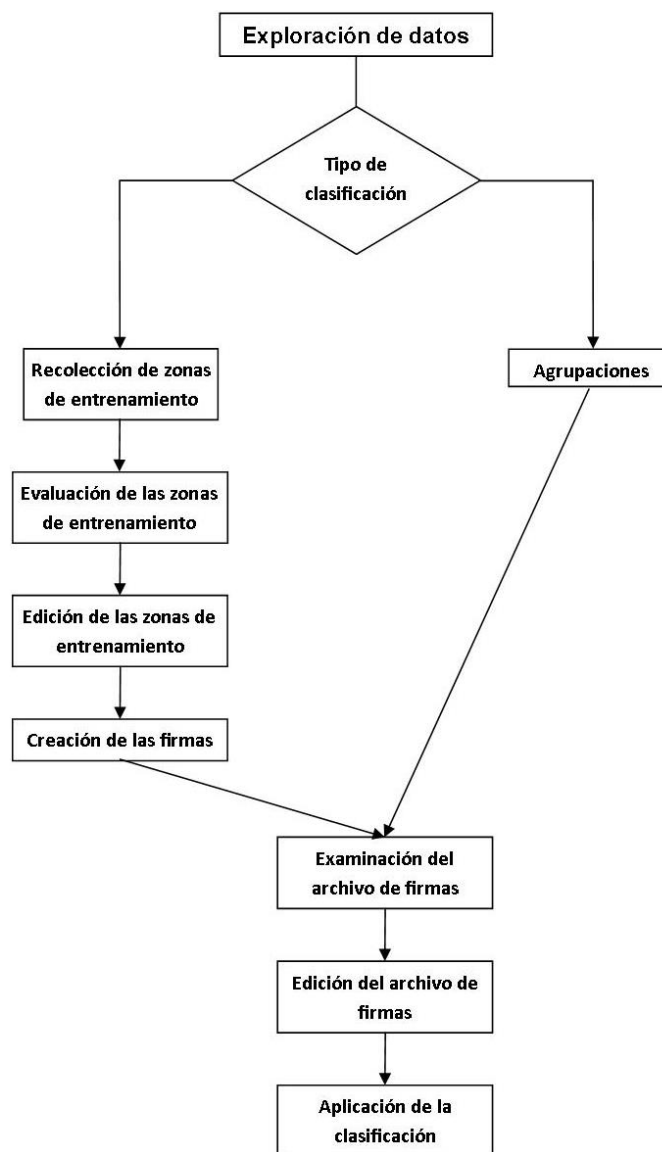


Figura 1. Diagrama de flujo del funcionamiento de la clasificación supervisada y no supervisada. Fuente: adaptado de ESRI.

### **1.3. Fuentes de información de percepción remota para el estudio de cuerpos de agua**

En años recientes, la integración de datos hidrológicos obtenidos mediante percepción remota con los Sistemas de Información Geográfica han tenidos varias aplicaciones como: 1) la extracción de cuerpos de agua de manera automática, 2) el monitoreo de cuerpos de agua a través del tiempo y espacio, 3) creación y actualización de la cartografía de cuerpos de agua, entre otros (Sarp y Ozcelik, 2016).

Para el estudio de cuerpos de agua con percepción remota se han utilizados varias fuentes de información. Según la literatura que se revisó, los satélites Landsat son los más usados para estos análisis a través del tiempo así como para la extracción automática de cuerpos de agua. Los satélites MODIS de igual manera han sido ampliamente utilizados por la ciencia para el estudio de cuerpos de agua, aunque por su baja resolución espacial se utilizan en cuerpos de agua con extensiones muy grandes. Las imágenes SPOT también han resultado útiles en el estudio y comprensión de cuerpos de agua, aunque estas imágenes cuentan con diferentes resoluciones espaciales, las que más se han utilizado son aquellas que cuenta con resolución espacial alta. En ocasiones resulta complicado adquirir las imágenes adecuadas para una zona de estudio, ya sea porque no se encuentran disponibles o no se cuente con los recursos para obtenerlas. Ante situaciones como las antes mencionadas, algunos investigadores han recurrido a recursos como las imágenes GeoEye-1 y WorldView-1 y 2, disponibles en la plataforma Google Earth, que ofrecen una resolución espacial de 2 m. Finalmente las fotografías aéreas son herramientas de gran utilidad para este tipo de estudios, ya que son de gran apoyo por su alta resolución espacial debido a lo bajo de sus vuelos y por la existencia de imágenes inclusive más antiguas que las imágenes de satélite.

### 1.3.1. Landsat

Las primeras imágenes espaciales de la superficie terrestre, tuvieron gran impacto positivo en todo el mundo. Debido a los excelentes resultados, en la década de los 60 se comenzó a gestar un proyecto visionario para monitorear la superficie terrestre, los recursos naturales así como la producción de cartografía a través de satélites artificiales. De este modo el 23 de julio de 1972 nació la primera generación de satélites Landsat, aunque el primero en ponerse en órbita en la fecha antes mencionada fue denominado ERTS (Earth Resource Technology Satellite), posteriormente fue renombrado Landsat 1, el sensor instalado en este satélite fue el Multi-Spectral Scanner (MSS), el cual estuvo presente hasta el satélite Landsat 5. El Landsat 1 estuvo en operaciones hasta 1978. El programa Landsat fue promovido conjuntamente por la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) (Chuvienco, 1990; Araiza, 2013; García-Varela).

El Landsat 2 entro en operaciones en 1975 y mantuvo actividades hasta 1982, el Landsat 3 tuvo su periodo de actividad de 1978 a 1983, en el Landsat 4 (1982-1993) se instala el sensor Thematic Mapper (TM), el cual también estuvo presente el Landsat 5 (1984 - 2013). En 1993 se suscitó el único incidente en los satélites Landsat, ya que el 6 falló en el lanzamiento. El Landsat 7 fue lanzado en 1999 y fue diseñado para una vida útil de 5 años, hoy en día (2018) aún se encuentra activo. El último satélite de la familia Landsat que ha sido lanzado es el Landsat 8 (2013 – a la fecha), el cual incorpora los sensores Operational Land Imager (OLI) y un sensor térmico infrarrojo Thermal Infrared Sensor (TIRS). En cuanto a la resolución espectral y espacial de los sensores utilizados los diferentes satélites Landsat son: 60 m con 4 bandas para MSS, 30 m con 7 bandas para TM, 30 m con 8 bandas para ETM, 30 m con 9 bandas para OLI y 100 m con 2 bandas para TIRS. Cabe mencionar que en la banda pancromática de los satélites Landsat 7 y 8 se mejoró la resolución espacial a 15 m (Chuvienco, 1990; Araiza, 2013).

Los datos de percepción remota provenientes de sensores Landsat, se han utilizado para muchas aplicaciones principalmente las enfocadas a los recursos naturales, en lo que se refiere a los cuerpos de agua superficiales destacan los siguientes: con Landsat 4 (Bonansea et al., 2015), desarrollaron de algoritmos para la evaluación de parámetros en la calidad del agua. Song et al., 2013, Utilizaron imágenes de los satélites Landsat 4 y 5 para estimar los cambios en el almacenamiento de agua en los lagos de la Meseta Tibetana, como una herramienta para la evaluación del cambio climático y el impacto en el entorno hidrológico. En el 2016 (Sarp y Ozcelik), utilizaron imágenes de Landsat 4, 5 y 7 para la extracción y detección de cambios en cuerpos de agua, dicho estudio fue realizado para Turquía. Para Landsat 5 (Bustamante et al., 2009), elaboraron un modelo para predecir la turbidez y la profundidad del agua, también se utilizaron datos del Landsat 7. Por otro lado (Halabisky et al., 2016) utilizaron imágenes del satélite Landsat 5 para reconstruir la dinámica del agua superficial para un periodo de 27 años en una zona de Washington. También con Landsat 5 (Mueller et al. 2016), cartografiaron los cuerpos de agua superficiales para todo Australia con el objetivo de comprender los fenómenos hidrológicos en ese lugar. Con Landsat 7 (Kutser, 2012), monitoreó las tendencias a largo plazo en la concentración de materia orgánica disuelta en aguas lacustres, para este estudio Kutser también utilizó Landsat 4 y 5. En el 2013 (Tulbure y Broich, 2013) desarrollaron una serie espacio-temporal explícita de cuerpos de agua mediante el mapeo automático de la extensión de los cuerpos de agua en Australia. En el 2015 (Lobo et al) utilizaron imágenes Landsat 8 para apoyo en un análisis de serie temporal para evaluar las aguas amazónicas afectadas por la actividad de la minería de oro en Brasil. Además también utilizaron imágenes de todos los satélites Landsat anteriores. En el 2016 (Lymburner et al) con Landsat 8, monitorearon la dinámica de la calidad del agua, de lagos y embalses en Australia.

### **1.3.2. MODIS**

En las últimas décadas las actividades humanas han tenido un gran impacto negativo en el planeta, ya que debido a las actividades económicas las zonas de

cultivo y pastizales han incrementado llegando a ocupar hasta un 40% la cobertura del suelo mundial, teniendo como consecuencias problemas ambientales. Lo inquietante de estos cambios provocados por el hombre es que se ha demostrado que el alterar la cobertura del suelo provoca alteraciones al ciclo hidrológico, pérdida de biodiversidad, erosión de suelo y el aumento de gases que incrementan el efecto invernadero. Además el clima también se ve afectado, provocando inundaciones, huracanes, sequías entre otros (Mas, 2011). Ante esta situación se han tomado medidas tanto de acción como preventivas en todo el mundo. La observación terrestre desde el espacio se convirtió en una poderosa herramienta para hacerle frente al problema. La obtención de imágenes de la superficie terrestre mediante sensores remotos, ha permitido estudiar de mejor manera los fenómenos naturales así como los cambios provocados por el hombre en el planeta (Ramachandran et al., 2010; Mas, 2011).

La NASA es una de las instituciones que se ha preocupado por los cambios ambientales globales, por cual ha creado sensores para el monitoreo de los cambios en la superficie. El proyecto más importante para los estudios de la ciencia de la tierra fue el Earth Observing System (EOS), el cual tiene como objetivo la observación permanente de los cambios de la atmosfera, de los océanos y la superficie terrestre en el planeta (Mas, 2011). La misión EOS puso en marcha tres plataformas, la primera en 1999 y la ultima en 2004, todas lanzadas exitosamente. Pero las benéficas para los estudios de la tierra son las primeras dos, Terra (lanzada en diciembre de 1999) y Aqua (lanzada en mayo de 2002). Dentro de estas plataformas sobresale el sensor Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), el cual está presente en ambos. El sensor Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), se encuentra contenido en el satélite Terra (Ramachandran et al., 2010).

Los instrumentos MODIS se basan en sistemas de sensores de segunda y tercera generación, que incluyen el Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) y los instrumentos Landsat Thematic Mapper. Los dos instrumentos MODIS a bordo de Terra y Aqua son prácticamente idénticos, atraviesan el ecuador en



diferentes momentos, Terra MODIS tiene una órbita descendente durante el día con un tiempo de cruce ecuatorial local a las 10:30 horas, mientras que Aqua MODIS tiene una órbita ascendente durante el día y un tiempo de cruce ecuatorial local a las 13:30 horas, esta situación le atribuye ser un ejemplo único de radiómetro multispectral de barrido transversal que adquiere un registro de datos global y multitemporal continuos a resoluciones moderadas (Ramachandran et al., 2010; Mas, 2011; Klein et al., 2012).

Los sistemas ópticos de MODIS incluyen matrices lineales de interferencia espectral. Incluyen el infrarrojo visible, infrarrojo cercano de onda corta y media y el infrarrojo de onda larga, los últimos dos requieren de enfriamiento criogénico de sus matrices detectoras (Ramachandran et al., 2010). MODIS cuenta con una alta sensibilidad radiométrica (12 bit) en 36 bandas espectrales, los rangos de longitud de estas van de los 0.4  $\mu\text{m}$  a los 14.4  $\mu\text{m}$ . Las primeras 19 bandas están situadas entre 0.405 nm y 2.155 nm. Las bandas de la 1 a la 7 son útiles para las aplicaciones terrestres; las bandas 8 a la 16 para las observaciones oceánicas y las bandas 17 a 19 para las mediciones atmosféricas. Las bandas 20 a la 36, cubren la porción del infrarrojo térmico del espectro de (3,660-14,385 nm) y las principales aplicaciones de estas son: superficie y temperatura de nubes, temperatura atmosférica, nubes cirrus y vapor de agua, propiedades de las nubes, ozono, altitud máxima de nubes. Dos bandas son tomadas a una resolución nominal de 250 m al nadir, cinco bandas a 500 m y las 29 bandas restantes a 1 km. MODIS posee una alta calidad geométrica que permite el monitoreo preciso de las alteraciones de la superficie terrestre (error RMS inferior a 50 m) (Mas, 2011; Klein et al., 2012).

La misión EOS ofrece un amplio campo de datos de percepción remota, así como también productos obtenidos de los sensores remotos instalados en los satélites. Los productos MODIS cuentan con nombres cortos para su identificación, los productos obtenidos por el satélite Terra tienen las iniciales MOD, los del satélite Aqua tienen las iniciales MYD y los productos combinados de Terra y Aqua tienen las iniciales MCD (Ramachandran et al., 2010).

MODIS ha resultado ser una excelente herramienta para el monitoreo de la superficie terrestre, ya que logra obtener información diaria en todo el planeta a una buena resolución superando a sensores como el AVHRR, además la detección térmica incluido el fuego así como las bandas de detección de nubes y corrección atmosférica han hecho de MODIS un sensor confiable y muy útil para la comunidad científica (Ramachandran et al., 2010). Las aplicaciones que se han logrado con este sensor, han beneficiado sin duda alguna el estudio de los recursos naturales. Entre las más destacadas se encuentran: la obtención temperatura y emisividad en la superficie terrestre, altura y propiedades de las nubes, estudios de balance energético, índices y dinámica de la vegetación, información para las ciencias y gestión de incendios, monitoreo del clima, clasificación del uso del suelo, entre otras. Una de las ventajas de MODIS es que se tiene acceso libre y gratuito para disponer de su información, es por tal razón que en todo el mundo se desarrollan nuevos productos y estudios por parte de la comunidad investigadora (Ramachandran et al., 2010).

Dentro las aplicaciones de los datos del sensor MODIS en estudios de cuerpos de agua se encuentran, la evaluación de las extensiones estacionales de cuerpos de agua en Asia central en el periodo de 1986 a 2012 realizado por Klein et al., 2012, además del sensor MODIS también se utilizó el sensor AVHRR. También se han utilizado imágenes MODIS para estimar la descarga de aguas subterráneas a escala de cuenca a través de la vegetación, como el estudio realizado por Tillman et al., 2012 en la cuenca y la provincia de Arizona. En el 2016 Ovakoglou et al., utilizaron imágenes MODIS para obtener la morfología detallada del lago Kerkini en Grecia, con una cuenca transfronteriza de 11,967 km<sup>2</sup>.

### **1.3.3. GEOEYE-1**

En la actualidad existe un gran número de plataformas de observación espacial de la tierra, además es cada día más común observar sensores equipados imágenes óptica VHR, con las cuales se obtienen imágenes con resolución espacial de menos de 2 m, lo cual permite observar detalles muy finos de la superficie terrestre (Aguilar et al., 2013; Poli et al., 2015). Tal situación ha provocado la atracción de más usuarios de diversos campos del conocimiento, además tienen un potencial muy grande para la elaboración de cartografía y monitoreo de la tierra. Este tipo de imágenes inclusive se pueden comparar en cuanto a calidad radiométrica y geométrica con imágenes aéreas digitales con la misma resolución. Para complementar la alta resolución espacial, los sensores VHR se montan en plataformas ágiles para permitirle una orientación rápida, y un alto tiempo de revisión (Poli et al., 2015).

El proyecto del satélite GEOEYE-1 fue desarrollado por la empresa GeoEye Inc, cuenta con tecnología de punta y es un sistema comercial de teledetección. Originalmente sería nombrado como OrbView-5, y su lanzamiento estaba previsto para el 22 de agosto de 2008, la fecha se aplazó en dos ocasiones y finalmente fue lanzado el 6 de septiembre de 2008 (INEGI, 2013). Este satélite es de órbita polar y realiza unas 15 órbitas/día a una altura de 681 km a una velocidad de 27,200 km/hr. La vida útil del satélite (activo en la actualidad) es de 7 años por diseño y 15 por combustible. El satélite GeoEye-1 adquiere imágenes con una resolución espacial hasta de 0.41 m (pancromática) y 1.65 m en la resolución espectral, sin embargo para ventas comerciales tienen que ser muestreados a 0.5 m en el pancromático y 2 m en el multiespectral esto como requisito impuesto por el gobierno de los Estados Unidos de América. El tiempo de revista de este satélite es de menos de tres días. Tiene una capacidad de recolección de 350,000 km<sup>2</sup>/día en la multiespectral y 700,000 km<sup>2</sup>/día en la pancromática (Aguilar et al., 2013; INEGI, 2013).

Las características de su sensor le permiten capturar una rápida colección de datos (5 Gbits/s), además el diseño del sensor le permite escanear en forma

bidireccional, de tal manera puede capturar un objeto de ida y vuelta en vez de reposicionarse. El tamaño de las imágenes es de 16X48 km (multiespectrales), 16X25 km (pancromáticas) y 16X7.5 (fusionadas) en promedio, el formato de las imágenes es archivo GeoTIFF y proyección cartográfica UTM (Universal Transversal de Mercator). El sensor cuenta con 5 bandas espectrales Azul (450-520 nm), Verde (520-600 nm), Rojo (625-695 nm), Infrarrojo cercano (760-900 nm) y Pancromática (450-900 nm) y una resolución radiométrica de 11 bits (INEGI, 2013).

GEOEYE-1 ofrece tres productos los cuales son como sigue: 1.- GEO, es una imagen corregida radiométricamente, estas imágenes están encaminadas principalmente a la visualización y referencia. Esta imagen se adquiere en formato RPC00B en archivos NITF. 2.- GeoProfessional, son imágenes orto-rectificadas, está disponible en varios niveles de precisión, estas imágenes son utilizadas en proyectos donde se requiere una alta resolución y precisión, pueden sustituir información y datos recabados en campo, si estos trabajos resultan ser más costosos que la adquisición de imágenes o es muy difícil el acceso al terreno. 3.- GeoStereo, este producto son pares estéreo de alta resolución recopiladas en un mismo paso orbital, esta situación permite disminuir los cambios de luz o contenido en la escena. Estos pares de imágenes disponen de un archivo modelo RCP lo cual permite tener datos de la cámara. Cabe hacer mención que los productos obtenidos de GEOEYE-1 son de los más utilizados en la plataforma Google Earth.

Entre las principales aplicaciones que se le han dado a estas imágenes destacan: 1) Defensa e inteligencia, para la identificación de fuerzas terrestres, navales, aéreas, instalaciones militares, detección de áreas de almacenamiento de armas entre otros, 2) Arquitectura e ingeniería. La excelente resolución de las imágenes GEOEYE-1 permiten observar atributos físicos de los sitios elegidos para la construcción de algún proyecto, como pueden ser acceso de caminos, cercanías con zonas comerciales o de interés tipo y condiciones de la vegetación existente etc... 3) Organismos de gobierno, apoyan en la toma de decisiones principalmente

en lo referido a clasificación y uso de suelos, crecimiento de mancha urbana y reserva de las ciudades. 4) Recursos naturales, sirven de apoyo para la planeación de uso y conservación de los recursos naturales, seguimiento a las actividades agrícolas, control de plagas, monitoreo de la salud de la vegetación entre otros. 5) Minería, Principalmente las imágenes GEOEYE-1 son usadas para el análisis y tratamiento de datos geológicos, para una correcta planeación y logística de identificación de yacimientos minerales. Imágenes con este tipo de resolución espacial reducen notablemente el trabajo de campo. En resumen se puede determinar que reducen costos notables en las actividades mineras (INEGI, 2013).

En cuanto a los estudios hidrológicos se refiere las imágenes de GEOEYE aún no se han aprovechado del todo en esta área, las razones pueden ser que estas imágenes son aun relativamente nuevas y además costosas, esto quizás obliga a los investigadores a tomar otras alternativas. Sin embargo y de acuerdo a la literatura citada en este trabajo, se cree que estas imágenes tienen un alto potencial para los estudios hidrológicos sobre todo aquellos en los que se estudia cuerpos de agua, ya que su excelente resolución espacial es ideal para monitorear las variaciones en el tiempo así como la ubicación y delimitación de cuerpos de agua, principalmente en aquellos que por su tamaño no pueden ser fácilmente identificados por sensores de menor resolución como por ejemplo Landsat.

Tabla 1. Comparación de las características principales de los sensores.

Plataforma	Sensor	Resolución espacial	Bandas	Ancho de barrido	Resolución temporal
<b>Landsat</b>					
Landsat 1	MSS	80 m	4	185 km	18 días
Landsat 2	MSS	80 m	4	185 km	18 días
Landsat 3	MSS	80 m	5	185 km	18 días
Landsat 4	MSS, TM	30, 80, 120 m	11	185 km	16 días
Landsat 5	TM	30, 120 m	7	185 km	16 días
Landsat 7	ETM+	15, 30 60 m	8	185 km	16 días
Landsat 8	OLI, TIRS	15, 30 y 100 m	11	185 km	16 días
<b>MODIS</b>					
	Aqua	250, 500 m, 1 km	36	2330 km	1-2 días
	Terra	250, 500 m, 1 km	36	2330 km	1-2 días
					menos de 3 días
GEOEYE-1	GeoEye	0.5, 2 m	5	15.2 km	días

#### 1.3.4. Fotografía Aérea

La fotografía aérea consiste en obtener imágenes de la superficie mediante una cámara especial que dispara fotos consecutivas cada cierto intervalo y una determinada altura sobre la superficie terrestre. Dichas fotografías pasan por un proceso de corrección y ajuste para posteriormente obtener información de ellas o ser tratadas en un sistema de información geográfica (SIG). Las características de fotografías obtenidas de los vuelos aéreos, se deben planear con anticipación al vuelo para obtener una escala que dependerá de la altitud, una proyección, la cantidad de área a muestrear etc. (INEGI, 2013).

Las imágenes obtenidas mediante diferentes sensores instalados en satélites resultan adecuadas y eficientes para el estudio y caracterización de recursos naturales en grandes extensiones de terreno, además es fácil integrar los datos

obtenidos mediante percepción remota en los SIG, sin embargo en algunas ocasiones se requiere de un detalle más fino del recurso que se estudia. Desde hace décadas las imágenes de alta resolución en formato más pequeño como lo son las fotografías aéreas digitales resultan eficientes y rentables para realizar estudios de los recursos naturales (López-García et al., 2016). Por lo general una resolución alta es sinónimo de un mayor procesamiento de imágenes, lo cual podría resultar como una desventaja, sin embargo con las imágenes de alta resolución espacial puede ser mejor caracterizado un fenómeno a estudiar y también es posible observar de mejor manera los cambios en el tiempo de los recursos naturales (López-García et al., 2016).

En años recientes se han puesto en marcha proyectos de nuevas plataformas con sensores remotos instalados que tiene la capacidad de obtener imágenes con resolución espacial comparada a la de las imágenes aéreas, por otro lado también se han creado nuevos sistemas aéreos y espaciales no tripulados como por ejemplo los drones que han logrado mayores resoluciones espectrales y espaciales. Sin embargo, los vuelos tripulados para la fotografía aérea siguen siendo flexibles por su opción de adquisición de pares de estéreo, obtención de atributos topográficos, buen tamaño de píxel, superposición, caracterización de atributos de la zona de estudio entre otros (López-García et al., 2016).

En cuanto a los vuelos aéreos no tripulados para la obtención de imágenes, la ventaja es el menor costo que representa contra los vuelos aéreos tripulados, los vuelos aéreos no tripulados serán más rentables y asequibles si el aérea de estudio no cubre muchos  $\text{km}^2$  ya que los vuelos son a baja altura y debido a la autonomía de las baterías no se pueden mantener mucho tiempo en vuelo (Díaz-Vilariño et al., 2016).

Otro tipo de sistema de obtención de imágenes por fotografía aérea es el que plantearon en su estudio Bryson et al., 2016 la fotografía aérea de la cometa (KAP, por sus siglas en inglés), el cual consiste en montar una cámara o un sensor en una cometa y activar de forma remota o automática la toma de fotografías. Bryson et al., recurrieron a esta técnica debido a los altos costos que

investigaron para la adquisición de imágenes con resolución espectral de aproximadamente 2 m, los cuales oscilaban entre 3000 y 5000 USD (para el 2016), aunado con los elevados costos de vuelos aéreos tripulados y no tripulados.

Dentro de las aplicaciones más destacadas de la fotografía aérea se encuentran: 1) creación o actualización de cartografía, 2) planeación y construcción, 3) estudio de recursos naturales, 4) planeación urbana, 5) catastro rural y 6) actividades agrícolas (INEGI, 2013).



## **1.4. Materiales y métodos**

### **1.4.1. Descripción de la zona de estudio**

#### **1.4.1.1. Localización de la zona de estudio**

La zona de estudio para este trabajo es el Valle de Rioverde, el cual se encuentra en la Zona Media del Estado de San Luis Potosí abarcando principalmente los municipios de Rioverde, Ciudad Fernández y Villa Juárez (Figura 2). Los principales núcleos poblacionales de la Zona Media son las cabeceras municipales de estos municipios las cuales llevan el mismo nombre respectivamente. Los municipios colindantes con la zona de estudio son: al Norte Cerritos, Ciudad del Maíz y Villa Juárez, al Este Alaquines, Cárdenas y Rayón, al Oeste San Nicolás Tolentino y al Sur con Santa María de Río, San Ciro de Acosta y el Estado de Guanajuato. La zona de estudio forma parte una planicie conocida como el “Valle de Rioverde” la cual tiene una elevación promedio de 900 m.s.n.m. y además también forma parte del acuífero administrativo con clave 2415 de nombre “Acuífero de Rioverde” el cual abarca una área de 2782.6 km<sup>2</sup>. Esta zona pertenece a la región hidrológica 26 (Cuenca del bajo Pánuco) y a su vez esta pertenece a la región 9 (Golfo-Norte) de las regiones hidrológico-administrativas (Charcas y Olivares, 2002; Ballín-Cortés, 2003; DOF, 2014; Díaz-Rivera, 2015).

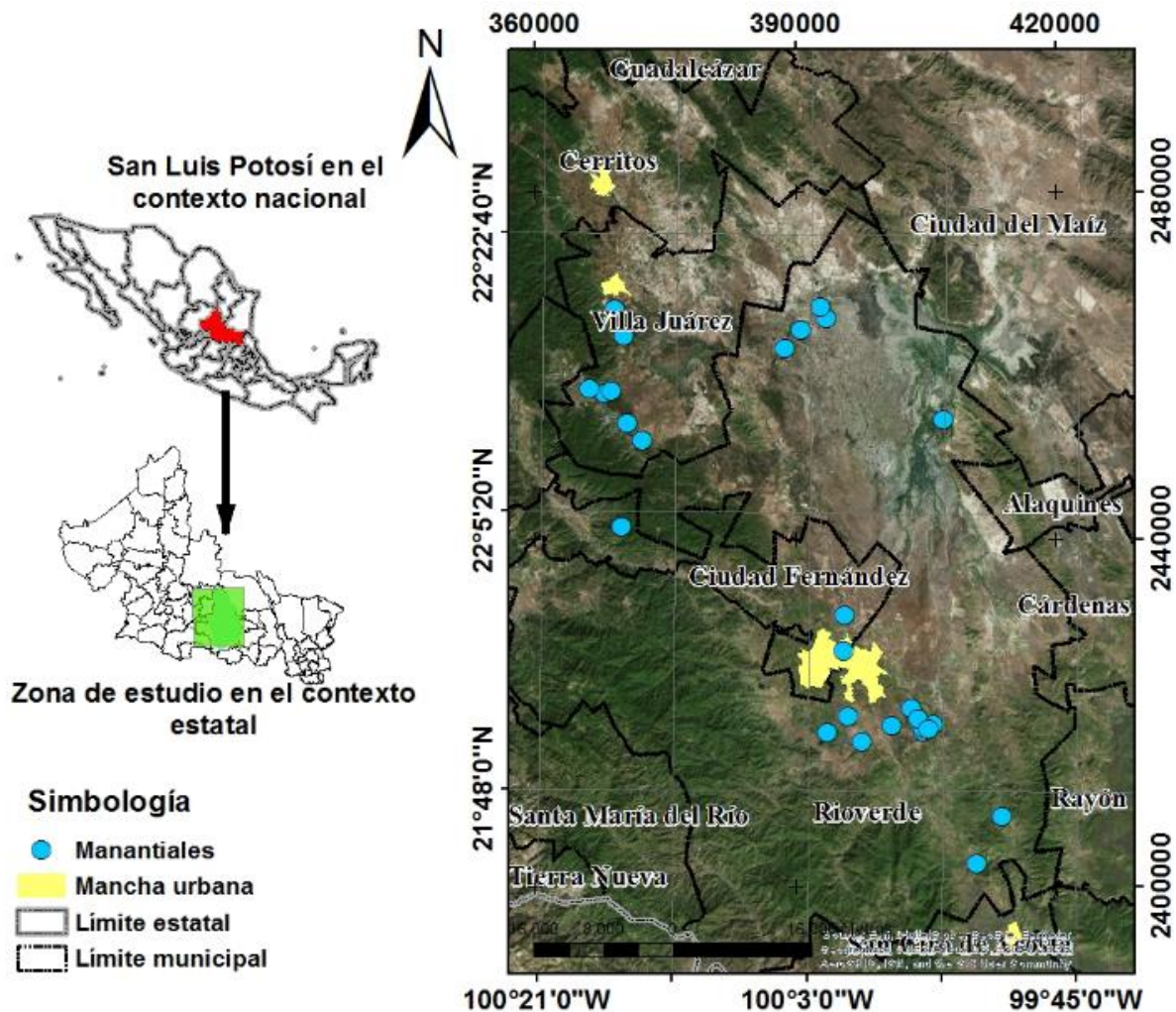


Figura 2. Localización de la zona de estudio.

#### 1.4.1.2. Clima

En la zona de estudio se presentan condiciones climáticas variadas, en la parte sur se puede notar un clima subhúmedo debido a las serranías de esa parte, en la parte central donde se concentra la mayor parte de la población así como la zona agrícola se observa un clima semiseco, mientras que en la parte norte se observa un clima seco (DOE, 2000). Sin embargo en la mayor parte de la región predomina el clima seco. En verano se alcanzan temperaturas que revesan los 40 °C, mientras que en invierno se perciben temperaturas de hasta 0 °C (Ballín-Cortés, 2003). De acuerdo a las estaciones de la región la temperatura media anual es de 22 °C. El régimen de precipitación es en verano en algunas ocasiones

extendiéndose hasta el otoño, mientras que en invierno generalmente hay escasas lluvias, al igual que el clima la precipitación pluvial anual es también variada a lo largo de la zona de estudio, pero los rango promedios de precipitación media anual oscila entre los 400 y 700 mm (UASLP, 2005; Ballín-Cortés, 2003; CONAGUA, 2006). Las características climatológicas más importantes de la zona de pueden encontrar resumidas en las siguientes gráficas.

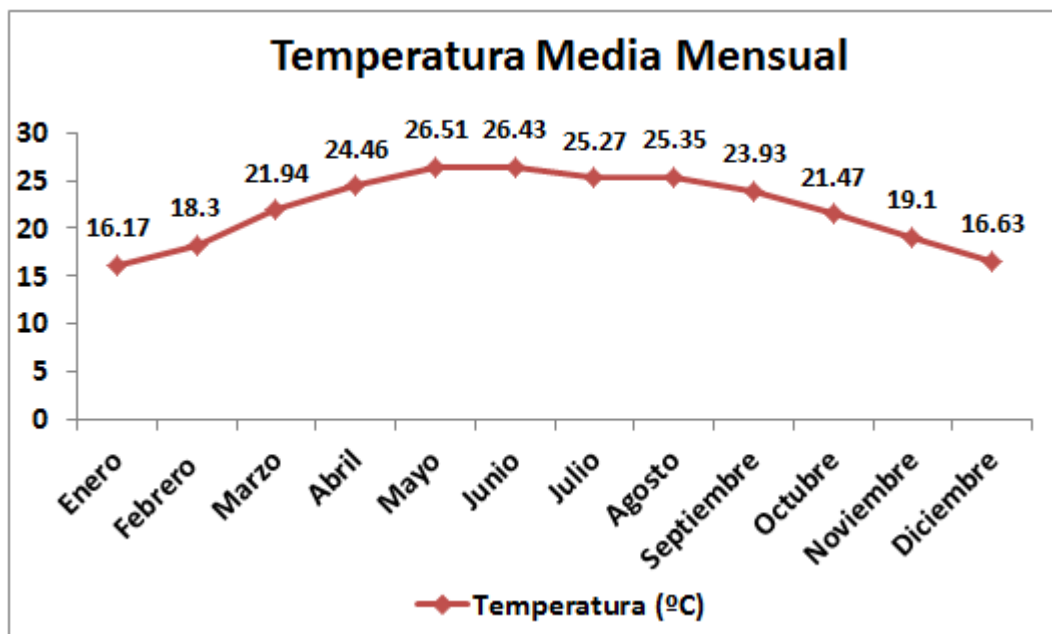


Figura 3. Temperatura media mensual de la zona de estudio. Adapta de UASLP 2005.

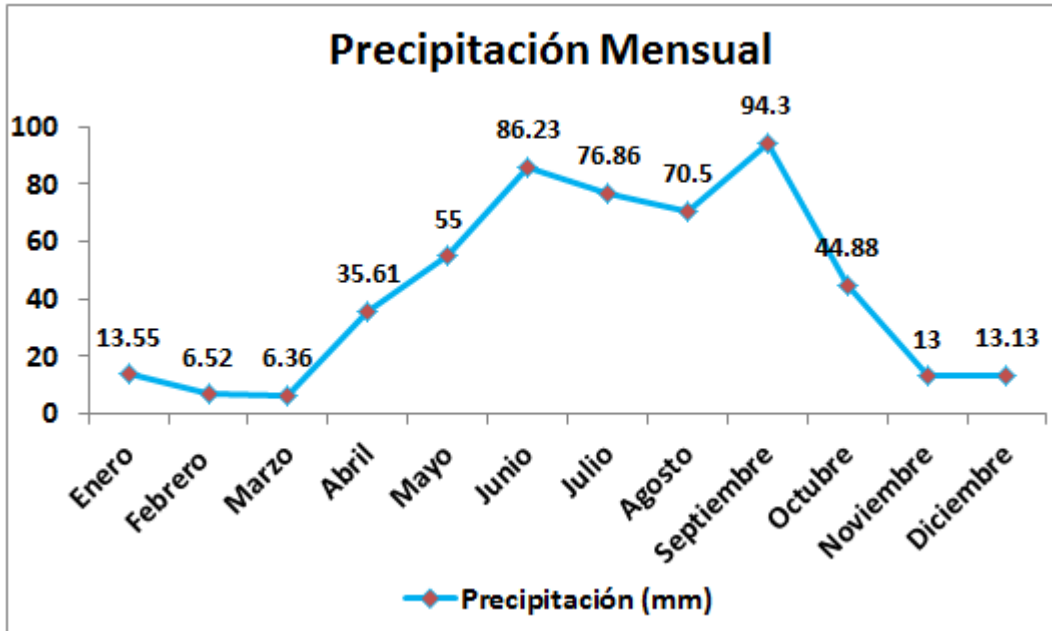


Figura 4. Precipitación mensual de la zona de estudio. Adapta de UASLP 2005.

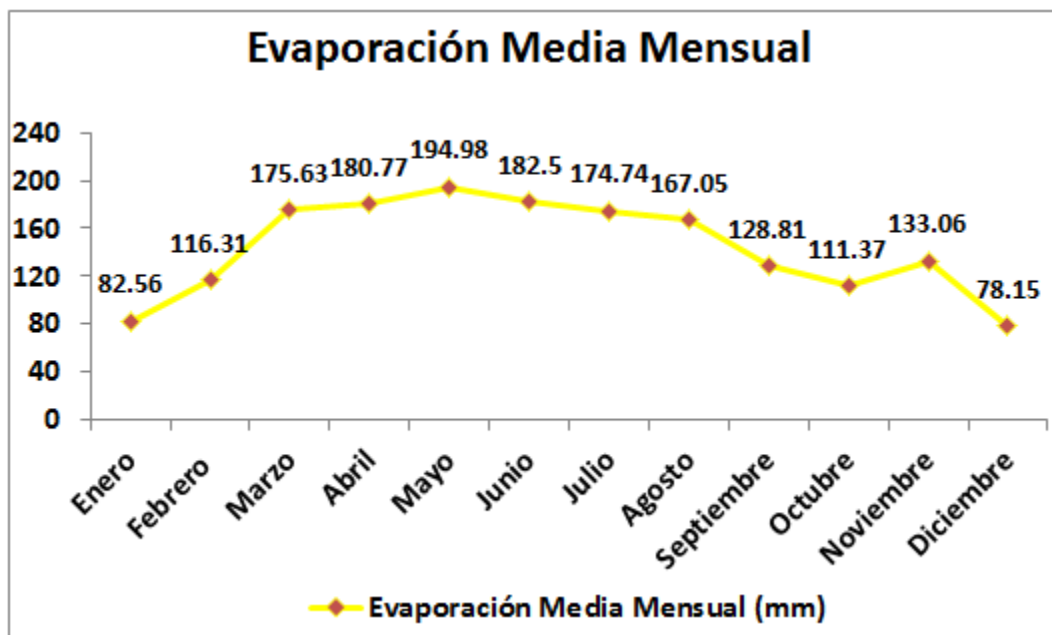


Figura 5. Evaporación media mensual de la zona de estudio. Adapta de UASLP 2005.

Diferentes Instituciones e investigadores han realizado estadísticas sobre el clima del Valle de Rioverde, generalmente obteniendo resultados parecidos, en la tabla

2 se observan las estaciones climatológicas más utilizadas para la obtención de datos.

Tabla 2. Estaciones climatológicas usadas para estimar las características climatológicas más importantes de la zona de estudio. Fuente: Adaptada de CONAGUA, 2006.

<b>Estación climatológica</b>	<b>Superficie (km<sup>2</sup>)</b>	<b>hp anual (km<sup>2</sup>)</b>
20 de Noviembre	209.32	1326.44
Armadillo	610.88	570.4
Guadalcázar	731.68	680.03
Lagunillas	229.52	574.96
Libertad	461.88	551.31
Paso de San Antonio	994.13	626.4
Pastora	1112.78	415.93
Pedro Montoya	882.09	478.85
Rayón	840.86	602.63
Rioverde	1245.26	475.58
San José de Albuquerque	172.63	427.32
Villa Juárez	1237.63	588.6
villa de Arriaga	332.28	417.48
Zaragoza	158.27	268.06

Como se ha mencionado antes en la zona de estudio existe una variedad de clima por la condición geográfica de la zona de estudio, de acuerdo a la clasificación de Köppen y modificada por Enriqueta García (1974), las estribaciones de la serranía “La Mesa Larga” pertenecen al grupo de climas templados C al subgrupo de climas Semicálidos (A) C y al tipo de semicálidos subhúmedos con lluvias en verano (A) C (Wo), en esta zona se encuentra una variación en el porcentaje de lluvia invernal con respecto a otras zonas del área de estudio. Cabe hacer mención que este clima es el menos húmedo en su tipo con precipitación media

anual de entre 600 y 700 mm , sin embargo esta zona es de las más importantes para la hidrología subterránea, ya que en esta zona se estima que hay una gran aportación para la recarga de acuíferos profundos del Valle de Rioverde (DOE, 2000).

La mayor parte de la zona de estudio pertenece a un clima del grupo de climas secos B, climas semisecos BS1 puntualmente al subtipo semiseco semicálido BS1hw, este subtipo presenta el régimen de precipitación en verano y un bajo porcentaje en invierno (DOE, 2000; CONAGUA, 2006). La parte norte y noreste del valle son las zonas menos habitadas de la región, por ende es donde están los mayores ecosistemas naturales principalmente bosques de mezquite a pesar de ser zona seca es de gran relevancia para la ecología de la región. Esta parte se caracteriza por ser parte de los climas secos B, de tipo seco BS, específicamente del subtipo seco semicálido Bsohw, es la misma situación que el clima anterior con lluvias en verano y escasas en invierno, el estimado de la precipitación anual ronda entre los 400 y 500 mm. Los vientos predominantes son con dirección noreste entre noviembre y abril y noroeste y oeste de mayo a octubre (DOE, 2000).

#### **1.4.1.3. Fisiografía**

En general el Valle de Rioverde se encuentra ubicado en una planicie, en la zona sur y sureste y suroeste se ubica la serranía en la que se hace frontera con el Estado de Guanajuato. La provincia Fisiográfica a la que pertenece la zona de estudio es la Sierra Madre Oriental. Esta provincia ocupa varias entidades federativas entre ellas se encuentra, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, San Luis Potosí, Querétaro, Tamaulipas, Hidalgo, Puebla y Veracruz. La mayoría de las montañas están constituidas por rocas de origen marino, calizas y lutitas. Estas rocas están dobladas en forma de pliegues las cuales forman una sucesión de crestas alternadas con bajos, los límites van desde la frontera norte del país hasta el eje Neovolcánico en Pachuca Hidalgo. Además está formada por sierras menores, que producen una topografía de ondulaciones fuertes. La zona de la planicie tiene una elevación promedio de 1,100 m.s.n.m., pero en las serranías la

elevación puede alcanzar hasta los 2,400 m.s.n.m. El material predominante es de calizas, lo cual se manifiesta en los rasgos cársticos, lo cual se da como resultado de la disolución de las rocas por el agua, los más comunes son sistemas cavernarios y depresiones (DOE, 2000; CONAGUA, 2006). La morfología de la cuenca del Rioverde ha sido el resultado de una intensa evolución geológica, entre los principales se encuentra, meteorización, denudación y erosión, como se mencionó anteriormente la zona es principalmente cárstica, los procesos geológicos que más han afectado son la formación de fallas, levantamiento y extrusión de rocas volcánicas (DOE, 2000). A continuación se relatan brevemente las principales zonas y formas de la zona:

Región suroeste.- Esta área es perteneciente a la provincia de la Sierra Madre Oriental, pero específicamente a la subprovincia del Carso Huasteco en las Sierras Altas de Laderas Abruptas, el área que abarca esta entre San José de las Flores (21° 57' 36.66" N, 100° 9' 2.70" O) y La Loma (21° 53' 47.26" N, 100° 5' 51.11" O). El resto de esta Sierra se encuentra entre El capulín (21° 49' 39.66" N, 100° 2' 28.44" O), San José del Tapanco (21° 46' 21.20" N, 99° 54' 32.88" O) y Santa Isabel (21° 49' 56.58" N, 99° 52' 21.97" O) y pertenece a la Sierra Laderas Convexas (DOE, 2000).

Región poniente.- En esta área se ubica la porción terminal de la Sierra de la Noria y pertenece a Subprovincia Sierras Occidentales a la Sierra Pliegue con Llanuras. Una parte en la zona oriental abarca las estribaciones de una Sierra orientada noroeste-sureste llamada Cordón de la localidad de San Francisco (22° 4' 34.49" N, 99° 51' 38.09" O) y que pertenece a la Sierra Pliegue (DOE, 2000).

Llano.- representando la parte plana del valle, esta zona se encuentra hacia la parte norte y se puede decir que se divide de poniente a oriente, por la planicie entre Pastora (22° 8' 1.33" N, 100° 3' 27.65" O) y 20 de Noviembre (21° 58' 44.64" N, 100° 2' 59.04" O), pertenece a la Subprovincia Sierras Occidentales y la Llanura de Piso Rocoso, un área de menor tamaño ubicada en la esquina noreste pertenece a la Subprovincia llamada Lomerío. Mientras que la parte central del Llano a ambos lados de la vía del ferrocarril, pertenece de igual manera a la

subprovincia de las Sierras Occidentales en la unidad fisiográfica Llanura Salina. El resto del área ubicada al norte del río que forma la porción oriental pertenece a la unidad de Llanura de Piso Rocosó (DOE, 2000).

Región Sur.- porción sur del río Verde, esta es la zona más importante económicamente hablando para la zona de estudio, ya que es la principal zona agrícola pertenece a la Subprovincia de las Sierras Occidentales a la unidad Piso Bolsón (DOE, 2000).

Finalmente otros aspectos importantes que componen la zona de estudio en lo referente a la fisiografía son:

Valle fluvial.- es el encauzamiento del río Verde que corta al valle abierto en forma transversal, es la geoforma más reciente de la región (CONAGUA, 2006).

Manantial.- Los manantiales se encuentran presentes dentro de toda la zona de estudio, pero la mayoría y los más importantes se encuentran en la margen derecha del río, el más importante de toda la zona de estudio es el manantial "La Media Luna" y son de origen cárstico (CONAGUA, 2006).

Cañones.- estos se encuentran en la porción occidental del valle, y se forman por las Sierras acordonadas, entre ellos también se forman arroyos y pasan algunos segmentos de ríos (CONAGUA, 2006).

#### **1.4.1.4. Edafología**

En la zona de estudio los suelos provienen de rocas sedimentarias de modo de formación aluvial, lacustres e in-situ, los suelos dependiendo su espesor se pueden encontrar desde profundos a poco profundos, según estudios en campo se encuentran suelos de más de 150 cm de profundidad hasta someros de 15 cm. Estos suelos presentan diferentes colores dependiendo su profundidad en los horizontes superficiales destacan los colores gris claro, café grisáceo o un café más oscuro, mientras en los horizontes profundos se pueden observar un color gris cafésáceo a naranja opaco.



En el sentido de las texturas varían de franco arenosas a francos arcillosos y arcilla. Mientras tanto los suelos a la margen izquierda del río Verde son texturas arenosas a las márgenes del río, arcillosas a poco profundas a medida en se alejan del cauce. Existen una gran cantidad de suelos desde los franco arenosos hasta arcillosos. Por el origen de la formación existen zonas con un elevado manto freático en el centro de la zona de estudio, y para el norte existen grandes zonas con problemas de salinidad (CONAGUA, 2006).

Existe en esta zona once unidades de suelos diferentes, además estas unidades cuentan con subunidades, en estudios anteriores se han logrado cartografiar alrededor de 73 unidades de suelo, en las que se incluyen unidades y subunidades, además de características físicas, químicas y morfológicas. Las principales unidades de suelo son: Chernozem, Rendzinas, Feozem, Litosol, Fluvisol, Castañozem, Vertisol, Xerosol y Solonchak (DOE, 2000).

Los suelos predominantes por zona se describen a continuación:

Zona centro.- los límites de esta porción van desde Pastora ( $22^{\circ} 8' 1.33''$  N,  $100^{\circ} 3' 27.65''$  O) hasta la Muralla ( $22^{\circ} 9' 12.75''$  N,  $99^{\circ} 54' 21.46''$  O) y San Francisco ( $22^{\circ} 4' 34.49''$  N,  $99^{\circ} 51' 38.09''$  O), los suelos predominantes en esta zona son unidades del tipo Solonchak y Xerosol en diferentes grados de asociaciones y en diferentes grados de salinidad y sodicidad, y con una fase física limitante petrogypsica presente en gran parte del Valle, esta situación dificulta la agricultura sin embargo sostiene ecosistemas naturales muy importantes para la región principalmente mezquitales (DOE, 2000).

Zona nororiental y oriental.- en esta zona predomina el Xerosol en las partes bajas de la sierra Cordón de San Francisco tanto al norte como al sur del poblado. La mayoría de esta área presenta una fase petrocálcica tanto somera como profunda, esta condición es también una gran limitante para el potencial agrícola en esa área. Aun cuando las condiciones son muy difíciles para el desarrollo de la agricultura en la zona de San Francisco, la mayoría de los pobladores hacen de esta el medio más importante para mantener su economía. Esa zona agrícola se

desarrolla sobre suelo Solonchak ligeramente sódico. En las estribaciones y sierra Cordón se presentan asociaciones de Litosoles, Xerosoles y Rendzinas (DOE, 2000).

Zona centro oriente.- área sobre la margen izquierda del río Verde, esta zona sigue con la tendencia de Solonchak, Xerosoles además algo de Chernozems, estos suelos presentan diferentes grados de sodicidad y salidad y fases físicas petrogypsicas someras y profundas, esta situación al igual que en la zona anterior también repercute en la producción agrícola. La porción del sureste del área ocupada por serranías, presenta asociaciones de Xerosoles, Litosoles y Feozems (DOE, 2000).

Margen derecha en el extremo sureste.- Esta rodeado de suelos asociados a pequeños cerros y serranías, Litosoles, Rendzinas, se presenta un área de Vertisoles asociados a Castañozems, en los alrededores de las localidades de El Obrajero (21° 50' 22.91" N, 99° 54' 34.07" O), El Huizachal (21° 49' 30.54" N, 99° 54' 44.70" O) y Plazuela (21° 48' 19.61" N, 99° 56' 20.56" O) en donde resulta una zona buena para la agricultura. De igual manera sobre la margen derecha, el extremo suroeste y sur del área está constituido por suelos que se desarrollan sobre rocas ígneas y calizas de la serranía, aquí se encuentran principalmente Litosoles, Feozems, Rendzinas en diferentes asociaciones, la topografía de esta zona permite la explotación sustentable de los recursos en su estado natural (DOE, 2000).

Margen izquierda.- se ubica al noreste a la altura de la localidad 20 de Noviembre (21° 58 '44.64" N, 100° 2' 59.04" O), en esta zona se encuentran Vertisoles, estos suelos son de los mejores en el zona de estudio en cuanto agricultura de riego se refiere. El resto de la zona agrícola, se desarrolla en un área que se ubica sobre suelos Feozems entre las localidades de La Loma (21° 53' 46.90" N, 100° 5' 54.60" O), El Aguacate (21° 51' 40.58" N, 100° 4' 50.31" O), El Jabalí (21° 53' 21.23" N, 100° 3' 20.05" O), Rioverde (21° 55' 49.77" N, 99° 59' 38.57" O), San Marcos (21° 54' 9.61" N, 100° 0' 15.82" O) y El Refugio (21° 55' 45.25" N, 100° 3'

3.64" O), esta zona corresponde también al área de riego del manantial La Media Luna (DOE, 2000).

Sur de Rioverde.- Entre el manantial La Media Luna (21° 51' 37.21" N, 100° 1' 40.27" O), Palomas (21° 50' 33.65" N, 99° 59' 34.06" O), Bordo Blanco (21° 51' 27.27" N, 99° 57' 37.17" O), La Virgen (21° 53' 42.87" N, 99° 56' 4.26" O) y El Carmen (21° 54' 26.40" N, 99° 58' 24.60" O), existen suelos Chernozem, Xerosol y Feozems con fases físicas petrogypsicas, situación que hace esta zona poco apta para la agricultura (DOE, 2000).

Se puede decir que los mejores suelos son aquellos en los que se puede utilizar el potencial de la agricultura, tal es el caso de la franja que hay de Vertisoles entre las localidades 20 de Noviembre, Rioverde así como la zona entre La Loma, El Jabalí y El Refugio donde existe la presencia de Feozems en los que se desarrolla la agricultura de riego (DOE, 2000).

Las zonas restantes del Valle de Rioverde presentan importantes restricciones para el desarrollo la agricultura, por un lado "El Llano" presenta altas concentraciones de sodicidad, salinidad y fases someras petrogypsicas, mientras que al sur de Rioverde los Chernozem, Xerosol y Feozems limitan el potencial de la agricultura (DOE, 2000).

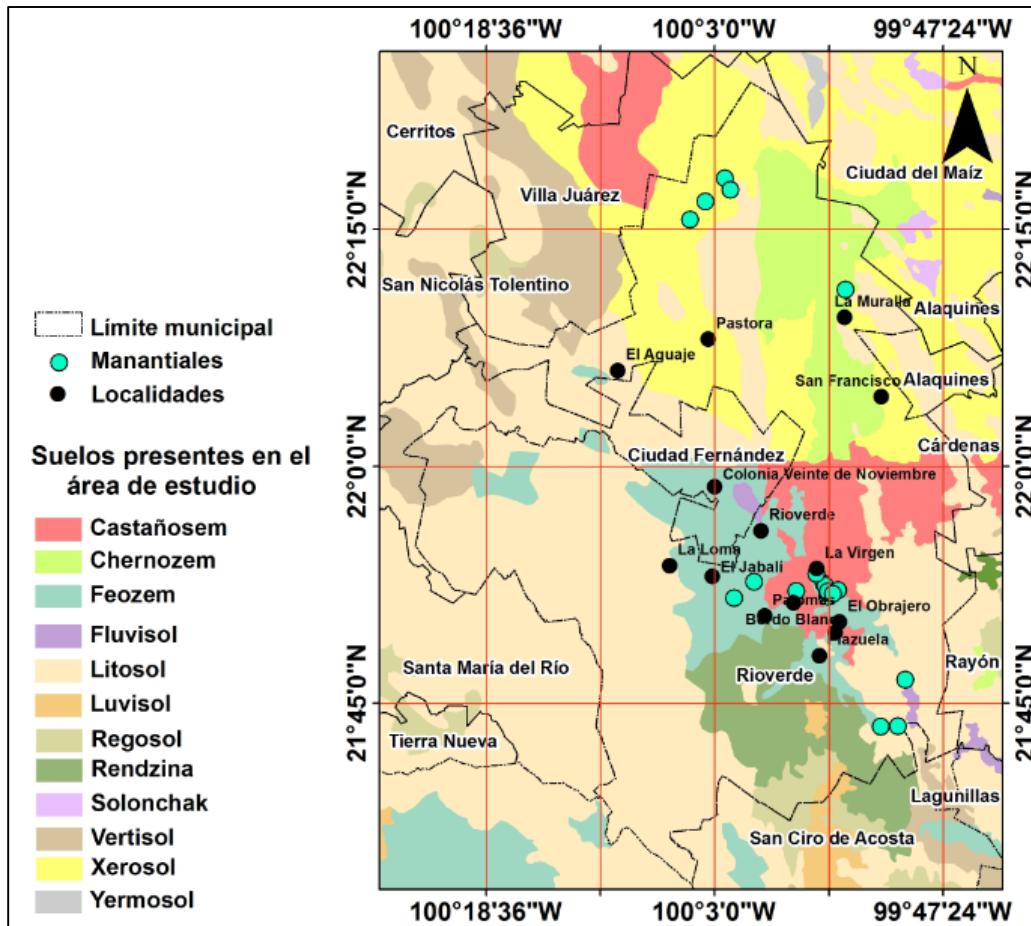


Figura 6. Suelos presentes en el área de estudio.

#### 1.4.1.5. Hidrología superficial

La zona de estudio se encuentra dentro de la Región Hidrológica 26 y que coincide con la Cuenca Media del río Verde que a su vez es subafluente del río Tampaón, afluente del río Pánuco. El río Verde es un gran aportador al río Tampaón, su corriente nace 35 km al oriente de la ciudad de San Luis Potosí, a una elevación estimada de 2,600 m.s.n.m., cerca de las localidades de Armadillo (22° 16' 25.82" N, 100° 42' 41.41" O) y San Nicolás Tolentino (22° 14' 51.54" N, 100° 33' 12.47" O), en una cordillera al río Pánuco de la Región Hidrológica 37 (UASLP, 2005).

Los orígenes de los principales afluentes de la corriente provienen de la margen izquierda. Con una elevación de 1,600 m.s.n.m. en las inmediaciones de Villa Morelos (22° 15' 3.44" N, 100° 39' 32.35" O), describe una amplia curva que corta

debajo de la población de San Nicolás Tolentino (22° 14' 53.62" N, 100° 33' 11.95" O), en la cual pasa por una zona montañosa en la que recibe aportaciones de ambas márgenes.

La estación hidrométrica Nogal Oscuro mide las aportaciones del Valle de Rioverde, las observaciones indican un escurrimiento medio anual de 125 millones de m<sup>3</sup>, estas aguas en conjunto con las provenientes de los manantiales Media Luna y Los Antejitos son usadas para el beneficio de las actividades agrícolas en este valle. Los volúmenes superficiales del manantial La Media Luna son determinados mediante aforos realizados en los canales que desaguan el manantial (El Capulín, Fernández, Potrero de Palos, Rioverde y San José), el gasto medio anual estimado es de 5.5 m<sup>3</sup>/s. En tanto el volumen del manantial Los Antejitos se derivan del canal que lleva el mismo el nombre, y se afora en la estación hidrométrica Los Antejitos con gastos estimados entre 0.065 y 0.279 m<sup>3</sup>/s. Después de pasar por la parte plana del Valle de Rioverde, unos 15 km adelante, atraviesa por una zona topográficamente accidentada, estas características se mantienen la confluencia con el río Santa María, en esta zona se encuentra la estación hidrométrica Vigas, en la cual se mide los escurrimientos de salida o no aprovechados por el río Verde, en la que se mide un escurrimiento anual de 202 millones de m<sup>3</sup> (DOE, 2000).

Entre los principales aportadores al río Verde en su cuenca media son: los arroyos Choy y Peroles en la margen izquierda del río, mientras tanto en la margen derecha los arroyos de La Loma, San Diego y Grande. En cuanto a las características del río Verde, este tiene una longitud aproximada de 180 km desde su nacimiento hasta su confluencia, el tramo presente en el Valle de Rioverde tiene un régimen permanente en Ciudad Fernández debido a las aportaciones de los manantiales Media Luna y Antejitos. El flujo se ve incrementado en las cercanías de la estación hidrométrica Vigas gracias a las aportaciones de materiales de relleno.

En general la región del Valle de Rioverde se encuentra dentro de la Subcuenca Rioverde, en la figura 7. Se aprecian los principales arroyos y ríos que comprenden la Subcuenca.

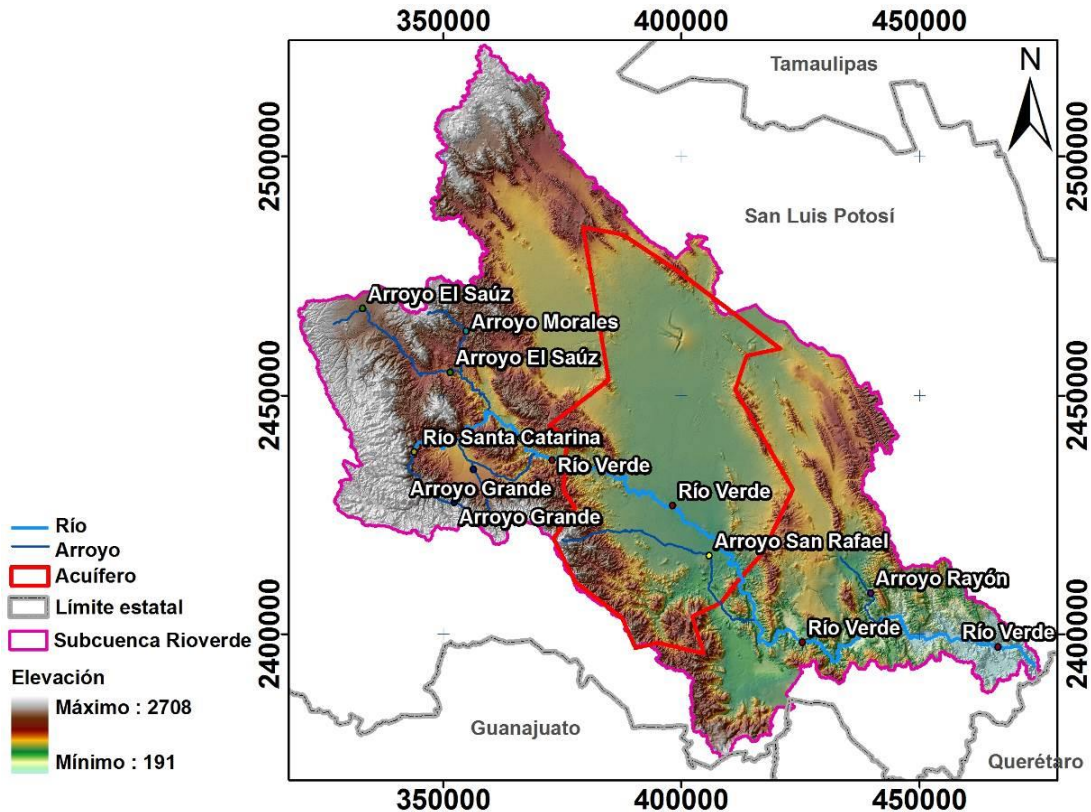


Figura 7. Principales ríos y arroyos de la Subcuenca Rioverde. Fuente: Díaz-Rivera, 2015.

#### 1.4.1.6. Hidrología subterránea.

En el Valle de Rioverde se pueden encontrar diferentes condiciones en cuanto a disponibilidad, accesibilidad y calidad de agua subterránea. El acuífero granular conformado en el aluvión reciente es sin duda el que tiene las mejores condiciones de aprovechamiento. Este acuífero se sitúa en la zona entre las localidades de San Diego, El Jabalí, El Refugio, Ciudad Fernández, Colonia Veinte de Noviembre y Ojo de Agua de Solano, aunque la mayor parte se encuentra en la margen derecha del río Verde. En esta zona se reporta que la profundidad del nivel estático varía entre 0 y 40 m, los caudales obtenidos varían entre 15 y 65 l/s,

además la calidad de agua es muy buena con un contenido de STD inferior a las 1,000 ppm. El resto de la zona está conformado de sedimentos lacustres, en lo que se obtiene en general agua de mala calidad con valores de STD mayores a las 1,000 ppm, esta zona se encuentra ubicada principalmente en la parte norte del Valle en la margen izquierda del río Verde (DOE, 2000; UASLP, 2005).

Acuífero Calizo.- Este acuífero tiene niveles que superan la superficie del terreno, esta situación beneficia la formación de manantiales, entre los que destacan La Media Luna, Los Antejitos, Los Peroles, Charco Azul y los formados en las cercanías de La Laborcilla. Estas calizas son de distribución regional en toda la provincia de la Sierra Madre Oriental, por lo cual se habla de recarga regional y la descarga se da principalmente en los manantiales como ya se ha mencionado. El aprovechamiento de estos manantiales es principalmente para riego.

Acuífero Granular.- El agua extraída de este acuífero son utilizadas para el suministro de agua potable a la zona conurbada de Rioverde-Ciudad Fernández, además es utilizada en mayor proporción para la agricultura siendo obtenida a través de pozos y norias. Este acuífero está constituido por materiales arcillosos y arenosos con algunas gravas. Estos materiales son más gruesos sobre la margen derecha del río Verde y más finos y arcilloso sobre la margen izquierda. Sobre la margen izquierda del río Verde generalmente se encuentra una capa de yesos y caliches, lo que provoca la disminución de la capacidad de infiltración y satura el agua de sulfatos y carbonatos deteriorando la calidad del agua (DOE, 2000).

#### **1.4.1.7. Funcionamiento Geohidrológico.**

La recarga se da principalmente sobre las calizas alrededor del valle, destacando las sierras de San Antonio, El Tapanco, sierra El Cordón de San Francisco, sierra La Noria, en las serranías de la porción sur del valle se encuentran las mejores condiciones de precipitación. En general el Vale de Rioverde recibe las aportaciones más importantes de las sierras, existe un flujo lateral del norte (San Bartolo-Angostura), al sur (Rioverde) y de igual manera los escurrimientos presentan esa misma dirección, esto indica una aportación vertical al medio

granular. En la zona El Refugio-Rioverde la recarga se da de oeste a este en un flujo lateral subterráneo, por lo tanto la recarga es vertical, producto de la precipitación y de los escurrimientos superficiales. La descarga se efectúa a través de manantiales, pozos, norias y el dren superficial. Los manantiales son la evidencia de la alta saturación y recarga del acuífero. En el medio granular está presente un comportamiento heterogéneo, ya que cuenta con varias capas que lo componen como: horizontes arcillosos, conglomerados y derrames de basaltos que dan pie a una mala calidad del agua. La parte suroeste del refugio está bien identificada como la zona de agua de mejor calidad con valores de STD que van desde las 265 a 320 ppm. El espesor de los materiales de relleno varia en las diferentes zonas del valle, entre Pastora y San Francisco miden aproximadamente 150 m, sobre el cauce del río Verde va de los 60 a los 100 m y al oriente del poblado de Rioverde tienen una mediada de unos 45 m aproximadamente. De manera general se pueden definir dos tipos de acuíferos, 1) uno de permeabilidad secundaria producido por fracturamiento, este acuífero no está siendo explotado y cuenta con agua de buena calidad, esta agua de buena calidad está condicionada a captarse antes de entrar en contacto con el medio granular para mantener sus características. La recarga de este acuífero es regional. 2) El acuífero de materiales granulares se presentan a lo largo de todo el valle, la desventaja de este acuífero son los materiales evaporíticos que lo componen ya que esto favorece la permeabilidad. La constitución litológica del medio granular provoca mala calidad del agua, esto repercute de manera más intensa en el norte del Valle. El agua para uso doméstico y agrícola se da solo una porción del sur y suroeste del Valle y es aquí donde se concentran el mayor número de pozos. Además de los pozos los manantiales presentes en esta zona dan vida a una importante zona agrícola de riego (DOE, 2000).



#### 1.4.1.8. Acuífero administrativo de Rioverde.

El acuífero administrativo de Rioverde cubre la zona del denominado “Valle de Rioverde”, su clave de identificación dentro del catálogo de acuíferos del país es 2415. Físicamente se localiza en la parte central del estado de San Luis Potosí delimitado por las coordenadas geográficas (100° 15' 36.19" y 99° 44' 52" O, 22° 29' 35" y 21° 38' 12" N), abarca varios municipios principalmente Rioverde y Ciudad Fernández, en menor proporción los municipios de Alaquines, Cárdenas, Cerritos, Ciudad del Maíz y Villa Juárez. En cuanto a lo administrativo pertenece a la región hidrológica de panuco con clave 26, la cual pertenece la región Golfo-Norte con clave 9. En la tabla 3, Se muestran los límites oficiales del polígono del acuífero de Rioverde (DOF, 2014).

Tabla 3. Coordenadas geográficas de los vértices del acuífero administrativo de Rioverde.

Vértice	Longitud oeste			Latitud norte		
	Grados	Minutos	Segundos	Grados	Minutos	Segundos
1	99°	58'	37.8"	22°	23'	12.7"
2	99°	46'	10.3"	22°	14'	32.5"
3	99°	50'	15.1"	22°	13'	42.3"
4	99°	51'	37"	22°	9'	50.3"
5	99°	44'	30.5"	21°	58'	30.7"
6	99°	48'	9.5"	21°	51'	18.2"
7	99°	51'	49.7"	21°	47'	20.1"
8	99°	53'	8"	21°	45'	37.9"
9	99°	56'	44.1"	21°	44'	1.9"
10	99°	55'	16.1"	21°	39'	52.4"
11	100°	0'	51.6"	21°	41'	1.8"
12	100°	3'	36.3"	21°	40'	27.9"
13	100°	5'	15.2"	21°	43'	48.8"
14	100°	10'	57.2"	21°	47'	54.6"
15	100°	13'	41.3"	21°	52'	48.9"

16	100°	11'	4.5''	21°	56'	16.1''
17	100°	12'	30.9''	21°	58'	15.2''
18	100°	12'	7''	22°	4'	33.8''
19	100°	14'	18.2''	22°	5'	32.5''
20	100°	7'	5.9''	22°	10'	48.2''
21	100°	10'	23.2''	22°	28'	10.4''
22	100°	5'	29.9''	22°	27'	23''

Fuente: Adaptado del estudio de Plan de Ordenación de la Zona Conurbada Intermunicipal de Rioverde y Ciudad Fernández (SEDUVOP, 2012).

#### **1.4.1.9. Veda.**

En la actualidad existen vedas presentes en el acuífero de Rioverde, estas vedas se enfocan en la extracción y alumbramiento de aguas subterráneas y están declaradas para los municipios de Rioverde y Ciudad Fernández (Figura 8). La primera veda se estableció para el municipio de Rioverde el 9 de julio de 1966 y la segunda para el municipio de Ciudad Fernández el 29 de abril de 1981, en ambos decretos se establecieron por tiempo indefinido. El objetivo de estos decretos prohibir la extracción y alumbramiento de las aguas subterráneas por causa de interés público y protección de los mantos acuíferos, se exceptúan los casos en los que se realice con fines domésticos y/o abrevaderos a través de medios manuales, o bien, en los casos en que sea autorizado con el permiso correspondiente de las dependencias encargadas de la administración de las aguas subterráneas (DOE, 2000).

Las vedas decretadas cubren aproximadamente 87% de la superficie del acuífero, el resto de la superficie corresponde a porciones de los municipios de Cerritos, Villa Juárez, Ciudad del Maíz, Alaquines y Cárdenas, en los cuales actualmente no existen decretos de veda (CONAGUA, 2012).

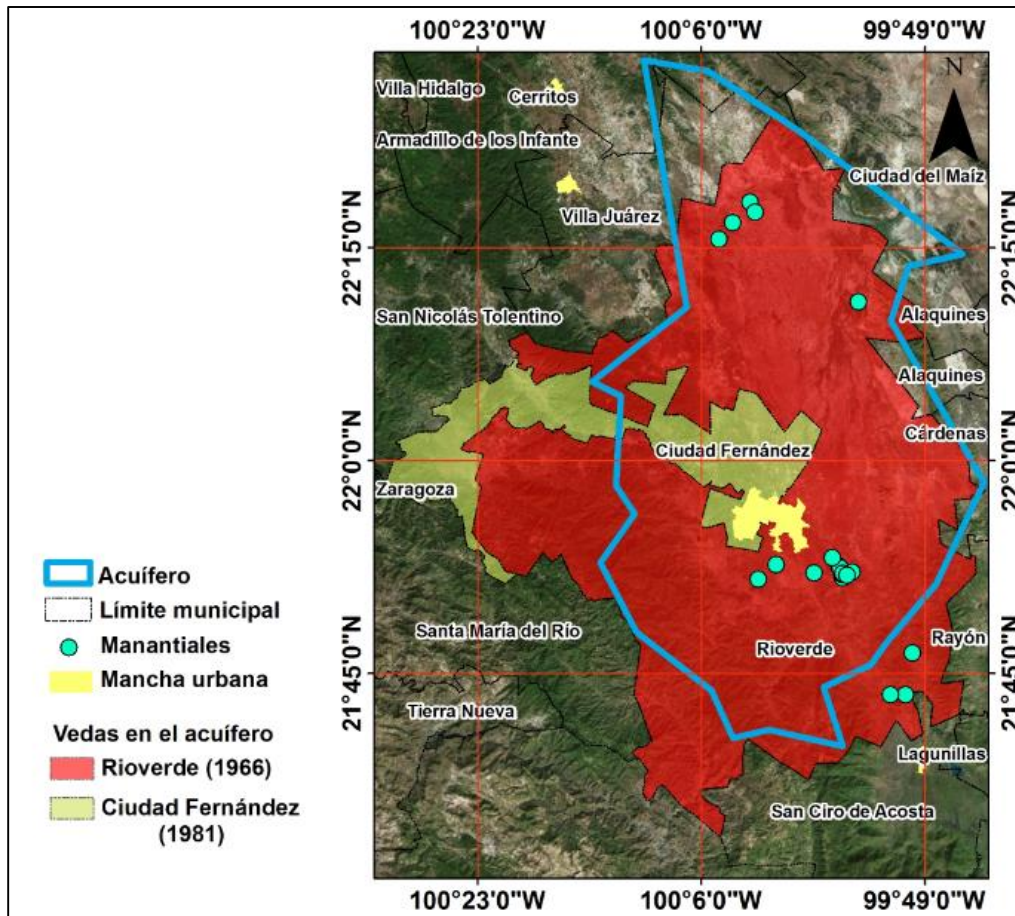


Figura 8. Zonas de veda presentes en el acuífero Rioverde. Fuente: Adaptado de CONAGUA, 2012.

#### 1.4.1.10 Geología estructural

La geología de la zona se puede reconstruir a partir de las rocas sedimentarias marinas de edad cretácica, las cuales forman parte de las altas cuencas, estas a su vez tienen su correspondencia con fenómenos de plegamiento que se registran en la secuencia; para la caracterización de estructuras anticlinales y sinclinales normales y recumbentes. Dichas estructuras tienen una orientación preferente noreste (NE), suroeste (SW) y buzamiento hacia el sureste (SE) para sus ejes axiales (Ballín-Cortés, 2003).

Al final del Cretácico posterior al plegamiento regional mencionado, los fenómenos denudatorios de las tierras emergidas propiciaron el relleno de las cuencas a tomar forma de la configuración actual. Posterior a esta intensa erosión, inició un

proceso de extravasación de emisiones basálticas, este fenómeno tuvo impacto en la parte sur de la cuenca propiciando el cierre superficial en esa zona. En la zona predominan importantes depósitos de caliche, la explicación aceptada para esta situación es la incidencia de medios climáticos de extremada aridez. De esta manera queda establecida se establece la estructura superficial de la zona, con estudios geofísicos se ha determinado que existe una continuidad de las estructuras mencionadas en el subsuelo del Valle. Esta correspondencia se observa principalmente en la influencia de emisiones de composición ácida y básica, sedimentos arcillo-calcáreas con materiales evaporíticos y en apariencia rocas calcáreas subyacentes a profundidades de 100 a 300 m (Ballín-Cortés, 2003).

Geológicamente en Valle de Rioverde se ubica dentro de la plataforma Valles-San Luis Potosí, siendo este un elemento paleogeográfico de la edad Mesozoica sobre la cual se depositaron rocas evaporíticas y rocas de tipo arrecifal y post-arrecifal. Las rocas mesozoicas fueron intensamente plegadas debido la Orogenia Laramide, originando los rasgos estructurales actuales que se observan en la zona (Ballín-Cortés, 2003).

## 1.5. Antecedentes en la zona de estudio

A inicios de 1900 el Gobernador del Estado de San Luis Potosí en turno, solicitó al Instituto Geológico Mexicano un estudio para localizar zonas de aguas brotantes potables en las cercanías de los municipios de Rioverde y Ciudad Fernández. El encargado de realizar el estudio fue el Ingeniero en minas Trinidad Paredes, 1909. Dicho trabajo lleva por nombre "Estudio Hidrológico de la región de Rioverde y Arroyo Seco en los estados de San Luis Potosí y Querétaro". En general se realizó un muy amplio en campo que dejó resultados satisfactorios para el estado y los municipios. La información que se rescata para este trabajo es la referida a los manantiales. Su trabajo se centró en tres manantiales a) La Media Luna (utilizada en este trabajo), b) Manantial Ojo de Agua de Solano (utilizado en la segunda parte de este trabajo) y c) Nacimiento de San Diego (No ubicado para este trabajo). Hay dos aspectos mencionados por el Ingeniero Paredes que son relevantes en cuanto a la dinámica de los manantiales 1) Se realizaron pruebas para estimar el caudal de La Media Luna, el cual se estimó en 4,000 litros por segundo para esa fecha comparable con los 4300 litros por segundo que reporta actualmente la CONAGUA, la diferencia puede ser por varios factores incluidos los instrumentos de medición utilizados por el ingeniero Paredes en ese entonces y los utilizados en la actualidad, 2) El ingeniero describe una serie de pequeños manantiales en las localidades Puestecitos (21° 57' 44.12" N, 100° 2' 15.16" O), Arroyo Hondo (21° 57' 1 8.71" N, 100° 1' 28.20" O), San Antonio de las Higueras (21° 56' 57.08" N, 100° 0' 59.50" O), Ojito de Agua (21° 56' 46.37" N, 100° 0' 36.63" O) y otras zonas no especificadas en las cercanías de la ribera del río de Ciudad Fernández, en la actualidad ya solo se tiene registro del manantial de Ojo de Agua de Solano (La Taza) y del manantial Ojito de Ciudad Fernández. Se puede decir que el caudal del manantial de La Media Luna se ha mantenido constante en los últimos cien años y por otro lado los manantiales de la ribera del río en Ciudad Fernández en su mayoría se han desecado.

## **1.6. Metodología**

### **1.6.1. Manantiales presentes en el Valle de Rioverde**

Los manantiales presentes en el Valle de Rioverde se manifiestan en el acuífero calcáreo en la zona oriental. La aparición de manantiales se asocia a las calizas cársticas que rodean al valle, se cree que los conductos de disolución de estas plataformas absorben un gran volumen de agua el cual es transportado hasta la superficie calcárea donde brotan. Sin duda alguna el manantial de La Media Luna es el más importante no solo de la zona sino de todo el estado (CONAGUA, 2006). Sin embargo existen manantiales más pequeños que son utilizados para el riego agrícola, entre los que destacan: 1) Porción centro del Valle.- Los Anteojos y los pequeños manantiales en los alrededores de las localidades de La Virgen y La Laborcilla, 2) Porción Sur.- San Sebastián y la Laguna de Jocolixtle, 3) Porción Norte.- Los Peroles, Puerta del Río y Laguna de San Bartolo.

En este trabajo se visitaron y georreferenciaron 27 manantiales ubicados dentro del Valle de Rioverde, aunque el objetivo de este trabajo es analizar la dinámica espacio-temporal de los manantiales otros datos que se recabaron en campo incluyen: la toma de muestras de agua para obtener sus propiedades físico-químicas, caracterización de flora y fauna, georreferenciación y toma de temperatura, en la tabla 4 se aprecian los manantiales visitados y un resumen de los datos más importantes recabados en campo.

Tabla 4. Manantiales y su información obtenida en campo.

Manantial	Y	X	pH	Conductivida d (mS/cm)	SDT
<b>Media Luna</b>	21.861	-100.028	7.21	1752	859
<b>Anteojitos</b>	21.878	-100.005	7.49	1811	887
<b>La Virgen</b>	21.886	-99.934	7.35	1732	849
<b>El Carrizalito</b>	21.863	-99.922	7.24	2013	986
<b>Agua Sonadora</b>	21.867	-99.922	7.12	1952	957
<b>Charco Azul</b>	21.876	-99.926	7.22	1805	885
<b>Laguna de Jocolixtle</b>	21.725	-99.861	7.80	587	288
<b>La Castilla</b>	21.866	-99.916	7.66	2125	1039
<b>La Lagunita</b>	22.292	-100.032	7.60	2895	1418
<b>San Bartolo</b>	22.303	-100.039	7.59	2762	1353
<b>San Sebastián</b>	21.775	-99.833	7.61	1958	957
<b>Puerta de Piedra</b>	21.870	-99.910	7.68	2019	987
<b>Santa Rosa</b>	22.260	-100.078	7.40	2852	1398
<b>Mojarras</b>	22.279	-100.061	7.46	2672	1318
<b>Los Peroles</b>	22.187	-99.901	7.46	2074	1026
<b>Guaxcamá</b>	22.214	-100.272	6.61	2342.0	1148
<b>El Bañito</b>	22.272	-100.259	6.65	2030.0	995
<b>Ojito de Cd. Fdz.</b>	21.946	-100.010	6.53	2226.0	1091
<b>Puerta del Río</b>	22.074	-100.259	6.75	1463.0	717
<b>La Cueva</b>	22.217	-100.297	6.54	2370.0	1161
<b>Carrizalito</b>	22.180	-100.253	4.8	4650.0	2279
<b>Ojo de León</b>	22.299	-100.269	6.66	2024.0	992
<b>Agua del Medio</b>	22.164	-100.237	6.57	2289.0	1122
<b>Guaxcamá Hacienda</b>	22.212	-100.280	6.05	2355.0	1154
<b>La Taza</b>	21.983	-100.010	6.67	1087.0	533
<b>Palma Larga</b>	21.869	-99.957	N/D	N/D	N/D
<b>Palomas</b>	21.851	-99.990	N/D	N/D	N/D

\*\*N/D = Información no disponible.

### 1.6.2. Manantiales Seleccionados para estimar la dinámica en el espejo de agua

Debido a la escasa información disponible de imágenes satelitales de alta resolución espacial para la realización de este trabajo, se optó por seleccionar un manantial representativo por zona geográfica del valle (Norte, Centro y Sur). Los aspectos que se tomaron en cuenta para la selección de los manantiales fueron:

1) jerarquía de importancia para su zona geográfica, 2) imágenes disponibles de fechas distintas y 3) calidad de imágenes aceptable para la clasificación de píxeles. La idea de tener un manantial por zona geográfica es tener una perspectiva general del comportamiento de la dinámica de los manantiales de agua subterránea en todo el valle.

Los manantiales seleccionados por jerarquía de importancia así como información disponible en cantidad y calidad fueron: para la zona norte, manantial “Puerta del Río” (22° 14' 25.33" N, 100° 15' 31.67" O), para la zona centro manantial “La Media Luna” (21° 51' 39.50" N, 100° 1' 41.23" O) y para la zona sur, manantial “Laguna de Jocolixtle” (21° 43' 31.66" N, 99° 51' 41.58" O) En la figura 9 se aprecia la ubicación de los manantiales seleccionados.

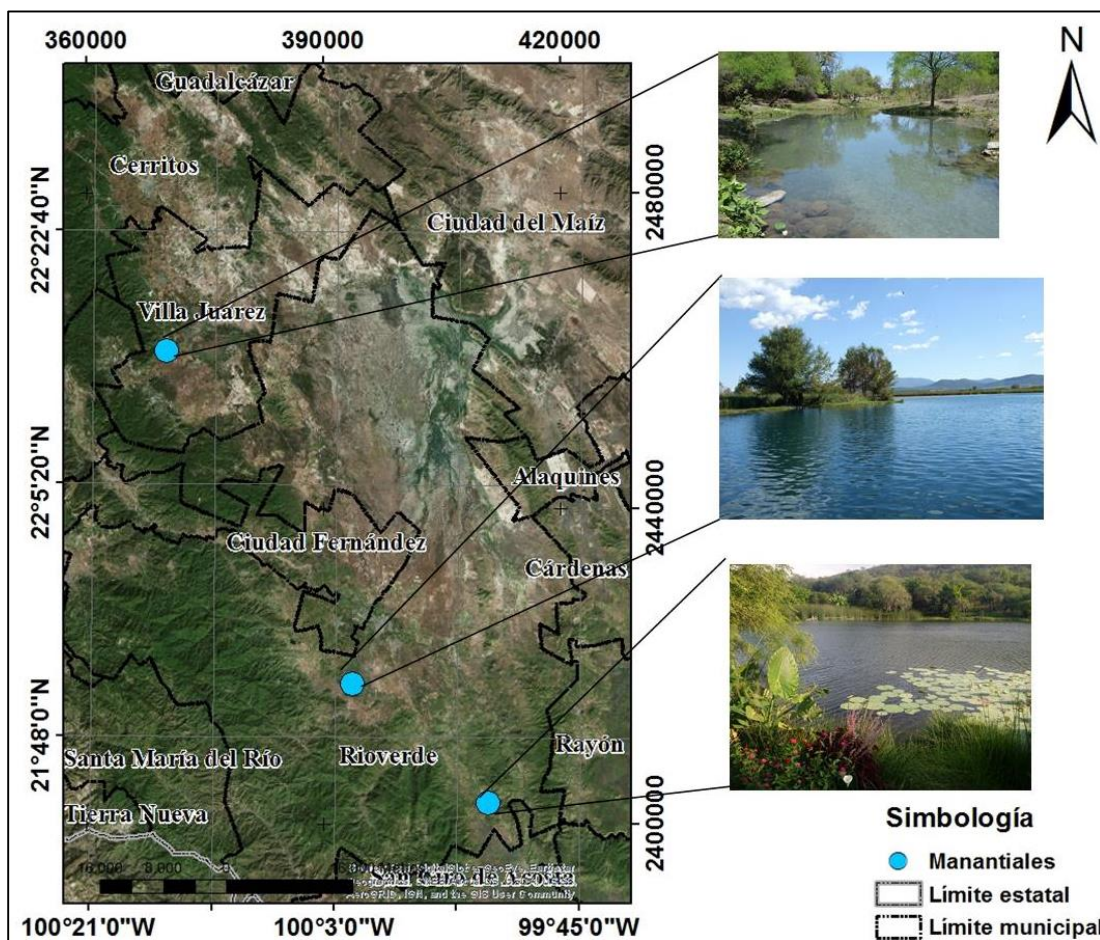


Figura 9. Manantiales seleccionados para el análisis espacio-temporal en el Valle de Rioverde, S.L.P.



### **1.6.2.1 Manantial La Media Luna**

La Media Luna es el manantial más importante del estado de San Luis Potosí, se localiza en el ejido de El Jabalí perteneciente al municipio de Rioverde concretamente en la parte sur, se ubica en las coordenadas 21° 51' 39.62" N, 100° 1' 40.99" y se encuentra a una elevación aproximada de 1,000 m.

El manantial está formado por varios nacimientos en forma de cono y se reportan profundidades de hasta 50 m, el agua es clara, azufrosa y termal con temperaturas entre 25 y 30 °C todo el año, existe una abundante vegetación sumergida y flotante (Aguilera-González, 1998). El agua de La Media Luna está constituida por lluvias que se filtran y almacenan en formaciones calizas, se cree que esta proviene principalmente de las serranías que se encuentran la ciudad de San Luis Potosí y la región poniente de la ciudad de Rioverde (Ballín-Cortés, 2003). En cuanto a gasto se refiere es también por mucho es el manantial más caudaloso de la zona de estudio, se calcula que se aporta un gasto de alrededor de 4.5 m<sup>3</sup>/s. Con el agua de La Media Luna se riegan cerca de 4,000 hectáreas pertenecientes al distrito de riego 049; la forma de distribución para el riego es a través de tres canales, 1) el canal principal que corre hacia el norte, 2) El Potrero de Palos y El Capulín, este canal se dirige al sur y riega las tierras del ejido El Capulín y 3) el canal de San José con dirección sureste y riega las tierras de varios ejidos como lo es Bordo Blanco, Obrajero, Huizachal, Plazuela, Riachuelo y San José del Tapanco. El tipo de suelo que se puede observar en el manantial es caliche (Charcas-Salazar, 2002).

El ecosistema de La Media Luna es rico en flora y fauna, destacando varios endemismos, en cuanto al manejo del manantial los esfuerzos siempre han estado encaminados a hacer crecer el turismo y no a proteger el ecosistema. Se declaró área natural protegida en el 2003 (Palacio-Nuñez et al., 2000).

El manantial de La Media Luna era muy diferente a lo que se aprecia hoy en día, pero debido a las obras de canalización para el riego agrícola una cantidad importante de agua es drenada, lo cual ha modificado el paisaje drásticamente en

el manantial. Pero además de estas modificaciones, se realizaron incorporaciones de especies exóticas para darle más importancia al manantial desde el punto turístico. Las especies más significativas que se introdujeron son: peces como *Oreochromis* sp. (Comúnmente conocido como tilapia) y árboles tales como *Casuarina* sp. (Los característicos pinos que siempre están verdes), estas tipo de especies también causo efectos negativos en algunos componentes biológicos. En la actualidad se han realizado modificaciones para la comodidad de los turistas además de perturbaciones causadas por los mismos turistas (Palacio-Nuñez et al., 2000).

En lo que respecta a la flora del manantial se pudieron observar varias especies, en las acuáticas se encuentran: nenúfares y lirio acuático siendo este el más representativo del manantial. En las terrestres se observaron: sabinos, pinos de encino, carrizo, palmas y pastizal.

#### **1.6.2.1.1. Especies Animales**

La fauna silvestre de mamíferos era numerosa pero ha ido decreciendo hasta prácticamente desaparecer, la caza está vedada en La Media Luna desde 1993 (Palacio-Nuñez et al., 2000). Las aves es una de las especies dominantes en el manantial de La Media Luna, destacando la presencia de pato cuervo (*Phalacrocorax olivaceus* Humboldt), martinete común (*Nycticorax nycticorax* L.), garza blanca (*Casmerodius albus* L.), garza azulada (*Ardea herodias* L.), garcita azulada (*Butorides striata*), garceta nívea (*Egretta thula*), cigüeñón (*Mycteria americana*), cuervo blanco (*C. albus*), ibis de cara blanca (*Plegadis chihi* Vieillott), especies de patos como (*Dendrocygna autumnalis* L., *Anas diazi* Ridgway, *Podylimbus podiceps* L., *Fulica americana* Gmelin., *Jacana spinosa* L.), estas especies se consideran como residentes ya que permanecen todo el año y realizan sus actividades reproductivas en el lugar, aunque también se reportan otras especies que permanecen por algunos periodos del año y luego desaparecen (Palacio-Nuñez et al., 2000).

La Media Luna alberga varias especies de peces tanto endémicas, nativas e introducidas, se han realizado y registrado muestreos y observaciones desde el siglo XIX (Palacio-Nuñez et al., 2009). Dentro de las especies que se pueden encontrar destacan: El cachorrito de Media Luna (*Cualac tessellatus*), Pez ciego (*Astyanax fasciatus mexicanus*), Carpa potosina (*Dionda rasconis*), Bagre del Verde (*Ictalurus mexicanus*), La Mojarra de dos Colores (*Cichlasoma bartoni*), Mojarra Huasteca (*C. lahridens*), Carpa Bicolor (*Dionda dichroma*), Mexclapique Cola Azul (*Ataeniobius toweri*), Guayacón del Pánuco (*Gambusia panuco*), Topote del Atlántico (*Poecilia mexicana*), Topote del Tamesí (*P. latipunctata*), Mojarra norteña (*H. cyanoguttatum*) y Tilapia del Nilo (*Oreochromis sp.*) (Aguilera González, 1998; Palacio-Nuñez et al., 2009)

#### **1.6.2.1.2. Especies Vegetales**

En La Media Luna se pueden encontrar una gran variedad de especies vegetales, de acuerdo a los recorridos realizados para elaboración de este trabajo y la literatura citada, se pueden encontrar especies nativas y especies introducidas principalmente por cuestiones turísticas. Se pueden encontrar especies como: pacate (*Andropogon glomeratus* Hack), *Panicum bulbosum* H.B.K., Liendrilla (*Muhlenbergia sp.*), pasto varilla (*Panicum-Andropogon*), helecho (*Polipodiáceas-Panicum*), *Polipodiáceas-Panicum*, carrizo (*Arundo sp.*), *Juncus sp*, grama dulce (*Cynodon-Paspalum*), pastizal de paja colorada (*Paspalum sp.*), (Palacio-Nuñez et al., 2000). Además se observaron también, mezquital, sabinos, palmas, pino de encino, lirio acuático y nenúfares.

#### **1.6.2.1.3. Turismo**

La laguna de La Media Luna es el punto turístico más importante de la Zona Media del Estado de San Luis Potosí. En promedio fluyen 500 l/s de agua cristalina que permite ver fácilmente las partes más profundas de la laguna, además los 30 m de profundidad que alcanza este manantial la hace excelente para la práctica del buceo y otros deportes acuáticos (Palacio-Nuñez et al., 2000). También cuenta con ramificaciones o canales de menor profundidad para niños, lo que la convierte

en un lugar de ambiente familiar. Los 30 °C promedio que tiene el agua, permiten que el turismo este presente a lo largo de todo el año. La capacidad máxima de personas que puede soportar el manantial es de aproximadamente 3,000 personas, aunque en temporada alta, han permitido el ingreso de casi el doble, lo que perjudica la conservación del lugar.



Figura 10. Manantial La Media Luna. Fuente (<http://www.angelfire.com>, 2005).

#### **1.6.2.1.4. Agricultura**

El agua de La Media Luna es de gran importancia para la agricultura de la zona, ya que es la segunda fuente más importante para el riego agrícola. El agua es utilizada para regar alrededor de 4,000 hectáreas distribuidas en localidades de los municipios de Rioverde y Ciudad Fernández (Charcas-Salazar, 2002).

#### **1.6.2.2. Manantial Puerta del Río**

El manantial Puerta del Río (también conocido como manantial de San Tiburcio), se ubica en la localidad del mismo nombre (22° 14' 25.33" N, 100° 15' 31.67" O) en el municipio de Villa Juárez, San Luis Potosí. La vegetación acuática es similar a los manantiales de la región con tule y nenúfar principalmente. El agua de este manantial también es aprovechado para fines agrícolas. En lo que refiere a lo turístico es un lugar poco conocido pero con acceso gratuito, la profundidad es de

aproximadamente 1 m y en los periodos de mayor hundimiento no sobrepasa los 1.5 m. El agua es cristalina y también posee temperaturas cálidas durante todo el año (aproximadamente entre 26 y 28 °C).



Figura 11. Manantial Puerta del Río.

### **1.6.2.3. Manantial Laguna de Jocolixtle**

La Laguna de Jocolixtle (también conocida como Laguna de Vielma) Se localiza en la localidad de la Ex hacienda de Vielma (21° 43' 31.66" N, 99° 51' 41.58" O) en el municipio de Rioverde, San Luis Potosí. Este lugar es conocido también por albergar las ruinas de lo que un día fue la Hacienda de Vielma. La laguna se asienta sobre una llanura árida lo que la convierte en un verdadero oasis. La vegetación natural consta de Lirio, Tule y Nenúfar, aunque también se puede apreciar vegetación inducida como pasto. La temperatura del agua es de 26 °C en todo el año. En la actualidad (2018) este manantial es propiedad privada, sin embargo los habitantes de la localidad hacen uso del agua para fines agrícolas. A la vez se está acondicionando como un lugar turístico para las personas que visitan la región. Por ahora en periodos vacacionales de abre al público en general

y la entrada tiene costo (desconocido), también se realiza en este lugar la actividad ancestral conocida como temazcal.



Figura 12. Manantial Laguna de Jocolixtle

### 1.6.3. Imágenes utilizadas para el análisis

Por lo general para el estudio de cuerpos de agua enfocado a sistemas de información geográfica y con fuentes de percepción remota, han usado imágenes de mediana y baja resolución espacial, principalmente por dos razones: 1) la gran extensión de los cuerpos de agua y 2) la disponibilidad gratuita de imágenes de baja y mediana resolución (Song et al., 2013). Un ejemplo es la colección Landsat que entro en operaciones desde la década de los 70`s por lo que son muy recurrentes para el estudio de cuerpos de agua (Song et al., 2013; Halabisky et al., 2016). Algunos investigadores que han hecho uso de imágenes Landsat para el monitoreo de cuerpos de agua son: Campos et al., 2012; Kutser, 2012; Song et al., 2013; Klein et al., 2014; Gautam et al., 2015; Halabisky et al., 2016; Tulbure et al.,

2016; Ding et al., 2017. Sin embargo para este trabajo la zona de estudio es muy extensa y los manantiales son pequeños y no pueden ser detectados de forma fácil en imágenes de satélite de moderada resolución espacial. Por ello se optó por explorar las imágenes de alta resolución espacial. Las imágenes de alta resolución espacial tienen la limitación de tener costos altos por escena (Dennison et al., en el 2010). Sin embargo en los últimos años se han generado algunos visualizadores de imágenes de alta resolución gratuitos. La plataforma Google Earth es quizá el programa de visualización de imágenes de alta resolución gratuito con más usuarios en el mundo. Ya que además de cubrir prácticamente todo el planeta con imágenes de variadas resoluciones, también dispone de varias fechas por escena en las que se puede navegar a través de la herramienta de la línea del tiempo. Las principales imágenes de alta resolución que contiene la plataforma son WorldView-1, WorldView-2 y GeoEye-1. Las imágenes disponibles en la plataforma Google Earth han tenido un gran auge en los últimos 15 años, en el campo de estudio de cuerpos de agua han sido poco utilizadas. Para este trabajo se puso a prueba el uso de imágenes de la plataforma Google Earth para analizar la dinámica de los manantiales del Valle de Rioverde en diferentes periodos de tiempo. Debido a que las imágenes son obtenidas directamente del software, se tiene la limitación de trabajar solo con 3 bandas: Azul, Verde y Roja (RGB, por sus siglas en inglés), lo cual puede generar errores de clasificación de píxeles. Se debe de recalcar que las imágenes no fueron tomadas con el mismo sensor, por lo que existen variaciones en aspectos como calidad, tonos del RGB y sombras de árboles u otros objetos. Como se mencionó anteriormente se seleccionaron 3 manantiales: Puerta del Río, Media Luna y Laguna de Jocolixtle, en la tabla 5 se encuentra la información de las imágenes disponibles utilizadas para este trabajo.

Tabla 5. Fechas de las imágenes obtenidas.

<b>Manantial</b>	<b>Fecha 1</b>	<b>Fecha 2</b>	<b>Fecha 3</b>	<b>Fecha 4</b>	<b>Altura de ojo</b>
<b>Puerta del Río</b>	12/07/2007	21/02/2011	01/04/2013	20/01/2015	330 m
<b>La Media Luna</b>	13/12/2005	06/09/2011	20/03/2014	12/12/2016	510 m
<b>Laguna de Jocolixtle</b>	05/03/2008	03/04/2011		06/01/2016	1600 m

\*\* El orden de la fecha es: día/mes/año

Debido a lo extenso de la zona de estudio fue imposible obtener las mismas fechas para cada manantial, por eso se trabajara la dinámica espacio-temporal de cada manantial de manera individual, para así tener una perspectiva general de lo que sucede en el valle en cuanto a dinámica en el espejo de agua. Para el caso del manantial Laguna de Jocolixtle solo se tuvieron tres fechas disponibles.

#### **1.6.4. Métodos utilizados para el trazado automático de la extensión de agua de los manantiales**

##### **1.6.4.1. Máxima Verosimilitud (ML)**

La clasificación de máxima verosimilitud es un algoritmo que se usa para determinar la distribución de una clase conocida como el máximo para una estadística dada. El algoritmo (ML, por sus siglas en inglés) tiene una gran variedad de aplicaciones, en lo que refiere a la percepción remota es ampliamente usado para clasificar pixeles en su clase correspondiente (Liu et al., 2011). En el supuesto caso de tener  $m$  clases, la probabilidad de clase a posteriori se define de la siguiente manera:

$$P(k|x) = \frac{P(k)P(x|k)}{\sum_{i=1}^m P(i)P(x|i)}$$

Donde  $P(k)$  es la probabilidad previa de la clase  $k$ ,  $P(x|k)$  es la probabilidad condicional de observar  $x$  de la clase  $k$  (función de densidad de probabilidad). En el caso de las distribuciones normales, la función de verosimilitud,  $P(x|k)$ , se puede expresar como:



$$L_k(x) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} |\Sigma_k|^{\frac{1}{2}}} \exp\left(-\frac{1}{2}(x - \mu_k)^T \Sigma_k^{-1} (x - \mu_k)\right),$$

Donde  $x = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n)^T$  es el vector de un pixel con  $n$  bandas;  $L_k(x)$  es la función de membresía de probabilidad de  $x$  perteneciente a la clase  $k$ ;  $\mu_k = (\mu_{k1} \ \mu_{k2} \ \dots$

$\mu_{kn})^T$  es el promedio de la clase  $k$ th:  $\Sigma_k = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1n} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \dots & \sigma_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n1} & \dots & \sigma_{nn} \end{pmatrix}$  es la matriz de

covarianza de varianza de la clase  $k$  (Liu et al., 2011).

El algoritmo de máxima verosimilitud (ML) se ha usado ampliamente como clasificador de datos de imágenes satelitales (Hagner y Reese, 2007; Liu et al., 2011). Para el algoritmo ML las funciones de densidad de probabilidad se construyen en función de los valores espectrales de los datos de entrenamiento. Durante la clasificación, los pixeles no clasificados reciben una membresía de clase que basa en la probabilidad relativa (probabilidad) de ese pixel que se produce dentro de la función de densidad de probabilidad de cada clase. Debido a la falta de datos de referencia la mayoría de las clasificaciones de ML suponen una misma probabilidad de ocurrencia (Hagner y Reese, 2007; Liu et al., 2011).

Cuando se trabaja con el algoritmo de máxima verosimilitud existe la opción de utilizar ponderaciones en los datos de entrenamiento. Generalmente en una probabilidad donde no se utilizan ponderaciones en los datos de entrenamiento, la frecuencia de ocurrencia de clases no se considera por tanto es posible que las clases más frecuentes se subclasifiquen y las clases que se producen con menos frecuencia se clasifiquen en exceso (Hagner y Reese, 2007; Liu et al., 2011). Cuando se usan extensiones del algoritmo ML se pueden asignar pesos de probabilidad prioritarios asociados con las clases de entrenamiento en función de la ocurrencia anticipada de cada clase dentro de las imágenes de percepción remota. Estos métodos sirven para minimizar errores en la clasificación al ponderar clasificaciones en basadas en frecuencias de clases conocidas o esperadas en una imagen. No obstante estas clasificaciones son tendenciosas, ya

que producen clasificaciones pueden asignarse a la clase a la clase más frecuente a costa de las menos representadas (Hagner y Reese, 2007).

#### **1.6.4.2. Vecino más cercano (K-nn)**

El algoritmo del vecino más cercano (kNN), es un modelo no paramétrico intuitivo y eficaz utilizado para fines de clasificación y regresión (Aguire-Salado, 2007: Ertugrul y Tagluk, 2017: Maillo et al., 2017). kNN, tiene aplicación en diversas áreas de la investigación como: la modelización financiera, interpolación en píxeles de imágenes y reconocimiento de categoría visual (Ertugrul y Tagluk, 2017). kNN estima variables asociadas a un píxel mediante el cálculo de una media ponderada de los k vecinos, para el caso de la percepción remota los vecinos son píxeles con información de las bandas espectrales de las imágenes (Aguire-Salado, 2007: Maillo et al., 2017). El objetivo del kNN es clasificar los nuevos píxeles la clase más frecuente de sus k vecinos más próximos. Para el caso de empate, se pueden añadir reglas heurísticas como el vecino más próximo. Para esta clasificación el píxel desconocido es asignado a la clase más común de los k vecinos más próximos, es decir si  $k=1$  se le asignará el vecino más próximo, si k es muy pequeño el resultado puede ser sensible a puntos ruidosos, pero si k es muy grande la vecindad del punto desconocido incluirá puntos de otras clases lejanas. Como regla general se tiene que k debe ser grande para disminuir la probabilidad de una mala clasificación pero pequeña en comparación con el número de puntos (Ertugrul y Tagluk, 2017). Aguirre-Salado, 2007 describió los pasos del funcionamiento del algoritmo kNN aplicado en percepción remota y quedaron como sigue: a) dado el valor de un píxel a cualquier ubicación, calcular la distancia euclidiana u otra distancia a todos los valores espectrales en el conjunto de datos de referencia, b) seleccionar las "k" muestras espectralmente más cercanas y c) estimar los parámetros desconocidos como un promedio ponderado inverso a la distancia entre las "k" muestras más cercanas. La fórmula empleada de kNN es la siguiente:

$$y_i = \frac{\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{d^2}\right) y_i}{\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{d^2}\right)},$$

Dónde:  $y_i$  = promedio inversamente al cuadrado de la distancia espectral de los  $k$  vecinos más cercanos;  $d$  = distancia euclidiana espectral;  $y_i$  = Observaciones a ser promediadas (Aguirre-Salado, 2007).

Debido a su simplicidad de aplicación se han realizado varias versiones modificadas destacando: 1) kNN ponderado, 2) kernel kNN y kNN mutuo (Ertugrul y Tagluk, 2017). Se ha afirmado que el kNN es uno de los algoritmos de minería de datos más influyentes en el mundo (Maillo et al., 2017).

#### **1.6.5. Selección del algoritmo de clasificación**

Para la selección del método se consideraron los algoritmos del vecino más próximo (kNN) y el de máxima verosimilitud (ML). Previo a la selección se realizaron varias pruebas para cada algoritmo y los resultados mostraron que el algoritmo que mejor se adaptó a las condiciones de trabajar con solo las bandas RGB para buscar pixeles de agua fue el método de máxima verosimilitud. Para demostrar los resultados de cada método seleccionamos una imagen del manantial Puerta del Río, la imagen corresponde a la fecha del 21 de febrero de 2011 (Figura 13).



Figura 13. Manantial Puerta del Río, correspondiente a la fecha 21/02/2011.

Para esta clasificación se tomaron en cuenta tres clases: Agua, Vegetación y Otros. La clase de interés es la de agua, sin embargo fue necesario el uso de las otras dos clases, para evitar que el modelo confundiera agua con vegetación, sombras u otros objetos. La clase otros incluye suelo desnudo, viviendas, vegetación seca entre otros. Cabe mencionar que para todos los modelos de clasificación trabajaron con un pixel de 0.5 m, para este caso la imagen tuvo un total de 213,807 pixeles. En la figura 14 se observan los resultados para cada modelo.

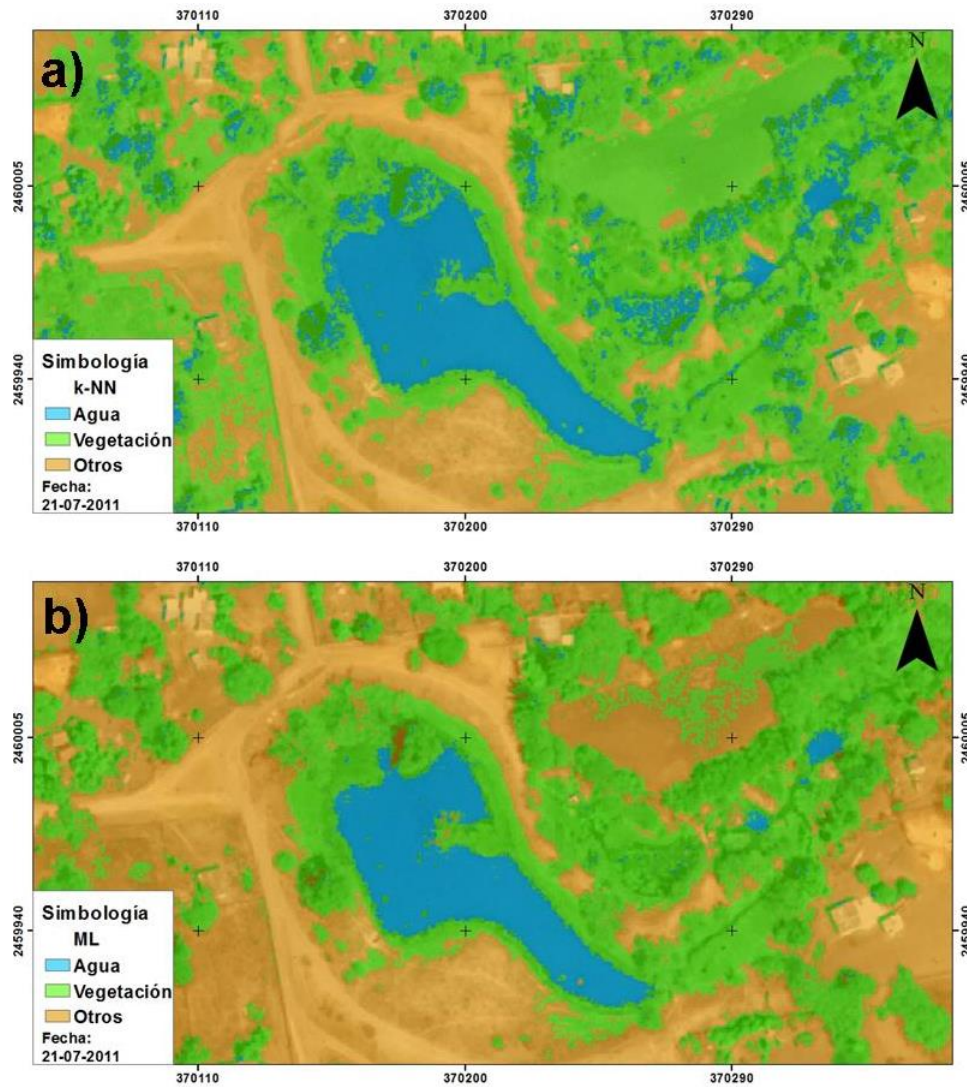


Figura 14. Resultados de la clasificación de algoritmo de clasificación para a) kNN y b) ML, Para ambos casos se aplicó una transparencia para la capa de las clases.

En la figura 14 se puede observar a simple vista que existieron diferencias notorias entre ambos algoritmos. El kNN tuvo tendencias a confundir pixeles de suelo desnudo y otros objetos con vegetación, mientras que también asigno pixeles de la clase agua a sombras y vegetación. El algoritmo de máxima verosimilitud tuvo más coherencia en todas clases, por lo tanto fue más fino y detallado sobre todo a hora de clasificar el cuerpo de agua principal. Para este trabajo se ha despreciado la exactitud del modelo para clasificar las clases de no-agua, sin embargo, es

notorio que el algoritmo de ML tuvo un buen rendimiento en la clasificación de las tres clases. En la Figura 15. Se observa la cantidad de pixeles para cada clase.

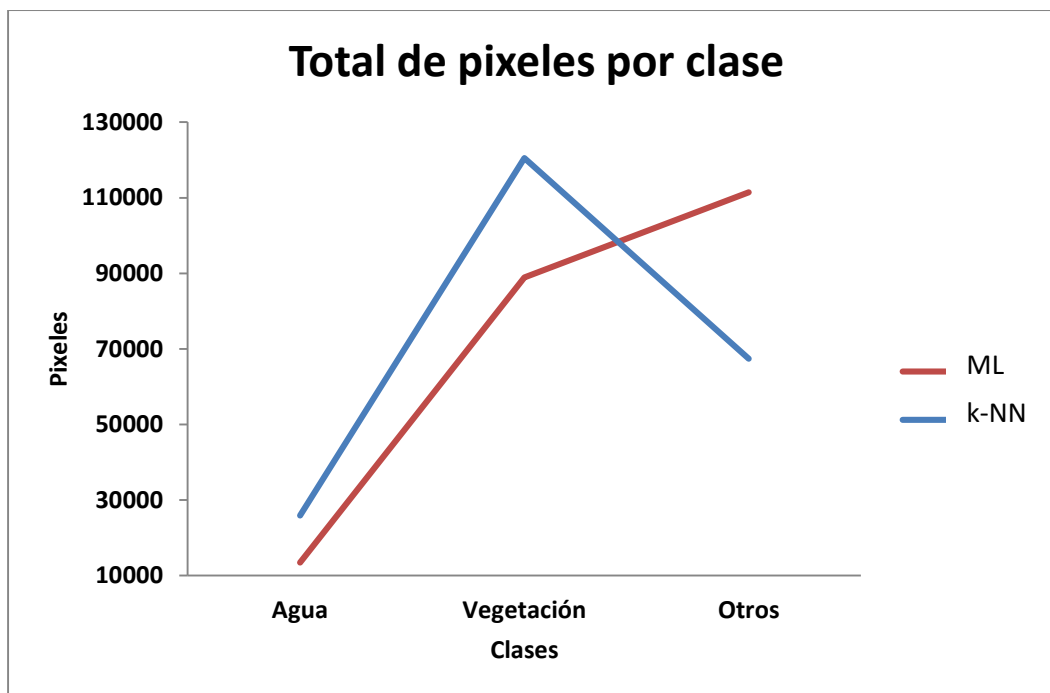


Figura 15. Cantidad de pixeles obtenida por clase para los algoritmos kNN y ML.

Las gráficas muestran diferencias muy marcadas entre ambos algoritmos sobre todo en la clase otros, ya que como se observa en la figura 14 el algoritmo kNN clasifico varias zonas de suelo desnudo como vegetación, también se puede observar que el algoritmo ML clasifico menos pixeles de agua que kNN. Los resultados arrojan los siguientes números de pixeles para cada clase de ambos algoritmos: para kNN, Agua (28,815 pixeles), Vegetación (155,256 pixeles) y Otros (90,923 pixeles), mientras que para ML, Agua (13,548 pixeles), Vegetación (106,435 pixeles) y otros (148,292 pixeles). En la Figura 16 se observa de mejor manera la distribución de los pixeles de la clase agua de ambos algoritmos de clasificación.



Figura 16. Resultados de clasificación de los algoritmos a) kNN y b) ML solo para la clase agua.

En esta figura queda claro que el algoritmo kNN tuvo más errores de clasificación de los pixeles de la clase agua, clasificando de manera errónea zonas de vegetación y sombras, mientras que el algoritmo ML clasifico pocos pixeles de las otras dos clases en la clase agua. Además se resalta la exactitud para clasificar el cuerpo de agua principal.

A pesar de que el algoritmo kNN tiene una gran aceptación por la comunidad científica debido al prestigio que tiene para la clasificación de pixeles de imágenes satelitales, tuvo un rendimiento más bajo que el algoritmo ML para clasificar pixeles de agua en imágenes con solo tres bandas disponibles (RGB), por tanto el

algoritmo de clasificación con el que se trabajó para estudiar la dinámica espacio-temporal de los manantiales del Valle de Rioverde fue el algoritmo de máxima verosimilitud (ML).

## **1.7. Resultados**

### **1.7.1. Modelación de los cambios de agua en los manantiales**

Algunos investigadores como Song et al., en el 2013 y Halabisky et al. en el 2016 han usado la técnica de análisis de mezcla espectral (SMA, por sus siglas en ingles) para modelar cuerpos de agua pequeños que son poco detectables en imágenes de resolución moderada, ya que dicho método tiene la capacidad de arrojar datos a nivel de subpixel. En este trabajo se han descartado ese tipo de métodos debido a la alta resolución espacial con la que trabajan las imágenes obtenidas de la plataforma Google Earth, no es necesario considerar de forma prioritaria la información al nivel de subpixel.

#### **1.7.1.1. Modelación del manantial Puerta del Río**

El manantial de Puerta del Río (22° 14' 25.33" N, 100° 15' 31.67" O) es uno de los manantiales mas representativos e historicos de la porción norte de Valle. Se localiza en el municipio de Villa Juárez. Además de la importancia que tiene este manantial para la región, tuvo una colección de imágenes de satélite aceptables en cantidad y calidad para este trabajo. Las fechas usadas para modelar la dinámica de su espejo de agua fueron las siguientes: 1) 12/07/2007, 2) 21/02/2011, 3) 01/04/2013 y 4) 20/01/2015, las imágenes fueron obtenidas a una altura de ojo (unidad de altura de la plataforma Google Earth) de 330 m. En la figura 17, se pueden observar los resultados de la clasificación de pixeles de agua para este manantial. Para el 2007 se puede apreciar solo agua en dos pequeñas porciones en la parte este del mapa (Figura 17b) que abarcan una extensión 1,793 pixeles (448 m<sup>2</sup>) en el espejo de agua. Para el 2011 se notó un incremento muy notorio en el espejo de agua en él se obtuvo una extensión de 13,448 pixeles (3,362 m<sup>2</sup>).



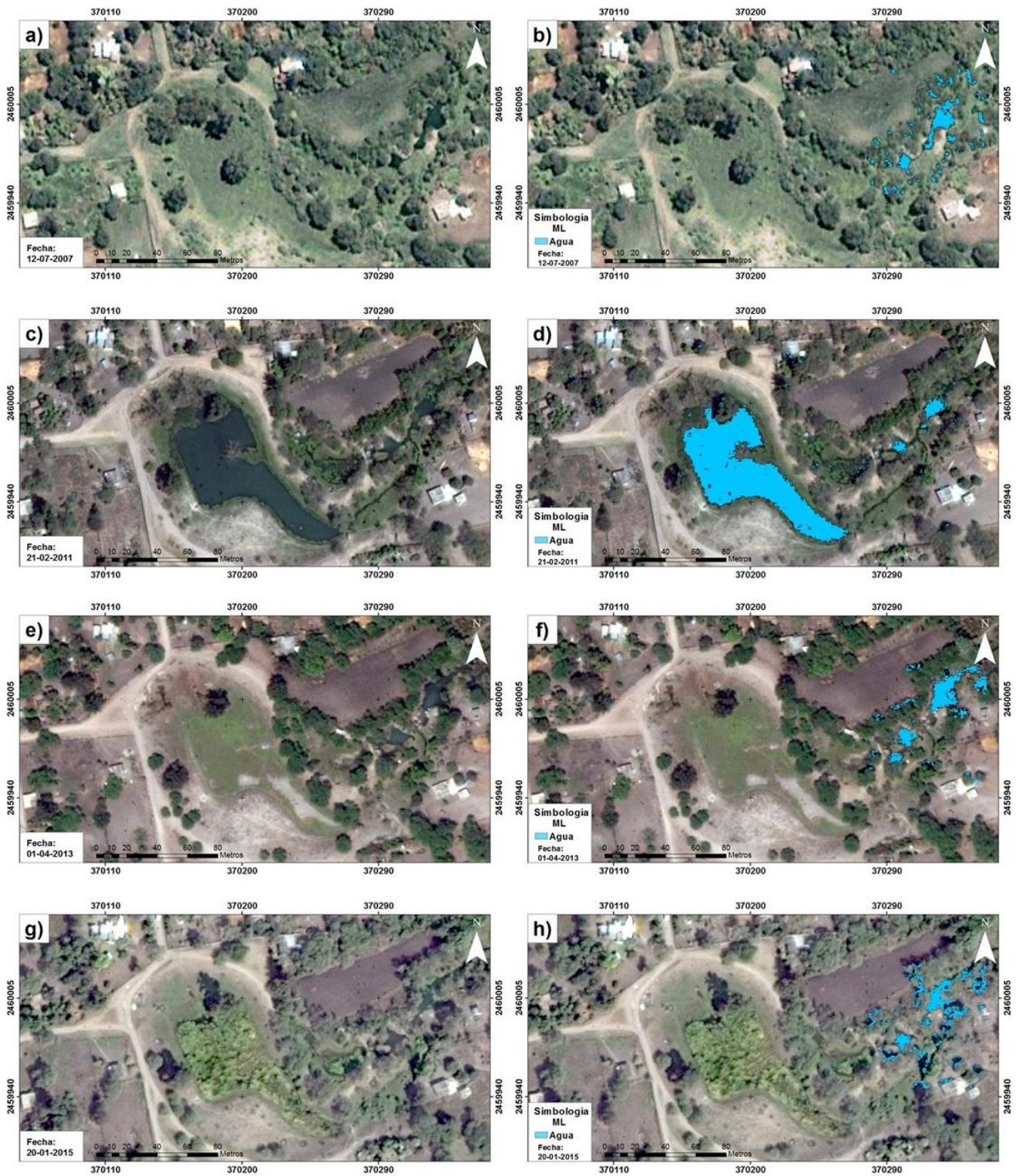


Figura 17. imágenes usadas para la calificación de pixeles con el algoritmo ML (a,c,e y g) y resultados de la clasificación (b,d,f y h).

Estos incrementos denotan una mayor producción de agua subterránea para este manantial. En el 2013 queda de manifiesto una disminución y el espejo de agua queda más parecido al obtenido en el 2007 con total de 2,315 pixeles (578 m<sup>2</sup>). Finalmente para el 2015 no se notaron cambios significativos respecto a la fecha anterior con un total de 2,589 pixeles (647 m<sup>2</sup>). La comparación de los resultados obtenidos se aprecia de mejor manera en la figura 18.

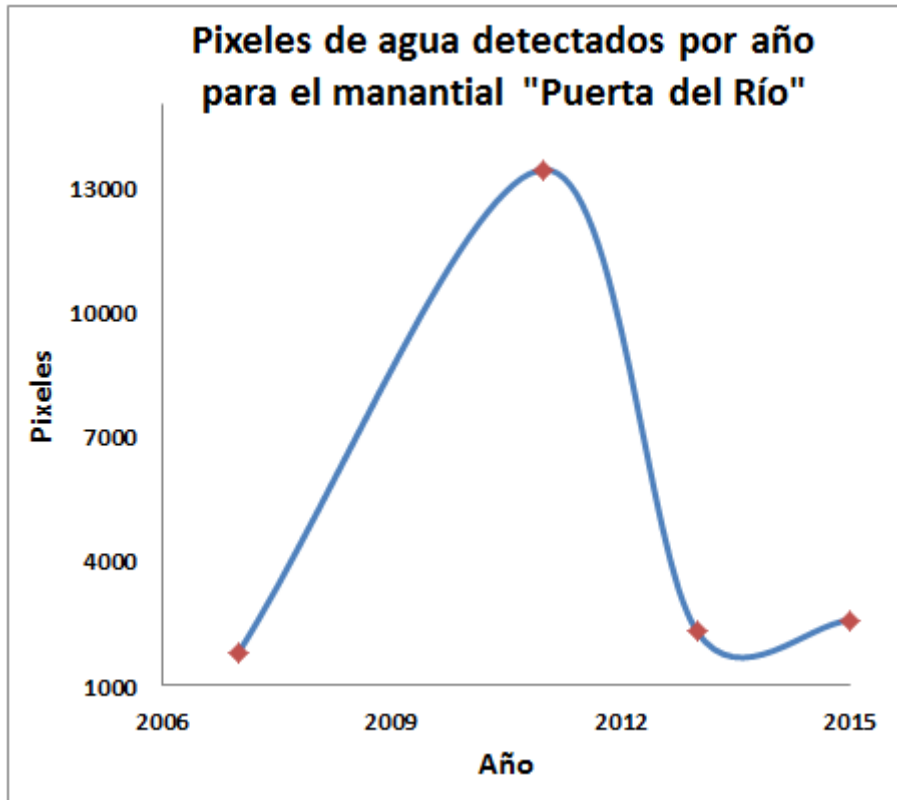


Figura 18. Comparación del total de pixeles obtenidos por la clasificación ML para cada año del manantial Puerta del Río.

Los resultados demuestran que la tendencia del manantial es conservar en la mayor parte del tiempo únicamente los dos pequeños cuerpos de agua localizados al este del mapa con una extensión de agua que promedia los 550 m<sup>2</sup>. Sin embargo en el 2011 se manifestó un incremento que inundó y dio forma a un cuerpo de agua más grande en la parte central de la imagen. Por lo que observó en campo y lo que se observa en las imágenes generalmente hay saturación de agua en el suelo de la zona donde forma el cuerpo de agua más grande ya que siempre

se mantiene vegetación verde en comparación con otras zonas, sin embargo también se aprecian árboles que de mantener un flujo de agua constante no podrían existir en esa zona. Es notorio que este manantial está en constante cambio en lo que se refiere a su espejo de agua. Por otra parte el algoritmo ML dio buenos resultados para la clasificación de este manantial ya que solo clasifiqué pocos píxeles de no-agua como agua, principalmente las sombras de árboles. Otro de los errores en clasificación se aprecia de forma notoria en el cuerpo de agua más grande formado en el año 2011, ya que debido a la poca profundidad que este alcanza, el algoritmo confundió algunos píxeles donde la vegetación al fondo del cuerpo de agua se alcanza a percibir en la imagen, por lo que el algoritmo clasifiqué a dichos píxeles dentro de la clase vegetación. Este manantial presenta una dinámica compleja ya que la mayor parte del tiempo mantiene la extensión de su espejo de agua estable, sin embargo en los periodos más productivos aumenta hasta más de 7 veces su tamaño normal.

#### **1.7.1.2. Modelación del manantial La Media Luna**

El manantial de La Media Luna es sin duda el manantial más importante no solo del Valle sino de todo el estado. Este manantial resultó complicado para el algoritmo ML no solo por las sombras que fueron una constante por solo tener tres bandas, sino también por las plantas acuáticas que este manantial produce en grandes cantidades (Flor de Lirio y Nenúfar), lo cual originó problemas de clasificación que generó una diferencia de hasta 20,000 m<sup>2</sup> de entre una fecha y otra. Para delimitar este manantial se tomó en cuenta el cuerpo de agua principal (la laguna) y además el canal natural que sale con dirección al este. También fueron incluidos canales que tienen como origen La Media Luna, por ejemplo el canal principal del distrito de riego 049, y aunque los píxeles obtenidos de estos canales se toman en cuenta para la suma del total de píxeles obtenidos por fecha, no fueron factor para realizar la delimitación de este manantial para el análisis.

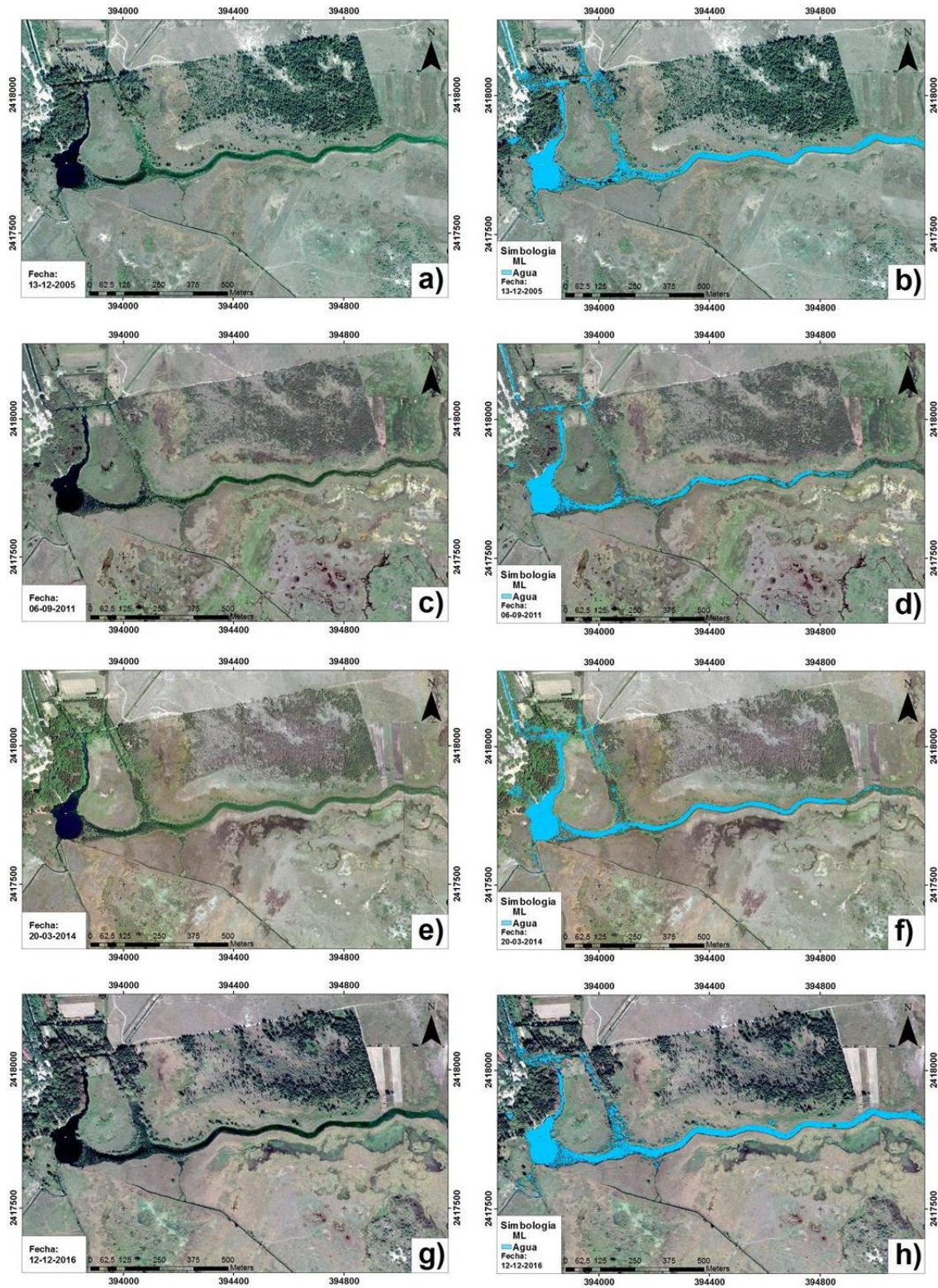


Figura 19. imágenes usadas para la calificación de píxeles con el algoritmo ML (a,c,e y g) y resultados de la clasificación (b,d,f y h).

Para el año 2005 el modelo estimo 232,297 pixeles (58,074 m<sup>2</sup>), para el año 2011 se tuvo una producción más baja de pixeles de agua con un total de 152,744 (38,186 m<sup>2</sup>), este es el año que menor extensión del espejo de agua mostro. Sin embargo en la imagen 17d se aprecia de manera clara que el canal natural de La Media Luna mostro más cobertura de vegetación acuática que cualquier otra fecha, por lo que todos los pixeles donde hay vegetación sobre el agua, el modelo los clasifíco como no-agua. Por tanto se vio disminuido considerablemente el número total de pixeles para esta fecha en relación al 2005. Para el 2014 se observa disminuida la vegetación acuática comparado con la imagen del 2011, por lo que el total de extensión del espejo de agua para esa fecha volvió a incrementarse a 190,299 (47,574 m<sup>2</sup>). Mientras que para el año 2016 se obtiene el valor más alto de pixeles clasificados como agua con un total de 242,526 (60631 m<sup>2</sup>), esta fecha marco una diferencia de más de 20,000 m<sup>2</sup> con la fecha que arrojo la menor cantidad de pixeles clasificados como agua que data del 2011. Otro punto a considerar es que las imágenes correspondientes a los años de 2011 y 2014 presentaron una calidad más alta de imagen por lo que la vegetación acuática fue más sensible al modelo ML que la clasifíco algunos pixeles en la clase “otros” y otra cantidad considerable de pixeles en la clase “vegetación”. Dicha situación también se vio reflejada cuando el algoritmo clasifíco varias zonas con sombras en la clase “agua” para los años 2005 y 2016. En la figura 20 se muestra la comparación del total de pixeles obtenidos por cada fecha para el manantial La Media Luna.

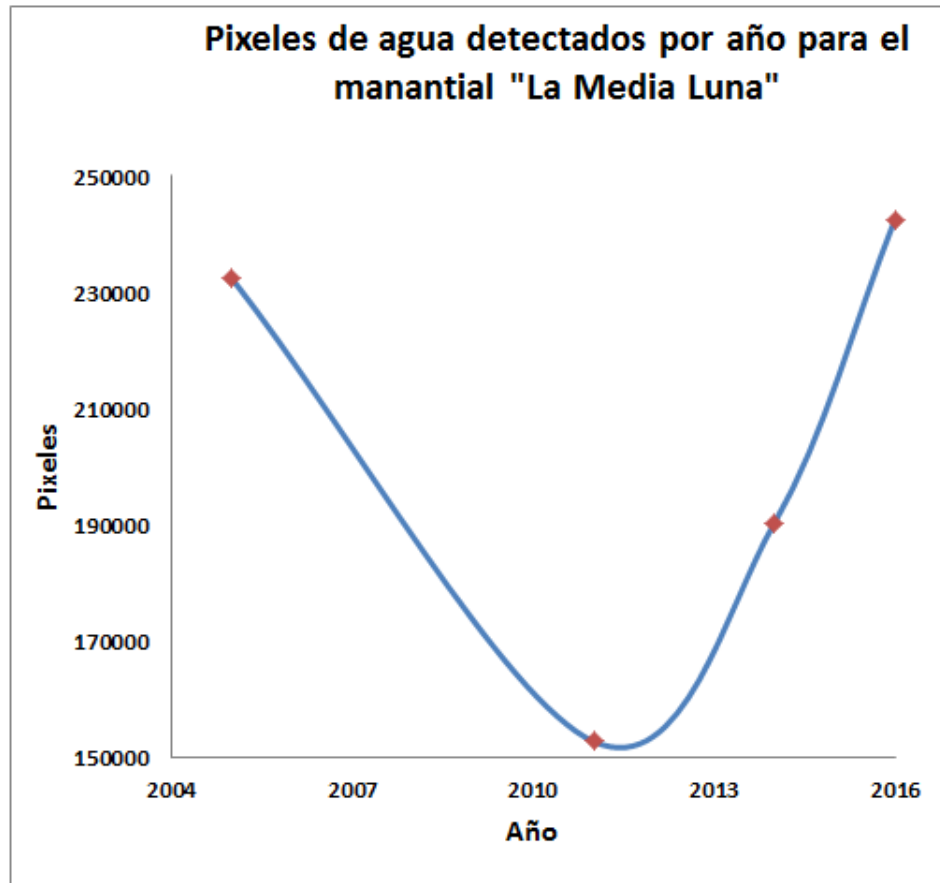


Figura 20. Comparación del total de píxeles obtenidos por la clasificación ML para cada año del manantial La Media Luna.

La línea trazada sobre los puntos del total de píxeles obtenidos para cada fecha muestra que las dos imágenes de mayor calidad (2011 y 2014) tuvieron valores de menos de 200,000 píxeles de agua y las imágenes con la calidad más baja (2005 y 2016) estuvieron por encima de los 200,000 píxeles de agua. A simple vista es apreciable que el manantial no varía significativamente en cuanto a la extensión de su espejo de agua, sin embargo la situación de la producción de vegetación acuática y la mala calidad de algunas imágenes que clasifican sombras como agua, hacen ver que el manantial La Media Luna es muy dinámico, sin embargo la única dinámica verdadera en este manantial es la producción de vegetación acuática. Ya que más allá de lo que los números arrojan la realidad es que este manantial no muestra cambios significativos en su espejo de agua.

### **1.7.1.3. Modelación del manantial Laguna de Jocolixtle**

El manantial Laguna de Jocolixtle es un manantial de importancia histórica ya que se ubica dentro de los límites de lo que algún día fue la hacienda de Vielma de gran importancia en esta región. Este manantial fue el que mostró más cambios en su espejo de agua. Para el 2008 este manantial estaba totalmente desecado, en la imagen del 2011 el manantial comienza a inundarse y sube de forma notoria la cobertura de agua llegando a ocupar una extensión de 30,775 pixeles (7,693 m<sup>2</sup>). Mientras que para el año 2016 continúa inundándose aún más, teniendo una extensión de 35,899 pixeles (8,974 m<sup>2</sup>) por lo cual la tendencia de este manantial es de crecimiento tomando como base las imágenes obtenidas. Cabe hacer mención que este manantial se visitó para este trabajo en junio de 2016 y mostró aún más inundación que la imagen que aquí se analiza con fecha de 6 de enero de 2016, ya que el agua se extendía hasta formar otro cuerpo de agua junto a la laguna principal. Esta situación hace ver que el manantial tiene cambios muy acelerados, ya que en solo 9 años puede pasar de estar totalmente desecado, hasta ocupar cerca de 10,000 m<sup>2</sup> tomando como referencia la visita que se realizó en junio de 2016. Sería interesante obtener una colección más amplia de información sobre todo de los años faltantes entre 2008 y 2016, para asegurar que al menos en este periodo de 9 años la tendencia del manantial fue inundarse o si existieron altibajos en este periodo de tiempo. Además otros datos interesantes es que este manantial alcanza profundidades de más de 2.5 m, lo cual habla de una cantidad importante de agua que llega a poseer este manantial. Otro dato interesante es que en el manantial se tiene una bomba de agua, que se usa para bombear agua hacia las parcelas de cultivo que hay en los alrededores de la comunidad Ex hacienda de Vielma. En la figura 21 se puede apreciar los cambios radicales en el espejo de agua de este manantial.

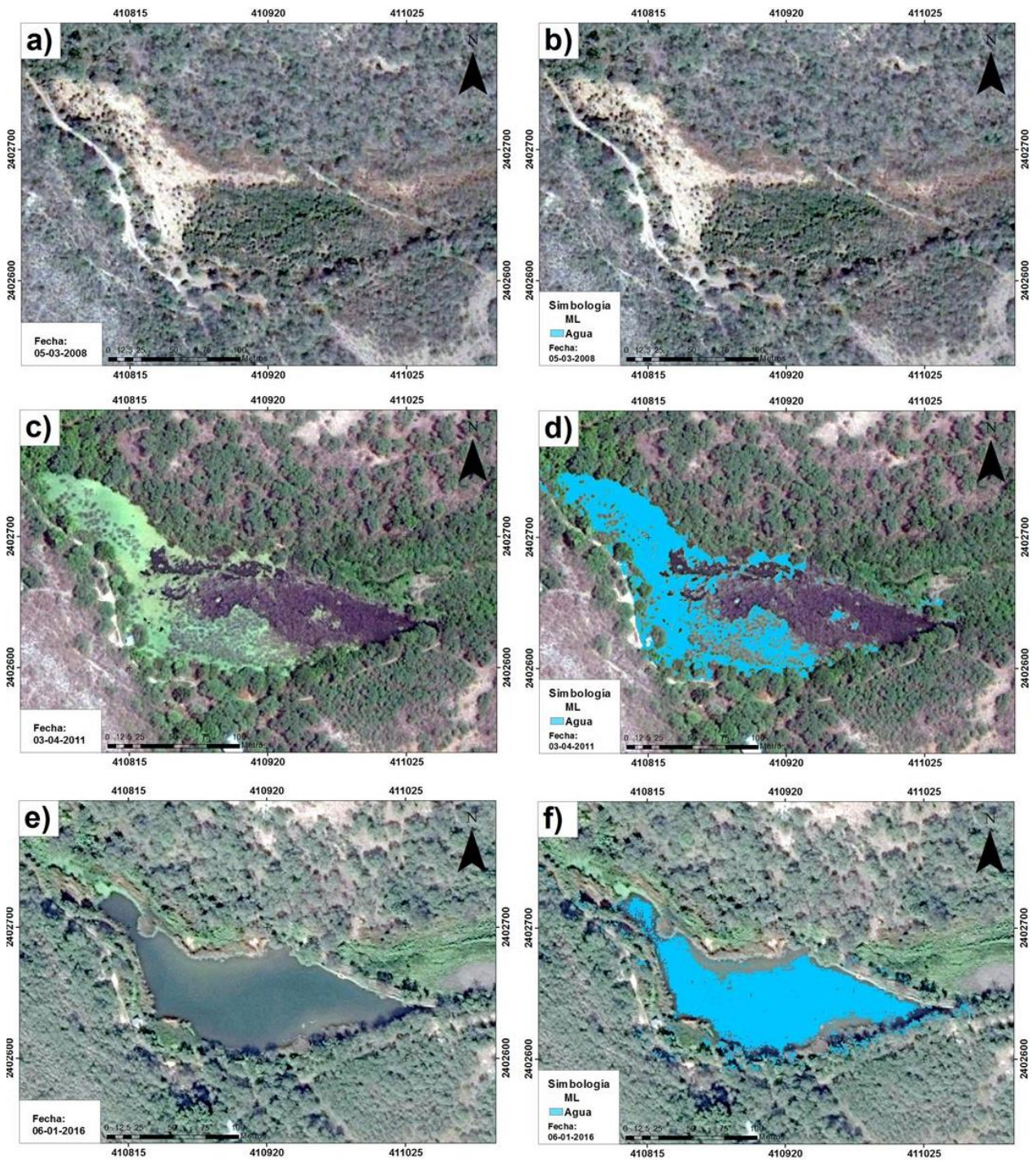


Figura 21. imágenes usadas para la calificación de pixeles con el algoritmo ML (a,c y e) y resultados de la clasificación (b,d y f).



Finalmente se han graficado los puntos que relacionan los pixeles obtenidos por cada fecha para este análisis (Figura 22).

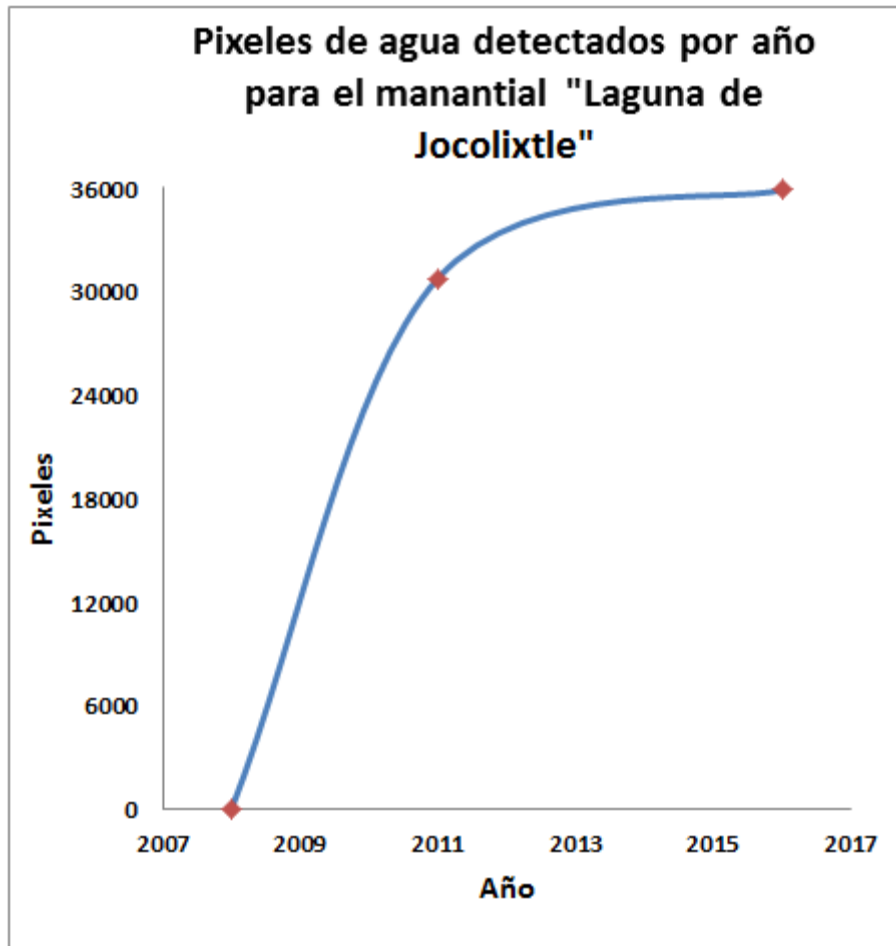


Figura 22. Comparación del total de pixeles obtenidos por la clasificación ML para cada año del manantial Laguna de Jocolixtle.

La grafica muestra de manera clara el crecimiento exponencial del espejo y cantidad de agua en este manantial, concluyendo que es el que presenta la dinámica más relevante de los tres manantiales analizados ya que muestra desecación total y extensiones cercanas a los 10,000 m<sup>2</sup> en un corto periodo de tiempo.

### **1.7.2. Errores de Clasificación del algoritmo**

El algoritmo ML mostro buenos resultados para este análisis ya que a pesar del reto que represento trabajar solo con tres bandas (RGB) y además de que probablemente no todas las imágenes correspondieron al mismo sensor lo cual quedo de manifiesto en diferencias de colores y ángulo en la captura de las imágenes. Los errores que se registraron con más frecuencia fueron los de clasificar vegetación en la clase otros y viceversa, sin embargo para este estudio se despreciaron todos los pixeles ajenos a la clase agua. No obstante existieron errores que si influyeron de manera notoria en la clase agua. La clasificación de sombras como pixeles de agua fue una constante que influyo de forma notoria, pues se estima que para algunas imágenes como las del manantial “La Media Luna” aumento hasta en un 10% la cantidad de pixeles de agua. Otra constante que se puede justificar es la presencia de vegetación en los cuerpos de agua el cual se puede abarcar en dos situaciones: 1) la vegetación que se encuentra al fondo de los manantiales y que debido a su poca profundidad, los pixeles de algunas zonas se asemejan más a vegetación que a pixeles de agua lo cual provoca que el algoritmo los clasifique como vegetación, 2) la vegetación que se encuentra sobre el cuerpo de agua, este problema afecto sobre todo la clasificación del manantial Media Luna, esta situación disminuyo hasta en un 15% el total de pixeles de la clase agua en algunas imágenes. Estos errores se conciben como el resultado de la gran resolución espacial que tienen las imágenes de la plataforma Google Earth para detectar cualquier objeto sobre la superficie, ya que en imágenes de resoluciones espaciales moderadas o bajas, los pixeles se generalizan a la clase más abundante.

### **1.7.3. Comparación del espejo de agua del manantial de La Media Luna en 1970 y 2011**

Para este trabajo se logró obtener una fotografía área con fecha del 16 julio de 1970 y escala de 1:25,000, la fotografía fue cedida por el INEGI. La imagen se georreferencio con el apoyo de los canales ya existentes en esas fechas, aunque presento variaciones con las imágenes georreferenciada de Google Earth. Se

logró hacer una buena comparación de la fotografía aérea con las imágenes actuales. La idea fue comparar el espejo de agua que había en los manantiales en aquella fecha con el espejo de agua actual y analizar el cambio. Lamentablemente la escena de esta fotografía solo cubre el manantial “La Media Luna”, por lo que esta comparación solo se realizó con dicho manantial. Para realizar esta comparación se tomó en cuenta la fecha que mostro más inundación según el algoritmo de máxima verosimilitud, la cual corresponde al 12 de diciembre de 2016. El análisis se concentra sobre la laguna principal así como el canal natural, el objetivo fue estimar el área que tenía el espejo de agua en 1970 a través de un delineado manual para compararlo con el resultado de ML del 2016 (Figura 23).

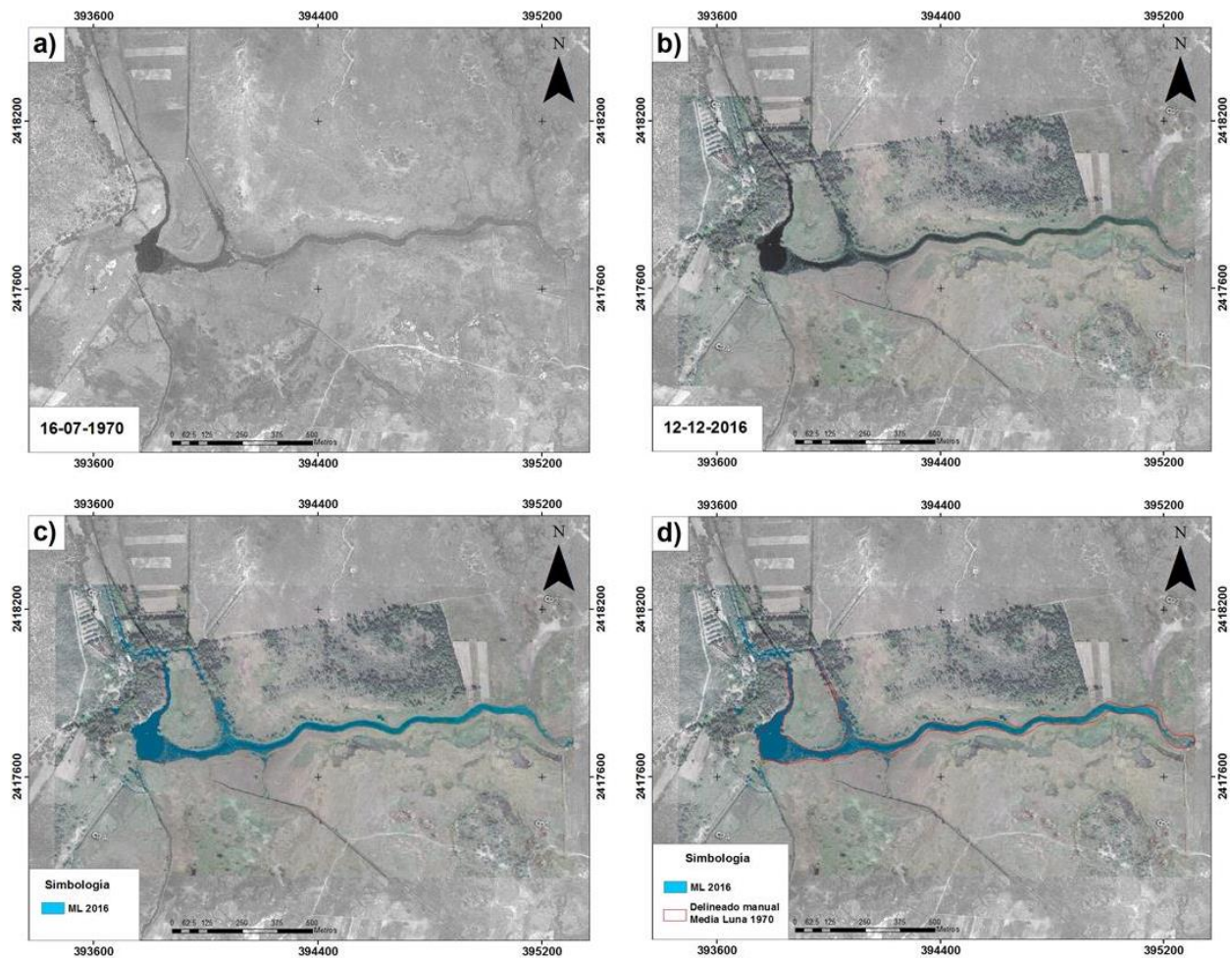


Figura 23. Comparación realizada con la imagen aérea de 1970, las imágenes están el siguiente orden a) Fotografía de 1970, b) imagen de Google Earth con

fecha de 2016 montada sobre la fotografía aérea, c) ML 2016 y d) comparación de ML 2016 y delineado manual de 1970.

Se debe de tener en cuenta que debido a la naturaleza de la imagen aérea existe un pequeño desfase entre la imagen de 1970 y la de 2106, sin embargo no tiene mucha influencia en el resultado final, como se puede observar en la figura 23d, existe una relación estrecha entre la fotografía de 1970, la imagen de 2016, el modelado de ML y el delineado manual. Para el 2016 el algoritmo ML estimo una cobertura de la clase agua de 60,631 m<sup>2</sup> mientras que el delineado manual estimo un área de aproximadamente 70,000 m<sup>2</sup>, se debe de tener en cuenta que el delineado manual no toma en cuenta pixeles de vegetación, es decir se generalizo los límites del manantial como espejo de agua. Teniendo en cuenta que, la vegetación fue un factor importante en el total de pixeles de agua obtenido por cada imagen de satélite de La Media Luna en donde la diferencia por vegetación acuática influyo hasta en más de 20,000 m<sup>2</sup> entre una imagen y otra., y además la observación visual en donde no se notan cambios en cuanto al espejo de agua de 1970 y el 2016, se puede asegurar entonces que el espejo de agua del manantial no ha tenido cambios significativos en los últimos 50 años.

### **1.8. Validación**

Para validar los resultados obtenidos, nos adaptamos al método de validación usado por Halabisky et al., 2016, quienes compararon la extensión del agua superficial con datos de referencia de cada manantial obtenidos mediante una delineación manual. Para esta validación se seleccionaron las fechas que presentaron la máxima de inundación de cada manantial, obtenidos del algoritmo de máxima verosimilitud. Por lo tanto para la validación se utilizaron las fechas siguientes: para el manantial del Puerta del Río se utilizó la imagen correspondiente al 21 de febrero de 2016, para el manantial La Media Luna se utilizó la fecha correspondiente al 12 de diciembre de 2016 y para el manantial Laguna de Jocolixtle se utilizó la fecha correspondiente al 6 de enero de 2016. En la figura 24 se muestra el ejemplo la comparación entre el delineado manual y el resultado del algoritmo ML.

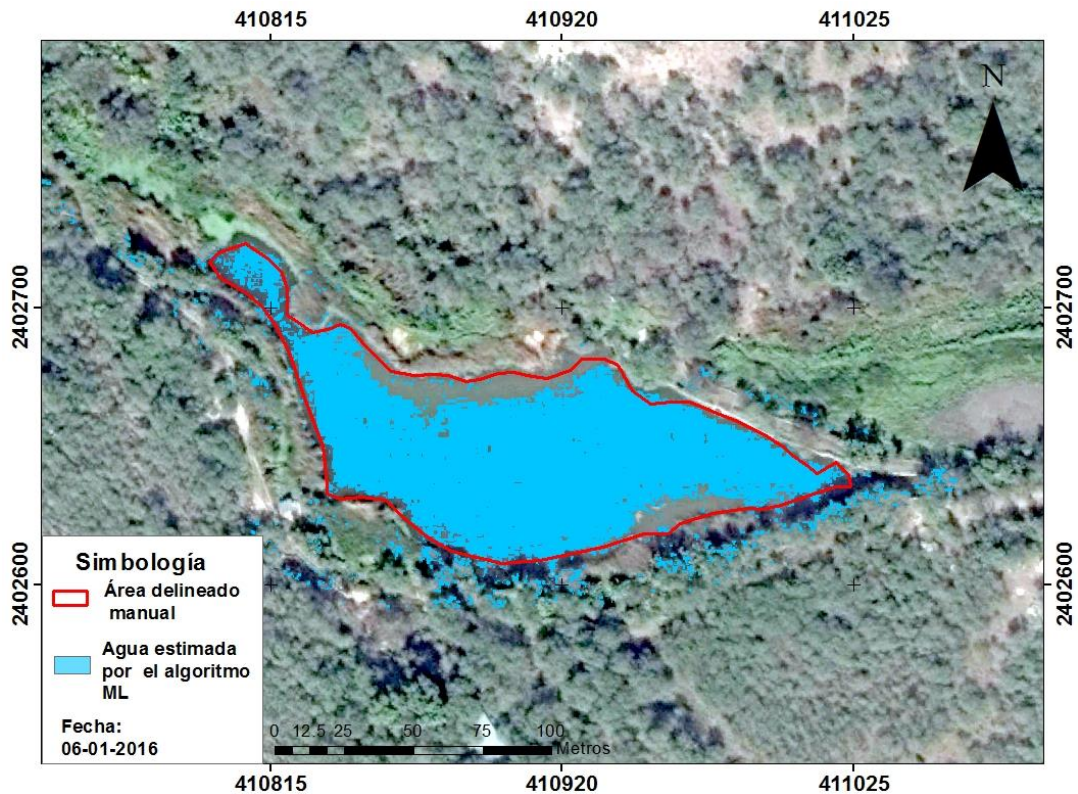


Figura 24. Comparación entre el delineado manual y los resultados automáticos de la clasificación de agua por el algoritmo ML.

De esta manera se obtuvo el porcentaje de extensión del espejo de agua de los manantiales trazada de modo manual sobre la imagen y la extensión de agua modelada por el algoritmo ML. Posteriormente se comparó la diferencia de porcentajes de área de extensión obtenida de ambos métodos para ver las diferencias. Para el caso del manantial Puerta del Río la diferencia fue de 700 m<sup>2</sup>, para el caso del manantial La Media Luna fue de 5,000 m<sup>2</sup> y para el manantial Laguna de Jocolixtle fue de 500 m<sup>2</sup>, todas las diferencias fueron a favor del delineado manual. Se puede decir que el algoritmo de máxima verosimilitud dio buenos resultados, ya que en la delineación manual se generaliza el trazo de los manantiales en cuanto a su extensión, mientras que el algoritmo ML, aunque tiene algunos errores como ya se mencionó antes tiene el potencial de identificar los pixeles que presentan agua.

Lamentablemente en el Valle de Rioverde los manantiales son muy poco estudiados y se carece de información oficial en cuanto a caudales anuales y extensión por lo cual los resultados de este análisis no pueden ser validados con información real y confiable de campo.

## Discusión

Realizar esta investigación represento un verdadero reto por la limitada información, pocos trabajos se han realizado con imágenes que solo tienen tres bandas espectrales (red, blue, green), sin embargo las imágenes obtenidas de la plataforma Google Earth eran las únicas de alta resolución espacial que estaban al alcance para este trabajo. Sin duda una de las grandes limitantes fue los errores de clasificación por parte del algoritmo ya que por la escasa información de las bandas confundía fácilmente sombras o vegetación de colores fuertes con agua o viceversa. Este problema también se presentó pero de forma inversa en el manantial Puerta del Río donde en la poca profundidad del manantial hacia que la vegetación por debajo del agua fuera notoria lo que provocó que el algoritmo confundiera algunos pixeles con vegetación. Otro problema que resulto fue que debido a la alta resolución espacial que tienen las imágenes el color de los cuerpos de agua variaba hasta en tres tonalidades debido a las variaciones de las profundidades (a mayor profundidad mostraba tonos de azul más oscuros). Sin embargo pensamos que algunas de las limitantes mencionadas se podrían convertir en cualidades positivas para el estudio de los manantiales en el Valle de Rioverde, S.L.P. El Lirio y los nenúfares fueron las plantas acuáticas que más problemas causo al algoritmo de clasificación ya que los confundía fácilmente con vegetación terrestre lo cual originaba perdida de pixeles de agua. Sin embargo dichas plantas son características y exclusivas de los manantiales de agua subterránea en esta zona de estudio, por lo cual se podría llevar a cabo un entrenamiento y crear una firma espectral de estas plantas para posteriormente aplicarlas en toda la zona de estudio y poder diferenciar de manera más fácil entre manantiales de agua subterránea y cuerpos de agua de otras fuentes.

Por otro lado la dinámica de los manantiales dio resultados satisfactorios ya que a pesar de contar con pocos periodos, aun así se pudieron observar cambios notorios en los manantiales. Sorprende el caso del manantial Laguna de Jocolixtle ya que en periodos bastante cortos, puede pasar de un desecado total a poseer gran cantidad de agua, estimar el volumen es complicado porque se necesita

información de profundidad. Pocos estudios en el mundo han generado información de profundidades de cuerpos de agua con percepción remota, para este trabajo estimar profundidad estuvo fuera de los alcances. Sin embargo la extensión del cuerpo de agua en particular de este manantial, tiene cambios severos ya que se estima puede sobrepasar los 10,000 m<sup>2</sup> en algunos periodos y en otros tener o m<sup>2</sup>. El manantial La Media Luna tiene un flujo muy constante ya que a raíz de los trabajos generados por el ingeniero Trinidad Paredes se aprecia que el caudal de afloramiento no ha variado en los últimos 100 años, así mismo gracias a la imagen área cedida por el INEGI se puede constatar que el espejo de agua y forma tampoco ha variado significativamente en los últimos 50 años.



## **Conclusión**

En este trabajo se aplicó el algoritmo de máxima verosimilitud para clasificar píxeles de agua para los manantiales de Puerta del Río, La Media Luna y Laguna de Jocolixtle. Las imágenes utilizadas de alta resolución fueron extraídas de la plataforma Google Earth, por lo que se trabajó solo con tres bandas Red, Green y Blue. Para los manantiales Puerta del Río y La Media Luna se utilizaron cuatro fechas diferentes y para el manantial Laguna de Jocolixtle se consiguieron solo tres fechas distintas. El trabajar solo con tres bandas y pocas fechas disponibles represento un gran reto para obtener un diagnostico acerca de la dinámica de los manantiales en el Valle de Rioverde, San Luis Potosí. Sin embargo, se obtuvieron buenos resultados de este trabajo. Referente al método de clasificación de píxeles, se pusieron a prueba los algoritmos kNN y ML, los resultados mostraron que algoritmo ML tuvo una mejor clasificación de píxeles de agua, vegetación y otros, aunque para este trabajo se discriminaron las clases vegetación y otros. El algoritmo mostro pocos errores de clasificación, el error que más efecto negativo tuvo para este trabajo fue el generar píxeles para la clase agua a partir de sombras de árboles, viviendas y otros objetos. Pero en general el algoritmo mostro una gran precisión a pesar de las limitaciones de las imágenes, prueba de ello es que el área de los modelos generados tuvo poca diferencia con el área de la delimitación manual, no obstante la delineación manual tomo la forma con gran precisión de la extensión del espejo de agua de los manantiales en las fechas elegidas para la validación. Por lo que se concluye que algoritmo tuvo un comportamiento aceptable para clasificar píxeles de agua.

En cuanto a la dinámica del espejo de agua de los manantiales no se tuvo información con las mismas fechas para los todos los manantiales seleccionados. Para el manantial Puerta del Río se analizó la información de 9 años distribuida en 4 imágenes, para La Media Luna fueron 12 años distribuidos en 4 imágenes y para el manantial Laguna de Jocolixtle fueron 9 años distribuidos en 3 imágenes. Los resultados mostraron que los manantiales presentes en las zonas norte y sur del valle, tienden a tener cambios más constantes en el espejo de agua en poco

tiempo. En el caso de del manantial Puerta del Río su espejo de agua puede aumentar en tan solo un año hasta ocho veces el tamaño que tiene regularmente. EL manantial Laguna de Jocolixtle es el caso más especial que se tiene quizás en todo el Valle de Rioverde, por los resultados de su observación y modelado de pixeles mostraron que el manantial pude llegar al grado de desecación total y en tan solo 9 años o quizá menos llegar a tener un tamaño de aproximadamente 10,000 m<sup>2</sup> y además profundidades de alrededor de los 2 m, por lo que el agua que puede llegar a perder o aganar es de consideración. Mientras tanto La Media Luna muestra muy poca variación en su espejo de agua, aunque en la gráfica los resultados muestran variaciones de hasta más de 20,000 m<sup>2</sup> entre una fecha y otra. Realmente existieron factores que influyeron en dichos resultados, principalmente la vegetación acuática, la cual si muestra una variación notoria entre las diferentes fechas, esto genera incrementos o decrementos de pixeles de agua. La imagen área de 1970 fue muy importante ya que aunada a los trabajos previos que describen La Media Luna, se puede concluir que su espejo de agua no ha tenido variaciones significativas al menos en los últimos 50 años. Entender los cambios en el aumento o disminución de agua de los manantiales, ayuda de forma notoria a preservar estos valiosos recursos de agua subterránea. Por otro lado ayuda a comprender los impactos ecológicos que causa la usencia temporal de algunos manantiales, y los impactos irreversibles que se pueden generar en caso de tener la usencia permanente de algún manantial. La usencia temporal o permanente del agua de los manantiales tiene consecuencias en el uso del suelo y económicas, ya que por ejemplo en el Valle de Rioverde todos los manantiales son de uso agrícola, la ausencia permanente de los manantiales más importantes, sin duda impactaría de forma negativa en la agricultura lo que provocaría grandes pérdidas económicas en la región.

Estimar los verdaderos cambios anuales, necesita de información con resolución temporal más alta, por ahora es muy difícil tenerla ya que no existen muchos sensores que combinen la alta resolución espacial y temporal para esta zona. Este trabajo deja una base para estudios posteriores de los manantiales de esta región, ya que se generó un inventario de los manantiales más importantes del Valle de

Rioverde hasta ahora inexistente. Estos datos pueden dar pistas para la estimación del tiempo de vida de los manantiales en el Valle. Para finalizar se puede decir que este método es válido para realizar estudios de dinámica de pequeños cuerpos de agua, pero no se pueden estimar medidas exactas de superficie ni volumen.

## **Capítulo 2**

# **Estimación de zonas potenciales de la presencia de manantiales en el Valle de Rioverde, San Luis Potosí**

## Resumen

El objetivo de este trabajo fue aplicar el modelo de Relación de Frecuencia (FR, por sus siglas en inglés) para la modelación del potencial de ocurrencia de manantiales de agua subterránea (GSP, por sus siglas en inglés) en el Valle de Rioverde, San Luis Potosí utilizando Sistemas de Información Geográfica. Se visitaron y georreferenciaron 27 manantiales, la mayoría de ellos son cuerpos de agua, y solo dos, son pequeños afloramientos. Se emplearon factores de tipo hidrológico, geológico, topográfico, ambiental y edafológico desglosados en 12 variables: 1) elevación, 2) pendiente, 3) aspecto de la pendiente, 4) curvatura, 5) longitud de pendiente (LS, por sus siglas en inglés), 6) índice de humedad topográfica (TWI, por sus siglas en inglés), 7) litología, 8) precipitación, 9) suelo y vegetación, 10) distancia a ríos, 11) densidad de drenaje, índice de potencia de corriente (SPI, por sus siglas en inglés). Posteriormente, se determinaron coeficientes de FR que explican el grado de ocurrencia de los manantiales respecto a la distribución espacial de los factores explicatorios. Se seleccionó una muestra del 70% (19 manantiales) y 30% (8 manantiales) para entrenamiento y validación del modelo, respectivamente. El procedimiento de validación confirmó que el modelo tiene muy buena capacidad de predicción de ocurrencia de manantiales, ya que el 87.5% de los manantiales fueron predichos correctamente. Adicionalmente, con el propósito de seguir validando el modelo, se buscaron cuerpos de agua empleando los valores de FR estimados y se obtuvieron buenos resultados, ya que se encontraron cuatro zonas de cuerpos de agua que no fueron utilizadas para la realización de este trabajo.

**Palabras clave:** Frequency/Ratio, Sistemas de Información Geográfica, Análisis espacial, acuífero.

## **Abstract**

The objective of this work was to apply the probabilistic-based Frequency/Ratio model in order to determine groundwater spring potential in the Rioverde Valley, San Luis Potosí (Mexico). As explaining factors, some hydrological, geological, topographic, environmental and soil factors including: 1) elevation, 2) slope, 3) aspect of the slope, 4) curvature, 5) slope length, 6) topographic water index, 7) lithology, 8) precipitation, 9) land cover/ land use, 10) distance to rivers, 11) drainage density and 12) stream power index. In order to train the model, 27 springs were visited and georeferenced, most of them were water bodies, and only two, were small water sprouts. Subsequently, FR coefficients explaining the degree of occurrence of the springs with respect to the spatial distribution of the explanatory factors were determined. A sample of 19 springs (70%) and 8 springs (30%) was selected for model training and validation, respectively. The validation procedure confirmed the model performance as very good predictor e.g. 87.5% of the springs were predicted correctly. Furthermore, additional water bodies were searched using the higher FR values and good results were obtained. i.e. four water bodies not used for this work were found out.

**Keywords:** Frequency/Ratio, GIS, spatial analysis, aquifer.

## 2.1. Introducción

El crecimiento de la población ha desencadenado un desarrollo exponencial desde el punto de vista económico y social, traducido en la necesidad de agua en cantidad y calidad (Moghaddam et al., 2015). El agua es esencial para la vida humana. La mayor parte de ella se extrae del subsuelo (Moghaddam et al., 2015). El agua subterránea es aquella que se encuentra en la zona saturada y que llena todo el espacio poroso de suelos y formaciones geológicas por debajo de la capa freática. Está conformada por todas las fuentes que se infiltran al subsuelo (precipitación, deshielo, vapor de agua condensado etc.) (Manap et al., 2012). La mayor fuente de recarga de agua subterránea es la precipitación, casi toda el agua de esta fuente se deposita en los acuíferos y otra pequeña porción se descarga a través de manantiales (Alcalá, 2006; López-Bermúdez y Sánchez-Fuster, 2010). Generalmente las fuentes de mayor aprovechamiento del agua subterránea se dan a través de pozos y norias, sin embargo en ciertas zonas existe la aparición de manantiales. Un manantial se define como un afloramiento de agua subterránea en la superficie, en algunos casos el caudal de afloramiento es muy grande y se pueden formar pequeños, medianos y grandes cuerpos de agua de manera natural sobre el terreno si tiene las condiciones topográficas necesarias. (López-Bermúdez y Sánchez-Fuster, 2010). Los manantiales resultan sumamente útiles para los núcleos poblacionales que existen alrededor de ellos. Algunos son utilizados como fuentes de consumo humano, pero principalmente se utilizan en las actividades agrícolas y ganaderas (López-Bermúdez y Sánchez-Fuster, 2010).

Las fuentes de agua subterránea tienen significativas ventajas que la convierten en un recurso muy valioso. Dentro de las ventajas destacan: 1) temperatura constante, 2) disponibilidad, 3) calidad natural, 4) vulnerabilidad limitada, 5) bajo costo de desarrollo, 6) contrarresta impactos de sequía, 7) se ve afectada en menor medida por eventos catastróficos y 8) reduce el riesgo agrícola (Manap et al., 2012; Balamurugan et al., 2017). En las regiones áridas y semiáridas del mundo la necesidad de agua se intensifica debido a que un bajo rendimiento de precipitación anual genera grandes problemas en poco tiempo. En estas zonas el

agua subterránea es fundamental para sanar dicha situación, inclusive las aguas de acuíferos kársticos que se caracterizan por una mala calidad son de gran ayuda (Abdalla, 2012).

La ocurrencia de agua subterránea en algún lugar está condicionada por diversos factores geológicos, climáticos, hidrológicos, fisiográficos y ecológicos. Los aspectos que determinan principalmente dicha situación son porosidad y permeabilidad de la superficie así como la litología (Ozdemir, 2011; Moghaddam et al., 2015). Una característica que es de gran interés en el estudio de las aguas subterráneas es el movimiento interno que tiene a través de las rocas. Resumiendo lo anterior, se puede decir que en general las características de mayor relevancia en el estudio de aguas subterráneas son la ocurrencia y movimiento (Ozdemir, 2011). Muchos investigadores que han modelado ocurrencia y movimiento del agua subterránea, coincidieron en la mayoría de los siguientes factores como los que mayor relación tienen con estas: topografía, litología, estructuras geológicas, fallas o fracturas del suelo, densidad de la fractura, recarga de aguas subterráneas, pendiente del terreno, drenaje superficial, forma del relieve, uso del suelo, condiciones climáticas y la interrelación entre estos factores. Todos los casos de estudio son diferentes y algunos investigadores utilizan factores de acuerdo a las necesidades de su zona de estudio (Ozdemir, 2011; Moghaddam et al., 2015). Sin embargo se debe de tomar en cuenta que la predicción del potencial de manantiales y en general, de las aguas subterráneas es un problema espacial, por lo tanto el grado de influencia de los factores para la ocurrencia de los manantiales dependerá de la zona de estudio (Adiat et al., 2012).

La sobreexplotación de las fuentes de agua subterránea y los cambios en los regímenes de precipitación, provocan problemas de recarga en los acuíferos, lo que ocasiona severos problemas como: a) desabasto para los distintos usos consuntivos, b) bajos niveles o pérdida total de agua en manantiales, c) descenso de niveles piezométricos, d) hundimiento del suelo y e) reducción de la capacidad del acuífero debido a la compartimentación. En algunas regiones se ha promovido



la recarga artificial para sanar estos problemas. Esta consiste en la inyección directa de agua a través de pozos, zanjas y fallas. Sin embargo las distintas dependencias reguladoras del agua subterránea son muy minuciosas en cuenta a la calidad del agua que se utiliza para llevar a cabo la recarga artificial, así como la selección de los sitios donde se realizará (Balamurugan et al., 2017).

El agua subterránea no es un recurso fácil de estudiar, ya que se encuentra bajo la superficie y por tanto no se pueden realizar observaciones directamente. Históricamente la perforación y estratigrafía han sido los métodos más utilizados y fiables para la ubicación de pozos y espesor de la unidad acuífera. No obstante, estos métodos requieren de esfuerzos grandes en cuanto a tiempo y costos. Las técnicas geofísicas también han sido ampliamente utilizadas para la exploración de recursos hídricos subterráneos. Sin embargo no son muy precisos y siempre deben ser validados con datos de pozos (Adiat et al., 2012). A todo lo anterior se suman problemas como los acuíferos de roca dura, lo complejo de estos escenarios es que el movimiento y aparición del agua queda restringido a horizontes fracturados. Esto requiere de investigaciones más amplias en el campo hidrogeológico para comprender las condiciones del agua subterránea en esas zonas (Balamurugan et al., 2017). Como ya se ha mencionado los métodos y técnicas que se utilizan para delimitar o preparar las zonas potenciales de agua subterránea se basan principalmente en estudios de la tierra, sin embargo el desarrollo de nuevas tecnologías para recolectar y procesar datos espaciales como los Sistemas de Información Geográfica, han permitido realizar modelos para la estimación de recursos naturales desde computadoras con softwares especializados reduciendo así tiempo y recursos (Ozdemir, 2011; Abdalla, 2012; Adiat et al., 2012; Moghaddam et al., 2015).

En la actualidad la percepción remota provee de información de forma rápida y eficaz de la superficie del planeta. La percepción remota permite la evaluación cualitativa de los recursos de agua subterránea, a través de la extracción y el análisis de estructuras geológicas, morfológicas y características hidrológicas. Además es capaz de proporcionar una mejor observación y análisis más

sistemático de unidades geomórficas, formas de relieve, rasgos de lineamientos y otras variables necesarias para la modelación de manantiales de agua subterránea, evitando con esto grandes campañas de trabajo en campo (<sup>1</sup>Ozdemir, 2011; Abdalla, 2012; Moghaddam et al., 2015; Balamurugan et al., 2017). De esta manera con la integración de información obtenida de percepción remota y otras fuentes en los SIG, muchos investigadores han evaluado áreas potenciales de agua subterránea y manantiales con diferentes métodos como Análisis de Decisión Multi-Criterio (Murthy y Mamo; 2009; Abdalla, 2012; Amer et al., 2012; Adiat et al., 2012; Magesh et al., 2012; Kumar et al., 2014; Singh et al., 2014; Díaz-Rivera, 2015; Machiwal y Singh, 2015; Venkateswaran y Ayyandurai, 2015; Jothibasulu y Anbazhagan, 2016), Frecuencia ratio (Oh et al., 2011; <sup>2</sup>Ozdemir, 2011; Manap et al., 2012; Balamurugan et al., 2017), Regresión Logística Binaria (<sup>1</sup>Ozdemir, 2011), Pesos de Evidencia (<sup>2</sup>Ozdemir, 2011; Lee et al., 2012), Regresión Logística (<sup>2</sup>Ozdemir, 2011), Modelo Lineal Generalizado (Zhou y Li, 2011; Basu et al., 2012; Li y Merchant, 2012; Tillman et al., 2012; Naghibi et al., 2017; Saadi et al., 2017), Función de creencias probatorias (Nampak et al., 2014), Modelo Estadístico Bivariado (Moghaddam et al., 2015), Árbol de Regresión Potencial (Naghibi et al., 2016), Árbol de Clasificación y Regresión (Naghibi et al., 2016), Modelo Forestal de Aprendizaje Aleatorio (Naghibi y Pourghasemi, 2016).

La delimitación y descripción de manantiales de aguas subterráneas es una poderosa herramienta para lograr el éxito en programas de protección y gestión de aguas subterráneas y cuidado ambiental. Los productos finales resultado de la delimitación de zonas potenciales de manantiales de agua subterránea son de utilidad para planificadores e ingenieros de distintos ámbitos como obra civil y de exploraciones de recursos (Moghaddam et al., 2015).

El objetivo principal de este trabajo fue estimar el potencial de manantiales de agua subterránea para el Valle de Rioverde mediante el método Frequency Ratio, en español nombrado “Relación de Frecuencia (FR, por sus siglas en inglés)” empleando variables físicas y ambientales dentro de un Sistema de Información Geográfica.

## **2.2. Métodos utilizados para la modelación del potencial de manantiales de agua subterránea basados en sistemas de información geográfica**

### **2.2.1. Modelo Relación de Frecuencia (FR)**

El método de relación de frecuencia (FR), aplicándose como técnica estadística bivariada puede usarse como una herramienta de evaluación geoespacial para calcular la relación probabilística entre variables dependientes e independientes incluyendo mapas de multi clasificación (Oh et al., 2011; Ozdemir et al., 2011; Moghaddam et al., 2015). Para el caso de la ocurrencia de manantiales de agua subterránea la relación de frecuencia es la proporción del área del total de la zona de estudio donde resultó ocurrencia de manantiales, de igual manera es la proporción de la probabilidad de ocurrencia o no ocurrencia de manantiales para cada atributo dado (Moghaddam et al., 2015).

Moghaddam et al., en el 2015 utilizaron las siguientes etapas para el cálculo de FR en cada clase de los factores que afectan en la ocurrencia de manantiales, la ecuación queda como sigue:

$$FR = \left( \frac{M}{G} / \frac{L}{S} \right)$$

Donde, M es el número de píxeles con manantiales para cada factor; G es el número del total de manantiales en el área de estudio; L es el número de píxeles en el área de la clase del factor; S es el número total de píxeles en el área de estudio; y FR es la relación de frecuencia de una clase para el factor.

El enfoque de la FR se basa en las relaciones observadas entre la distribución de los manantiales y cada factor relacionado con ellos, para encontrar el grado de asociación entre la ubicación de los manantiales y los factores en el área de estudio. Utilizando el modelo de FR, se encuentran las relaciones espaciales entre la localización de los manantiales y cada factor que contribuye a la ocurrencia de estos (Moghaddam et al., 2015).

Este método ha sido ampliamente usado en fenómenos hidrológicos, incluso Oh et al., en el 2011 utilizaron la relación de frecuencia para realizar un mapa del potencial de agua subterránea en la ciudad de Pohang, Corea. Sin embargo Ozdemir en el 2011 fue el primero en poner a prueba este método para mapear el potencial de manantiales en una zona de Turquía (Ozdemir, 2011).

### 2.2.2. Modelo Regresión Logística (LR)

La regresión logística (LR, por sus siglas en inglés), es un método que describe la relación entre una variable dependiente categórica o binaria y una o más variables explicativas continuas, categóricas o binarias, las cuales se derivan de muestras y arrojan el coeficiente para cada variable (Sifuentes-Amaya y Ramírez-Valverde, 2010; Ozdemir, 2011). Estos coeficientes se utilizan como ponderaciones en el algoritmo, en el caso de las aplicaciones en los sistemas de información geográfica se pueden usar para producir mapas que muestran la probabilidad de susceptibilidad para un determinado fenómeno. En el enfoque SIG las variables independientes de este modelo pueden tener valores de cero y uno, estos valores representan tanto la usencia como la presencia de pixeles o sitios para este caso de manantiales. Los resultados del modelo entre cero y uno muestran el resultado de los pixeles susceptibles al fenómeno estudiado (Ozdemir, 2011). La ecuación general de la regresión logística es como sigue:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_mx_m$$

$$y = \log_e \left( \frac{P}{1 - P} \right) = \text{logit}(P)$$

$$P = \frac{e^y}{1 + e^y}$$

Donde,  $x_1, x_2, \dots, x_m$  son variables explicativas, e  $y$  es una función de combinación lineal de las variables explicativas que representan una combinación lineal. Los parámetros  $b_1, b_2, \dots, b_m$  son los coeficientes de regresión a estimar. Si  $k$  se toma como una variable de respuesta binaria (0 o 1), el valor 1 ( $k=1$ ) significa la presencia de un manantial y el valor 0 ( $k=0$ ) indica la ausencia de un

manantial.  $P$  es la probabilidad de ocurrencia de un manantial, es decir,  $k=1$ . La función  $y$  se representa como logit ( $P$ ), es decir el logaritmo a base  $e$  de la razón de probabilidades o probabilidad de que la variable dependiente  $k$  sea 1 (Ozdemir, 2011).

### **2.2.3. Árbol de clasificación y regresión (CART)**

El método del árbol de clasificación y regresión (CART, por sus siglas en inglés) es una técnica informativa ya que la representación de la información que realiza es intuitiva y fácil de visualizar. Además este método abarca una técnica de regresión no paramétrica que "hace crecer" un árbol de decisión basado en un algoritmo de partición binario que divide recursivamente los datos hasta lograr que los grupos sean homogéneos o contengan observaciones por encima del umbral definido por el usuario (Aertsen et al., 2010; Naghibi et al., 2016). El valor predicho de un nodo "terminal" es el promedio de los valores de respuesta de ese nodo (Aertsen et al., 2010). Para este caso la ubicación de los manantiales son los predictores candidatos. Por otra lado los factores predictores pueden ser de cualquier tipo (numéricos, binarios, categóricos etc...), otra ventaja es que los resultados del modelo no se ven afectados por las transformaciones monótonas y las diferentes escalas de medición entre los predictores (un ejemplo es que para este trabajo se utilizan los factores de precipitación y elevación los cuales se miden en mm y m respectivamente) (Aertsen et al., 2010; Naghibi et al., 2016). Los árboles de regresión son insensibles a los valores atípicos y pueden acomodar los datos faltantes en los factores de predicción con el uso de sustitutos. Para evitar sobreajuste existe un procedimiento llamado "poda" el cual consiste en cortar divisiones que tienen menor importancia en términos de desviación explicativa de forma recursiva (Naghibi et al., 2016). Existe una regla de dosificación modificada que se basa en una comparación directa de la distribución del atributo objetivo en dos nodos secundarios (Naghibi et al., 2016). La ecuación se muestra a continuación:

$$I(Split) = \left[ 0.25(q(1 - q)) \sum_k^u \backslash PL(k) - PR(k) \backslash \right]^2$$

Donde  $k$  indexa las clases objetivo,  $PL(k)$  y  $PR(k)$  son las distribuciones de probabilidad del objetivo en los nodos secundarios izquierdo y derecho respectivamente, y el término de potencia  $u$  incorpora una penalización controlable por el usuario en las divisiones que generan nodos secundarios de tamaño desigual (Naghbi et al., 2016).

El resultado del CART es un árbol binario jerárquico que subdivide el espacio de predicción en regiones donde los valores del factor de respuesta son similares.

Los métodos descritos se han utilizado en diferentes regiones geográficas de todo el mundo y con diferentes resultados. En el 2011 Ozdemir utilizó tres métodos distintos en una sola investigación para obtener el potencial de manantiales en Las Montañas del Sultán (Turquía). Los modelos utilizados fueron relación de frecuencia, pesos de evidencia y regresión logística, midiendo la capacidad de predicción de cada modelo con el área bajo la curva, característica de la curva de operación. Los resultados quedaron como sigue: relación de frecuencia (0.903), pesos de evidencia (0.880) y regresión logística (0.840). El modelo más exitoso para su zona de estudio fue la relación de frecuencia, mientras que la regresión logística fue el método que le dio peores resultados.

## **2.3. Materiales y métodos**

### **2.3.1. Descripción de la zona de estudio**

#### **2.3.1.1. Ubicación**

La zona de estudio para este trabajo es la Región de Rioverde, la cual se encuentra en la Zona Media del Estado de San Luis Potosí abarcando principalmente los municipios de Rioverde y Ciudad Fernández (Figura 1). Los principales núcleos poblacionales de la Zona Media son las cabeceras municipales de estos municipios las cuales llevan el mismo nombre respectivamente. La ubicación geográfica de las cabeceras municipales queda como sigue, 21° 55 '55" N, 99° 59' 34" O para Rioverde y 21° 56' 36" N, 100° 0' 39" O para Ciudad Fernández. Los municipios colindantes con la zona de estudio son: al Norte Cerritos, Ciudad del Maíz y Villa Juárez, al Este Alaquines, Cárdenas y Rayón, al Oeste San Nicolás Tolentino y al Sur con Santa María de Río, San Ciro de Acosta y el Estado de Guanajuato. La zona de estudio forma parte una planicie conocida como el "Valle de Rioverde" la cual tiene una elevación promedio de 900 m.s.n.m. y además también forma parte del acuífero administrativo con clave 2415 de nombre "Acuífero de Rioverde" el cual abarca un área de 2,782.6 km<sup>2</sup>. Esta zona pertenece a la región hidrológica 26 (Cuenca del bajo Pánuco) y a su vez esta pertenece a la región 9 (Golfo-Norte) de las regiones hidrológico-administrativas (Charcas y Olivares, 2002; Ballín-Cortés, 2003; DOF, 2014; Díaz-Rivera, 2015).

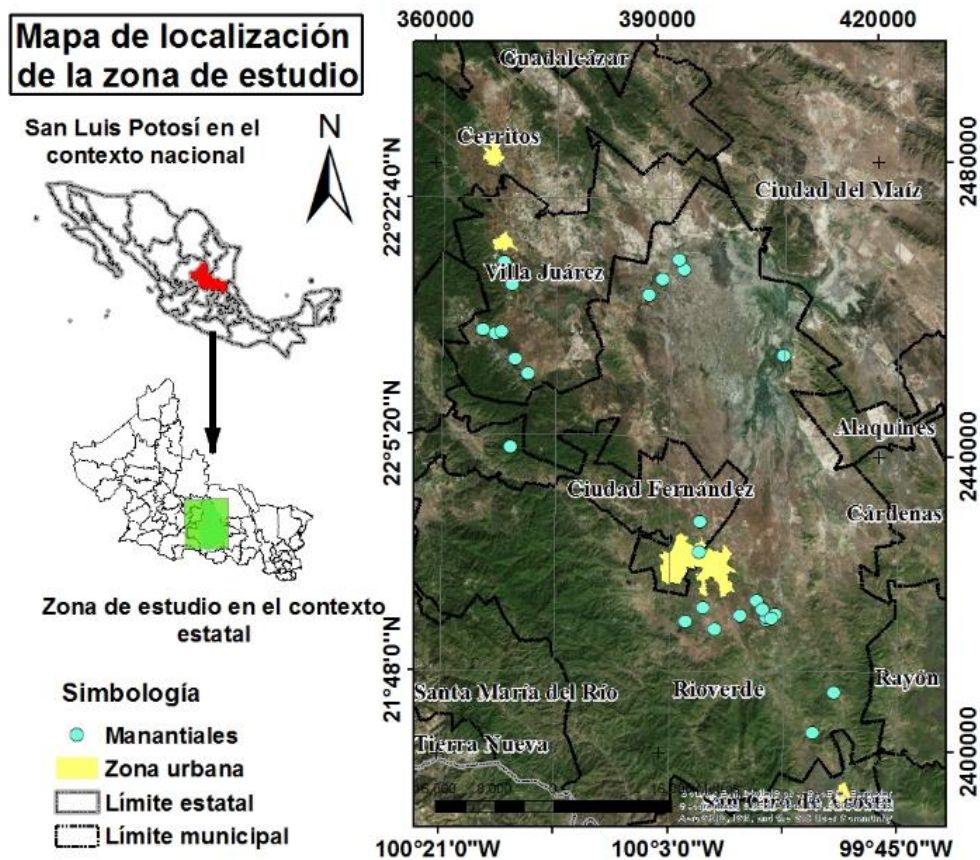


Figura 1. Localización de la zona de estudio.

### 2.3.1.2. Aspectos socioeconómicos de la zona

Los municipios de Ciudad Fernández y Rioverde cuentan con una extensión territorial aproximada de 367.5 km<sup>2</sup> y 3,242 km<sup>2</sup> respectivamente, representando así el 6% aproximado del total del Estado en este sentido. De acuerdo al Censo de Población y Vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en el 2010, la población de estos municipios fue de 91,924 habitantes para Rioverde y 43,528 habitantes para Ciudad Fernández, cabe mencionar que las cabeceras de estos municipios están conurbadas, por tal situación están dentro de las cinco zonas más pobladas de San Luis Potosí, además de acuerdo a este mismo censo Rioverde-Ciudad Fernández están el lugar 56 de las 59 Zonas Metropolitanas de México, la Zona Metropolitana de San Luis Potosí (San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez) se encuentra en la posición 11 (INEGI, 2010).



En cuanto a educación existen los medios necesarios, contando con jardín de niños, primaria, secundaria, preparatoria y licenciatura, habiendo instituciones públicas y privadas de todos los niveles mencionados, además también cuenta con instituciones de capacitación para el trabajo. Dentro de estas instituciones destacan los Colegios de Bachilleres (COBACH) plante 05 (Ciudad Fernández) y 20 (Rioverde) así como la Unidad Académica Multidisciplinaria de la Zona Media (UAMZN) de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) (Ballín-Cortés, 2003).

La agricultura es la actividad económica más importante de esta región, tanto la modalidad de riego y temporal. Los cultivos que más se siembran son: maíz, frijol, chile, tomate y algunos cítricos principalmente la naranja la cual es la principal fuente de ingresos para estos municipios (Ballín-Cortés, 2003; Rocha-Escalante, 2008). Según estadísticas reportadas por Ballín-Cortés, 2003 la producción anual de naranjas tan solo en el municipio de Rioverde es de alrededor de 24,000 toneladas representando cerca del 10% de la producción de todo el estado. Otra de las actividades importantes en la zona es la ganadería, sobresalen la producción de ganado vacuno, porcino, ovino, caprino y equino. En menor medida la silvicultura representa otra de las actividades importantes de la zona.

### **2.3.1.3. Clima**

En la zona de estudio se presentan condiciones climáticas variadas, en la parte sur se puede notar un clima subhúmedo debido a las serranías de esa parte, en la parte central donde se concentra la mayor parte de la población así como la zona agrícola se observa un clima semiseco, mientras que en la parte norte se observa un clima seco (DOE, 2000). Sin embargo en la mayor parte de la región predomina el clima seco. En verano se alcanzan temperaturas que revesan los 40 °C, mientras que en invierno se perciben temperaturas de hasta 0 °C (Ballín-Cortés, 2003). De acuerdo a las estaciones de la región la temperatura media anual es de 22 °C. El régimen de precipitación es en verano en algunas ocasiones extendiéndose hasta el otoño, mientras que en invierno generalmente ocurren escasas lluvias, al igual que el clima la precipitación pluvial anual es también

variada a lo largo de la zona de estudio, pero los rango promedios de precipitación media anual oscila entre los 400 y 700 mm (UASLP, 2005; Ballín-Cortés, 2003; CONAGUA, 2006).

Diferentes Instituciones e investigadores han realizado estadísticas sobre el clima del Valle de Rioverde, generalmente obteniendo resultados parecidos, en la tabla 1 se observan las estaciones climatológicas más utilizadas para la obtención de datos.

Tabla 1. Estaciones climatológicas usadas para estimar las características climatológicas más importantes de la zona de estudio. Fuente: Adaptada de CONAGUA, 2006.

<b>Estación climatológica</b>	<b>Superficie (km<sup>2</sup>)</b>	<b>hp anual (km<sup>2</sup>)</b>
20 de Noviembre	209.32	1326.44
Armadillo	610.88	570.4
Guadalcázar	731.68	680.03
Lagunillas	229.52	574.96
Libertad	461.88	551.31
Paso de San Antonio	994.13	626.4
Pastora	1112.78	415.93
Pedro Montoya	882.09	478.85
Rayón	840.86	602.63
Rioverde	1245.26	475.58
San José de		
Albuquerque	172.63	427.32
Villa Juárez	1237.63	588.6
villa de Arriaga	332.28	417.48
Zaragoza	158.27	268.06

En la zona de estudio existe una variedad de climas. De acuerdo a la clasificación de Köppen y modificada por Enriqueta García (1974), la serranía nombrada “La

Mesa Larga” presenta un clima semicálidos subhúmedo con lluvias en verano A CW<sub>o</sub>, siendo el menos húmedo en su tipo con una precipitación media anual de entre 600 y 700 mm. Sin embargo, esta zona es de gran aportación para la recarga de acuíferos profundos del Valle de Rioverde (DOE, 2000).

La mayor parte de la zona de estudio es de clima Semiseco semicálido BS<sub>1</sub>hw, con precipitación en verano y un bajo porcentaje es invierno (DOE, 2000; CONAGUA, 2006). La parte norte y noreste del valle son las zonas menos habitadas de la región. Aquí, los ecosistemas predominantes son bosques de mezquite con un clima del tipo Semiseco semicálido (Bs<sub>o</sub>hw), con una precipitación anual ronda entre los 400 y 500 mm. Los vientos predominantes tienen dirección noreste, y soplan entre noviembre y abril, mientras que en dirección noroeste y oeste desde mayo hasta octubre (DOE, 2000).

#### **2.3.1.4. Fisiografía**

El Valle de Rioverde se encuentra ubicado en una planicie que pertenece a la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre Oriental. Esta provincia ocupa varias entidades federativas entre ellas se encuentra, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, San Luis Potosí, Querétaro, Tamaulipas, Hidalgo, Puebla y Veracruz. La mayoría de las montañas están constituidas por rocas de origen marino, calizas y lutitas. Estas rocas están dobladas en forma de pliegues formando una sucesión de crestas alternadas con bajos, los límites van desde la frontera norte del país hasta el eje Neovolcánico en Pachuca Hidalgo. Además está formada por sierras menores, que producen una topografía de ondulaciones fuertes. La zona de la planicie tiene una elevación promedio de 1,100 m.s.n.m., pero en las serranías la elevación puede alcanzar hasta los 2,400 m.s.n.m. El material predominante es de calizas, lo cual se manifiesta en los rasgos cársticos, tal situación se da como resultado de la disolución de las rocas por el agua, los más comunes son sistemas cavernarios y depresiones (DOE, 2000; CONAGUA, 2006). La morfología de la cuenca del Rioverde ha sido el resultado de una intensa evolución geológica, entre los principales se encuentra, meteorización, denudación y erosión, como se mencionó anteriormente la zona es principalmente cárstica, los procesos

geológicos que más han afectado son la formación de fallas, levantamiento y extrusión de rocas volcánicas (DOE, 2000). A continuación se relatan brevemente las principales zonas y formas de la zona:

Región suroeste.- Esta área es perteneciente a la provincia de la Sierra Madre Oriental, pero específicamente a la subprovincia del Carso Huasteco en las Sierras Altas de Laderas Abruptas, el área que abarca esta entre San José de las Flores (21° 57' 36.66" N, 100° 9' 2.70" O) y La Loma (21° 53' 47.26" N, 100° 5' 51.11" O). El resto de esta Sierra se encuentra entre El capulín (21° 49' 39.66" N, 100° 2' 28.44" O), San José del Tapanco (21° 46' 21.20" N, 99° 54' 32.88" O) y Santa Isabel (21° 49' 56.58" N, 99° 52' 21.97" O) y pertenece a la Sierra Laderas Convexas (DOE, 2000).

Región poniente.- En esta área se ubica la porción terminal de la Sierra de la Noria y pertenece a Subprovincia Sierras Occidentales a la Sierra Pliegue con Llanuras. Una parte en la zona oriental abarca las estribaciones de una Sierra orientada noroeste-sureste llamada Cordón de la localidad de San Francisco (22° 4' 34.49" N, 99° 51' 38.09" O) y que pertenece a la Sierra Pliegue (DOE, 2000).

Llano.- representando la parte plana del Valle, esta zona se encuentra hacia la parte norte y se puede decir que se divide de poniente a oriente, por la planicie entre Pastora (22° 8' 1.33" N, 100° 3' 27.65" O) y 20 de Noviembre (21° 58' 44.64" N, 100° 2' 59.04" O), pertenece a la Subprovincia Sierras Occidentales y la Llanura de Piso Rocoso, un área de menor tamaño ubicada en la esquina noreste pertenece a la Subprovincia llamada Lomerío. Mientras que la parte central del Llano a ambos lados de la vía del ferrocarril, pertenece de igual manera a la subprovincia de las Sierras Occidentales en la unidad fisiográfica Llanura Salina. El resto del área ubicada al norte del río que forma la porción oriental pertenece a la unidad de Llanura de Piso Rocoso (DOE, 2000).

Región Sur.- porción sur del río Verde, esta es la zona más importante económicamente hablando para la zona de estudio, ya que es la principal zona

agrícola pertenece a la Subprovincia de las Sierras Occidentales a la unidad Piso Bolsón (DOE, 2000).

Finalmente otros aspectos importantes que componen la zona de estudio en lo referente a la fisiografía son:

Valle fluvial.- es el encauzamiento del río Verde que corta al valle abierto en forma transversal, es la geoforma más reciente de la región (CONAGUA, 2006).

Manantial.- Los manantiales se encuentran presentes dentro de toda la zona de estudio, pero la mayoría y los más importantes se encuentran en la margen derecha del río, el más importante de toda la zona de estudio es el manantial “Media Luna” y son de origen cárstico (CONAGUA, 2006).

Cañones.- estos se encuentran en la porción occidental del valle, y se forman por las Sierras acordonadas, entre ellos también se forman arroyos y pasan algunos segmentos de ríos (CONAGUA, 2006).

### **2.3.1.5. Edafología**

En la zona de estudio los suelos provienen de rocas sedimentarias de modo de formación aluvial, lacustres e in-situ, los suelos dependiendo su espesor se pueden encontrar desde profundos a poco profundos, según estudios en campo se encuentran suelos de más de 150 cm de profundidad hasta someros de 15 cm. Estos suelos presentan diferentes colores dependiendo su profundidad en los horizontes superficiales destacan los colores gris claro, café grisáceo o un café más oscuro, mientras en los horizontes profundos se pueden observar un color gris cafésáceo a naranja opaco.

En el sentido de las texturas varían de franco arenosas a francos arcillosos y arcilla. Mientras tanto los suelos a la margen izquierda del río Verde son texturas arenosas a las márgenes del río, arcillosas a poco profundas a medida en se alejan del cauce. Existen una gran cantidad de suelos desde los franco arenosos hasta arcillosos. Por el origen de la formación existen zonas con un elevado manto

freático en el centro de la zona de estudio, y para el norte existen grandes zonas con problemas de salinidad (CONAGUA, 2006).

Existe en esta zona once unidades de suelos diferentes, además estas unidades cuentan con subunidades, en estudios anteriores se han logrado cartografiar alrededor de 73 unidades de suelo, en las que se incluyen unidades y subunidades, además de características físicas, químicas y morfológicas. Las principales unidades de suelo son: Chernozem, Rendzinas, Feozem, Litosol, Fluvisol, Castañozem, Vertisol, Xerosol y Solonchak (DOE, 2000).

Los suelos predominantes por zona se describen a continuación:

Zona centro.- los límites de esta porción van desde Pastora ( $22^{\circ} 8' 1.33''$  N,  $100^{\circ} 3' 27.65''$  O) hasta la Muralla ( $22^{\circ} 9' 12.75''$  N,  $99^{\circ} 54' 21.46''$  O) y San Francisco ( $22^{\circ} 4' 34.49''$  N,  $99^{\circ} 51' 38.09''$  O), los suelos predominantes en esta zona son unidades del tipo Solonchak y Xerosol en diferentes grados de asociaciones y en diferentes grados de salinidad y sodicidad, y con una fase física limitante petrogypsica presente en gran parte del Valle, esta situación dificulta la agricultura sin embargo sostiene ecosistemas naturales muy importantes para la región principalmente mezquitales (DOE, 2000).

Zona nororiental y oriental.- en esta zona predomina el Xerosol en las partes bajas de la sierra Cordón de San Francisco tanto al norte como al sur del poblado. La mayoría de esta área presenta una fase petrocálcica tanto somera como profunda, esta condición es también una gran limitante para el potencial agrícola en esa área. Aun cuando las condiciones son muy difíciles para el desarrollo de la agricultura en la zona de San Francisco, la mayoría de los pobladores hacen de esta el medio más importante para mantener su economía. Esa zona agrícola se desarrolla sobre suelo Solonchak ligeramente sódico. En las estribaciones y sierra Cordón se presentan asociaciones de Litosoles, Xerosoles y Rendzinas (DOE, 2000).

Zona centro oriente.- área sobre la margen izquierda del río Verde, esta zona sigue con la tendencia de Solonchak, Xerosoles además algo de Chernozems,

estos suelos presentan diferentes grados de sodicidad y salinidad y fases físicas petrogypsicas someras y profundas, esta situación al igual que en la zona anterior también repercute en la producción agrícola. La porción del sureste del área ocupada por serranías, presenta asociaciones de Xerosoles, Litosoles y Feozems (DOE, 2000).

Margen derecha en el extremo sureste.- Esta rodeado de suelos asociados a pequeños cerros y serranías, Litosoles, Rendzinas, se presenta un área de Vertisoles asociados a Castañozems, en los alrededores de las localidades de El Obrajero (21° 50' 22.91" N, 99° 54' 34.07" O), El Huizachal (21° 49' 30.54" N, 99° 54' 44.70" O) y Plazuela (21° 48' 19.61" N, 99° 56' 20.56" O) en donde resulta una zona buena para la agricultura. De igual manera sobre la margen derecha, el extremo suroeste y sur del área está constituido por suelos que se desarrollan sobre rocas ígneas y calizas de la serranía, aquí se encuentran principalmente Litosoles, Feozems, Rendzinas en diferentes asociaciones, la topografía de esta zona permite la explotación sustentable de los recursos en su estado natural (DOE, 2000).

Margen izquierda.- se ubica al noreste a la altura de la localidad 20 de Noviembre (21° 58' 44.64" N, 100° 2' 59.04" O), en esta zona se encuentran Vertisoles, estos suelos son de los mejores en el zona de estudio en cuanto agricultura de riego se refiere. El resto de la zona agrícola, se desarrolla en un área que se ubica sobre suelos Feozems entre las localidades de La Loma (21° 53' 46.90" N, 100° 5' 54.60" O), El Aguacate (21° 51' 40.58" N, 100° 4' 50.31" O), El Jabalí (21° 53' 21.23" N, 100° 3' 20.05" O), Rioverde (21° 55' 49.77" N, 99° 59' 38.57" O), San Marcos (21° 54' 9.61" N, 100° 0' 15.82" O) y El Refugio (21° 55' 45.25" N, 100° 3' 3.64" O), esta zona corresponde también al área de riego del manantial Media Luna (DOE, 2000).

Sur de Rioverde.- Entre el manantial Media Luna (21° 51' 37.21" N, 100° 1' 40.27" O), Palomas (21° 50' 33.65" N, 99° 59' 34.06" O), Bordo Blanco (21° 51' 27.27" N, 99° 57' 37.17" O), La Virgen (21° 53' 42.87" N, 99° 56' 4.26" O) y El Carmen (21° 54' 26.40" N, 99° 58' 24.60" O), existen suelos Chernozem, Xerosol y Feozems

con fases físicas petrogypsicas, situación que hace esta zona poco apta para la agricultura (DOE, 2000).

Se puede decir que los mejores suelos son aquellos en los que se puede utilizar el potencial de la agricultura, tal es el caso, de la franja de suelos vertisoles entre las localidades 20 de Noviembre, Rioverde así como la zona entre La Loma, El Jabalí y El Refugio donde existe la presencia de Feozems en los que se desarrolla la agricultura de riego (DOE, 2000).

Las zonas restantes del Valle de Rioverde presentan importantes restricciones para el desarrollo la agricultura, por un lado “El Llano” presenta altas concentraciones de sodicidad, salinidad y fases someras petrogypsicas, mientras que al sur de Rioverde los Chernozem, Xerosol y Feozems limitan el potencial de la agricultura (DOE, 2000).

#### **2.3.1.5. Hidrología superficial**

La zona de estudio se encuentra dentro de la Región Hidrológica 26 y que coincide con la Cuenca Media del río Verde que a su vez es subafluente del río Tampaón, afluente del río Pánuco. El río Verde es un gran aportador al río Tampaón, su corriente nace 35 km al oriente de la ciudad de San Luis Potosí, a una elevación estimada de 2,600 m.s.n.m., cerca de las localidades de Armadillo (22° 16' 25.82" N, 100° 42' 41.41" O) y San Nicolás Tolentino (22° 14' 51.54" N, 100° 33' 12.47" O), en una cordillera al río Pánuco de la Región Hidrológica 37 (UASLP, 2005).

Los orígenes de los principales afluentes de la corriente provienen de la margen izquierda. Con una elevación de 1,600 m.s.n.m. en las inmediaciones de Villa Morelos (22° 15' 3.44" N, 100° 39' 32.35" O), describe una amplia curva que corta debajo de la población de San Nicolás Tolentino (22° 14' 53.62" N, 100° 33' 11.95" O), en la cual pasa por una zona montañosa en la que recibe aportaciones de ambas márgenes.



La estación hidrométrica Nogal Oscuro mide las aportaciones del Valle de Rioverde, las observaciones indican un escurrimiento medio anual de 125 millones de m<sup>3</sup>, estas aguas en conjunto con las provenientes de los manantiales Media Luna y Los Antejitos son usadas para el beneficio de las actividades agrícolas en este valle. Los volúmenes superficiales del manantial Media Luna son determinados mediante aforos realizados en los canales que desaguan el manantial (El Capulín, Fernández, Potrero de Palos, Rioverde y San José), el gasto medio anual estimado es de 5.5 m<sup>3</sup>/s. En tanto el volumen del manantial Los Antejitos se derivan del canal que lleva el mismo el nombre, y se afora en la estación hidrométrica Los Antejitos con gastos estimados entre 0.065 y 0.279 m<sup>3</sup>/s. Después de pasar por La parte plana del Valle de Rioverde, unos 15 km adelante, atraviesa por una zona topográficamente accidentada, estas características se mantienen la confluencia con el río Santa María, en esta zona se encuentra la estación hidrométrica Vigas, en la cual se mide los escurrimientos de salida o no aprovechados por el río Verde, en la que se mide un escurrimiento anual de 202 millones de m<sup>3</sup> (DOE, 2000).

Entre los principales aportadores al río Verde en su cuenca media son: los arroyos Choy y Peroles en la margen izquierda del río, mientras tanto en la margen derecha los arroyos de La Loma, San Diego y Grande. En cuanto a las características del río Verde, este tiene una longitud aproximada de 180 km desde su nacimiento hasta su confluencia, el tramo presente en el Valle de Rioverde tiene un régimen permanente en Ciudad Fernández debido a las aportaciones de los manantiales Media Luna y Antejitos. El flujo se ve incrementado en las cercanías de la estación hidrométrica Vigas gracias a las aportaciones de materiales de relleno.

Tabla 2. Manantiales aportadores al río Verde más importantes del Valle de Rioverde.

<b>Nombre</b>	<b>Gasto (lps)</b>
Media Luna	4,200
Anteojitos	1,500
Ojo de Agua de Solano	100
Puerta del Río	200
La Muralla	20

Fuente: Adaptada de UASLP (2005).

#### **2.3.1.6. Hidrología subterránea**

En el Valle de Rioverde se pueden encontrar diferentes condiciones en cuanto a disponibilidad, accesibilidad y calidad de agua subterránea. El acuífero granular conformado en el aluvión reciente es sin duda el que tiene las mejores condiciones de aprovechamiento. Este acuífero se sitúa en la zona entre las localidades de San Diego, El Jabalí, El Refugio, Ciudad Fernández, Colonia Veinte de Noviembre y Ojo de Agua de Solano, aunque la mayor parte se encuentra en la margen derecha del río Verde. En esta zona se reporta que la profundidad del nivel estático varía entre 0 y 40 m, los caudales obtenidos varían entre 15 y 65 l/s, además la calidad de agua es muy buena con un contenido de STD inferior a las 1,000 ppm. El resto de la zona está conformado de sedimentos lacustres, en lo que se obtiene en general agua de mala calidad con valores de STD mayores a las 1,000 ppm, esta zona se encuentra ubicada principalmente en la parte norte del Valle en la margen izquierda del río Verde (DOE, 2000; UASLP, 2005).

Acuífero Calizo.- Este acuífero tiene niveles que superan la superficie del terreno, esta situación beneficia la formación de manantiales, entre los que destacan La Media Luna, Los Anteojitos, Los Peroles, Charco Azul y los formados en las cercanías de La Laborcilla. Estas calizas son de distribución regional en toda la provincia de la Sierra Madre Oriental, por lo cual se habla de recarga regional y la

descarga se da principalmente en los manantiales como ya se ha mencionado. El aprovechamiento de estos manantiales es principalmente para riego.

Acuífero Granular.- El agua extraída de este acuífero son utilizadas para el suministro de agua potable a la zona conurbada de Rioverde-Ciudad Fernández, además es utilizada en mayor proporción para la agricultura siendo obtenida a través de pozos y norias. Este acuífero está constituido por materiales arcillosos y arenosos con algunas gravas. Estos materiales son más gruesos sobre la margen derecha del río Verde y más finos y arcilloso sobre la margen izquierda. Sobre la margen izquierda del río Verde generalmente se encuentra una capa de yesos y caliches, lo que provoca la disminución de la capacidad de infiltración y satura el agua de sulfatos y carbonatos deteriorando la calidad del agua (DOE, 2000).

#### **2.3.1.7. Geología**

La geología de la zona se puede reconstruir a partir de las rocas sedimentarias marinas de edad cretácica, las cuales forman parte de las altas cuencas, estas a su vez tiene su correspondencia con fenómenos de plegamiento que se registran en la secuencia; para la caracterización de estructuras anticlinales y sinclinales normales y recumbentes. Dichas estructuras tiene una orientación preferente noreste (NE), suroeste (SW) y buzamiento hacia el sureste (SE) para sus ejes axiales (Ballín-Cortés, 2003).

Al final del Cretácico posterior al plegamiento regional mencionado, los fenómenos denudatorios de las tierras emergidas propiciaron el relleno de las cuencas a tomar forma de la configuración actual. Posterior a esta intensa erosión, inicio un proceso de extravasación de emisiones basálticas, este fenómeno tuvo impacto en la parte sur de la cuenca propiciando el cierre superficial en esa zona. En la zona predominan importantes depósitos de caliche, la explicación aceptada para esta situación es la incidencia de medios climáticos de extremada aridez. De esta manera queda establecida se establece la estructura superficial de la zona, con estudios geofísicos se ha determinado que existe una continuidad de las estructuras mencionadas en el subsuelo del Valle. Esta correspondencia se

observa principalmente en la influencia de emisiones de composición acida y básica, sedimentos arcillo-calcáreas con materiales evaporíticos y en apariencia rocas calcáreas subyacentes a profundidades de 100 a 300 m (Ballín-Cortés, 2003).

Geológicamente en Valle de Rioverde se ubica dentro de la plataforma Valles-San Luis Potosí, siendo este un elemento palogeográfico de la edad Mesozoica sobre la cual se depositaron rocas evaporíticas y rocas de tipo arrecifal y post-arrecifal. Las rocas mesozoicas fueron intensamente plegadas debido la Orogenia Laramide, originando los rasgos estructurales actuales que se observan en la zona (Ballín-Cortés, 2003).

#### **2.3.1.8. Descripción geohidrológica**

La zona geohidrológica de Rioverde forma parte de la unidad de edad Mesozoica, la cual fue descubierta en trabajos de Geología superficial por Petróleos Mexicanos y fue denominada como Plataforma Valles-San Luis Potosí. Se puede describir como un gran segmento de rocas precámbricas, paleozoicas y triásicas, plegadas y falladas y sobre el cual se depositaron una secuencia de sedimentos marinos del Jurásico Superior y en el Cretácico Inferior potentes secciones de rocas evaporíticas (Formación Guaxcamá); posteriormente en el periodo Albiano, se depositaron rocas calizas de tipo arrecifal y post-arrecifal con un gran espesor, este conjunto fue denominado Formación el Abra. En el Cretácico Superior se desarrolla la secuencia de lutitas, areniscas y calizas las cuales dan paso a la Formación Cárdenas. El plegamiento que durante el Terciario Inferior estuvo afectando esta unidad fue altamente intenso e influenciado por las evaporitas que se encuentran entre las rocas ígneas, aunque fue intensa en algunos sitios, en general es de tipo extrusivo (UASLP, 2005).

Como se menciona anteriormente durante la Orogenia Laramide, se originó un graben que dio paso a una cuenca cerrada de profundidades someras y fue rellenada por abanicos aluviales, conglomerados polícticos mal clasificados así como sedimentos lacustres y precipitados químicos como carbonatos y sulfatos,

estos dos últimos componen principalmente la porción septentrional, por el aporte de la Formación Guaxcamá. La formación del encauzamiento del río Verde de origen debido a un agrietamiento regional con dirección WNW-ESE en el cuaternario, el río Verde captura los escurrimientos del Valle así como las descargas de los manantiales cársticos. Un caso especial se presenta la zona de El Refugio-Ciudad Fernández donde un bloque rejuveneció localmente, depositándose así materiales granulares de composición riolítica, el aluvión reciente, y es aquí donde se encuentra el acuífero de buena calidad de agua en la región de Rioverde.

Tabla 3. Columna estratigráfica de Labarthé (1989).

<b>Edad</b>	<b>Formación</b>	<b>Clasificación</b>
Cuaternario	Aluvión Reciente	Acuífero de buena calidad de agua
	Sedimentos Lacustres	Acuitardos, acuíferos de baja permeabilidad
	Travertino	
	Conglomerados polimícticos	Acuífero/Acuífugo
	Basaltos	Acuífugo/Acuífero
Terciario	Ignimbrita El Órgano	Acuífugo/Acuitardo
	Riodacita El Carmen	Acuífugo/Acuitardo
Cretácico	Formación Cárdenas	Acuitardo
	Formación Soyotal	Acuitardo
	Formación El Abra	Acuífero
	Formación Guaxcamá	Acuífero

Fuente: Adaptada de UASLP, 2005.

## 2.4. Metodología

### 2.4.1. Generación de la base de datos de los manantiales

Se realizaron recorridos en campo para ubicar y referenciar los manantiales más importantes dentro del valle. Se recolectó información de 27 manantiales, ubicados en tres diferentes municipios (Rioverde, Ciudad Fernández y Villa Juárez), los cuales tenían el suficiente caudal para formar un cuerpo de agua. Los manantiales visitados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4. Manantiales visitados en campo.

Manantial	Latitud Norte	Longitud Oeste	Vegetación dominante
<b>Media Luna</b>	21° 51' 39.50"	-100° 01' 41.23"	Matorral submontano
<b>Anteojitos</b>	21° 52' 40.80"	-100° 00' 18.00"	Halófila xerófila
<b>La Virgen</b>	21° 53' 09.60"	-99° 56' 02.40"	Halófila xerófila
<b>El Carrizalito</b>	21° 51' 46.80"	-99° 55' 19.20"	Bosque de Mezquite
<b>Agua Sonadora</b>	21° 52' 01.20"	-99° 55' 19.20"	Matorral
<b>Charco Azul</b>	21° 52' 33.60"	-99° 55' 33.60"	Bosque de Mezquite
<b>Laguna de Jocolixtle</b>	21° 43' 31.66"	-99° 51' 41.58"	Matorral submontano
<b>La Castilla</b>	21° 51' 57.60"	-99° 54' 57.60"	Matorral
<b>La Lagunita</b>	22° 17' 31.20"	-100° 01' 55.20"	Bosque de Mezquite
<b>San Bartolo</b>	22° 18' 10.80"	-100° 02' 20.40"	Bosque de Mezquite
<b>San Sebastián</b>	21° 46' 30.00"	-99° 49' 58.80"	Matorral submontano
<b>Puerta de Piedra</b>	21° 52' 12.00"	-99° 54' 36.00"	Matorral submontano
<b>Santa Rosa</b>	22° 15' 36.00"	-100° 04' 40.80"	Bosque de Mezquite
<b>Mojarras</b>	22° 16' 44.40"	-100° 03' 39.60"	Bosque de Mezquite
<b>Los Peroles</b>	22° 11' 13.20"	-99° 54' 03.60"	Halófila xerófila
<b>Guaxcamá</b>	22° 12' 50.40"	-100° 16' 19.20"	Matorral submontano
<b>El Bañito</b>	22° 16' 19.20"	-100° 15' 32.40"	Bosque de Mezquite
<b>Ojito de Cd. Fdz.</b>	21° 56' 45.60"	-100° 00' 36.00"	Matorral submontano
<b>Puerta del Río</b>	22° 14' 25.33"	-100° 15' 31.67"	Matorral submontano
<b>La Cueva</b>	22° 13' 01.20"	-100° 17' 49.20"	Matorral submontano
<b>Carrizalito</b>	22° 10' 48.00"	-100° 15' 10.80"	Matorral submontano
<b>Ojo de León</b>	22° 17' 56.40"	-100° 16' 08.40"	Bosque de Mezquite
<b>Agua del Medio</b>	22° 09' 50.40"	-100° 14' 13.20"	Bosque de Mezquite
<b>Guaxcamá Hacienda</b>	22° 12' 43.20"	-100° 16' 48.00"	Matorral submontano
<b>La Taza</b>	21° 48' 58.80"	-100° 00' 36.00"	Halófila xerófila
<b>Palma Larga</b>	21° 52' 08.40"	-99° 57' 25.20"	Bosque de Mezquite
<b>Palomas</b>	21° 51' 03.60"	-99° 59' 24.00"	Bosque de Mezquite

Los 27 manantiales muestreados fueron divididos aleatoriamente en dos conjuntos de datos; el 70% (19 manantiales) se usaron para el entrenamiento del modelo y el 30% restante para validación (Figura 2), de acuerdo a la metodología empleada por Oh et al., 2011. Para generar el mapa del potencial de ocurrencia manantiales de agua subterránea (GSP) se diseñó y construyó una base de datos espacial de los factores relacionados con la ocurrencia de manantiales, la información base se obtuvo de diferentes fuentes; la información topográfica se construyó a partir del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la información geológica se obtuvo a partir las cartas geológicas del Servicio Geológico Mexicano (SGM), la información hidrológica se generó a partir de la carta topográfica del INEGI, de igual manera se utilizó la carta de uso de suelo y vegetación del INEGI, la precipitación de la zona se estimó a partir de la información de las estaciones climatológicas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Para aplicar el modelo de relación de frecuencia, toda la información obtenida (puntos, líneas y polígonos) se procesó para generar capas raster con un tamaño de pixel de 15 m. Las capas raster generadas tuvieron un área de 4,831 columnas por 7,101 con lo cual se obtuvieron capas de 34, 304,931 pixeles en total.

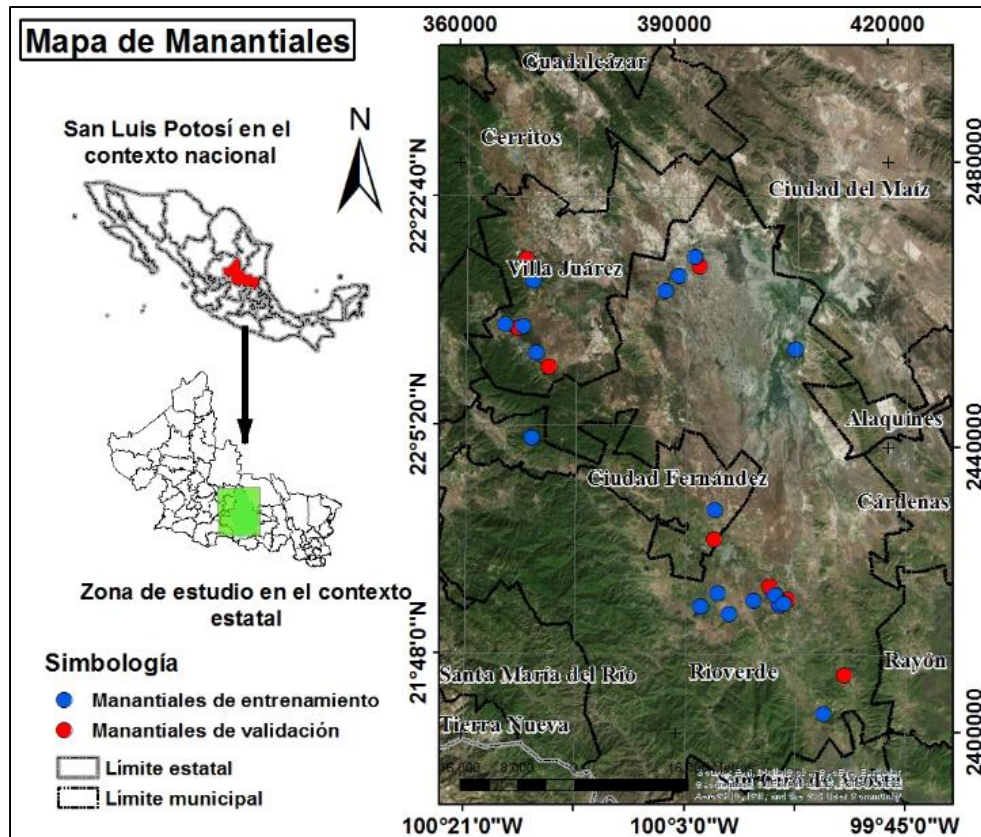


Figura 2. Manantiales de entrenamiento y validación utilizados para la modelación Relación de Frecuencia del potencial de ocurrencia de manantiales de agua subterránea.

#### 2.4.2. Factores que favorecen la ocurrencia de manantiales

La ocurrencia de manantiales está determinada por diferentes factores, es de suma importancia tener un acuífero rocoso fracturado para que el agua pueda moverse en el subsuelo fácilmente y brotar en la superficie. Además de esto las variables que más influyen para la aparición de manantiales son: a) topográficas, b) hidrológicas, c) ambientales, d) distribución de las capas freáticas, e) porosidad, f) geológicas, g) uso del suelo h) cobertura vegetal e i) recarga de agua subterránea (Ozdemir, 2011; Nampak et al., 2014). Dentro de los factores topográficos que controlan el flujo, se encuentra: la pendiente, el drenaje y la curvatura, la litología determina el tipo de roca del subsuelo la cual controla el régimen del flujo, dentro de las hidrológicas el sistema de escurrimientos que



influyen en la filtración al subsuelo, por último en las ambientales se encuentra la precipitación, la cual determina la cantidad de lluvia que se da en la zona y por tanto la cantidad de agua que llega a los acuíferos por infiltración (Ozdemir, 2011).

### **2.4.3. Factores seleccionados para el modelo del potencial de ocurrencia de manantiales**

Para generar el modelo del GSP se crearon capas temáticas de los factores que influyen en la ocurrencia de los manantiales, para este estudio se utilizaron doce factores que quedan como sigue: 1) Elevación (Figura 3a), 2) Pendiente (Figura 3b), 3) Longitud de pendiente (Figura 3c), 4) Aspecto de la pendiente (Figura 3d), 5) Curvatura (Figura 3e), 6) Índice de humedad topográfico (Figura 3f), 7) Litología (Figura 4g), 8) Precipitación (Figura 4h), 9) Densidad de drenaje (Figura 4i), 10) Stream Power Index (Figura 4j), 11) Distancia a los ríos (Figura 4k), y 12) Uso de suelo y Vegetación (Figura 4l). Los factores seleccionados para este trabajo han sido obtenidos de diferentes fuentes y formatos, en la tabla 5, se puede observar el tipo de formato de la información de origen para la creación de la capa final de cada uno de los factores. Algunos factores se reclasificaron en grupos para tener un mejor manejo de la información, los parámetros de reclasificación se han tomado de trabajos previos como Oh y Lee, 2011, Ozdemir, 2011, Adiat et al., 2012, Nampak et al., 2014, Moghaddam et al., 2015 entre otros.

#### **2.4.3.1. Elevación**

La elevación es un factor importante ya que refleja la topografía de la zona de estudio, además de esta variable se derivan otras como la pendiente, curvatura, aspecto de la pendiente, longitud de pendiente y TWI, también influye para la generación de otras como la densidad de drenaje. La elevación fue obtenida del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) descargada del Conjunto de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) disponible en el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y se utilizó la resolución espacial más alta disponible (15 m), cabe hacer mención que la información descargada está disponible en formato raster. La importancia de esta variable radica en distinguir las zonas de recarga

(zonas más altas) y zonas de descarga (zonas más bajas) así como la influencia en la dirección de las escorrentías. El punto más alto de la zona de estudio es de 2486 m.s.n.m. y el más bajo es de 716 m.s.n.m. (Figura 3a). Las elevaciones se clasificaron en cinco clases y quedaron como sigue: 1 (719 – 900 m), 2 (900 – 1,200 m), 3 (1,200 – 1,500 m), 4 (1,500 – 1,800 m), 5 (1,800 – 2,586 m).

#### **2.4.3.2. Pendiente**

Este factor se generó a partir del MDE, la pendiente es de suma importancia en cuanto al movimiento de las aguas superficiales pero que impacta fuertemente en la ocurrencia de aguas subterráneas. Las pendientes pronunciadas generan un movimiento más rápido en los escurrimientos mientras que en pendientes suaves el movimiento es menor lo que promueve la recarga subterránea así como ocurrencia de manantiales (Abdalla, 2012). La zona de estudio tiene un gran porcentaje de planicie, sin embargo se encuentra rodeado de serranías principalmente al sur lo que favorece la presencia de manantiales. La pendiente en la zona de estudio va desde los 0° hasta los 76°, por lo que existen pendientes muy inclinadas hasta planicie como se mencionó antes, este factor se clasificó en siete clases: 1 (0° - 3°), 2 (3° – 9°), 3 (9° - 15°), 4 (15° – 22°), 5 (22° - 29°), 6 (29° - 37°), 7 (>37°). En la figura 3b, se puede apreciar el factor pendiente.

#### **2.4.3.3. Longitud de Pendiente**

El factor de longitud de pendiente (LS), es la combinación de la inclinación de la pendiente y la longitud de la pendiente. Este factor entre otras cosas sirve para medir la capacidad del transporte de sedimentos en flujos superficiales así como el efecto de pérdida de suelo (Moghaddam et al., 2015; Naghibi et al., 2016). Para la generación de este factor se utilizó el MDE y la ecuación universal de la pérdida de suelos que queda como sigue:

$$LS = \left( \frac{Bs}{22.13} \right)^{0.6} \left( \frac{\sin \alpha}{0.0896} \right)^{1.3}$$

Donde LS= Longitud de pendiente,

$B_s$ = Área de captación específica

$\alpha$ = el área de la pendiente ascendente acumulativa que atraviesa un punto.

Una vez procesada la longitud de pendiente se reclasifico en 4 clases: 1 (1 – 10 m), 2 (10 – 20 m), 3 (20 – 30), 4 (> 30), donde se espera que las pendientes menos largas favorezcan la ocurrencia de los manantiales.

#### 2.4.3.4. Aspecto de la Pendiente

El aspecto de la pendiente es un factor relacionado con la inclinación de la misma, ya que de ello depende su orientación y es suma importancia porque influye en la dirección y velocidad de los flujos superficiales de agua (Naghbi et al., 2016). De igual manera que la pendiente se espera que las orientaciones planas favorezcan la ocurrencia de los manantiales (Ozdemir, 2011). Este factor fue generado con la ayuda del software ArcGis. El modelo en automático genera las orientaciones de las pendientes presentes en la zona de estudio (Figura 3d), este factor está clasificado en diez clases y quedan como sigue: 1 (Flat), 2 (North), 3 (Northeast), 4 (East), 5 (Southeast), 6 (South), 7 (Southwest), 8 (West), 9 (Northwest) y 10 (North).

Tabla 5. Datos generales de la información recolectada para la generación del modelo FR.

Factor	Fuente	Tipo de dato SIG	Escala	Unidad
<b>Elevación</b>	INEGI	Raster	15 X 15 M	M
<b>Uso de suelo y vegetación</b>	INEGI	polígono	1:250 000	Permeabilidad
<b>TWI</b>	Elaboración propia	Raster	15 X 15 M	Adimensional
<b>Litología</b>	SGM	polígono	1:50 000	Permeabilidad
<b>Precipitación</b>	CONAGUA	Punto		mm
<b>Distancia ríos</b>	INEGI	Línea	1:25 000	M
<b>Densidad de drenaje</b>	Elaboración propia	Raster	15 X 15 M	KM/KM <sup>2</sup>
<b>Pendiente</b>	Elaboración propia	Raster	15 X 15 M	Grados
<b>Longitud de pendiente</b>	Elaboración propia	Raster	15 X 15 M	M
<b>Curvatura</b>	Elaboración propia	Raster	15 X 15 M	(100/m)

<b>Aspecto de la pendiente</b>	Elaboración propia	Raster	15 X 15 M	Adimensional
<b>SPI</b>	Elaboración propia	Raster	15 X 15 M	Adimensional

#### 2.4.3.5. Curvatura

La curvatura representa la morfología de la topografía, la representatividad de esta variable radica en encontrar que tipo de curvatura se ajusta mejor a la ocurrencia de los manantiales (Manap et al., 2012). Este factor se generó a partir del MDE y se clasifica solo en tres clases: 1 (Cóncava), 2 (Plana) y 3 (Convexa) en la figura 3e, se puede apreciar la clasificación de este factor.

#### 2.4.3.6. Índice de Humedad Topográfico (TWI)

El índice de humedad topográfica (TWI, por sus siglas en inglés) es un factor que encuentra dentro de cada celda del raster la tendencia del agua a fluir a un cierto punto o también a la generación de escorrentías en la topografía del terreno así como la acumulación de flujos superficiales o subterráneos en ciertas zonas. Por lo tanto, el TWI está asociado directamente con la pendiente, entre más suave o plana sea, el TWI será mayor. Para generar este factor se utilizó el software ArcGis así como aplicando la ecuación siguiente:

$$TWI = Ln(\alpha / \tan B)$$

TWI=Índice de humedad topográfico.

$\alpha$ = Área de acumulación de flujo en m<sup>2</sup> (raster de acumulación x área del pixel);

B = Pendiente del terreno expresada en radianes.

Esta variable se reclasifico en cinco clases: 1 (6 – 9), 2 (9 – 11), 3 (11 – 13), 4 (13 – 15), 5 (15 – 30).

#### 2.4.3.7. Litología

Las formaciones geológicas son de suma relevancia en cuanto a la ocurrencia de manantiales se refiere ya que dependerá de esta y las fracturas que tenga para que el agua subterránea pueda circular por el subsuelo y emerger a la superficie

(Adiat et al., 2012). Este factor se obtuvo de plataforma GeoInfoMex disponible en la página del Servicio Geológico Mexicano, la escala en la que se presenta esta información de 1:50,000. La información de origen está disponible en polígonos, una vez obtenida se realizó un recorte acorde a la zona de estudio y las clases que se encuentran dentro del área son: 1 (Basalto Cubilete), 2(Calderones – Cedros), 3 (Cárdenas), 4 (El Abra), 5 (Guaxcamá), 6 (Aluvión), 7 (Riodacita del Carmen), 8 (Riolita panalillo), 9 (Serie Volcánica Atotonilco), 10 (Santa María – El Órgano – Cantera), 11 (Tamasopo), 12 (Tlanchinol).

#### **2.4.3.8. Precipitación**

La precipitación es un factor importante cuando se requiere realizar una estimación hidrológica, ya que es la principal fuente de recarga de sistema subterráneos, por otro lado condiciona la cantidad de agua a brotar sobre la superficie o extraída por medio de perforaciones (Ozdemir, 2011; Abdalla, 2012; Nampak, 2014). Para estimar este factor se utilizó la información de precipitación diaria de 39 estaciones meteorológicas distribuidas en el área de estudio abarcando el periodo de 1981 al 2015, dicha información se encuentra disponible en la Comisión Nacional del Agua. Posteriormente se obtuvo la precipitación media anual para cada año de cada estación y se realizó una interpolación para generar un raster de salida con la información a nivel de pixel con una resolución de 15 m. La precipitación varía desde los 167 a 1300 mm. La clasificación de sus clases queda como sigue: 1 (167 – 300 mm), 2 (300 – 500 mm), 3 (500 – 700 mm), 4 (700 – 900 mm), 5 (900 – 1,100 mm) y 6 (1,100 – 1,300 mm).

#### **2.4.3.9. Densidad de Drenaje**

El sistema de drenaje muestra la distribución espacial de las corrientes, e influyen en él la pendiente, la naturaleza de roca interior y el sistema de fracturas presentes en la zona. En general, el sistema de drenaje de una zona es un reflejo de la litología y las estructuras que se pueden encontrar ahí. En un entorno de permeabilidad baja, existe una tasa pobre de infiltración y estas características producen un sistema de drenaje más desarrollado (Abdalla, 2012; Moghaddam et

al., 2015). Para generar este modelo, se utilizó el MDE de la zona de estudio para generar las escorrentías, donde posteriormente se aplicó la siguiente ecuación:

$$Dd = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{Di}{A} (km)$$

Donde, Dd = Densidad de drenaje, Di = Total de la suma de todas las corrientes (km) y A = área del grid (km<sup>2</sup>). Finalmente este factor se clasificó en seis clases: 1 (0 – 0.3), 2 (0.3 – 0.6), 3 (0.6 – 0.9), 4 (0.9 – 1.2), 5 (1.2 – 1.5), 6 (> 1.5).

#### **2.4.3.10. Índice de potencia de las corrientes (SPI)**

Este factor hace referencia a la fuerza de las corrientes superficiales y su influencia en la erosión de las zonas específicas por donde corren (Moghaddam et al., 2015). Este factor fue generado a partir del MDE, al cual se le aplicó la siguiente ecuación:

$$SPI = A_s X \tan \beta$$

SPI= Stream Power Index

A= Área de captación específica

β= La gradiente de la pendiente medida en grados

Una vez generado este factor se clasificó en cuatro clases: 1 (-24 a -1.6), 2 (-1.6 – 0.16), 3 (0.16 – 1.7) y 4 (>1.7) en la figura 4j se observa el factor SPI.

#### **2.4.3.11. Distancia a los Ríos**

La distancia a ríos es un factor estrechamente ligado a la ocurrencia de los manantiales, debido a los sistemas de infiltración, por lo general los ríos más importantes en la zona de estudio se mantienen con agua durante todo el año. Para la generación de este factor se utilizó la capa de escorrentías disponible en el INEGI. Después de la generación de este factor se clasificó en cinco clases: 1 (0 –

100 m), 2 (100 – 200 m), 3 (200 – 300 m), 4 (300 – 400 m) y 5 (> 400 m). En la figura 4k, se puede observar el factor de distancia a los ríos.

#### **2.4.3.12. Uso de Suelo y Vegetación**

EL uso de suelo es de primordial importancia ya que tiene gran influencia en la infiltración del agua, la salida y el uso de esta. Las zonas agrícolas están asociadas a los manantiales, ya que en la zona de estudio el 100% de manantiales muestreados se usan para el riego de cultivos. Por otro lado la vegetación que los rodea es variada en todos los manantiales. Este factor fue obtenido de la serie VI de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación disponible en el INEGI. Las zonas identificadas son: 1 (Agricultura de Riego), 2 (Agricultura de temporal), 3 (Asentamientos humanos) 4 (Bosque de encino) 5 (Bosque de mezquite), 6 (Bosque de pino), 7 (Cuerpo de Agua), 8 (Matorral), 9 (Pastizal), 10 (Sin vegetación), 11 (Vegetación halófila xerófila) y 12 (Zona urbana).

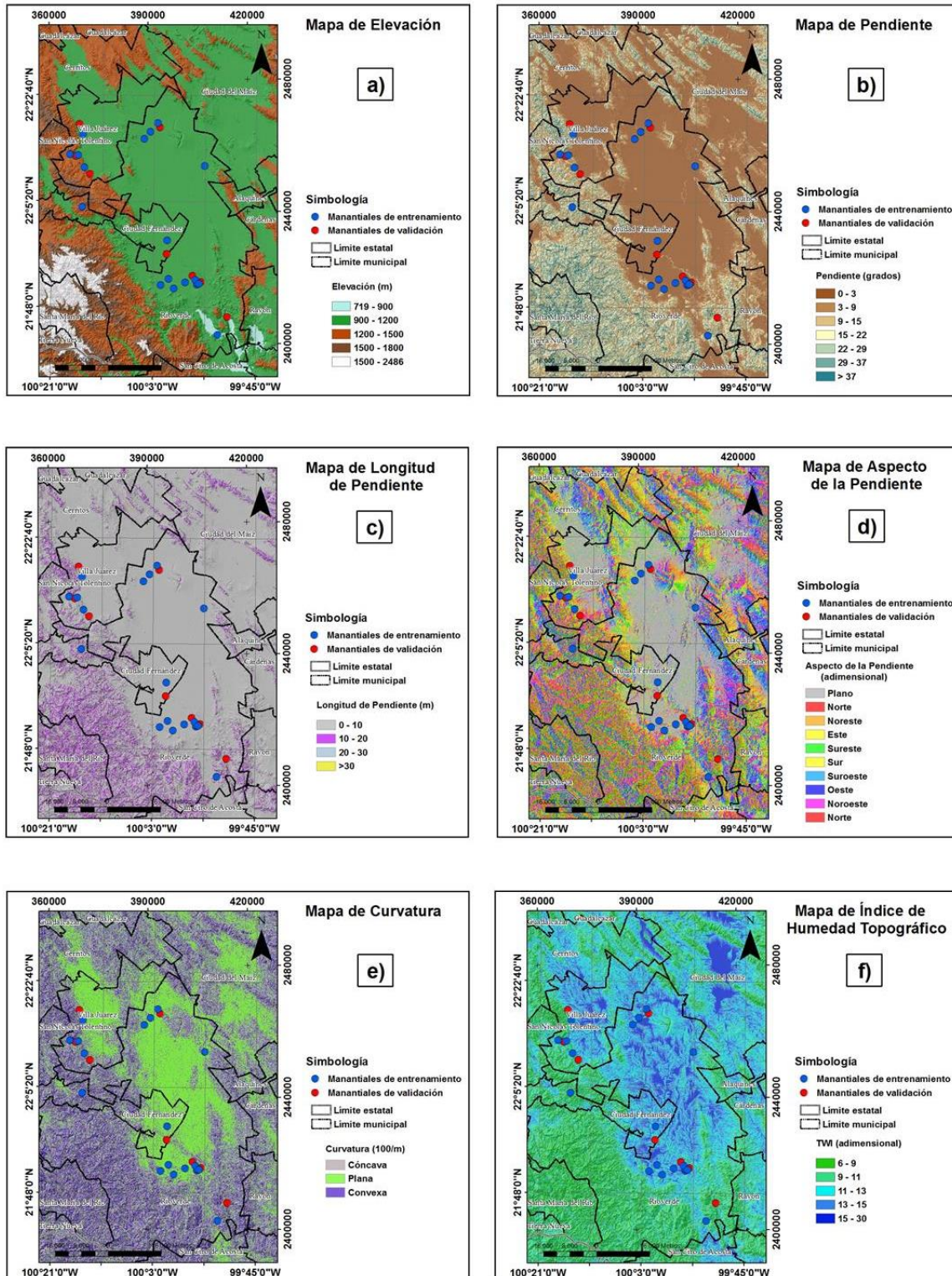


Figura 3. Factores utilizados para la modelación del potencial de zonas potenciales de manantiales: a) Elevación, b) Pendiente, c) Longitud de Pendiente, d) Aspecto de la Pendiente, e) Curvatura, f) TWI.



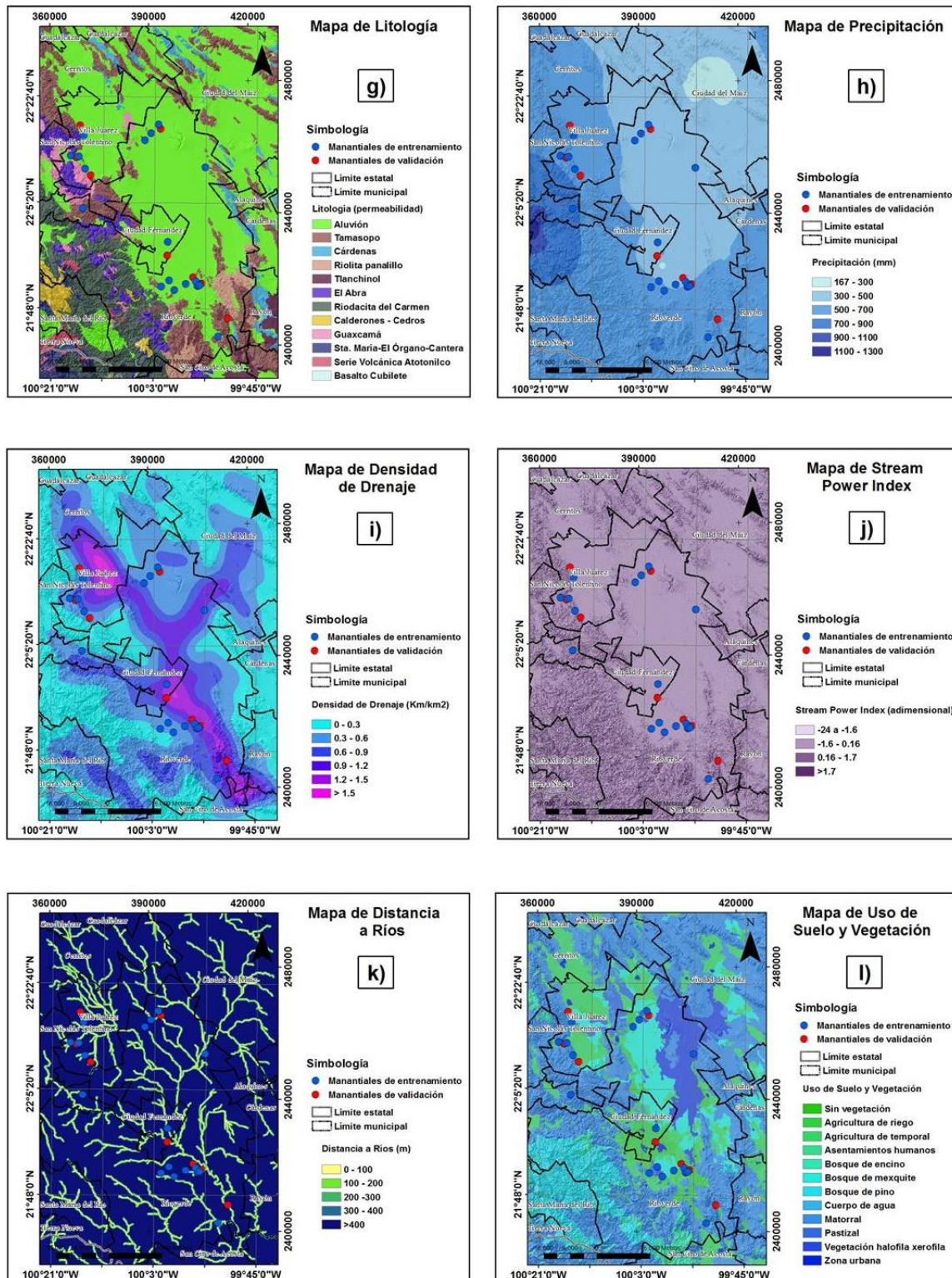


Figura 4. Factores utilizados para la modelación del potencial de zonas potenciales de manantiales: g) Litología, h) Precipitación, i) Densidad de Drenaje, j) SPI, k) Distancia a Ríos, l) Uso de Suelo y Vegetación.

#### 2.4.4. Método de Relación de Frecuencia (FR)

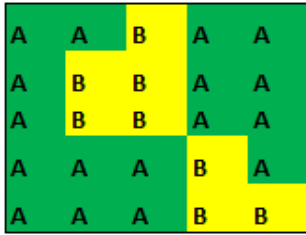
El modelo Relación de Frecuencia (FR), ha sido ampliamente utilizado para realizar modelos hidrológicos de algún fenómeno (Oh et al., 2012). Puntualmente ha sido usado para modelar zonas potenciales de probabilidad de manantiales, sobre todo en regiones áridas y semiáridas. Algunos de los investigadores que han utilizado este método para modelar zonas potenciales de aguas subterráneas son: Ozdemir, 2011, Moghaddam et al., 2015, Naghibi et al., 2016 entre otros.

La relación de frecuencia es la probabilidad de ocurrencia de un determinado evento (Oh et al., 2011). Si se crea un evento E y ciertos factores atribuidos a F, la relación de probabilidad-frecuencia F es la razón de la probabilidad condicional:

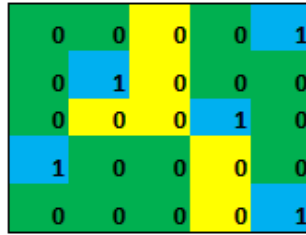
$$P\{E/F\} = (P\{E \cap F\})/P\{F\}$$

Donde E = evento de interés (factor dependiente) y F = factores involucrados o variables explicatorias (factores independientes).

Los pasos para calcular la relación de frecuencia para los factores son los siguientes: 1) georreferenciar las ubicaciones de los manantiales, 2) representar los pixeles de las clases de cada factor y 3) describir el área de superposición espacial para áreas de manantiales y áreas de cada clases para cada factor (Oh et al., 2011). A manera de ejemplo, se describe el siguiente caso de un factor (1) para encontrar la relación de frecuencia. El área de estudio tiene un total de 25 pixeles y se localizan un total de 5 manantiales en los cuales los pixeles con presencia de manantiales se representan con 1 y los pixeles sin presencia de manantiales con 0, el factor 1 se divide en dos clases (A y B), la clase A tiene un área de 17 pixeles (68% del total del área) y la clase B tiene un área de 8 pixeles (32% del total del área). La clase tiene un total de 3 pixeles con presencia de manantiales (60% del total de manantiales) y la clase B tiene presencia en 2 pixeles (40% del total de manantiales). La FR de cada clase es el % de manantiales/ % del área. Por lo tanto la FR de la clase A es de 0.88 y para la clase B es de 1.25 (Figura 5).



Representación de las clases A y B para el factor 1



Representación de la presencia de manantiales



FR para las clases A y B del factor 1

- 1) Área total de la zona estudio para este caso 25 pixeles
- 2) Área total para la clase A= 68% y B= 32%
- 3) Total de manantiales en la zona de estudio para este caso 5
- 4) Total de manantiales para la clase A= 3 (60%) y B= 2 (40%)
- 5) FR para la clase A:  $60\% / 68\% = 0.88$  y B:  $40\% / 32\% = 1.25$

Figura 5. Diagrama representativo para el cálculo de los valores de FR.

En la figura 6. Se muestran el diagrama de flujo de los procesos que se aplicaron a los datos de entrada para la generación del modelo del potencial de manantiales de agua subterránea con la aplicación del método de relación de frecuencia.

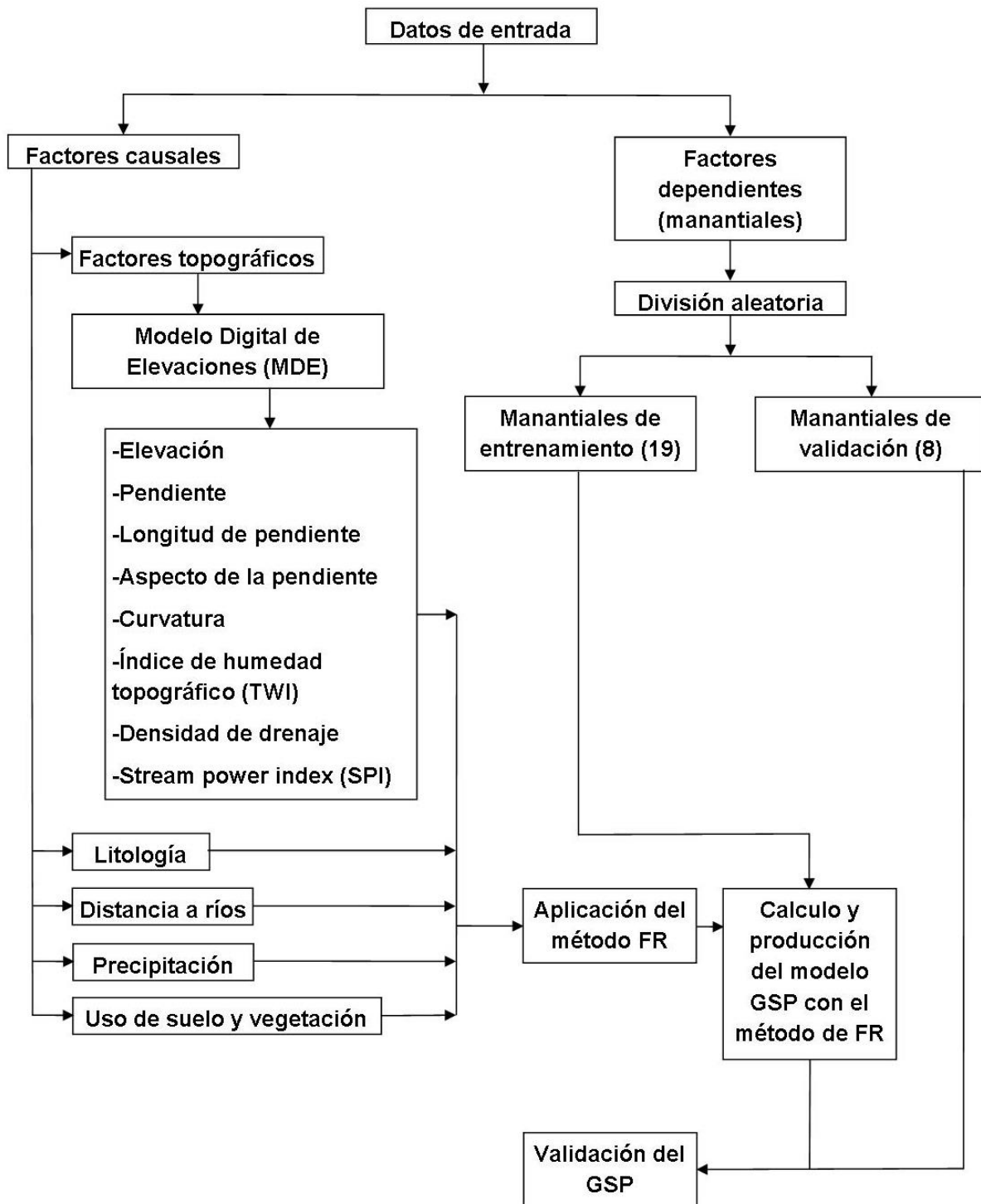


Figura 6. Diagrama de flujo de la metodología.

## 2.5. Resultados

Para encontrar la relación entre los factores seleccionados y las ubicaciones de los manantiales se utilizó el modelo FR enfocado en un sistema de información geográfica. En la tabla 6 se observan los resultados de la relación espacial entre los factores utilizados en este modelo y los manantiales muestreados en campo.

Tabla 6. Relación de frecuencia de los factores seleccionados y los manantiales utilizando el modelo FR.

Clases	Área (Pixel)	Área (%)	Numero de Manantiales	Manantiales (%)	FR
<b>Elevación (m)</b>					
719 - 900	399254	1.16	1	5.263	4.522
900 - 1200	20634314	60.15	16	84.211	1.400
1200 - 1500	8860079	25.83	2	10.526	0.408
1500 - 1800	2787330	8.13	0	0.000	0.000
1800 - 2486	1623954	4.73	0	0.000	0.000
<b>USV</b>					
Agricultura de Riego	1575868	4.59	6	31.579	6.874
Agricultura de temporal	4996447	14.56	5	26.316	1.807
Asentamientos humanos	70637	0.21	0	0.000	0.000
Bosque de encino	1050873	3.06	0	0.000	0.000
Bosque de mezquite	2953006	8.61	1	5.263	0.611
Bosque de pino	2863973	8.35	0	0.000	0.000
Cuerpo de agua	48225	0.14	0	0.000	0.000
Matorral	17979976	52.41	3	15.789	0.301
Pastizal	682991	1.99	0	0.000	0.000
Sin vegetación	4422	0.01	0	0.000	0.000
Vegetación halófila xerófila	1893264	5.52	4	21.053	3.815
Zona urbana	185249	0.54	0	0.000	0.000
<b>Índice de humedad topográfico (TWI)</b>					
15 - 30	2505290	7.30	3	15.789	2.162
13 - 15	6646981	19.38	10	52.632	2.716
11 - 13	9842218	28.69	3	15.789	0.550
9 - 11	9744185	28.40	1	5.263	0.185
6 - 9	5566257	16.23	2	10.526	0.649
<b>Litología</b>					
Basalto Cubilete	6477	0.02	0	0.000	0.000
Calderones-Cedros	510598	1.49	0	0.000	0.000
Cárdenas	1164758	3.40	0	0.000	0.000

El Abra	1463476	4.27	0	0.000	0.000
Guaxcamá	666729	1.94	2	10.526	5.416
Aluvión	18269693	53.26	15	78.947	1.482
Riodacita del Carmen	3994384	11.64	0	0.000	0.000
Riolita panalillo	806650	2.35	0	0.000	0.000
Serie Volcánica Atotonilco	358205	1.04	0	0.000	0.000
Sta. María-El Órgano-Cantera	624087	1.82	0	0.000	0.000
Tamasopo	5937538	17.31	2	10.526	0.608
Tlanchinol	502336	1.46	0	0.000	0.000
<b>Precipitación (mm)</b>					
167 - 300	801082	2.34	0	0.000	0.000
300 - 500	13347798	38.91	7	36.842	0.947
500 - 700	17781838	51.83	11	57.895	1.117
700 - 900	2083259	6.07	1	5.263	0.867
900 - 1100	224092	0.65	0	0.000	0.000
1100 - 1300	66862	0.19	0	0.000	0.000
<b>Distancia a ríos (m)</b>					
0 - 100	1703884	4.97	3	15.789	3.179
100 - 200	1601869	4.67	0	0.000	0.000
200 - 300	1585924	4.62	2	10.526	2.277
300 - 400	1441883	4.20	1	5.263	1.252
> 400	27971371	81.54	13	68.421	0.839
<b>Densidad de drenaje (km/km<sup>2</sup>)</b>					
0 - 0.3	14060435	40.99	0	0.000	0.000
0.3 - .6	11056258	32.23	10	52.632	1.633
0.6 - 0.9	5355799	15.61	2	10.526	0.674
0.9 - 1.2	2710239	7.90	6	31.579	3.997
1.2 - 1.5	960039	2.80	1	5.263	1.881
> 1.5	162161	0.47	0	0.000	0.000
<b>Pendiente (°)</b>					
0 - 3	15579983	45.42	15	78.947	1.738
3 - 9	5843685	17.03	2	10.526	0.618
9 - 15	3600463	10.50	0	0.000	0.000
15 - 22	3694196	10.77	1	5.263	0.489
22 - 29	2858725	8.33	1	5.263	0.632
29 - 37	1919748	5.60	0	0.000	0.000
> 37	808131	2.36	0	0.000	0.000
<b>Longitud de pendiente (LS)</b>					
0 - 10	30899904	90.07	19	100.000	1.110
10 - 20	2724791	7.94	0	0.000	0.000
20 - 30	549184	1.60	0	0.000	0.000
> 30	131052	0.38	0	0.000	0.000
<b>Curvature (100/m)</b>					

Cóncava (+)	11078062	32.29	3	15.789	0.489
Plana (0)	12300858	35.86	10	52.632	1.468
Convexa (-)	10926011	31.85	6	31.579	0.991
<b>Aspecto</b>					
Flat (-1)	7592849	22.13	10	52.632	2.378
North (0 - 22.5)	1958832	5.71	1	5.263	0.922
Northeast (22.5 - 67.5)	4069307	11.86	2	10.526	0.887
East (67.5 - 112.5)	3863979	11.26	0	0.000	0.000
Southeast (112.5 - 157.5)	2981502	8.69	0	0.000	0.000
South (157.5 - 202.5)	3052378	8.90	3	15.789	1.775
Southwest (202.5 - 247.5)	3745044	10.92	0	0.000	0.000
West (247.5 - 292.5)	3313453	9.66	2	10.526	1.090
Nortwest (292.5 - 337.5)	2626802	7.66	1	5.263	0.687
North (337.5 - 360)	1100785	3.21	0	0.000	0.000
<b>Stream Power Index (SPI)</b>					
-24 a -1.6	1975195	5.76	2	10.526	1.828
-1.6 - 0.16	21512343	62.71	15	78.947	1.259
0.16 - 1.7	9160973	26.70	2	10.526	0.394
> 1.7	1656420	4.83	0	0.000	0.000

Después de calcular y obtener los valores de FR para cada factor se reclasificaron las capas de información para asignarles el valor FR. De esta manera los factores quedan como sigue: Elevación FR (Figura 7a), 2) Pendiente FR (Figura 7b), 3) Longitud de pendiente FR (Figura 7c), 4) Aspecto de la pendiente FR (Figura 7d), 5) Curvatura FR (Figura 7e), 6) Índice de humedad topográfico FR (Figura 7f), 7) Litología FR (Figura 8g), 8) Precipitación FR (Figura 8h), 9) Densidad de drenaje FR (Figura 8i), 10) Stream Power Index FR (Figura 8j), 11) Distancia a los ríos FR (Figura 8k), y 12) Uso de suelo y Vegetación FR (Figura 8l). Cabe resaltar que si existen más de dos clases con valor 0 de FR, estas formaran una sola clase por lo cual algunos factores modificarán su número de clases.

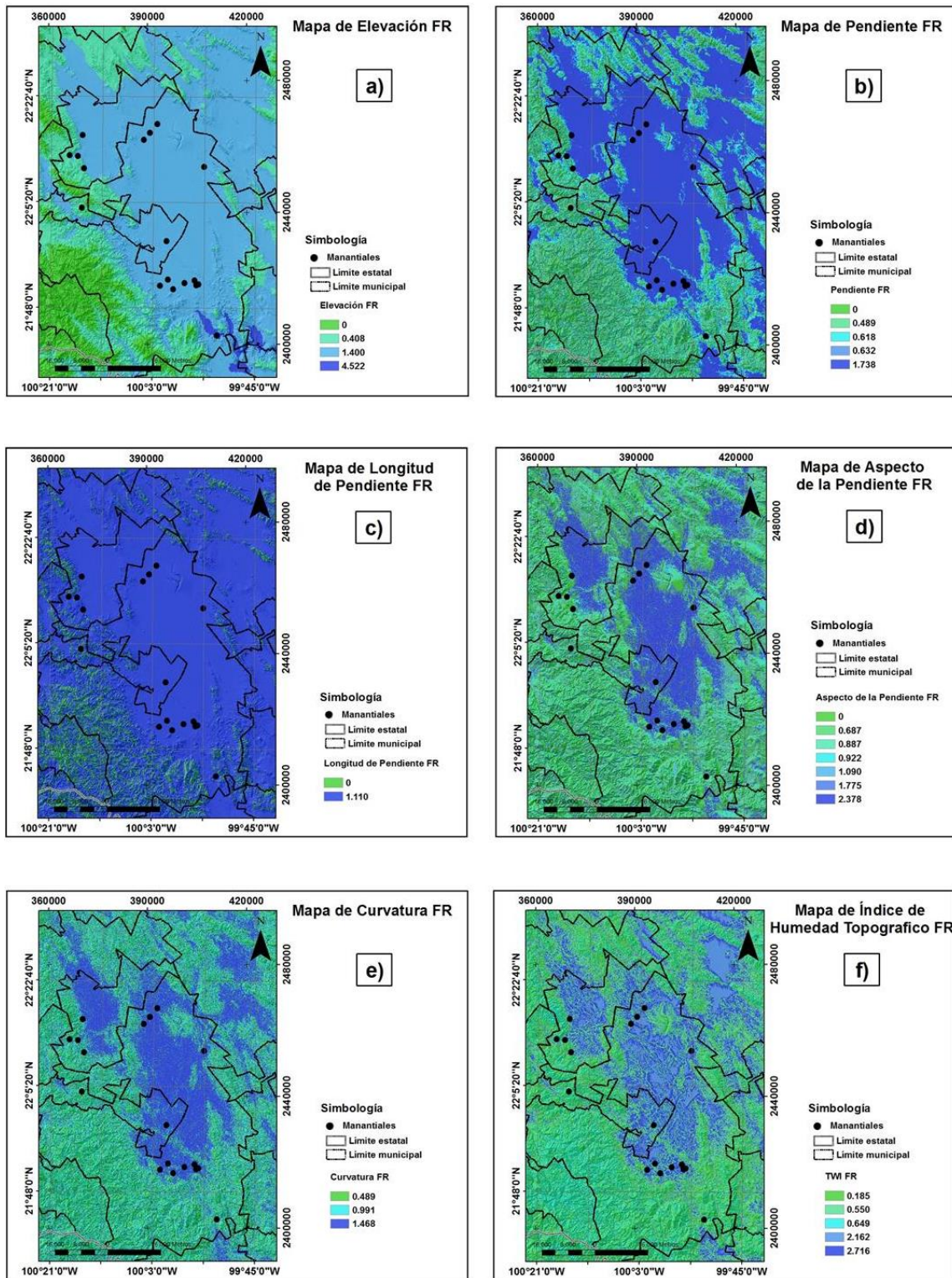


Figura 7. Factores reclasificados con los valores FR: a) Elevación FR, b) Pendiente FR, c) Longitud de Pendiente FR, d) Aspecto de la Pendiente FR, e) Curvatura FR, f) TWI FR.



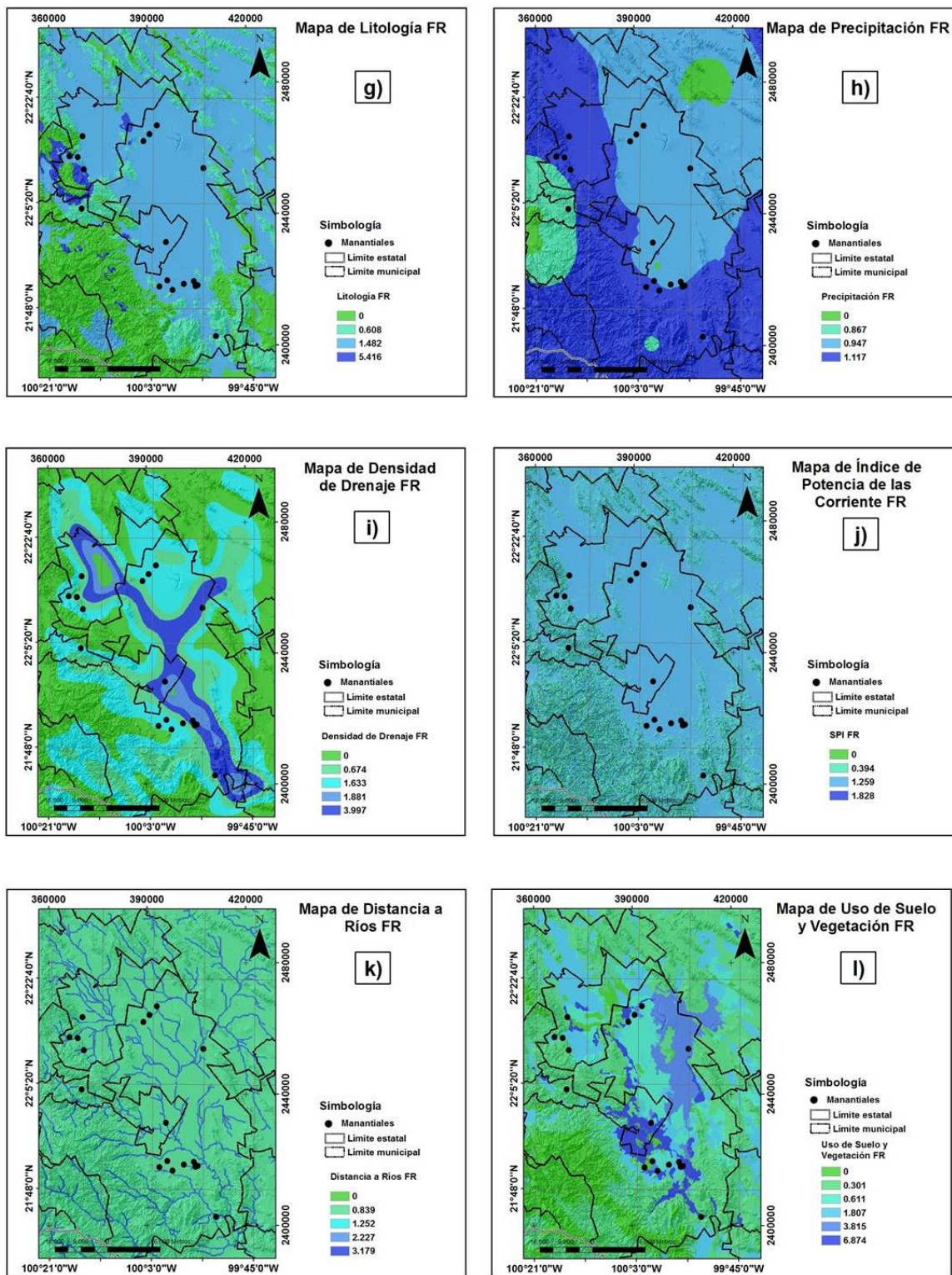


Figura 8. Factores reclassificados con los FR: g) Litología FR, h) Precipitación FR, i) Densidad de Drenaje FR, j) SPI, k) Distancia a Ríos FR, l) Uso de Suelo y Vegetación FR.

De acuerdo a los estudios previos realizados por Ozdemir, 2011 y Moghaddam et al., 2015 un valor de relación de frecuencia de 1 indica grado de asociación promedio entre la ubicación de los manantiales y los factores. Los valores mayores a 1 de FR muestran un grado de asociación muy alto, mientras que los valores menores a 1 muestran un grado de asociación muy bajo.

De acuerdo a los resultados obtenidos de relación de frecuencia las elevaciones entre 700 y 900 m son las que más favorecen la ocurrencia de los manantiales de hecho tienen un grado de asociación muy alto con valor FR mayor de 4, las elevaciones entre 900 y 1,200 m también presentan un buen grado de asociación. Sin embargo las elevaciones mayores de 1,500 m no presentan relación la ubicación de los manantiales. Para el caso del factor de uso de suelo y cobertura vegetal, la clase que mejor relación mostró fue agricultura de riego, se debe hacer mención que esta clase fue la que obtuvo el valor más alto de FR de todas las clases de los doce factores utilizados. Era un resultado obvio de esperarse ya que en los muestreos en campo se pudo observar que el 100% de los manantiales censados para este estudio se usan para el riego agrícola. La clase de vegetación halófila xerófila también mostró un muy alto grado de asociación con un valor de FR mayor a 3, en este factor existieron varias clases sin un grado de asociación, destacando los bosques de pino ya que cuenta con un gran porcentaje de área de extensión pero no cuenta con la ubicación de manantiales. El factor TWI es una de las pocas clases que mostraron relación espacial con la ubicación de los manantiales en todas sus clases. Este factor es de gran importancia ya que muestra las áreas que tienen mayor saturación de escorrentías y humedad, por tanto las zonas con mayor TWI tienen condiciones más favorables para permeabilidad y capacidad de almacenamiento de la misma (Ozdemir, 2011). La litología es un factor muy importante y determinante en los estudios que involucran aguas subterráneas. La aparición de aguas subterráneas y el movimiento de las mismas están controlados por las formaciones. Por un lado la porosidad contribuye a un mayor almacenamiento de aguas en el subsuelo, además esta misma condición ayuda en la aparición de manantiales. La permeabilidad ayuda a tener mejores rendimientos de aguas subterráneas (Abdalla, 2012). La

precipitación es otro factor de relevancia ya que de este depende en mayor medida la disponibilidad de agua para infiltrarse a los sistemas de agua subterránea y posteriormente ser parte de los manantiales (Adiat et al., 2012). Este factor se dividió en seis clases, teniendo el mejor rendimiento de FR (1.117) en las precipitaciones que van de los 500 a los 700 mm. Las precipitaciones mayores de 900 mm y menores de 300 no mostraron relación con la ubicación de los manantiales. En la zona de estudio las precipitaciones más altas se dan en las serranías que rodean las planicies, por lo tanto son zonas de recarga y además las condiciones topográficas no favorecen la aparición de manantiales en esas zonas. En el factor de distancia a ríos se obtuvo un grado de asociación alto en los manantiales que se encontraban a menos de 100 m de distancia, mientras que el grado de asociación más bajo se registró en los manantiales que se encontraron entre 100 y 200 m de distancia a los ríos. El drenaje es el factor causante de trasladar el agua de las precipitaciones y aguas derretidas de nieve (en caso de existir en la zona) de las regiones más altas hacia las llanuras. Debido a que el drenaje está controlado por las estructuras litológicas como formaciones y fallas y fracturas desempeña un papel importante como fuente de agua subterránea (Moghaddam et al., 2016; Balamurugan et al., 2017). La densidad de drenaje que mejor resultados de FR mostro son las que están entre 0.9 y 1.2. Para el caso de la pendiente la clase que mejor se ajusta son las pendientes que se encuentran entre  $0^{\circ}$  y  $3^{\circ}$  es decir las zonas más planas en el área de estudio. Las pendientes superiores a  $35^{\circ}$  se consideran una restricción para la ocurrencia de los manantiales (Moghaddam et al., 2016). En este estudio se confirma dicha aseveración, incluso desde las pendientes de  $29^{\circ}$ . El mejor escenario para la longitud de pendiente es de 0 – 10 m, en comparación con otras investigaciones es generalizado que el mejor escenario para este factor son las longitudes de pendiente cortas, ya que son las zonas más planas. Esta clase es la única de todas las clases de todos los factores que acapara el 100% de manantiales. Por lo que las demás clases de longitud de pendiente para este estudio no tienen relación con la ubicación espacial de los manantiales. Para el factor de curvatura las superficies planas muestran el valor FR más alto, cabe resaltar que las

superficies planas dominan el área de estudio con un 35.86%, mientras que las superficies cóncavas mostraron el valor de FR más desfavorable, quizá por condición de tener menos aptitud para retener humedad y formas cuerpos de aguas. En la tabla 7. Se resumen las clases que tuvieron mejor y peor FR para cada factor.

Tabla 7. Clases más favorables y desfavorables de FR para cada factor efectivo utilizado.

<b>Clases</b>	<b>Área (Pixel)</b>	<b>Área (%)</b>	<b>Manantiales (%)</b>	<b>FR</b>
<b>Elevación (m)</b>				
719 - 900	399254	1.16	5.263	4.522
1500 - 1800	2787330	8.13	0.000	0.000
<b>Uso de suelo y vegetación</b>				
Agricultura de Riego	1575868	4.59	31.579	6.874
Bosque de pino	2863973	8.35	0.000	0.000
<b>Índice de humedad topográfico (adimensional)</b>				
13 - 15	6646981	19.38	52.632	2.716
9 - 11	9744185	28.40	5.263	0.185
<b>Litología</b>				
Guaxcamá	666729	1.94	10.526	5.416
Riodacita del Carmen	3994384	11.64	0.000	0.000
<b>Precipitación (mm)</b>				
500 - 700	17781838	51.83	57.895	1.117
167 - 300	801082	2.34	0.000	0.000
<b>Distancia a ríos (m)</b>				
0 - 100	1703884	4.97	15.789	3.179
100 - 200	1601869	4.67	0.000	0.000
<b>Densidad de drenaje</b>				
0.9 - 1.2	2710239	7.90	31.579	3.997
0 - 0.3	14060435	40.99	0.000	0.000
<b>Pendiente (°)</b>				
0 - 3	15579983	45.42	78.947	1.738
9 - 15	3600463	10.50	0.000	0.000
<b>Longitud de pendiente (LS)</b>				
0 - 10	30899904	90.07	100.000	1.110
10 - 20	2724791	7.94	0.000	0.000
<b>Curvature (100/m)</b>				

Plana (0)	12300858	35.86	52.632	1.468
Cóncava (+)	11078062	32.29	15.789	0.489
<b>Aspecto</b>				
Flat (-1)	7592849	22.13	52.632	2.378
East (67.5-112.5)	3863979	11.26	0.000	0.000
<b>Stream Power Index (SPI)</b>				
(-24 a -1.6)	1975195	5.76	10.526	1.828
(> 1.7)	1656420	4.83	0.000	0.000

\* Para el caso de los factores que tuvieron más de dos clases sin relación con la ubicación espacial de los manantiales, se tomaron aquellas clases que ocuparon mayor porcentaje de área.

En el caso del aspecto de pendiente, el mejor escenario de FR son las laderas planas con 2.378 y el peor escenarios son las laderas orientadas al este. Finalmente para el factor de SPI la mejor aptitud para el valor de FR se observó en la clase de -24 a -1.6 y el escenario más desfavorable de FR es la clase de > 1.7.

### 2.5.1. Generación del modelo de GSP

Con los factores reclasificados con los valores de FR se realizó el mapa del potencial de ocurrencia de manantiales con el método de relación de frecuencia. Para generar el modelo GSP con el método FR se utilizó la siguiente ecuación:

$$GSP = \sum (El_{FR} + USV_{FR} + TWI_{FR} + Li_{FR} + Pr_{FR} + Dr_{FR} + Dd_{FR} + Sl_{FR} + LS_{FR} + Cu_{FR} + As_{FR} + SPI_{FR})$$

Donde, GSP= Potencial de ocurrencia de manantiales,  $El_{FR}$ = relación de frecuencia de elevación,  $USV_{FR}$ = relación de frecuencia de uso de suelo y vegetación,  $TWI_{FR}$ = relación de frecuencia del índice de humedad topográfica,  $Li_{FR}$ = relación de frecuencia de litología,  $Pr_{FR}$ = relación de frecuencia de precipitación,  $Dr_{FR}$ = relación de frecuencia de distancia a ríos,  $Dd_{FR}$ = relación de frecuencia de densidad de drenaje,  $Sl_{FR}$ = relación de frecuencia de pendiente,  $LS_{FR}$ = relación de frecuencia de longitud de pendiente,  $Cu_{FR}$ = relación de frecuencia de curvatura,  $As_{FR}$ = relación de frecuencia de aspecto,  $SPI_{FR}$ = relación de frecuencia de stream power index.

Finalmente se obtuvo el modelo del potencial de ocurrencia de manantiales a nivel de pixel para el Valle de Rioverde utilizando el modelo FR (Figura 9). Para

describir los resultados del modelo se ajustaron los valores obtenidos a la escala de clasificación que uso Ozdemir, 2011, los cuales se clasificaron en cuatro grupos de potencial de ocurrencia de manantiales: 1) Muy bajo (48.90%), 2) Bajo (14.22%), Moderado (16.87%) y Alto (20.01%). Como se puede observar cómo se puede apreciar en la tabla 8 la clase Muy bajo ocupa casi la mitad del área de estudio, mientras que la clase de potencial de ocurrencia Alto es la segunda en ocupación del área de estudio.

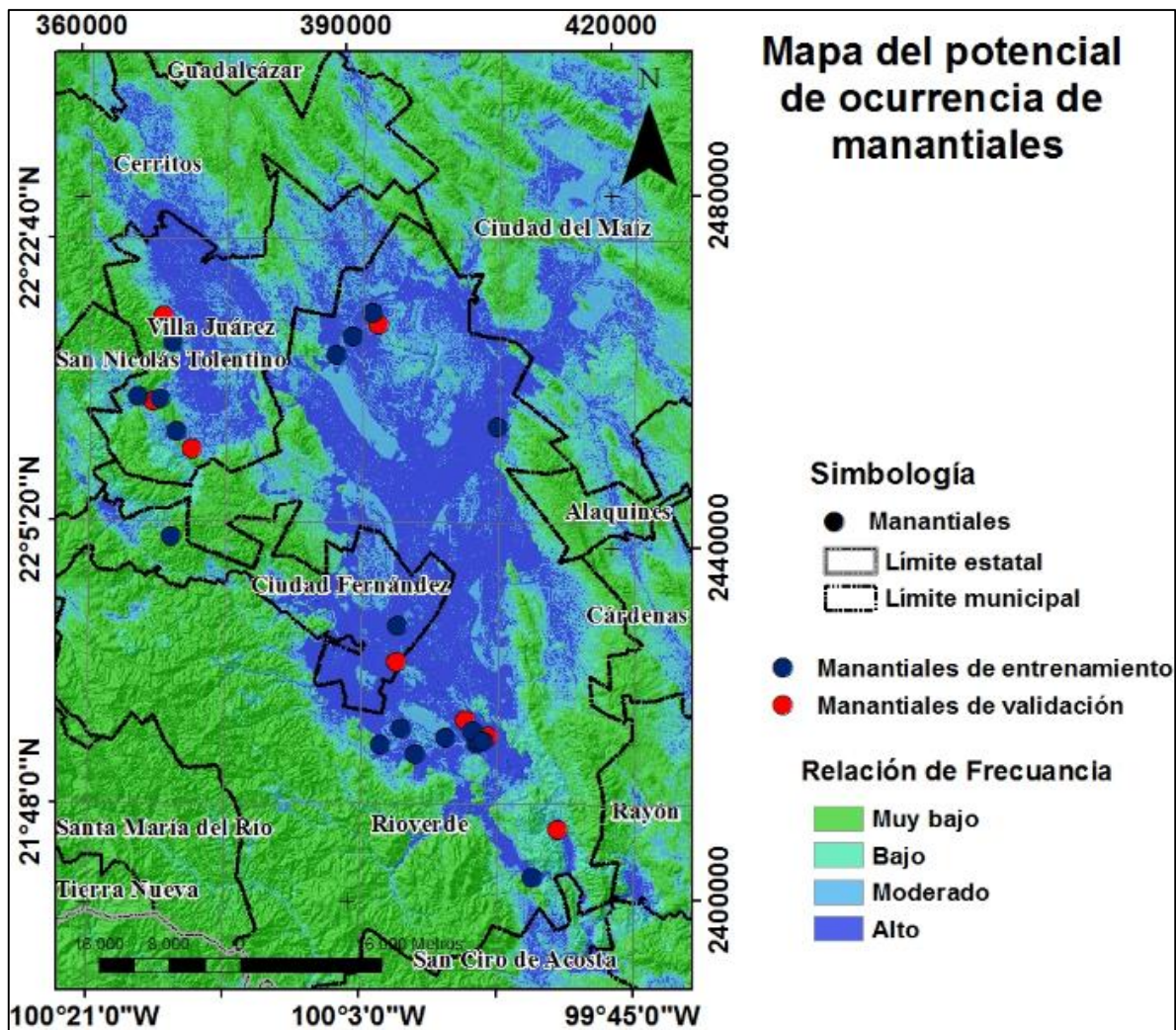


Figura 9. Mapa de estimación del potencial de ocurrencia de manantiales en el Valle de Rioverde, SLP.

El mapa obtenido muestra la relación que existe entre la ubicación espacial de los manantiales y los factores que provocan la ocurrencia de estos.

Tabla 8. Porcentaje de área ocupada por cada una de las clases del modelo de relación de frecuencia.

<b>Clases del potencial</b>	<b>Rango</b>	<b>Área (pixel)</b>	<b>Área (%)</b>
Muy bajo	0.674 - 10.820	16776409	48.90
Bajo	10.820 - 13.330	4879811	14.22
Moderado	13.330 - 16.780	5785668	16.87
Alto	16.780 - 32.482	6863043	20.01

Los resultados indican que existe una mayor probabilidad de encontrar zonas sin las cualidades necesarias para la ocurrencia de manantiales y que además las mejores zonas para la presencia de manantiales se encuentran en el centro de la zona de estudio. Por otro lado se puede observar que las zonas que presentan prácticamente una probabilidad nula de ocurrencia de manantiales, se encuentran en la parte suroeste del valle, y corresponde a las serranías ubicadas principalmente con la frontera del estado de Guanajuato.

## **2.6. Validación de los resultados**

Para la realización de este trabajo se utilizaron 27 manantiales censados en campo, de estos se utilizaron 19 para la generación del modelo de GSP y 8 manantiales se excluyeron para efectos de validación. Los manantiales que se utilizaron para validación se muestran la figura 10. El mapa final del potencial de ocurrencia de manantiales fue dividido en cuatro clases: muy bajo, bajo, moderado y Alto, se pondero la efectividad del modelo con cada uno de los manantiales utilizados para la validación y quedo como sigue: muy bajo (0%), bajo (25%), moderado (50%) y Alto (100%). Para este trabajo solo los manantiales en los que el modelo tuvo una efectividad del 100% fueron tomados como acertados para obtener el porcentaje de efectividad del modelo FR.

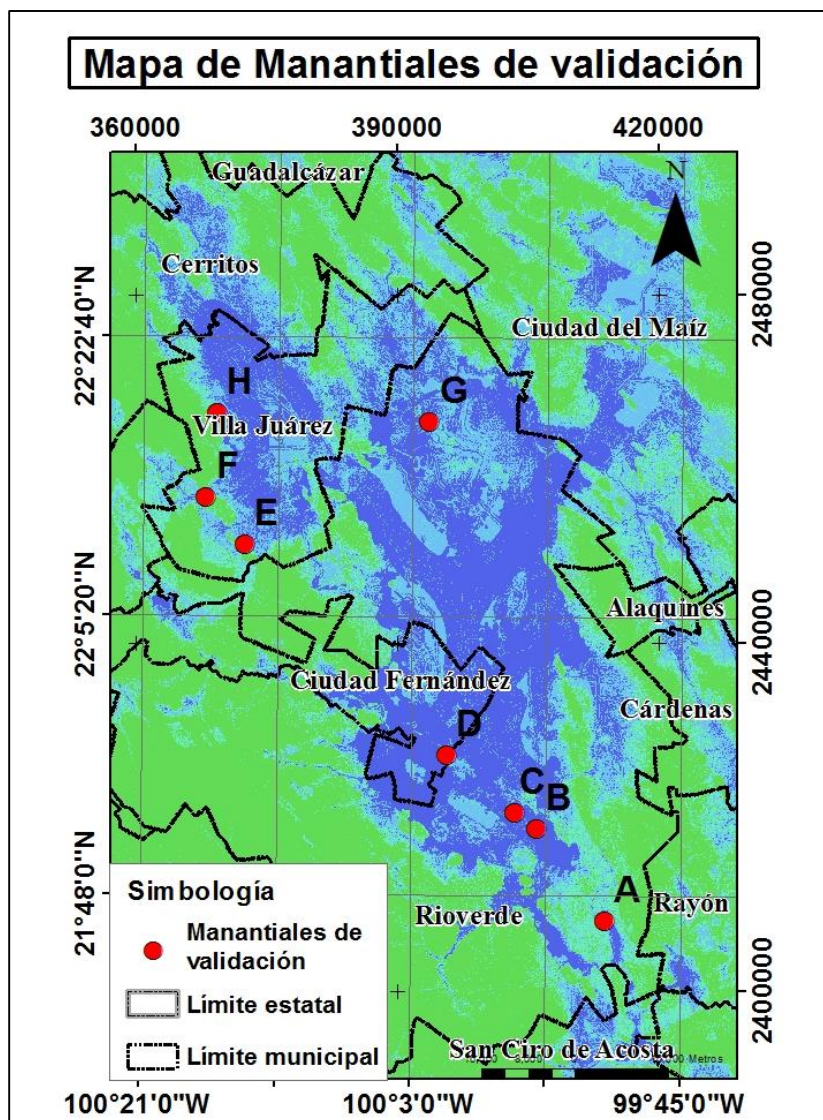


Figura 10. Manantiales utilizados para la validación del modelo: A) San Sebastián, B) Puerta de Piedra, C) La Virgen, D) El Ojito de Agua, E) Atarjea de en Medio, F) Guaxcamá, G) La Lagunita y H) Ojo de León.

El análisis muestra que en siete de los ocho manantiales utilizados para esta validación el modelo tuvo una efectividad del 100% o se encuentran en la categoría de la clase “alto”, únicamente el manantial de Guaxcamá se encuentra en la clase “moderado” con una efectividad por para del modelo del 50% para este manantial (Tabla 9). En este sentido el análisis demuestra que el modelo de FR tuvo una efectividad en general del 87.5% de acuerdo a los manantiales utilizados para la validación.



Tabla 9. Efectividad del modelo FR para cada uno de los manantiales utilizados para la validación.

	<b>Nombre</b>	<b>Municipio</b>	<b>Condición de GSP</b>	<b>Efectividad</b>
<b>A</b>	San Sebastián	Rioverde	Alto	100%
<b>B</b>	Puerta de Piedra	Rioverde	Alto	100%
<b>C</b>	La Virgen	Rioverde	Alto	100%
<b>D</b>	El Ojito de Agua	Ciudad Fernández	Alto	100%
<b>E</b>	Atarjea de en Medio	Villa Juárez	Alto	100%
<b>F</b>	Guaxcamá	Villa Juárez	Moderado	50%
<b>G</b>	La Lagunita	Rioverde	Alto	100%
<b>H</b>	Ojo de León	Villa Juárez	Alto	100%

Por tanto y comparado con trabajos previos realizados es distintas partes del mundo utilizando la misma metodología se puede decir que el modelo tuvo una muy buena efectividad para predecir las zonas más favorables para la ocurrencia de manantiales de agua subterránea.

En este trabajo también se realizó una revisión visual de la efectividad del modelo FR para predecir las zonas más favorables para la ocurrencia de manantiales de agua subterránea. Para esta revisión se cargó la capa de GSP en el software Google Earth (Figura 11) y se buscaron manantiales o cuerpos de agua no utilizados o no identificados en este trabajo. La búsqueda se realizó solo en las zonas marcadas con la clase “alto” del modelo GSP. Se localizaron cuatro zonas con formaciones aparentes de cuerpos de agua, cabe mencionar que la zona de estudio es muy grande y se cuentan con pocos recursos por lo que no se pudieron clasificar ni visitar los cuerpos de agua encontrados en este análisis para verificar la fuente de su formación, es decir si es manantial de agua subterránea o alguna zona de acumulación de flujos superficiales ya sea de formación natural o hecha por el hombre.

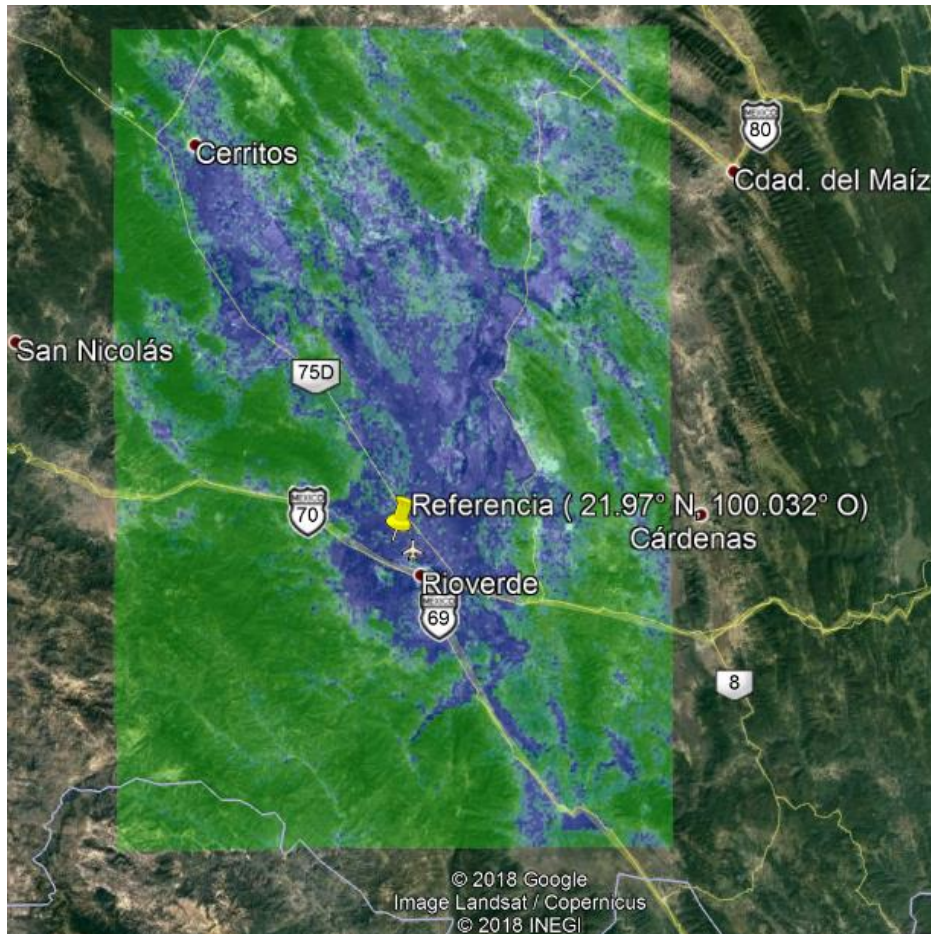


Figura 11. Capa de GSP cargada en el software Google Earth.

Para el primer caso se encontró un cuerpo de agua cerca de la comunidad de El Paso con las coordenadas  $21.78^{\circ}$  latitud norte y  $-99.97^{\circ}$  longitud oeste, se ubica en la parte centro-sur de la zona de estudio (Figura 12). Tiene una extensión aproximada de  $2,500 \text{ m}^2$ . Para la captura de imagen de este manantial se tomó una altura de ojo de  $1.5 \text{ km}$ .

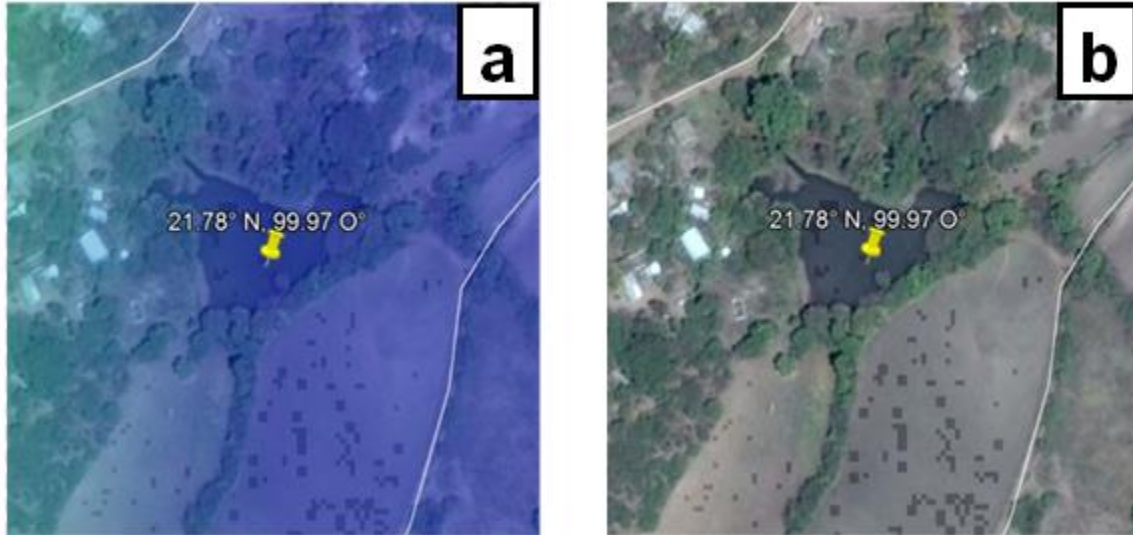


Figura 12. Cuerpo de agua encontrado cerca de la comunidad el paso, la imagen “a” muestra la capa del modelo GSP encendida y la imagen “b” se observa el panorama con la capa apagada. Fuente: Google Earth, altura de ojo 1.50 km y fecha de imagen: Marzo de 2014.

En el segundo caso se encontraron unas formaciones aparentemente con la intervención humana, pero de igual manera con las condiciones más favorables para la ocurrencia de manantiales (Figura 13) con las coordenadas 21.77° latitud norte y -99.83° longitud oeste. De hecho estas formaciones de cuerpos de agua se localizan muy cerca del manantial San Sebastián el cual fue utilizado para la validación de este modelo.



Figura 13. Cuerpos de agua localizados cerca del manantial de San Sebastián, la imagen “a” muestra la capa del modelo GSP encendida y la imagen “b” se observa el panorama con la capa apagada. Fuente: Google Earth, altura de ojo 1.50 km y fecha de imagen: Diciembre de 2016.

En el tercer caso se localiza en las coordenadas  $21.99^{\circ}$  latitud norte y  $-99.91^{\circ}$  longitud oeste y se encuentra cerca de la “Poza Quintareña” un manantial extinto formado en el subsuelo y con salida a la superficie. Cabe destacar que a pesar de que este cuerpo no sea un manantial, el modelo FR gana efectividad debido a que este manantial extinto también está dentro de la clase “alta” del potencial de ocurrencia de manantiales, destacando que la ubicación de la Poza Quintareña no fue utilizada con fines de entrenamiento ni validación para este trabajo.



Figura 14. Cuerpo de agua localizado cerca del manantial extinto de la Poza Quintareña, la imagen “a” muestra la capa del modelo GSP encendida y la imagen “b” se observa el panorama con la capa apagada. Fuente: Google Earth, altura de ojo 1.30 km y fecha de imagen: Abril de 2011.

Por último tenemos la formación más interesante de este análisis visual en Google Earth, es una formación compuesta por varios cuerpos de agua la cual se localiza en la comunidad de Las Tablas con las coordenadas de referencia 22.26° latitud norte y 99.85° longitud oeste. En esta imagen tomada en el año 2012 se pueden contar al menos ocho pequeños cuerpos de agua y aparentemente forman un sistema de humedal, y los cuerpos de agua se pueden ver distribuidos en una zona de aproximadamente 2 km<sup>2</sup>. Resultando de manera valiosa para el modelo del potencial de manantiales que casi todos estos cuerpos se encuentran dentro de la clase “alto”.

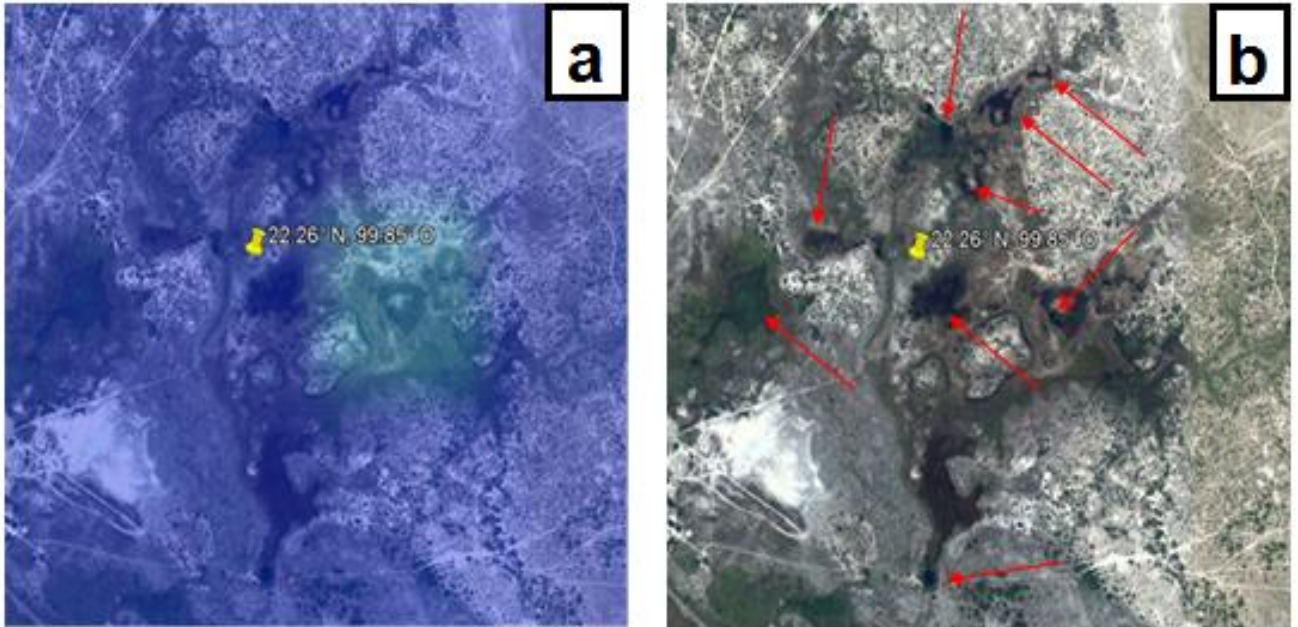


Figura 15. Formación compuesta por varios cuerpos de agua localizado en la comunidad de Las Tablas, la imagen “a” muestra la capa del modelo GSP encendida y la imagen “b” se observa el panorama con la capa apagada. Fuente: Google Earth, altura de ojo 3.25 km y fecha de imagen: Mayo de 2012.

Se puede concluir que este análisis visual deja muy buenos resultados ya que se encontraron cuerpos de agua no utilizados en este trabajo y además se localizaron en las zonas de potencial de ocurrencia de manantiales “alto”.

## **2.6. Discusión**

El objetivo de este capítulo fue modelar el potencial de ocurrencia de manantiales de agua subterránea (GSP) utilizando el modelo de Relación de Frecuencia (FR) aplicado en un Sistema de Información Geográfica y poner a prueba su capacidad predictiva. Para lograr este objetivo se seleccionaron doce factores en los que el modelo FR determinó el nivel de asociación entre la ubicación de los manantiales en el área de estudio y los factores seleccionados. En este sentido la discusión se puede dividir en dos partes: (1) el grado de asociación existente entre los factores seleccionados y la ubicación de los manantiales en el área de estudio y (2) la efectividad del modelo para predecir las zonas potenciales para la ocurrencia de manantiales de agua subterránea.

### **Grado de asociación existente entre los factores seleccionados y la ubicación de los manantiales en el área de estudio**

Doce factores fueron seleccionados para la modelación del potencial de ocurrencia de agua subterránea, los factores fueron seleccionados de acuerdo a varios aspectos entre ellos: a) las condiciones topográficas, geológicas, hidrológicas y climáticas de la zona, b) la información disponible y c) la información utilizada en trabajos previos como los de Ozdemir, 2011; Moghaddam et al., 2015; Naghibi et al., 2016 entre otros. Algunas variables fueron obtenidas de dependencias mexicanas y adaptadas para este trabajo como la elevación y otras fueron calculadas como TWI. A excepción de los factores de litología y uso de suelo y vegetación todos los demás factores fueron clasificados en varias clases para encontrar la que mejores condiciones tuvo para la ocurrencia de manantiales.

Analizando la información, se puede observar que las elevaciones altas en esta zona son una restricción para la ocurrencia de manantiales ya que a partir de los 1200 m de altitud solo se encuentran dos manantiales. A partir del factor de uso de suelo y vegetación, y los trabajos en campo, se puede observar que el uso que más se le da a los manantiales en la zona de estudio, es el riego agrícola. Para este trabajo y en general en investigaciones de este tipo se ha concluido que las

pendientes inclinadas en un grado mayor de  $30^{\circ}$  son una restricción para la ocurrencia de manantiales. En esta zona la mayor parte de los manantiales se concentran en las zonas más planas y esta queda de manifiesto con la variable de la curvatura en el que las zonas planas tienen el mayor FR con 1.4, teniendo que las zonas cóncavas y convexas tienen un FR menor de 1. Las formaciones de aluvión son predominantes en la zona por lo cual esta clase de litología contiene la mayoría de los manantiales presentes en la zona, aunque no cuenta con el FR más alto. Otro factor en el que la clase con valor más grande de FR no coincide con la clase con más manantiales es el factor distancia a ríos, ya que la mayor parte de los manantiales de entrenamiento para este factor (64.8%) está en la clase  $> 400$  m, sin embargo la FR para esta clase es menor a 1. Estas situaciones se observaron en algunos factores debido a que los valores de FR dependen principalmente del porcentaje del área que ocupa cada clase. Solo existió un factor en el que todos los manantiales de entrenamiento se concentraron en una sola clase y fue la longitud de pendiente en la clase "0-10" en la que además también fue la que mayor porcentaje de área tuvo para este factor por lo cual su FR apenas fue 1.1. El factor que mejor distribución en el área de sus clases mostró fue el TWI aunque la mayoría de los manantiales los ocupó la clase "13-15". Las zonas en donde se presentan las precipitaciones más altas también fueron una restricción para la ocurrencia de los manantiales. Esto debido a que las zonas en donde se presentan las precipitaciones más altas son las serranías de la zona de estudio.

Para finalizar se puede concluir de que existió coherencia en los factores seleccionados basados en la ubicación de los manantiales. Para corroborar esto se puede analizar la tabla 7 y observar que las peores condiciones por clases para la ocurrencia de manantiales son: las zonas donde existe precipitación alta es decir las serranías, que a su vez son las zonas más altas y las que tienen pendientes más inclinadas, que como se habían mencionado antes se consideran restricciones para la ocurrencia de manantiales. Por otro lado estas serranías y zonas altas están dominadas por la vegetación de bosques los cuales tampoco presentan relación con la ocurrencia de manantiales. Sin embargo a pesar de que



no muestran relación con la ubicación espacial de los manantiales, si son de importancia para los manantiales ya que es en estas zonas altas y de serranía donde comienza la recarga. Por otro lado las condiciones que mejor favorecen la ocurrencia de los manantiales son las zonas más planas, que a su vez son las que tienen las pendientes más suaves y es también en estas zonas donde están las mejores condiciones para la agricultura, el uso de suelo que mejor favorece la presencia de manantiales. En el caso del TWI los mejores escenarios también se presentan en las zonas planas del Valle.

### **Efectividad del modelo para predecir las zonas potenciales para la ocurrencia de manantiales de agua subterránea**

Para la realización del modelo del potencial de ocurrencia de manantiales de agua subterránea se utilizó una base de datos de 27 manantiales, los cuales se georreferenciaron en campo y de los cuales 70% (19) se utilizaron para el entrenamiento del modelo y el 30% (8) restante se utilizaron con fines de validación. El modelo final se dividió en cuatro clases: 1) Muy bajo (48.90%), 2) Bajo (14.22%), Moderado (16.87%) y Alto (20.01%). Para validar este modelo se utilizó la validación de Abdalla 2011, es decir obtener el porcentaje en el que el modelo predijo de forma correcta los puntos de validación (manantiales), para este caso solo se tomaron en cuenta aquellos manantiales que coincidieron con la clase de potencial "alto" por lo que la probabilidad de que los manantiales coincidan con esta clase es solo del 20%. Los manantiales correctamente predichos por el modelo fueron: 1) San Sebastián (21° 46' 30.00" N, -99° 49' 58.80" E), 2) Puerta de Piedra (21° 52' 12.00" N, -99° 54' 36.00" O), 3) La Virgen (21° 53' 09.60" N, -99° 56' 02.40" O), 4) El Ojito de Agua (21° 56' 45.60" N, -100° 00' 36.00" O), 5) Agua del Medio (22° 09' 50.40" N, -100° 14' 13.20" O), 6) La Lagunita (22° 17' 31.20" N, -100° 01' 55.20" O), 7) Ojo de León (22° 17' 56.40" N, -100° 16' 08.40" O). De este modo, se obtuvo una efectividad del 87.5%, el cual fue un resultado muy bueno comparado con otras investigaciones en diferentes partes del mundo. Otra manera en la que pusimos prueba el modelo fue buscar manantiales y/o cuerpos de agua a partir de los resultados generados del mismo.

Para ello se cargó en el software Google Earth, la capa final del GSP y se analizaron solo las zonas de la clase potencial alto, y los resultados fueron satisfactorios ya que se lograron ubicar varios cuerpos de agua, entre ellos una zona muy interesante, la cual es claramente un humedal compuesto por varios cuerpos de agua. Debido a falta de recursos, no fue posible visitar estos cuerpos de agua para verificar su fuente de origen, sin embargo el hecho de que se encuentren formaciones de agua vuelve poner de manifiesto una buena efectividad del modelo, así como la coherencia de las variables utilizadas ya que están encaminadas a encontrar las condiciones para el nacimiento y formación de cuerpos de agua.

La validación realizada arrojó resultados satisfactorios. Sin embargo, poniendo en perspectiva este trabajo, la base de datos de manantiales empleada fue pequeña, ya que se considera que en la zona existen muchos más manantiales o nacimientos de agua, que le hubieran dado un mayor grado de robustez a la fase de validación del modelo. No obstante, se trabajó solo con los manantiales más conocidos y de fácil acceso; todos los manantiales utilizados en esta investigación tienen el caudal suficiente para formar un cuerpo de agua. Esta investigación representa un esfuerzo importante en el mapeo de manantiales en el área de estudio, marcando un precedente interesante para futuras investigaciones en el tema, así como una herramienta de apoyo para asegurar la gestión sustentable de los recursos hídricos de la región.

## **2.7. Conclusión**

En este trabajo se aplicó el modelo de relación de frecuencia para la determinación del potencial de la ocurrencia de manantiales. Las características con mayor probabilidad de ocurrencia para cada factor son como sigue: elevaciones entre 719 – 900, la clase agricultura de riego, el TWI entre 13 – 15, la clase aluvión de la litología, la precipitación entre 500 – 700 mm, la distancia de 100 m a los ríos, la densidad de drenaje entre 0.90 – 1.20 km/km<sup>2</sup>, la pendiente entre 0 – 3°, la longitud de pendiente entre 0 – 10 m, la curvatura plana, las laderas con orientaciones planas y el SPI entre -24 a 1.60. Los manantiales predichos correctamente se encuentran espacialmente distribuidos en toda el área de estudio. En la fase de validación, el modelo demostró ser confiable ya que presentó una efectividad del 87.5% para encontrar las zonas potenciales de ocurrencia de manantiales. Los resultados obtenidos en este trabajo representan una herramienta importante dentro de las actividades de gestión para la preservación de los manantiales y los recursos naturales.

## **Discusión general y Conclusiones**

Los manantiales son una fuente valiosa de agua en todo el mundo, especialmente en las regiones áridas y semiáridas. El agua proveniente de estos manantiales normalmente presenta una mayor calidad. En México, el agua se obtiene normalmente a partir de cuerpos de agua superficial o pozos profundos provocando que los manantiales sean poco estudiados.

El Valle de Rioverde, San Luis Potosí (México) es una zona agrícola muy importante, tanto regional como nacionalmente, por la producción citrícola que genera. El agua utilizada para la producción agrícola en esta región proviene de una serie de manantiales distribuidos en todo el valle. A pesar de que la producción agrícola depende de la disponibilidad de agua de los manantiales, éstos han sido poco estudiados. Solo el manantial "La Media Luna" es el más conocido por el público en general, por su alto potencial turístico. Por lo que, los manantiales del Valle de Rioverde han sido poco estudiados y mucho menos monitoreados, generando un desconocimiento de su comportamiento hidrológico.

La primera pregunta de investigación planteada en esta tesis fue: ¿El espejo de agua en los manantiales del Valle de Rioverde ha permanecido sin cambio a través del tiempo? Para responder la pregunta, se diseñó un marco metodológico que sirviera para conocer la dinámica espaciotemporal de los manantiales en el Valle de Rioverde. En este sentido, se seleccionaron los tres manantiales representativos: Puerta del Río en el municipio de Villa Juárez ( $22^{\circ} 14' 25.33''$  N,  $100^{\circ} 15' 31.67''$  O) en la zona norte, Media Luna en el municipio de Rioverde ( $21^{\circ} 51' 39.50''$  N,  $100^{\circ} 1' 41.23''$  O) en la zona centro y Laguna de Jocolixtle en el municipio de Rioverde ( $21^{\circ} 43' 31.66''$  N,  $99^{\circ} 51' 41.58''$  O) en la zona sur. Posteriormente, se empleó una colección de imágenes de la plataforma Google Earth, con 4 distintas fechas para Puerta del Río y Media Luna y 3 fechas para Laguna de Jocolixtle. Para clasificar las imágenes se emplearon dos algoritmos, máxima verosimilitud y kNN, resultando el método de máxima verosimilitud más apropiado para la realización de este trabajo. Los resultados obtenidos de la clasificación permitieron realizar un análisis de cambio, encontrando que, tanto el

manantial ubicado en zona norte (Puerta del Río), como el manantial ubicado en la zona sur (Jocolixtle), fueron los más susceptibles a cambios. El manantial que presentó más cambios durante el periodo de estudio (2008-2016: 9 años) fue la Laguna de Jocolixtle, con variaciones de hasta 10,000 m<sup>2</sup> en 9 años. Mientras que el manantial denominado la Media Luna, localizado en la zona centro, ha mostrado pocos cambios en los últimos 100 años, según el análisis realizado con imágenes de los años 2005, 2011, 2014 y 2016.

La segunda pregunta de investigación planteada en este trabajo fue: ¿La presencia de manantiales en el Valle de Rioverde, puede ser asociada a factores físicos y ambientales, que permita realizar una estimación del potencial de la ocurrencia de los mismos? Para responder a esta pregunta, se generó un modelo para determinar el potencial de ocurrencia de manantiales de agua subterránea (GSP), utilizando una base de datos con 27 manantiales, de los cuales el 70% se utilizó para entrenar el modelo y 30% restante para validarlo. Se seleccionaron doce factores relacionados con la ocurrencia de los manantiales. Para estimar la relación entre la ubicación de los manantiales y los factores seleccionados se utilizó el método de relación de frecuencia FR. El modelo estimó que 154,418 ha (20% del área de estudio) presentó un alto potencial de ocurrencia de manantiales, dicho de otra manera, en el 20% del área de estudio se conjugan los factores (físicos y ambientales) requeridos para la aparición de manantiales. El modelo construido con el algoritmo de Frecuencia/Ratio se validó obteniendo una efectividad del 87.5%. Para validar geográficamente el modelo del potencial de ocurrencia de manantiales, se comparó con imágenes de alta resolución espacial disponibles en la plataforma Google Earth, donde se encontraron manantiales que no fueron considerados (por desconocimiento de su existencia) para la fase de entrenamiento/validación del modelo. Este hecho ayudó a confirmar el poder predictivo del modelo generado.

Ambas preguntas de investigación fueron respondidas de manera exitosa. La primera reveló que el espejo de agua los manantiales de la zona sur y del norte tienen variaciones considerables en cortos periodos de tiempo, al grado de tener

ausencia total de agua en menos de 9 años. Por otro lado, el modelo realizado para la predicción de la ocurrencia de manantiales, con una efectividad del 87.5% sirvió para encontrar cuerpos de agua no incluidos en el trabajo como el sistema de humedal en las cercanías de la localidad de “Tablas” (22° 15' 26.53" N, 99° 51' 35.76" O), en el municipio de Rioverde. Mejor aún, lo más interesante y sorprendente de este modelo fue encontrar cuerpos de agua intermitentes con la ayuda de la herramienta de la línea del tiempo del software Google Earth. Es decir, el modelo tuvo la capacidad de predecir manantiales en aquellas zonas con un alto potencial de ocurrencia de manantiales. Varias de estas zonas se encontraban totalmente secas en la imagen más reciente en Google Earth, sin embargo al revisar imágenes de fechas pasadas empleando la línea del tiempo, se pudo observar que algunas de las zonas secas presentaban cuerpos de agua formados. Un punto muy especial fue el hecho de encontrar con el modelo de ocurrencia, manantiales en la zona norte y sur y no en la zona centro, fortaleciendo los resultados obtenidos en la sección de la determinación de la dinámica espaciotemporal. Sin embargo, durante las visitas a campo, en los trabajos en campo, se pudieron obtener testimonios relacionados con manantiales desaparecidos en la zona centro. Otra revelación importante obtenida con la realización de este trabajo es que, el manantial más importante del Valle de Rioverde denominado “La Media Luna”, ha mantenido una estabilidad en caudal y forma en los últimos cien años. Los resultados de este trabajo pueden servir de base para investigaciones futuras que se realicen en la zona en cuanto a los manantiales y cuerpos de agua.

Dentro de las preguntas de investigación pendientes que pueden motivar a la realización de trabajos a futuro y que se desprenden de la realización de esta tesis, se encuentra el estimar el tiempo de vida que le resta a cada manantial, o inclusive predecir cuál será el siguiente manantial en desaparecer, ya sea por razones naturales o acciones antropogénicas. Los resultados de las dos investigaciones planteadas en este trabajo pueden ayudar a dar pistas de las zonas o manantiales más vulnerables, y en general, servir como una herramienta

de apoyo para el cuidado y preservación de manantiales, así como de los recursos hídricos de la región.

## Referencias

- Abdalla, F. 2012. Mapping of groundwater prospective zones using remote sensing and GIS techniques: A case study from the Central Eastern Desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*. 70:8-17.
- Adiat, K.A.N., Nawawi, M.N.M., and Abdullah, K. 2012. Assessing the accuracy of GIS-based elementary multi-criteria decision analysis as a spatial prediction tool - A case of predicting potential zones of sustainable groundwater resources. *Journal of Hydrology*. 440-441:75-89.
- Aertsen, W., Kint, V., Van Orshoven, J., Özkan, K. and Muys, B. 2010. Comparison and ranking of different modeling techniques for prediction of site index in Mediterranean mountain forests. *Ecological Modelling*, 221, 1119–1130.
- Aguilar, M.A., Saldaña, M. and Aguilar, F.J. 2013. Assessing geometric accuracy of the orthorectification process from GeoEye-1 and WorldView-2 panchromatic images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 21: 427-435.
- Aguilera González, C. J., 1998. Conservación en cautiverio de peces amenazados del noreste de México. Universidad Autónoma de Nuevo León Facultad de Ciencias Biológicas. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. G005. México D. F.
- Aguirre-Salado, C.A. 2007. Almacenamiento de carbono en bosques manejados de *Pinus patula*: estimación mediante percepción remota. Colegio de Postgraduados- Tesis de maestría. 116 pag.
- Ahmed, K.R. and Akter, S. 2017. Analysis of landcover change in southwest Bengal delta due to floods by NDVI, NDWI and K-means cluster with landsat multi-spectral surface reflectance satellite data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 8: 168-181.



- Alcalá, F.J. 2006. Recarga a los acuíferos españoles mediante balance hidrogeoquímico. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. 2 Vols. 719 pp.
- Amer, R., Ripperdan, R., Wang, T. and Encarnación J. 2012. Groundwater quality and management in arid and semi-arid regions: Case study, Central Eastern Desert of Egypt. *Journal of African Earth Sciences*. 69:13-25.
- Ariza, A. 2013. Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 45 p.
- Balamurugan, G., Seshan, K. and Bera, S. 2017. Frequency ratio model for groundwater potential mapping and its sustainable management in cold desert, India. *Journal of King Saud University Science*. 29: 333-347.
- Ballín, R. 2003. Caracterización y manejo del hidrosistema de la región agrícola de Rioverde. Tesis de Maestría en Hidrosistemas Especialidad en Ambiental. Centro de Investigación y Estudios de Posgrado. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 160 p.
- Basu, N.B., Jindal, P., Schilling, K.E., Wolter, C. and Takle, E. 2012. Evaluation of analytical and numerical approaches for the estimation of groundwater travel time distribution. *Journal of Hydrology*. 475: 65-73.
- Beeri, O., and Phillips, R.L. 2007. Tracking palustrine water seasonal and annual variability in agricultural wetland landscapes using Landsat from 1997 to 2005. *Global Change Biology*. 13(4): 897–912.
- Bekesi, G., McGuire, M. and Moiler, D. 2009. Groundwater Allocation Using a Groundwater Level Response Management Method—Gnangara Groundwater System, Western Australia. *Water Resour Manage*. 23: 1665-1683.

- Bhuiyan, C. 2015. An approach towards site selection for water banking in unconfined aquifers through artificial recharge. *Journal of Hydrology*. 523:465-474.
- Bonanseña, M., Rodríguez, M.C., Pinotti, L. and Ferrero, S. 2015. Using multi-temporal Landsat imagery and linear mixed models for assessing water quality parameters in Río Tercero reservoir (Argentina). *Remote Sensing of Environment*. 158: 28-41.
- Bryson, M., Stephanie, D., Harris, D., Webster, J.M., Thompson, A., Vila-Concejo, A. and Williams, S.B. 2016. Geomorphic changes of a coral shingle cay measured using Kite Aerial Photography. *Geomorphology*. 270: 1-8.
- Bustamante, J., Pacios, F., Díaz-Delgado, R. and Aragonés, D. 2009. Predictive models of turbidity and water depth in the Doñana marshes using Landsat TM and ETM+ images. *Journal of Environmental Management*. 90: 2219-2225.
- Campos, J.C., Sillero, N. and Brito, J.C. 2012. Normalized difference water indexes have dissimilar performances in detecting seasonal and permanent water in the Sahara–Sahel transition zone. *Journal of Hydrology*. 464-465: 438-446.
- Carroll, M.L. and Loboda, T.V. 2017. Multi-Decadal Surface Water Dynamics in North American Tundra. *Remote sensing*. 15 pag.
- Charcas-Salazar, H., Olivares, E. 2002. Proceso de Conformación y Caracterización Actual de la Región Agrícola de Rioverde, San Luis Potosí, México. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Nuevo León. División de Agronomía. 173 p.
- Chuvieco, E. 1990. Fundamentos de teledetección espacial. Segunda edición. Ediciones RIALP, S.A. Madrid. 449 p.
- Collins, S.D., Heintzman, L.J., Starr, S.M., Wright, C.K., Henebry, G.M., and McIntyre, N.E. 2014. Hydrological dynamics of temporary wetlands in the

- southern Great Plains as a function of surrounding land use. *Journal of Arid Environments*. 109: 6–14.
- CONAGUA. 2006. Estudio de actualización geohidrológica en el acuífero de Rioverde, en el estado de San Luis Potosí. Comisión Nacional del Agua. Gerencia Estatal en San Luis Potosí. 264 p.
- CONAGUA. 2012. Presentación de los resultados del estudio técnico del acuífero Rioverde, estado de San Luis Potosí. Subdirección general técnica. 29 p.
- CONAGUA. 2013. Estadísticas del agua en México. 176 pags.
- Das, A.K., Goswami, S., Chakrabarti, A. and Chakraborty, B. 2017. A new hybrid feature selection approach using feature association map for supervised and unsupervised classification. *Expert Systems With Applications*. 88: 81-94.
- Dennison, P.E., Brunelle, A.R. and Carter, V.A. 2010. Assessing canopy mortality during a mountain pine beetle outbreak using GeoEye-1 high spatial resolution satellite data. *Remote Sensing of Environment*. 114: 2431-2435.
- Díaz-Rivera, J.C. 2015. Modelación geoespacial integrada del potencial de agua subterránea en el acuífero de Rioverde, San Luis Potosí. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 86 p.
- Díaz-Vilariño, L., González-Jorge, H., Martínez-Sánchez, J., Bueno, M. and Arias, P. 2016. Determining the limits of unmanned aerial photogrammetry for the evaluation of road runoff. *Measurement*. 85: 132-141.
- Ding, C., Liu, X., Huang, F., Li, Y. and Zou, X. 2017. Onset of drying and dormancy in relation to water dynamics of semi-arid grasslands from MODIS NDWI. *Agricultural and Forest Meteorology*. 234-235: 22-30.
- Dirección de Ordenamiento Ecológico. 2000. Plan de Ordenamiento Ecológico del Valle de Rioverde y Ciudad Fernández. 196 p.

- DOF. 2014. Acuerdo por el que se dan a conocer los Estudios Técnicos de Aguas Nacionales Subterráneas del Acuífero Rioverde, clave 2415, en el Estado de San Luis Potosí, Región Hidrológico Administrativa Golfo Norte. Diario Oficial de la Federación (DOF). México. 10p. Disponible en: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/DO3441.pdf>
- Ertugrul, O.F. and Tagluk, M.E. 2017. A novel version of k nearest neighbor: Dependent nearest neighbor. *Applied Soft Computing*. 55: 480-490.
- Fasel, M., Bréthaut, C., Rouholahnejad, E., Lacayo-Emery, M.A. and Lehmann, A. 2016. Blue water scarcity in the Black Sea catchment: Identifying key actors in the water-ecosystem-energy-food nexus. *Environmental Science & Policy*. 66: 140-150.
- Gao, B.C. 1996. NDWI A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. *Remote sens. Environ*. 58: 257-266.
- García-Varela, A. 2010. Landsat. *Sistemas de Comunicación Vía Satélite*. 40 p.
- Gemitzi, A. and Stefanopoulos, K. 2011. Evaluation of the effects of climate and man intervention on ground waters and their dependent ecosystems using time series analysis. *Journal of Hydrology*. 403:130-140.
- GeoEnciclopedia. 2017. Disponible en: <http://www.geoenciclopedia.com>
- Gómez-Rodríguez, C., Bustamante, J., and Díaz-Paniagua, C. 2010. Evidence of hydroperiod shortening in a preserved system of temporary ponds. *Remote Sensing*. 2: 1439–1462.
- Hagner, O. and Reese, H. 2007. A method for calibrated maximum likelihood classification of forest types. *Remote Sensing of Environment*. 110: 438-444.

- Huang, S., Dahal, D., Young, C., Chander, G., and Liu, S. 2011. Integration of Palmer drought severity index and remote sensing data to simulate wetland water surface from 1910 to 2009 in Cottonwood Lake area, North Dakota. *Remote Sensing of Environment*. 115(12): 3377–3389.
- Huang, C., Peng, Y., Lang, M., Yeo, I. -Y., and McCarty, G. 2014. Wetland inundation mapping and change monitoring using Landsat and airborne LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*. 141: 231–242.
- Halabisky, M., Moskal, L.M., Gillespie, A. and Hannam, M. 2016. Reconstructing semi-arid wetland surface water dynamics through spectral mixture analysis of a time series of Landsat satellite images (1984–2011). *Remote Sensing of Environment*. 177: 171-183.
- Indoitu, R., Kozhoridze, G., Batyrbaeva, M., Vitkovskaya, I., Orlovsky, N., Blumberg, D. and Orlovsky, L. 2015. Dust emission and environmental changes in the dried bottom of the Aral Sea. *Aeolian Research*. 17: 101-115.
- INEGI. 2013. Aspectos técnicos de imágenes GEOEYE-1. 12 pags.
- Jothibasu, A. and Anbazhagan, S. 2016. Modeling groundwater probability index in Ponnaiyar River basin of South India using analytic hierarchy process. *Model. Earth Syst. Environ*. 2:109-125.
- Kelly, J.T. and A Gontz, A.M. 2018. Using GPS-surveyed intertidal zones to determine the validity of shorelines automatically mapped by Landsat water indices. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*. 65: 92-104.
- Khadka, M. B., Martin, J. B. and Kurz, M. J. 2017. Synoptic estimates of diffuse groundwater seepage to a spring-fed karst river at high spatial resolution using an automated radon measurement technique. *Journal of Hydrology*. 544: 86-96.
- Klein, I., Dietz, A.J., Gessner, U., Galayeva, A., Myrzakhmetov, A. and Kuenzer, C. 2014. Evaluation of seasonal water body extents in Central Asia over the

- past 27 years derived from medium-resolution remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 26: 335-349.
- Klemas, V. and Pieterse, A. 2015. Using remote sensing to map and monitor water resources in arid and semiarid regions. *Advances in Watershed Science and Assessment*. pags. 33-60.
- Kumar, T., Gautam, A.K. and Kumar, T. 2014. Appraising the accuracy of GIS-based Multi-criteria decision making technique for delineation of Groundwater potential zones. *Water Resour Manage*. 28: 4449-4466.
- Kumar-Gautam, V., Kumar-Gaurav, P., Murugan, P. and Annadurai, M. 2015. Assessment of Surface Water Dynamics in Bangalore using WRI, NDWI, MNDWI, Supervised Classification and K-T Transformation. *International Conference On Water Resources, Coastal And Ocean Engineering (ICWRCOE 2015)*. 4: 739-746.
- Kutser, T. 2012. The possibility of using the Landsat image archive for monitoring long time trends in coloured dissolved organic matter concentration in lake waters. *Remote Sensing of Environment*. 123: 334-338.
- Lee, S., Kim, Y. and Oh, Hyun-Joo. 2012. Application of a weights-of-evidence method and GIS to regional groundwater productivity potential mapping. *Journal of Environmental Management*. 96:91-105.
- Li, R. and Merchant, J.W. 2013. Modeling vulnerability of groundwater to pollution under future scenarios of climate change and biofuels-related land use change: A case study in North Dakota, USA. *Science of the Total Environment*. 447: 32-45.
- Liu, K., Shi, W. and Zhang, H. 2011. A fuzzy topology-based maximum likelihood classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 66: 103-114.

- Liu, J., Wang, Y., Yu, Z., Cao, X., Tian, L., Sun, S. and Wu, P. 2017. A comprehensive analysis of blue water scarcity from the production, consumption, and water transfer perspectives. *Ecological Indicators*. 72: 870-880.
- Lobo, F.L., Costa, M.P.F. and Novo, E.M.L.M. 2015. Time-series analysis of Landsat-MSS/TM/OLI images over Amazonian waters impacted by gold mining activities. *Remote Sensing of Environment*. 157: 170-184.
- López-Bermúdez, F. y Sánchez-Fuster, M.C. 2010. Manantiales de la Comarca del Noroeste de la Región de Murcia: Un patrimonio natural amenazado. *Papeles de Geografía*. 51-52: 169-188.
- López-García, J., Prado-Molina, J., Manzo-Delgado, L. and Peralta-Higuera, A. 2016. Monitoring changes of forest canopy density in a temperate forest using high-resolution aerial digital photography. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 90: 59-74.
- Lymburner, L., Botha, E., Hestir, E., Anstee, J., Sagar, S., Dekker, A. and Malthus, T. 2016. Landsat 8: Providing continuity and increased precision for measuring multi-decadal time series of total suspended matter. *Remote Sensing of Environment*. IN PRESS.
- Machiwal, D. and Jha, M.K. 2015. GIS-based water balance modeling for estimating regional specific yield and distributed recharge in data-scarce hard-rock regions. *Journal of Hydro-environment Research*. 9: 554-568.
- Magesh, N.S., Chandrasekar, N. and Soundranayagam, J. 2012. Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques. *Geoscience Frontier*. 3(2):189-196.
- Maillo, J., Ramírez, S., Triguero, I. and Herrera, F. 2017. kNN-IS: An Iterative Spark-based design of the k-Nearest Neighbors classifier for big data. *Knowledge-Based Systems*. 117: 3-15.

- Manap, M.A., Nampak, H. Pradhan, B., Lee, S., Azmin-Sulalman, W.N. and Firuz-Ramll, M. 2012. Application of probabilistic-based frequency ratio model in groundwater potential mapping using remote sensing data and GIS. Saudi Society for Geosciences. 7(2):711-724.
- Manju, S. and Sagar, N. 2017. Renewable energy integrated desalination: A sustainable solution to overcome future fresh-water scarcity in India. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 73: 594-609.
- Marshal, M. and Thenkabail, P. 2015. Advantage of hyperspectral EO-1 Hyperion over multispectral IKONOS, GeoEye-1, WorldView-2, Landsat ETM+, and MODIS vegetation indices in crop biomass estimation. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 108: 205-218.
- Martínez-Gil, F.J. 1972. Aspecto histórico y evolutivo de las ideas acerca de las aguas subterráneas desde los tiempos más remotos hasta el nacimiento de la Ciencia Hidrogeológica. Universidad de Salamanca. Apartado de la Memoria con la que obtuvo la plaza de Profesor Agregado en la Universidad de Salamanca. 10 p.
- Mas, J. F. 2011. Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio. México, ISBN, 978-607.
- McDermid, S.S. and Winter, J. 2017. Anthropogenic forcings on the climate of the Aral Sea: A regional modeling perspective. Anthropocene. IN PRESS.
- Moghaddam, D.D., Rezaei, M., Pourghasemi, H.R., Pourtaghie, Z.S. and Pradhan, B. 2015. Groundwater spring potential mapping using bivariate statistical model and GIS in the Taleghan Watershed, Iran. Arab J Geosci. 8: 913-929.
- Molinos-Senante, M. and Donoso, G. 2016. Water scarcity and affordability in urban water pricing: A case study of Chile. Utilities Policy. 43: 107-116.
- Mueller, N., Lewis, A., Roberts, D., Ring, S., Melrose, R., Sixsmith, J., Lymburner, L., McIntyre, A., Tan, P., Curnow, S. and Ip, A. 2016. Water observations



- from space: Mapping surface water from 25 years of Landsat imagery across Australia. *Remote Sensing of Environment*. 174: 341-352.
- Murthy, K.S.R. and Mamo, Abiy, G. 2009. Multi-criteria decision evaluation in groundwater zones identification in Moyale-Teltele subbasin, South Ethiopia. *International Journal of Remote Sensing*. 30: 2729-2740.
- Naghibi, S.A. and Pourghasemi, H.R. 2016. GIS-based groundwater potential mapping using boosted regression tree, classification and regression tree, and random forest machine learning models in Iran. *Environ Monit Assess*. 188:44.
- Naghibi, S.A., Moghaddam, D.D., Kalantar, B., Pradhan, B. and Kisi, O. 2017. A comparative assessment of GIS-based data mining models and a novel ensemble model in groundwater well potential mapping. *Journal of Hydrology*. 548: 471-483.
- Nampak, H., Pradhan, B. and Manap, M. 2014. Application of GIS based data driven evidential belief function model to predict groundwater potential zonation. *Journal of Hydrology*. 513:238-300.
- Oh, H.J., Kim, Y., Choi, J., Park, E. and Lee, S. 2010. GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang City, Korea. *Journal of Hydrology*. 399:158-172.
- Opp, C., Groll, M., Aslanov, I., Lotz, T. and Vereshagina, N. 2017. Aeolian dust deposition in the southern Aral Sea region (Uzbekistan): Ground-based monitoring results from the LUCA project. *Quaternary International*. 429:86-99.
- Ovakoglou, G., Alexandridis, T.K., Crisman, T.L., Skoulikaris, C. and Vergos, G. 2016. Use of MODIS satellite images for detailed lake morphometry: Application to basins with large water level fluctuations. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 51: 37-46.

<sup>1</sup>Ozdemir, A. 2011. Using a binary logistic regression method and GIS for evaluating and mapping the groundwater spring potential in the Sultan Mountains (Aksehir, Turkey). *Journal of Hydrology*.405: 123-136.

<sup>2</sup>Ozdemir, A. 2011. GIS-based groundwater spring potential mapping in the Sultan Mountains (Konya, Turkey) using frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods and their comparison. *Journal of Hydrology*. 411: 290-308.

Palacio-Núñez, J., Clemente-Sánchez, F., Herrera-Haro, J.G., Ortega-Escobar, M., García-Bojalil, C.M. y Larqué-Saavedra, A. 2000. Ornitofauna acuática y ribereña del ecosistema de La Media Luna, Rioverde, San Luis Potosí, México. *Agrociencia*. 34: 303-310.

Palacio-Nuñez J., G. Olmos-Oropeza, J. R-Verdú, E. Galante, O. C. Rosas-Rosas, J.F. Mastínez-Montoya y J. Enriquez. 2009. Traslape espacial de la comunidad de peces dulceacuícolas diurnos en el sistema de humedal Media Luna, Rioverde, S.L.P., México. *Hidrobiológica* 20 (1): 21-30.

Paredes, T. 1909. Estudio Hidrológico de la región de Rioverde y Arroyo Seco en los estados de San Luis Potosí y Querétaro. *Paregones del Instituto Geologico de México*. Tomo II. Número 8. 50 pag.

Poli, D., Remondino, F., Angiuli, E. and Agugiario, G. 2015. Radiometric and geometric evaluation of GeoEye-1, WorldView-2 and Pléiades-1A stereo images for 3D information extraction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 100: 35-47.

Rajendran, S., Al-Sayigh, A.R. and Al-Awadhi, T. 2016. Vegetation analysis study in and around Sultan Qaboos University, Oman, using Geoeye-1 satellite data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 19: 297-311.

Ramachandran, B., Justice, C and Abrams, M.J. 2010. Land Remote Sensing and global Environmental Change NASA's Earth Observing System and

theScience of ASTER and MODIS. Remote Sensing and Digital Image Processing.

Reschke, J., and Hüttich, C. 2014. Continuous field mapping of Mediterranean wetlands using sub-pixel spectral signatures and multi-temporal Landsat data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 28: 220–229.

Rocha-Escalante, H. 2008. Estrategias para el desarrollo sustentable de los sistemas de flujo en el acuífero de Rioverde, S.L.P. Tesis de Maestría en Ciencias. Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 148 p.

Rodríguez-García, R., Martínez-Muñoz, C., Hernández-Vizcaino, D., Lucas-Veguillas, J. y Acevedo-de-Pedro, M.L. 2003. Calidad del agua de fuentes de manantial en la zona básica de salud de Sigüenza. *Revista Española de Salud Pública*. 77: 423-432.

Saadi, R., Túri, M., Palcsu, L., Marah, H., Hakam, O.K., Rinyu, L., Molnár, M. and Futó, I. 2017. A potential groundwater aquifer for palaeoclimate reconstruction: Turonian Aquifer, Tadla Basin, Morocco. *Journal of African Earth Sciences*. 132: 64-71.

Sarp, G. and Ozcelik. 2016. Water body extraction and change detection using time series: A case study of Lake Burdur, Turkey. *Journal of Taibah University for Science*. IN PRESS.

Shatat, M., Worall, M. and Riffat, S. 2013. Opportunities for solar water desalination worldwide: Review. *Sustainable Cities and Society*. 9: 67-80.

Sifuentes-Amaya R. and Ramirez-Valverde, G. 2010. Effects of specifying an incorrect model for Logistic Regression, with two independent correlated variables. *Agrociencia*. 44:197-207.

- Silva-García, J.T., Ochoa-Estrada, S., Cruz-Cárdenas, G., Nava-Velázquez, J. y Villalpando-Barragán, F. 2016. Manantiales de la cuenca del río Duero Michoacán: operación, calidad y cantidad. 32(1): 55-68.
- Singh, A., Seitz, F. and Schwatke, C. 2012. Inter-annual water storage changes in the Aral Sea from multi-mission satellite altimetry, optical remote sensing, and GRACE satellite gravimetry. *Remote Sensing of Environment*. 123:187-195.
- Singh, A. 2014. Groundwater resources management through the applications of simulation modeling: A review. *Science of the Total Environment*. 499: 414-423.
- Song, C., Huang, B. and Linghong, K. 2013. Modeling and analysis of lake water storage changes on the Tibetan Plateau using multi-mission satellite data. *Remote Sensing of Environment*. 135: 25-35.
- Sritarapat, T. and Takeuchi, W. 2017. Building classification in Yangon City, Myanmar using Stereo GeoEye images, Landsat image and night-time light data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 6: 46-51.
- Sun, J., Dang, Z. and Zheng, S. 2017. Development of payment standards for ecosystem services in the largest interbasin water transfer projects in the world. *Agricultural Water Management*. 182: 158-164.
- Tillman, F.D., Callegary, J.B., Nagler, P.L. and Glenn, E.P. 2012. A simple method for estimating basin-scale groundwater discharge by vegetation in the basin and range province of Arizona using remote sensing information and geographic information systems. *Journal of Arid Environments*. 82: 44-52.
- Tulbure, M. and Broich, M. 2013. Spatiotemporal dynamic of surface water bodies using Landsat time-series data from 1999 to 2011. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 79: 44-52.

- UASLP. 2005. Estudio para la determinación de proyectos prioritarios para la recarga del acuífero Rioverde - Ciudad Fernández y región Hidrológica Pánuco. 189 p.
- Venkateswaran, S. and Ayyandurai, R. 2015. Groundwater Potential Zoning in Upper Gadilam River Basin. International Conference on Wather Resources, Coastal and Ocean Engineering (ICWRCOE 2015). 4: 1275- 1282.
- Villanueva-Díaz, J., Hernández-Reyna, A., García-Sánchez, F., Cornejo-Oviedo, E., Stahle, D., Therrell, M. Y Cleaveland, M. 2005. Análisis estructural de un rodal de sabino (*Taxodium mucronatum* Ten.) en los peroles, San Luis Potosí, México. *Ciencia Forestal en México*. 28: 57-79.
- Zaidi, F.K., Nazzal, Y., Ahmed, I., Naeem, M. and Jafri, M.K. 2015. Identification of potential artificial groundwater recharge zones in Northwestern Saudi Arabia using GIS and Boolean logic. *Journal of African Earth Sciences*. 111:156-169.
- Zhou, Y. and Li, W. 2011. A review of regional groundwater flow modeling. *Geoscience Frontiers*. 2(2):205-214.