



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA

PROGRAMAS MULTIDISCIPLINARIOS DE POSGRADO EN CIENCIAS  
AMBIENTALES

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

## DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

**ANÁLISIS ECONÓMICO Y AMBIENTAL DE LA PRODUCCIÓN DE CHILE  
(*Capsicum sp.*) EN LA ZONA IRRIGADA POR EL ACUÍFERO CALERA**

PRESENTA:

**CRISTINA JARED CARRILLO MARTÍNEZ**

**DIRECTOR DE TESIS:**

Dr. GREGORIO ÁLVAREZ FUENTES

**ASESORES:**

Dra. GISELA AGUILAR BENÍTEZ

Dr. CARLOS CONTRERAS SERVIN

**14 de junio de 2019**

# **CRÉDITOS INSTITUCIONALES**

## **PROYECTO REALIZADO EN:**

El Instituto de Investigación de Zonas Desérticas (IIZD) de la  
Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
Bajo la tutoría del Dr. Gregorio Álvarez Fuentes

## **AGRADEZCO A CONACyT EL OTORGAMIENTO DE LA BECA-TESIS**

Becario No. 488527

## **ASÍ COMO POR EL OTORGAMIENTO DE LA BECA MIXTA PARA REALIZAR LA ESTANCIA DE INVESTIGACIÓN EN:**

Universidad Autónoma de Nayarit

**EL DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES RECIBE APOYO ATRAVÉS  
DEL PROGRAMA NACIONAL DE POSGRADOS DE CALIDAD (PNPC)**

## **DEDICATORIA**

Agradezco a Dios por todas sus bendiciones y ayuda en los momentos más difíciles que se presentaron durante el desarrollo de este importante proyecto en mi vida.

Este trabajo está dedicado a todas las personas que han creído en mí, me han apoyado en cada una de las decisiones importantes que he tomado a través de mi carrera profesional y que han sido una parte fundamental para culminar con éxito este proyecto.

A mi esposo y mi hijo:

José Alfonso Pinedo Escobar y José Alfonso Pinedo Carrillo

Por ser el motor que mueve mi mundo y la luz que ilumina mi camino. Son la motivación más importante que tengo para salir adelante y esforzarme cada día para ser una mejor persona de la que se sientan orgullosos. Los amo.

A mi mamá:

Rosa María Martínez Veyna

Por darme todo su amor, su apoyo y su comprensión.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), a la Agenda Ambiental por medio del Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales (PMPCA) y en especial al Instituto de Investigación de Zonas Desérticas (IIZD) por la oportunidad que me brindaron para realizar el Doctorado en Ciencias Ambientales.

Al Dr. Gregorio Álvarez Fuentes por su dirección, dedicación y conocimientos aportados a este proyecto de investigación.

A la Dra. Gisela Aguilar Benítez y al Dr. Carlos Contreras Servín por sus valiosas contribuciones para el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Álvaro Can Chulím, por ser parte del jurado, por el apoyo brindado en la realización de este trabajo y por su asesoría durante las estancias de investigación en la Universidad Autónoma de Nayarit.

Al Dr. Luis Armando Bernal Jácome por ser parte del jurado y por sus aportaciones para mejorar la calidad de este proyecto.

Al M. C. Ulises Pineda Manzano por su amistad y su ayuda en el análisis espacial en cada una de las etapas de la investigación.

A todos los productores por su apreciable colaboración en la recopilación de la información.

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN GENERAL.....	1
GENERAL ABSTRACT .....	2
1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	4
1.1 Descripción del área de estudio.....	4
1.2 Justificación .....	5
1.3 Hipótesis.....	6
1.4 Objetivos.....	6
1.5 Descripción del contenido del documento.....	7
1.6 Literatura citada.....	7
2. ANTECEDENTES.....	10
2.1 Características del acuífero calera .....	10
2.1.1 Localización.....	10
2.1.2 Situación administrativa .....	11
2.1.3 Fisiografía.....	12
2.1.4 Clima.....	12
2.1.5 Hidrografía .....	13
2.1.6 Geología.....	13
2.1.7 Hidrogeología.....	15
2.1.8 Hidrometría.....	16
2.1.9 Tipos de suelo .....	17
2.1.9.1 Kastañozem.....	17
2.1.9.2 Regosol .....	18
2.1.9.3 Xerosol.....	18
2.2 Importancia socioeconómica de la región que comprende el acuífero Calera .....	18
2.2.1 Actividad agrícola .....	18
2.2.1.1 Producción de chile (Capsicum sp.) en la región que comprende el acuífero Calera. ....	20
2.2.2 Actividad industrial.....	21
2.3 Indicadores para la evaluación de la rentabilidad de los sistemas de producción intensivos .....	21

2.3.1 Costo de producción.....	21
2.3.2 Porcentaje de rentabilidad .....	22
2.3.3 Relación beneficio-costo.....	22
2.3.4 Punto de equilibrio.....	23
2.4 Impactos ambientales derivados de los sistemas de producción agrícola intensivos .....	23
2.4.1 Reducción de la calidad de agua .....	23
2.4.1.1 Parámetros para la evaluación de la calidad del agua de riego.....	24
2.4.1.1.1 Condición de electroneutralidad.....	24
2.4.1.1.2 pH .....	24
2.4.1.1.3 Conductividad eléctrica .....	24
2.4.1.1.4 Sólidos totales disueltos .....	25
2.4.1.1.5 Salinidad efectiva y potencial.....	25
2.4.1.1.6 Relación de adsorción de sodio.....	25
2.4.1.1.7 Carbonato de sodio residual .....	25
2.4.1.1.8 Porcentaje de sodio posible .....	26
2.4.1.1.9 Boro .....	26
2.4.1.1.10 Fósforo .....	26
2.4.1.1.11 Clasificación hidrogeoquímica del agua.....	26
2.4.2 Reducción de la calidad del suelo .....	26
2.4.2.1 Parámetros físicos y químicos para la evaluación de la calidad del suelo agrícola.....	27
2.4.2.1.1 pH .....	27
2.4.2.1.2 Conductividad eléctrica .....	27
2.4.2.1.3 Materia orgánica .....	28
2.4.2.1.4 Nitrógeno .....	28
2.4.2.1.5 Fósforo .....	29
2.4.2.1.6 Potasio .....	30
2.4.2.1.8 Capacidad de intercambio catiónico .....	30
2.4.2.1.9 Bases intercambiables .....	31
2.4.2.1.10 Relación de adsorción de sodio y porcentaje de sodio intercambiable .....	32
2.4.2.1.11 Textura .....	32
2.5 Literatura citada.....	33

3. RENTABILIDAD DE LA PRODUCCIÓN DE FRIJOL ( <i>Phaseolus vulgaris</i> L.), MAÍZ ( <i>Zea mays</i> L.) Y CHILE ( <i>Capsicum annuum</i> .) EN EL MUNICIPIO DE MORELOS, ZACATECAS.....	38
3.1 Resumen.....	38
3.2 Introducción.....	38
3.3 Materiales y métodos .....	39
3.4 Resultados y discusión .....	43
3.4.1 Características generales de los productores .....	43
3.4.2 Características generales de la producción .....	43
3.4.3 Tenencia de la tierra.....	45
3.4.4 Costo de producción.....	45
3.4.5 Rentabilidad.....	52
3.4.6 Depreciación .....	52
3.4.7 Análisis socioeconómico.....	53
3.5 Conclusiones.....	53
3.6 Literatura citada.....	53
4. CALIDAD DEL AGUA PARA RIEGO AGRÍCOLA EN LA REGIÓN DEL ACUÍFERO CALERA .....	59
4.1 Resumen.....	59
4.2 Introducción.....	59
4.3 Materiales y métodos .....	61
4.3.1 Ubicación y caracterización del área de estudio.....	61
4.3.1.1 Clima.....	62
4.3.1.2 Geología y tipos de suelo.....	62
4.3.1.3 Marco hidrogeológico.....	62
4.3.1.4 Actividad agrícola .....	63
4.3.2 Muestreo de agua y métodos analíticos .....	63
4.3.3 Condición de electroneutralidad.....	65
4.3.4 pH .....	65
4.3.5 Criterio de salinidad .....	66
4.3.6 Criterio de sodicidad.....	66
4.3.7 Criterio de toxicidad .....	66
4.3.8 Clasificación hidrogeoquímica del agua .....	67
4.3.9 Análisis estadístico .....	67

4.4 Resultados y discusión .....	68
4.4.1 Condición de electroneutralidad.....	68
4.4.2 Clasificación del agua respecto a su pH.....	69
4.4.3 Criterio de salinidad .....	70
4.4.3.1 Conductividad eléctrica .....	70
4.4.3.2 Sólidos totales disueltos .....	72
4.4.3.3 Salinidad efectiva y potencial.....	72
4.4.4 Criterio de sodicidad.....	74
4.4.4.1 Relación de adsorción de sodio.....	74
4.4.4.2 Carbonato de sodio residual .....	76
4.4.4.3 Porcentaje de sodio posible.....	76
4.4.5 Criterio de toxicidad .....	78
4.4.5.1 Boro .....	78
4.4.5.2 Fósforo.....	78
4.4.5.3 Nitrato.....	79
4.4.6 Clasificación hidrogeoquímica .....	80
4.4.7 Análisis estadístico .....	82
4.5 Conclusión .....	87
4.6 Literatura citada.....	88
5. ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL SUELO PARA LA PRODUCCIÓN INTENSIVA DE CHILE ( <i>CAPSICUM SP.</i> ) EN LA REGIÓN IRRIGADA POR EL ACUÍFERO, CALERA. ....	96
5.1 Resumen.....	96
5.2 Introducción.....	96
5.3 Materiales y métodos .....	97
5.3.1 Área de estudio .....	97
5.3.2 Fertilización.....	98
5.3.3 Muestreo de suelos y análisis químicos .....	99
5.3.4 Análisis estadístico .....	103
5.4 Resultados y discusión .....	103
5.4.1 Fertilización.....	103
5.4.2 Análisis químico de los suelos.....	106
5.4.2.1 Indicadores de calidad del suelo .....	106

5.4.2.1.2 Conductividad eléctrica .....	107
5.4.2.1.3 Textura .....	108
5.4.2.1.4 Densidad Aparente .....	109
5.4.2.1.5 Materia orgánica .....	110
5.4.2.1.6 Micronutrientes (N, P, K) .....	112
5.4.2.1.7 Bases intercambiables .....	114
5.4.2.1.8 Capacidad de Intercambio catiónico .....	115
5.4.2.1.9 Relación de adsorción de sodio y Porcentaje de sodio intercambiable .....	116
5.4.3 Análisis estadístico de componentes principales.....	118
5.4.4 Análisis estadístico clúster .....	119
5.5 Conclusiones y recomendaciones.....	120
5.6 CONCLUSIONES GENERALES.....	121
5.7 Literatura citada.....	123

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas geográficas donde se localiza el polígono que comprende el acuífero, Calera.....	10
Tabla 2. Demanda de agua y superficie agrícola que los principales cultivos de la región del acuífero Calera.....	19
Tabla 3. Estimación de los costos de producción de frijol, maíz y chile por hectárea, año agrícola 2013. ....	46
Tabla 4. Desglose de los Insumos empleados en la producción de una hectárea de frijol, maíz y chile.....	48
Tabla 5. Cantidad de combustible para las actividades mecánicas en la producción de una hectárea de frijol, maíz y chile.....	49
Tabla 6. Cantidad de jornales por hectárea requeridos para las labores demandadas en la producción de frijol, maíz y chile.....	50
Tabla 7. Localización de los pozos de muestreo en la región que comprende el acuífero, Calera. ....	63
Tabla 8. Marchas analíticas utilizadas para la determinación de los parámetros en el agua subterránea del acuífero Calera. ....	65
Tabla 9. Clasificación de los parámetros de calidad de agua para uso agrícola.....	67
Tabla 10. Concentración iónica del agua subterránea en el acuífero Calera, Zacatecas. Ciclo 2016. ....	68
Tabla 11. Concentración iónica del agua subterránea en el acuífero Calera, Zacatecas. Ciclo 2017. ....	69
Tabla 12. Concentraciones observadas en los parámetros que integran el criterio de salinidad durante los muestreos de 2016-2017 en el acuífero Calera. ....	71
Tabla 13. Valores registrados en los parámetros que integran el criterio de sodicidad durante los ciclos 2016-2017 en el acuífero Calera. ....	77

Tabla 14. Cantidades obtenidas en los parámetros que integran el criterio de toxicidad para los ciclos 2016-2017 en el acuífero Calera. ....	79
Tabla 15. Análisis estadístico por bloques de las muestras de agua del acuífero Calera. Ciclos de producción 2016-2017. ....	83
Tabla 16. Análisis estadístico por bloques estratificados en los parámetros de las muestras de agua del acuífero Calera. Ciclos de producción 2016-2017. ....	83
Tabla 17. Análisis estadístico por componentes principales en los parámetros de las muestras de agua del acuífero Calera. Ciclos de producción 2016-2017. ....	85
Tabla 18. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo. ....	100
Tabla 19. Técnicas analíticas utilizadas para la determinación de los atributos usados como indicadores de calidad del suelo del acuífero Calera. ....	101
Tabla 20. Clasificación de los parámetros químicos evaluados en el suelo. ....	102
Tabla 21. Principales agroquímicos usados para la producción de chile en la región del acuífero, Calera. ....	104
Tabla 22. Parámetros químicos de las muestras de suelo del Acuífero, Calera; ciclos 2016-2017. ....	107
Tabla 23. Componentes principales que inciden en calidad de suelo para uso agrícola en el Acuífero, Calera. Ciclo 2017. ....	119

## **INDICE DE FIGURAS**

Figura 1. Localización del acuífero Calera y municipios que abarca. ....	11
Figura 2. Material geológico localizado en la región del acuífero Calera. ....	14
Figura 3. Hidrogeología de la región que comprende el acuífero, Calera. ....	15
Figura 4. Localización y profundidad de los pozos que se localizan en el acuífero, Calera. ....	16
Figura 5. Tipos de suelo en la región que abarca el acuífero, Calera. ....	17
Figura 6. Localización del municipio de Morelos, Zacatecas. ....	40
Figura 7. Ubicación de los pozos muestreados en el acuífero Calera. ....	64
Figura 8. Clasificación del agua del acuífero Calera en cuanto a su CE y RAS en el ciclo 2016. ....	74
Figura 9. Clasificación del agua del acuífero Calera en cuanto a su CE y RAS en el ciclo 2017. ....	75
Figura 10. Clasificación hidrogeoquímica del agua del acuífero Calera en el ciclo de 2016. ....	80
Figura 11. Clasificación hidrogeoquímica del agua del acuífero Calera en el ciclo de 2017. ....	81
Figura 12. Análisis clúster y agrupación de los pozos del acuífero Calera de acuerdo a los parámetros evaluados, ciclos 2016-2017. ....	86
Figura 13. Agrupación de los pozos del acuífero Calera de acuerdo a los valores obtenidos en los parámetros evaluados y su ubicación en la región, ciclo 2017. ....	87

Figura 14. Clase textural de las muestras de suelo en el Acuífero Calera durante el periodo de 2016-2017. ....	109
Figura 15. Clasificación de las muestras de suelos en la región del acuífero Calera, de acuerdo a su conductividad eléctrica y relación de adsorción de sodio. ....	117
Figura 16. Análisis clúster y agrupación de las parcelas evaluadas en la región del acuífero Calera de acuerdo a los parámetros evaluados, ciclos 2016-2017. ....	120

## RESUMEN GENERAL

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la rentabilidad del sistema de producción de chile (*Capsicum sp.*) así como la calidad del agua y la calidad del suelo de las unidades destinadas a la producción del cultivo de chile en los municipios de Zacatecas, Morelos, Calera, Enrique Estrada, y Pánuco, los cuales se ubican en la región del acuífero Calera, Zacatecas.

Se inició con un diagnóstico de las actividades agrícolas de la zona de interés y se estimaron los costos de producción por hectárea, el porcentaje de rentabilidad y la relación beneficio-costos B/C. Se realizó un muestreo de agua de acuerdo con NOM-014-SSA1-1993 a los pozos que frecuentemente se usan para irrigación de chile, estos pozos se clasificaron en cinco estratos considerando márgenes de profundidad de 50 a 280 m sobre el nivel estático. Para los criterios de salinidad, sodicidad, y toxicidad se determinaron los parámetros de calidad de agua, y se determinaron la velocidad de las corrientes subterráneas para observar la dinámica de recarga del acuífero. Durante dos ciclos consecutivos se realizó un muestreo según la norma NOM-021-RECNAT-2000 a las parcelas donde se cultivó chile durante dos ciclos consecutivos y se evaluaron aspectos sobre su fertilización y sus características físicoquímicas, además se estimó la relación de adsorción de sodio y porcentaje de sodio intercambiable para evaluar su posible sodificación.

El cultivo de chile requiere de una inversión mayor en comparación con la producción de frijol y maíz, pero es el que genera la rentabilidad más alta y de acuerdo a los resultados de este trabajo, su dinámica no ha impactado la calidad de agua del acuífero. También se evidenció que la profundidad de los pozos no influye en la calidad del agua, ésta más bien depende de la región en donde se ubica cada pozo, de los procesos de recarga, geología de la región, velocidad de las corrientes subterráneas y la infiltración por la acción de fallas y fracturas geológicas. Se encontró que la mayoría de los suelos de la región del acuífero Calera, presentan una clasificación franco arcillo arenosa sin embargo, de acuerdo con la SEMARNAT (2002) observan un considerable contenido de arena, además son pobres en nutrientes y también presentan problemas de compactación, principalmente por el sistema convencional mecanizado y la falta de estrategias de conservación de los suelos, por lo tanto la dinámica agrícola está impactando la calidad de su suelo.

Ante esta situación se recomiendan prácticas de labranza de conservación, por lo menos tres años para que los suelos desarrollen una porosidad más favorable en los primeros 25 cm. También se recomienda y la aplicación de materia orgánica, por lo menos 1 ton ha<sup>-1</sup> de materiales orgánicos para modificar la estructura y la distribución del espacio poroso del suelo para que permita una mejor

infiltración y retención de agua y nutrientes y por lo tanto se incrementaría la capacidad e intercambio catiónico.

**Palabras Clave:** Producción de chile, Acuífero Calera, Rentabilidad, Calidad de agua, Calidad de suelo.

## GENERAL ABSTRACT

The objective of the present work was to evaluate the profitability of the Chilean pepper production system (*Capsicum* sp.) As well as the water quality and the soil quality of the units destined to the production of the chile culture in the municipalities of Zacatecas, Morelos, Calera, Enrique Estrada, and Pánuco, which are located in the Calera aquifer region, Zacatecas.

It started with a diagnosis of the agricultural activities of the area of interest and estimated the production costs per hectare, the profitability percentage and the benefit-cost ratio  $B / C$ , a water sampling was conducted in accordance with NOM-014 -SSA1-1993 to the wells that are often used for irrigation of chili, these wells were classified into five strata considering depth margins of 50 to 280 m above the static level. For the criteria of salinity, sodicity, and toxicity, the parameters of water quality were determined, and the speed of the underground currents was determined to observe the recharge dynamics of the aquifer. During two consecutive cycles, a sampling according to the NOM-021-RECNAT-2000 standard was carried out to the plots where chili was cultivated during two consecutive cycles and aspects of its fertilization and its physicochemical characteristics were evaluated, in addition the adsorption ratio of Sodium and interchangeable sodium percentage to evaluate its possible sodification.

The cultivation of chile requires a greater investment in comparison with the production of beans and corn, but it is the one that generates the highest profitability and according to the results of this work, its dynamics have not impacted the water quality of the aquifer. It was also shown that the depth of the wells does not influence the quality of the water, this depends more on the region where each well is located, on the recharge processes, geology of the region, speed of the underground currents and infiltration by the action of faults and geological fractures. It was found that most of the soils of the Calera aquifer region have a sandy clay loam classification; however, according to the SEMARNAT (2002) they observe a considerable content of sand, they are also poor in nutrients and also present problems of compaction, mainly due to the mechanized conventional system and the lack of soil conservation strategies, therefore the agricultural dynamic is impacting the quality of its soil.

Given this situation, conservation tillage practices are recommended, for at least three years so that the soils develop a more favorable porosity in the first 25 cm. It is also recommended and the application of organic matter, at least 1 ton ha<sup>-1</sup> of organic materials to modify the structure and distribution of the porous space of the soil to allow a better infiltration and retention of water and nutrients and therefore it would increase capacity and cation exchange.

**Keywords:** Chili production, Aquifer Calera, Profitability, Water quality, Soil quality.

# 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

## 1.1 Descripción del área de estudio

La conversión productiva del estado de Zacatecas se ha orientado en los últimos diez años a cultivos de alta rentabilidad económica, debido a que en estudios anteriores se ha identificado que los cultivos de maíz y frijol han disminuido en superficie dando lugar a una mayor área para el cultivo de chile (Pineda *et al.*, 2013), el cual es una de las opciones que brindan mayores ingresos a los productores y es la fuente generadora de empleos más importante, ya que durante estos últimos años el cultivo ha aportado en promedio el 43% del valor de la producción agrícola del estado (SIAP, 2013a) y requiere anualmente casi 150 jornales/ha (INIFAP, 2006).

La producción de chile en Zacatecas abarca el 25% del área de riego del estado y se concentra en la región central de la entidad, específicamente en los municipios de Zacatecas, Morelos, Calera, General Enrique Estrada, Pánuco y Fresnillo, en los cuales durante los últimos diez años ha ocupado en promedio el 47.44% de la superficie sembrada en riego para este cultivo, además durante los últimos diez años en la zona se ha observado un incremento del 9% en la superficie destinada para su producción y sus rendimientos se han elevado en un 70% (SIAP, 2013a).

En la región del acuífero Calera se ubica el 27% de las unidades de producción del estado las cuales aportan el 21% de la superficie mecanizada, el 37% del uso de fertilizantes químicos (el 22% es destinado para el cultivo de chile) y el 42% de la superficie irrigada del estado. También en este lugar se consume el 40% de la semilla mejorada (SIAP, 2013b). Respecto a los diferentes sistemas de riego que se utilizan en esta zona, el que tiene mayor demanda es el de canales de tierra con un 55% de preferencia por parte de las unidades de producción, seguido por canales recubiertos y goteo con un 26% y 7% respectivamente. Con todo esto se evidencia que con el paso del tiempo en este territorio los procesos productivos agrícolas cada vez se vuelven más intensivos (INEGI, 2007).

Aunado a lo anterior, el 82% de la extracción de agua en esta región se destina a la actividad agrícola práctica que se realiza a través de pozos profundos (INEGI, 2007). Se tiene un registro de 2,114 inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) (CNA, 2014) mientras que el aprovechamiento de 322 Norias cubre el 18% restante (CNA, 2009). El acuífero calera, es uno de los 101 acuíferos sobreexplotados a nivel nacional (CNA, 2012) ya que la recarga media anual que recibe es de 83.9 Mm<sup>3</sup>/año, mientras que el volumen extraído por bombeo es de 125 Mm<sup>3</sup>/año, por lo que se tiene un déficit de extracción de -67.75 Mm<sup>3</sup>/año sobre su valor concesionado que es de 150.36

Mm<sup>3</sup>/año. De la extracción total del acuífero, el 79.37% es utilizado para fines agrícolas y el 20.63% restante es para uso público urbano y actividades doméstico-pecuarias e industriales (CNA, 2009).

El acuífero cubre superficialmente una extensión de 1,151 km<sup>2</sup> (CNA, 2009) lo que equivale al 1.5% de la superficie del estado (INEGI, 2010), y como ya se mencionó anteriormente sobre esta provincia se localizan en su totalidad los municipios Gral. Enrique Estrada y Morelos, y de manera parcial los municipios de Calera, Fresnillo, Pánuco y Zacatecas (CNA, 2009). La actividad de mayor importancia en la región es la agricultura de riego, y a pesar de que el chile desempeña un papel preponderante, también se observa la producción de frijol (*Phaseolus vulgaris L.*) y especies destinadas al forraje como el maíz (*Zea mays L.*) y avena (*Avena spp.*) (Pineda *et al.*, 2013). También se realizan otras actividades como el comercio, la explotación y beneficio de minerales, la ganadería y la industria (Vélez, 2012).

Las actividades económicas antes citadas, le han permitido a la población de esta zona alcanzar un nivel de vida estable ya que cuenta con un índice de desarrollo humano alto y un índice de marginación bajo (SNIIM, 2010). No obstante por su condición de semiáridez, los sistemas de producción de esta área cada vez requieren mayor cantidad de agua para satisfacer su crecimiento, y la presión que está ejerciendo el sistema social sobre el sistema ecológico puede degradar las tierras de cultivo provocando desertificación y pérdida de productividad ya que los sistemas ecológicos en regiones semiáridas tienen recursos más limitados y por lo tanto son más frágiles (Pineda, *et al.*, 2013).

## **1.2 Justificación**

Zacatecas es el estado más importante en la producción de chile seco (Sánchez y Rumayor, 2010) al concentrar el 28% de la superficie sembrada del país con este cultivo y al generar el 15% y 16% de su volumen y valor de la producción a nivel nacional. Además cultivar chile representa la opción que brinda mayores ingresos a los agricultores debido a que el alto volumen de producción que se obtiene en el estado genera en promedio una derrama económica superior a 2000 millones de pesos por año (INEGI, 2012; SIAP, 2013) lo que corresponde al 20% del Producto Interno Bruto estatal del Sector Primario. Así mismo, se le considera como la principal fuente de empleo en el medio rural ya que se requiere mano de obra desde la plantación del cultivo, hasta el secado y empaquetado de los frutos (Bravo *et al.*, 2002).

Anualmente en el estado de Zacatecas se establecen en promedio más de 35 mil hectáreas de chile, mismas que son cultivadas con agua de riego extraída del subsuelo. Este sistema de producción, y otras actividades agropecuarias e industriales, han sobreexplotado los mantos acuíferos de la región por

su excesiva extracción (Serna *et al.*, 2011). Esta situación se hace más crítica debido a que el 86% del total del territorio se encuentra integrado por zonas semiáridas al concentrar una limitada precipitación pluvial promedio de 460.8 mm., y por la falta de obras para la captación y retención del agua de lluvia para la recarga de los mantos acuíferos (INIFAP, 2006; González, 2012).

Por lo tanto, de acuerdo con Pineda *et al.*, (2013) los sistemas de producción de cultivos en condiciones de aridez y semiáridez como en el caso del estado de Zacatecas, requieren mayor cantidad de agua para satisfacer su crecimiento. La irrigación excesiva y un pobre drenaje convierten muchas tierras productivas en desiertos salinos o alcalinos. Si las tierras semiáridas no son utilizadas con cuidado y destreza, son extremadamente propensas a la desertificación, a la destrucción gradual o a la reducción de la capacidad de la tierra para la producción vegetal y animal, tales efectos son una respuesta ante la inherente vulnerabilidad de la tierra y la presión de las actividades humanas.

Aunado a lo anterior INIFAP (2012) indica que el empleo de fertilizantes y agroquímicos ha generado paulatinamente efectos nocivos sobre el ambiente y la salud humana por lo tanto, no puede admitirse una rentabilidad para los productores basada en la degradación de los recursos naturales ya que al provocar un deterioro en la calidad de agua y suelo, el desarrollo de la actividad agrícola puede verse limitado hasta el punto de dejar de practicarse.

### **1.3 Hipótesis**

Los beneficios socioeconómicos generados actualmente por la producción de chile en la zona irrigada por el acuífero Calera, decrecerán en poco tiempo si no se generan y aplican estrategias de conservación de los recursos naturales que sustentan el sistema de producción.

### **1.4 Objetivos**

- Analizar el impacto socioeconómico y ambiental de la producción de chile (*Capsicum sp.*) en la zona irrigada por el acuífero calera.
- Caracterizar el sistema de producción de chile en el acuífero calera, para determinar su rentabilidad económica e identificar la problemática socioeconómica y ambiental del sistema de producción.
- Elaborar propuestas de manejo sostenible de los recursos naturales de los que depende la producción de chile, buscando mantener los beneficios económicos actuales.

## 1.5 Descripción del contenido del documento

Esta tesis la integran cinco capítulos, el primero es la introducción general, donde se describió el área de estudio, así como justificación, hipótesis y objetivos, el segundo es una revisión bibliográfica que incluye la caracterización del acuífero Calera y la región productiva en donde se localiza este acuífero, la dinámica agrícola de esta zona, principales cultivos, tipos de suelo y sus indicadores de rentabilidad, así como los parámetros de calidad de agua y suelo aptos para la producción de Chile.

El tercero abarca un análisis detallado sobre los tres principales cultivos que se producen en esta región que son Chile (*Capsicum sp.*), frijol (*Phaseolus vulgaris*) y maíz (*Zea mays*) donde se puede observar una descripción detallada del ciclo de cultivo de cada uno así como sus insumos, costos de producción, niveles de rentabilidad y estrategias de conservación realizadas para incrementar su productividad. El cuarto diagnostica la calidad del agua del acuífero Calera para la producción del cultivo de Chile. El quinto establece la calidad del suelo para la producción de Chile en esta zona y se elaboraron algunas estrategias para mejorar su calidad. Se finaliza con una discusión general y recomendaciones.

## 1.6 Literatura citada

Bravo L., B. Cabañas; J. Mena; R. Velásquez; S. Rubio; F. Mojarro y G. Medina (2002) Guía para la producción de Chile seco en el Altiplano de Zacatecas. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Zacatecas. Calera de V. R., Zac., México. p. 2 (Publicación Técnica Núm. 1).

CNA (2009) Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea Acuífero (3225) Calera, estado de Zacatecas. Comisión Nacional del Agua [En línea] disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/disponibilidad.aspx?n1=3&n2=62&n3=112>

CNA (2012) Prontuario de aguas subterráneas 2012. Comisión Nacional del Agua, [En línea] disponible en:

<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Prontuario%20de%20aguas%20subterr%C3%A1neas.pdf>

CNA (2014) Registro Público de Derechos de Agua (REPGA). Títulos y Permisos de Extracción de Aguas Nacionales y sus Bienes Públicos Inherentes Comisión Nacional del Agua, [En línea] disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/Repda.aspx?n1=5&n2=37&n3=115>

- González (2012) Las Zonas Áridas y Semiáridas de México y su Vegetación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Instituto Nacional de Ecología (INE). Primera edición, 2012. 194 p.
- INEGI (2007) CENSO Agropecuario, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México 2007 [En línea] disponible en: <http://www.inegi.org.mx/sistemas/TabuladosBasicos/Default.aspx?c=17177&s=est>
- INEGI (2010) Producto Interno Bruto a precios de 2010, por sector de actividad económica. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. [En línea] disponible en: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/cn/bs/>
- INIFAP (2006) Tecnología de Producción de Chile Seco. Libro Técnico No. 05. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 2006. 232 p. [En línea] disponible en: [http://www.zacatecas.inifap.gob.mx/publicaciones/Tecnologia\\_de\\_produccion\\_de\\_chile\\_seco.pdf](http://www.zacatecas.inifap.gob.mx/publicaciones/Tecnologia_de_produccion_de_chile_seco.pdf)
- INIFAP (2012) Introducción al Uso y Manejo de los Biofertilizantes en la Agricultura. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 2012. 315 p.
- Sánchez T., y A. Rumayor (2010) Evaluación del entorno para la innovación tecnológica en Zacatecas: identificación de las cadenas productivas relevantes. Publicación especial N° 25. INIFAP. CIRNOC. CEZAC. 27 p.
- Serna, A., J. Zegbe, y J. Mena (2011) Rendimiento y Calidad de Chile Seco Mirasol Cultivado Bajo Riego Parcial de la Raíz. Revista Chapingo serie horticultura, vol. 17, núm. 01, enero-abril, 2011, pp. 19-24.
- SIAP (2013a) Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera; Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) [En línea] disponible en: [http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com\\_wrapper&view=wrapper&Itemid=351](http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=351)
- SIAP (2013b) Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Tecnificación. Uso de tecnología y servicios en el campo. Archivo de matrices tabulares con la estadística de uso tecnología y de servicios en el campo. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) [En línea] disponible en: <http://www.siap.gob.mx/tecnificacion/>

SNIIM (2010) Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados. Volúmenes de exportaciones mexicanas de frutas y hortalizas. Secretaría de Economía (SE) [En línea] disponible en: <http://www.economia-sniim.gob.mx/nuevo/>

Vélez, A. (2012) Tipificación tecnológica de los productores agrícolas usuarios de los acuíferos de calera y chupaderos y su disposición a aceptar ahorrar agua. Tesis de Doctorado, Unidad Académica de Contaduría y Administración. Universidad Autónoma de Zacatecas. 2012, 141 p.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1 Características del acuífero calera

#### 2.1.1 Localización

La zona geohidrológica Calera se localiza en la porción central del Estado de Zacatecas, en las coordenadas geográficas que muestra la Tabla 1. El área cubre una superficie aproximada de 2,087.6 km<sup>2</sup>, que representa el 2.8 % del territorio estatal; ocupando en su totalidad los municipios de Gral. Enrique Estrada y Morelos, y de manera parcial a los municipios de Calera, Fresnillo, Pánuco, Veta Grande y Zacatecas. La zona se encuentra densamente poblada, los principales centros de población están concentrados en las cabeceras municipales de: Morelos, Calera de Víctor Rosales, Gral. Enrique Estrada y Fresnillo, existiendo además, poblaciones importantes como son: Plateros, Morfín Chávez, Santiaguillo, ubicadas en la porción Norte; Hidalgo, Ramón López al Sur (CONAGUA, 2015).

**Tabla 1. Coordenadas geográficas donde se localiza el polígono que comprende el acuífero, Calera.**

VÉRTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	102	38	31.9	23	20	5.3
2	102	38	18.9	23	14	50.0
3	102	35	45.8	23	13	28.7
4	102	33	15.7	23	5	8.6
5	102	34	18.2	22	54	43.4
6	102	32	44.0	22	49	6.8
7	102	33	22.0	22	44	8.9
8	102	34	37.8	22	41	43.2
9	102	37	23.0	22	43	23.7
10	102	48	36.1	22	47	3.9
11	102	52	13.0	22	52	55.5
12	102	54	35.7	22	59	12.4
13	102	59	34.9	23	1	41.1
14	102	1	10.1	23	2	4.9
15	102	57	50.5	23	6	39.0
16	102	57	52.0	23	8	17.0
17	102	55	51.7	23	12	23.3
18	102	53	32.1	23	14	27.2

19	102	51	22.4	23	18	40.8
20	102	47	12.7	23	21	10.2
21	102	44	2.3	23	23	26.2
22	102	40	15.2	23	22	22.7
1	102	38	31.9	23	20	5.3

### 2.1.2 Situación administrativa

El acuífero Calera se encuentra ubicado dentro de la Región Hidrológica No. 37 El Salado, cuenca Fresnillo-Yesca; subcuenca Fresnillo (Figura 1.). Una mínima porción ubicada al poniente se circunscribe a la Región Hidrológica No 36 Nazas-Aguanaval. La cuenca hidrológica es de tipo cerrada, forma irregular con alargamiento de sur a norte. Al oriente se encuentra delimitada por la Sierra de Zacatecas y al poniente por la Sierra de Fresnillo. No presenta corrientes superficiales de importancia, únicamente pequeños arroyos intermitentes, que tienen una dirección hacia el centro del acuífero. La capacidad de volumen almacenado es de 13.2 hm<sup>3</sup> (Ávila *et al.*, 2012).



Figura 1. Localización del acuífero Calera y municipios que abarca.

La conservación de las aguas del subsuelo, fue declarada de interés público por el Ejecutivo Federal, mediante los decretos de veda publicados en el Diario Oficial de la Federación los días 16 de mayo de 1960 y 6 de abril de 1981, esta última comprende una pequeña fracción de la porción Norte; en estos decretos el tipo de veda que se estableció fue de control. Así mismo, en el Estado están definidas distintas zonas de disponibilidad, que de acuerdo a la Ley Federal de Derechos vigente para el año 2000, de los siete municipios que conforman la región, dos de ellos (Fresnillo y Zacatecas) se ubican en la zona de disponibilidad No.4; otros dos (Calera y Enrique Estrada) en la zona No. 5; y tres más (Veta Grande, Morelos y Pánuco) en la zona No. 6. (CONAGUA, 2009).

### **2.1.3 Fisiografía**

De acuerdo con Hernández *et al.*, (2012), la zona geohidrológica forma parte de dos Provincias Fisiográficas: La porción Oeste, Suroeste y Sureste pertenecen a la Provincia Fisiográfica de La Sierra Madre Occidental, ocupando la Subprovincia Sierras y Valles Zacatecanos; el resto de la zona se ubica en la Provincia Fisiográfica de La Mesa Central, ocupando la Subprovincia Llanos y Sierras Potosino - Zacatecanos. Los principales sistemas de topografías que se observan son: una llanura aluvial delimitada al Norte, Este y Oeste por lomeríos con bajadas, al Sur se distinguen bajadas aluviales con lomeríos, y al Sureste los rasgos corresponden a sierras bajas y lomeríos. Los principales sistemas montañosos son: La Sierra de Fresnillo localizada en la parte Noroccidental del área, la cual presenta elevaciones máximas de 2850 msnm; y La Sierra de Zacatecas, ubicada al Oriente de la zona, con elevaciones máximas del orden de los 2,700 msnm mientras que las elevaciones mínimas se presentan en la llanura, siendo del orden de 1,030 msnm. El drenaje en general es de tipo dendrítico; por sus características, la región se ubica en una etapa geomorfológica de madurez temprana.

### **2.1.4 Clima**

La precipitación promedio anual es de 450 mm/año, el periodo de lluvias, en general, es de junio a septiembre, con lluvias aisladas en invierno, siendo marzo el mes más seco. La temperatura media anual es de 16° C, el período caluroso del año es de mayo a agosto, siendo enero el mes más frío. La evaporación potencial media anual es de 1990 mm; el mes con índice mayor de evaporación media es mayo; el de menor es diciembre. De acuerdo a la clasificación de W. Köppen, el clima es del tipo semiseco BS1kw, con lluvias en verano y en menor proporción en invierno (Navarro *et al.*, 2005).

### **2.1.5 Hidrografía**

De acuerdo con CONAGUA (2015) el área corresponde a una cuenca cerrada de forma irregular, ligeramente alargada, con orientación Norte - Sur; delimitada por el parteaguas que forma la Sierra de Zacatecas en su porción Oriental, y la Sierra de Fresnillo en su parte Occidental y algunos cerros y lomeríos de poca elevación. Cabe mencionar, que una pequeña fracción de la zona geohidrológica, aproximadamente el 4 %, queda dentro de la región hidrológica No. 36 "Nazas - Aguanaval".

Además, Ávila *et al.*, (2012) indica que en el área no existen corrientes superficiales importantes, únicamente pequeños arroyos de régimen intermitente; destacan: el arroyo "La Joya", originado por la confluencia de los arroyos El Bote, Rancho Nuevo y El Molino; arroyo Calera, formado por los arroyos Carrizalillo y Hornitos; arroyo de Enmedio y arroyo de Plateros; todos ellos escurren a las lagunas Santa Ana y Sedano. El drenaje es hacia el centro de la cuenca, para continuar con dirección Norte, hacia las lagunas Santa Ana y Sedano, que son los cuerpos de agua de mayor importancia.

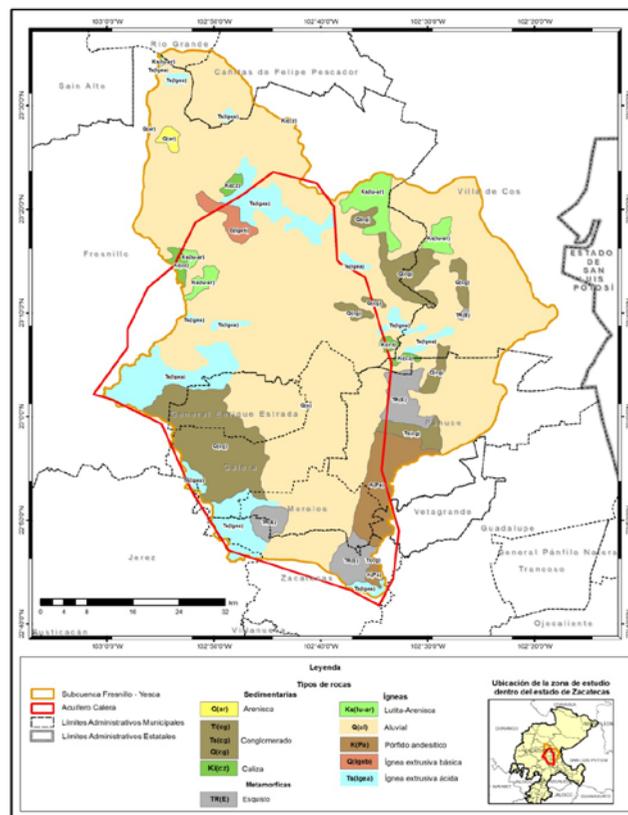
### **2.1.6 Geología**

De acuerdo con CONAGUA (2015), las rocas más antiguas en el área son metamórficas que están representadas por esquistos sericiticos de color negro con algunos nódulos de cuarzo y esquistos sericiticos que varían de color rojizo a verdoso. Sobreyaciendo a la secuencia anterior, existe un paquete constituido por una secuencia de rocas sedimentarias (Figura 2.) y rocas volcánicas interestratificadas; su litología consta de filitas de color morado, gris, verde y algunas veces con manchas moradas o rojizas, con variaciones a pizarras de color morado y gris, esquistos sericiticos y grafiticos de color gris a gris oscuro, cuarcitas de color gris, metaconglomerado de color gris blancuzco, con fragmentos de cuarcita, esquistos sericiticos, rocas metavolcánicas de composición básica con matriz arenosa y micacea, calizas de grano fino y color gris oscuro, dispuestas en capas discontinuas con espesores que no pasan de 40 cm, y escasa presencia de pedernal.

Por su parte, CONAGUA (2009) establece que sobreyace una alternancia de calizas y pizarras, predominando en la parte superior, calizas que son correlacionables con la Formación Zuloaga del Jurásico. En el distrito minero de Fresnillo se ha detectado una unidad denominada localmente Grupo Proaño, que consiste de una secuencia de rocas sedimentarias, que se encuentran divididas en tres unidades de acuerdo con sus características litológicas y posición estratigráfica: grauvaca inferior (no aflora en superficie), lutitas calcáreas y carbonosas y grauvaca superior. Yaciendo concordantemente sobre la unidad anterior está la Formación Chilitos del Cretácico Inferior, constituida por rocas

volcánicas de composición andesítica y basáltica, con intercalación de sedimentos como limolitas areniscas y lentes de margas, depositadas en un medio acuático, por lo que presentan numerosas estructuras de almohadilla. El conglomerado está compuesto por depósitos fluviales que sufrieron muy poco transporte.

Así mismo, CONAGUA (2002) señala que el material cementante es arcillo - calcáreo y su color rojo se debe a la descomposición de los silicatos ferromagnesianos de las rocas volcánicas de la Formación Chilitos. Así mismo, una unidad clasificada como brecha sedimentaria, que se encuentra constituida por fragmentos de areniscas, lutitas calcáreas y calizas, en su mayoría angulosos a subangulosos, en donde su espesor, se estima es mayor a 300 m. En el Terciario se desarrolló una actividad volcánica que originó considerables volúmenes de tobas riolíticas y riolitas. Estas rocas están expuestas ampliamente al Noroeste de la zona. Durante el Plioceno y principios del Cuaternario se depositó un conglomerado que aflora. En el Pleistoceno los depósitos son lacustres y basaltos.



**Figura 2. Material geológico localizado en la región del acuífero Calera.**

### 2.1.7 Hidrogeología

De acuerdo con Hernández *et al.*, (2012) la información geológica, geofísica, hidrogeológica y piezométrica existente, y por correlación con otros acuíferos vecinos que tienen el mismo, origen, evolución y constitución geológica, se puede establecer la presencia de un acuífero de tipo libre, heterogéneo y anisótropo, que presenta condiciones locales de semiconfinamiento, constituido en su porción superior por sedimentos aluviales y fluviales, de granulometría variada, conglomerados y depósitos lacustres, cuyo espesor puede alcanzar hasta 400 m en el centro de los valles tectónicos. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

Así mismo, Ávila *et al.*, (2012) indican que a mayor profundidad las calizas y areniscas representan un acuífero potencial que puede presentar condiciones de semiconfinamiento, debido a que están sobreyacidas y alternadas con lutitas y limolitas. Además, se pueden distinguir tres medios diferentes por donde circula el agua subterránea: El medio poroso con permeabilidad primaria y secundaria e intergranular y de fracturas, el medio fracturado con permeabilidad secundaria y el medio de doble porosidad con permeabilidad combinada, intergranular y de fracturas.

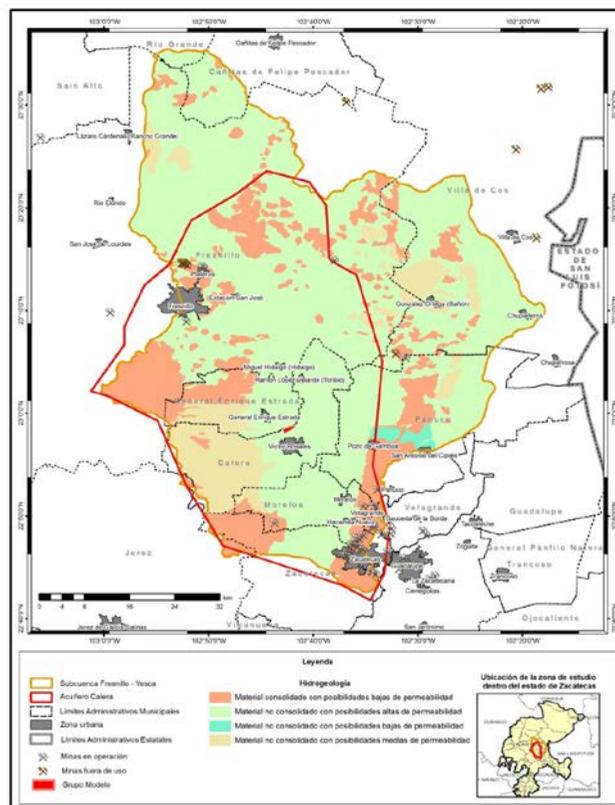


Figura 3. Hidrogeología de la región que comprende el acuífero, Calera.

### 2.1.8 Hidrometría

De acuerdo con CONAGUA (2012) la información del censo de aprovechamientos más reciente llevado a cabo como parte del estudio realizado en 2010, se registraron un total de 2,097 obras activas que aprovechan el agua subterránea, de las cuales 1,417 son pozos y 680 norias (Figura 4.). Del total de obras, 1,379 se utilizan para uso agrícola, 453 para dotación de agua potable a las comunidades de la región, 229 para uso doméstico-abrevadero, 31 para uso industrial y 5 para otros usos. No obstante, CONAGUA (2014) establece que el volumen de extracción conjunto calculado asciende a 176.5 hm<sup>3</sup> anuales, de los cuales 159.2 hm<sup>3</sup> (90.2 %) se destinan al uso agrícola, 11.1 hm<sup>3</sup> (6.3%) para abastecimiento de agua potable, 1.1 hm<sup>3</sup> (0.6%) para usos pecuario y doméstico y 5.1 hm<sup>3</sup> (2.9%) para uso industrial.

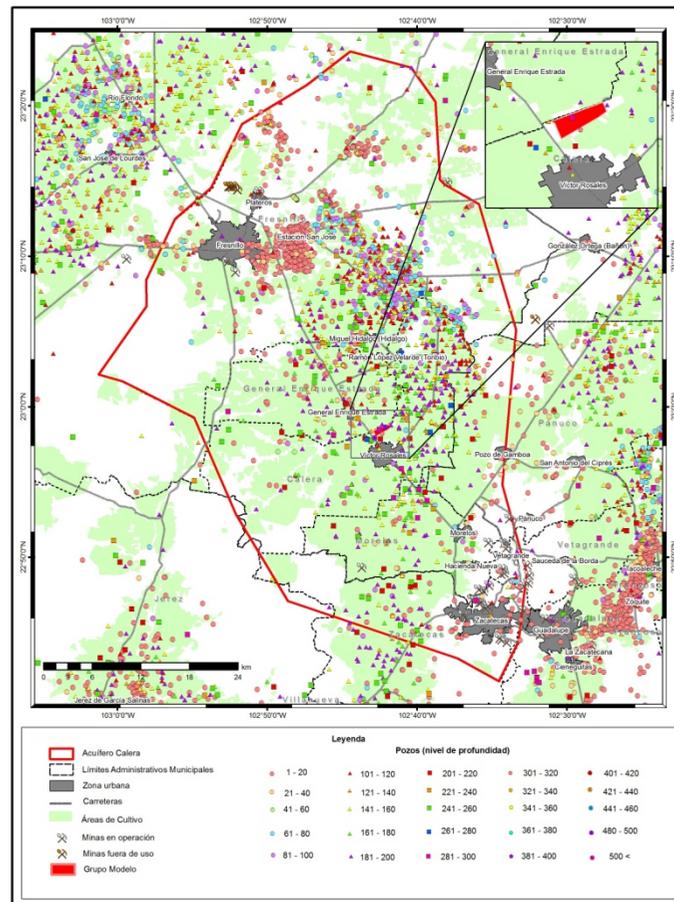
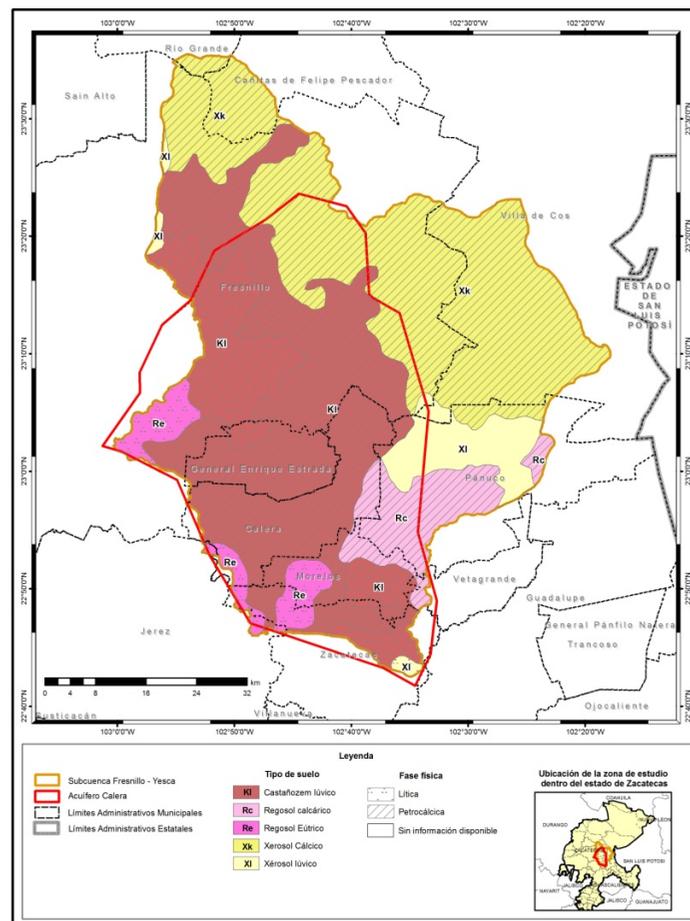


Figura 4. Localización y profundidad de los pozos que se localizan en el acuífero, Calera.

### 2.1.9 Tipos de suelo

De acuerdo con INEGI (2004) la región que comprende el acuífero Calera, se caracteriza por concentrar suelos del tipo Kastañozem luvico, Regosol calcárico, Regosol eutrico, Xerosol cálcico y Xerosol luvico, de los cuales el que presenta una mayor predominancia en la región es el kastañozem luvico (Figura 5.)



**Figura 5. Tipos de suelo en la región que abarca el acuífero, Calera.**

De acuerdo con FAO (2007) las características de los principales suelos de la región son las siguientes:

#### 2.1.9.1 Kastañozem

Los Kastanozems acomodan suelos de pastizales secos, entre ellos los suelos zonales de la franja de estepa de pastos cortos, al sur de la franja de estepa de pastos altos de Eurasia con Chernozems. Los Kastanozems tienen un horizonte superficial rico en humus es de menor espesor y muestran acumulaciones de carbonatos secundarios más prominentes. El color castaño-pardo del suelo superficial se refleja en el nombre Kastanozem.

Los Kastanozems son suelos potencialmente ricos; pero la falta periódica de humedad del suelo es el obstáculo principal para alcanzar altos rendimientos. El riego es necesario casi siempre para alcanzar altos rendimientos por lo que debe tenerse cuidado para evitar la salinización secundaria del suelo superficial. Los fertilizantes fosfáticos pueden ser necesarios para niveles de productividad aceptables. Los granos finos y los cultivos comestibles y vegetales bajo riego son los principales cultivos. La erosión hídrica y eólica son un problema en los Kastanozems, especialmente en tierras en descanso.

#### **2.1.9.2 Regosol**

Los Regosoles son suelos minerales muy débilmente desarrollados en materiales no consolidados que no tienen un horizonte mólico o úmbrico, no son muy someros ni muy ricos en gravas, arenosos o con materiales flúvicos. Los Regosoles están extendidos en tierras erosionadas, particularmente en áreas áridas y semiáridas y en terrenos montañosos. Muchos Regosoles correlacionan con taxa de suelos que están marcados por formación de suelos incipiente. En áreas de desierto tienen un mínimo potencial agrícola por lo que necesitan riego para una producción satisfactoria de cultivos. La baja capacidad de retención de humedad de estos suelos obliga a aplicaciones frecuentes de agua de riego; el riego por goteo o chorritos resuelve el problema pero raramente es económico.

#### **2.1.9.3 Xerosol**

Los Xeerosoles son suelos con una acumulación secundaria sustancial de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Estos suelos se encuentran en la parte más seca de las zonas de clima árido, lo que explica que la clasificación de suelos los hayan denominado como suelos de desierto. Además son suelos con acumulación sustancial de sulfato de calcio secundario, principalmente en depósitos aluviales, coluviales y eólicos no consolidados de material meteorizable rico en bases. Presentan un ambiente predominantemente en áreas de tierras llanas hasta con colinas y depresiones y en regiones de clima árido. La vegetación natural es escasa y dominada por arbustos y árboles xerófitos y/o pastos efímeros.

### **2.2 Importancia socioeconómica de la región que comprende el acuífero Calera**

#### **2.2.1 Actividad agrícola**

El sector agrícola es el principal usuario del agua en la región que abarca el acuífero Calera ya que durante el período 2001-2014 existieron alrededor de 85,845 ha bajo explotación agrícola, de las

cuales 18,074 ha equivalentes al 21.05%, se destinaron para riego, y 67,771 ha se destinaron para uso de temporal. En términos de valor de la producción, aun cuando la superficie de agricultura de riego es aproximadamente cuatro veces menor a la de temporal, representó prácticamente el 80% del valor total de la producción; de forma general, la demanda agrícola supera por sí sola a la recarga natural en un 117% (CONAGUA, 2015; INEGI, 2007). Esta actividad económica, le ha permitido a la población de esta zona alcanzar un nivel de vida estable pues, se cuenta con un índice de desarrollo humano alto y un índice de marginación bajo (SNIM, 2010) sin embargo, CONAGUA (2009) indica que esta actividad está influyendo significativamente en el sobreexplotación del acuífero ya que la principal fuente de presión en el recurso subterráneo tiene su origen en la agricultura, ya que de los poco más de 157 hm<sup>3</sup> de agua concesionada, el 90% se destina a este sector el cual genera en términos globales una baja productividad en el uso de este recurso.

Con base en su extensión, INEGI (2007) señala que los principales cultivos cíclicos en la región son chile seco, frijol y maíz, mientras que entre los perennes, se ubica a la alfalfa como la de mayor importancia. CONAGUA (2015) estima que prácticamente el 88.5% del volumen anual es consumido por los cultivos cíclicos, y sólo el 25.6% restante por los perenes. Para este último caso, la alfalfa representa por sí sola el 58.2% del agua requerida para cultivos perenes. La superficie que se siembra bajo riego es de 21,720 ha por año, equivalentes al 15.2% de la superficie en el estado, con una extracción total del orden de los 178 hm<sup>3</sup> anuales. En las actuales condiciones de distribución de aprovechamientos, la zona de mayores abatimientos corresponde con las áreas de agricultura, principalmente la de riego. La demanda de agua que requieren los principales cultivos de esta zona se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2. Demanda de agua y superficie agrícola que los principales cultivos de la región del acuífero Calera.**

Cultivo	ha	Mm <sup>3</sup> /ha	% de ocupación agrícola
Chile comercializado en seco	6,700	54.17	29
Chile verde	800	6.47	3.5
Frijol	6,950	43.6	23
Maíz	2,150	16.57	8.9
Avena forrajera	500	6.41	3.4
Zanahoria	1,400	12.2	6.5
Papa	260	2.27	1.2

Ajo	500	4.36	2.3
Tomate	560	5.46	2.9
Cebolla	800	6.6	3.5
Alfalfa	600	11.68	6.3
<b>Total</b>	<b>21,220</b>	<b>169.79</b>	<b>91</b>

Además tan solo en esta región se localiza el 27% de las unidades de producción del estado las cuales aportan el 21% de la superficie mecanizada, el 37% del uso de fertilizantes químicos y el 42% de la superficie irrigada del estado. También en este lugar se consume el 40% de la semilla mejorada en riego (SIAP, 2013). Respecto a los diferentes sistemas de riego que se utilizan en esta zona, el que tiene una mayor demanda es el de canales de tierra con un 55% de preferencia por parte de las unidades de producción, seguido por canales recubiertos y goteo con un 26% y 7% respectivamente. Con todo esto se evidencia que con el paso del tiempo en este territorio los procesos productivos agrícolas cada vez se vuelven más intensivos (INEGI, 2007).

En este lugar, además de tener una intensa actividad agrícola, se encuentran establecidos dos de los tres municipios más poblados del estado (Fresnillo y Zacatecas) incluidas sus cabeceras municipales. También se asienta la ciudad de Zacatecas que conforma una parte de la zona metropolitana del estado, por lo que se concentra una población de 425,494 habitantes lo que representa casi el 30% de la población del estado (INEGI, 2010), por lo que esta situación también implica una alta demanda de agua para abastecimiento urbano (Vélez, 2012).

### **2.2.1.1 Producción de chile (*Capsicum sp.*) en la región que comprende el acuífero Calera.**

La producción de chile en los últimos 15 años ha situado a México como el segundo mayor productor del planeta y principal exportador, siendo éste el segundo cultivo hortícola socioeconómicamente más importante para el país, debido a que su consumo per cápita es de 10 kg anuales (INIFAP, 2006) y requiere 135 jornales ha<sup>-1</sup> (Reyes, *et al.*, 2006), lo que representa una ocupación promedio de 20.6 millones de jornales anuales, equivalente al 39% de la población económicamente activa. En el estado de zacatecas este sistema de producción se considera como la principal actividad económica y fuente de empleo ya que el 24% de la población económicamente activa se dedica a esta labor pues genera alrededor del 20% del PIB (Producto Interno Bruto) del estado de Zacatecas.(INEGI, 2011).

Para la región que abarca el acuífero Calera, la producción de chile concentra el 50% del volumen de la producción del estado de Zacatecas anualmente, además durante el periodo de 2004 a

2018 la superficie destinada para este cultivo se ha incrementado diez veces, de igual forma, los rendimientos de las variedades de chile mirasol, guajillo y pasilla han superado a la media nacional, por lo que se habla de una intensificación a este sistema de producción, ya que en esta zona el cultivo de chile concentra casi el 23% del uso de fertilizantes y agroquímicos en el estado (SIAP, 2013).

No obstante, Bedmar (2015) señalan que esta situación es muy propia de las zonas áridas y semiáridas, como es el caso de ésta región de estudio, y la utilización excesiva de fertilizantes y agroquímicos pueden alterar las propiedades químicas del agua, ya que estos dependiendo del tiempo de tránsito a través de la zona no saturada y de la capacidad de los suelos para retardar el movimiento de los agroquímicos, pueden percolar a los mantos acuíferos ocasionando un aumento en la cantidad de sólidos totales, y sales de nitratos, sulfatos, cloruros y sodio. O bien, de acuerdo con Duval *et al.*, (2016) la intensificación de los procesos agrícolas como la utilización excesiva de insumos químicos y los sistemas de labranza convencional en la actualidad son la principal fuente de la degradación del suelo, lo cual constituye uno de los principales problemas ambientales que afecta a la humanidad, impactando en la capacidad productiva y en la calidad de los recursos naturales.

### **2.2.2 Actividad industrial**

Por su parte, la región también alberga 1,725 unidades económicas que representan el 45% de la industria manufacturera del estado, entre las sobresalientes se pueden mencionar Delphi Cableados S.A. de C.V., Compañía Cervecera de Zacatecas S.A. de C.V., Tapas y Tapones de Zacatecas S.A. de C.V., e Industrias Alimenticias de Zacatecas S.A. de C.V., entre otras. De igual forma se localizan importantes industrias de extracción y beneficio de minerales, algunas de ellas son la compañía minera Peñoles unidad Francisco I. Madero, Zacatecas y minera Fresnillo S. A. de C.V. Las unidades económicas establecidas en esta zona representan aproximadamente el 70% de la inversión estatal en el sector, situación que también incrementa la demanda de agua del acuífero calera (Vélez, 2012).

## **2.3 Indicadores para la evaluación de la rentabilidad de los sistemas de producción intensivos**

### **2.3.1 Costo de producción**

Molina (2009) señala que los costos de producción (también llamados costos de operación) son los gastos necesarios para mantener un proyecto, línea de procesamiento o un equipo en funcionamiento. En una compañía estándar, la diferencia entre el ingreso (por ventas y otras entradas) y el costo de producción indica el beneficio bruto. Esto significa que el destino económico de una empresa está asociado con: el ingreso y el costo de producción de los bienes vendidos. Mientras que el

ingreso, particularmente el ingreso por ventas, está asociado al sector de comercialización de la empresa, el costo de producción está estrechamente relacionado con el sector tecnológico. El costo de producción tiene dos características opuestas, que algunas veces no están bien entendidas en los países en vías de desarrollo. La primera es que para producir bienes uno debe gastar; esto significa generar un costo. La segunda característica es que los costos deberían ser mantenidos tan bajos como sea posible y eliminados los innecesarios. Esto no significa el corte o la eliminación de los costos indiscriminadamente.

### **2.3.2 Porcentaje de rentabilidad**

Para Hoz *et al.*, (2008), la rentabilidad económica o de la inversión es una medida, referida a un determinado periodo de tiempo, del rendimiento de los activos de una empresa con independencia de la financiación de los mismos. De aquí que, según la opinión más extendida, la rentabilidad económica sea considerada como una medida de la capacidad de los activos de una empresa para generar valor con independencia de cómo han sido financiados, lo que permite la comparación de la rentabilidad entre empresas sin que la diferencia en las distintas estructuras financieras, puesta de manifiesto en el pago de intereses, afecte al valor de la rentabilidad.

Berlijn (2002), establece que el porcentaje de rentabilidad, trata de evaluar la cantidad de utilidades obtenidas con respecto a la inversión que las originó, ya sea considerando en su cálculo el activo total o el capital contable. Se puede decir entonces que es necesario prestar atención al análisis de la rentabilidad porque las empresas para poder sobrevivir necesitan producir utilidades al final de un ejercicio económico, ya que sin ella no podrán atraer capital externo y continuar eficientemente sus operaciones normales. Este porcentaje es una noción que se aplica a toda acción económica en la que se movilizan medios materiales, humanos y financieros con el fin de obtener ciertos resultados. En la literatura económica, aunque el término se utiliza de forma muy variada y son muchas las aproximaciones doctrinales que inciden en una u otra faceta de la misma, en sentido general se denomina rentabilidad a la medida del rendimiento que en un determinado periodo de tiempo producen los capitales utilizados en el mismo.

### **2.3.3 Relación beneficio-costos**

De acuerdo con Terrones y Sánchez (2011), es un indicador económico que compara de forma directa los beneficios y los costos, ya que mide el grado de desarrollo y bienestar que un proyecto puede generar a una comunidad. Para calcular la relación (B/C), primero se halla la suma de los beneficios

descontados, traídos al presente, y se divide sobre la suma de los costes también. Para una conclusión acerca de la viabilidad de un proyecto, bajo este enfoque, se debe tener en cuenta la comparación de la relación B/C hallada en comparación con 1, así tenemos lo siguiente:

$B/C > 1$  indica que los beneficios superan los costes, por consiguiente el proyecto debe ser considerado.

$B/C=1$  Aquí no hay ganancias, pues los beneficios son iguales a los costos.

$B/C < 1$ , muestra que los costos son mayores que los beneficios, no se debe considerar.

### **2.3.4 Punto de equilibrio**

Ayala *et al.*, (2013) indica que el punto de equilibrio es un concepto de las finanzas que hace referencia al nivel de ventas donde los costos fijos y variables se encuentran cubiertos. Esto supone que la empresa, en su punto de equilibrio, tiene un beneficio que es igual a cero (no gana dinero, pero tampoco pierde). En el punto de equilibrio, por lo tanto, una empresa logra cubrir sus costos. Al incrementar sus ventas, logrará ubicarse por encima del punto de equilibrio y obtendrá beneficio positivo. En cambio, una caída de sus ventas desde el punto de equilibrio generará pérdidas.

La estimación del punto de equilibrio permitirá que una empresa, aún antes de iniciar sus operaciones, sepa qué nivel de ventas necesitará para recuperar la inversión. En caso que no llegue a cubrir los costos, la compañía deberá realizar modificaciones hasta alcanzar un nuevo punto de equilibrio. Por su parte, Berlijn (2002) menciona que si una empresa quiere conocer la cantidad de unidades de su producto o productos que debe vender para alcanzar el citado punto de equilibrio, debe dividir los costos fijos entre el resultado de restar el costo variable unitario al precio de venta por unidad.

## **2.4 Impactos ambientales derivados de los sistemas de producción agrícola intensivos**

### **2.4.1 Reducción de la calidad de agua**

El concepto de calidad del agua se refiere a la característica del agua que puede afectar su adaptabilidad a un uso específico y se define por sus características físicas, químicas o biológicas. Para uso agrícola, la calidad del agua se define por la concentración de iones específicos,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$  y  $K^+$  como cationes;  $CO_3^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$  y  $SO_4^{2-}$  como aniones, y otros de menor proporción como el  $B^{3+}$  y el P (Can *et al.*, 2011).

De las actividades humanas que tienen una gran influencia en la calidad del agua, la actividad agrícola es la más importante debido a que puede alterar las propiedades químicas del agua por el uso de fertilizantes y plaguicidas, ya que estos dependiendo del tiempo de tránsito a través de la zona no

saturada y de la capacidad de los suelos para retardar el movimiento de los agroquímicos, pueden percolar a los mantos acuíferos ocasionando un aumento en la cantidad de sólidos totales, y sales de nitratos, sulfatos, cloruros y sodio (Bedmar, 2015).

La importancia de conocer la calidad del agua para riego tiene el fin de poder predecir su efecto sobre el suelo y los cultivos. Los problemas más comunes causados por el agua de riego de mala calidad son la salinización paulatina de los suelos, que trae como consecuencia problemas osmóticos sobre las plantas, y la toxicidad de algunas sales y elementos iónicos. respecto a la toxicidad, una alta concentración de sales o iones causarán efectos tóxicos en las plantas; el grado de toxicidad dependerá del tipo de sal o ion predominante y se refleja comúnmente en las hojas, que presentan cambios fisiológicos y morfológicos (Can *et al.*, 2014).

#### **2.4.1.1 Parámetros para la evaluación de la calidad del agua de riego**

##### **2.4.1.1.1 Condición de electroneutralidad**

De acuerdo con Peña *et al.* (2012) Las soluciones de las muestras que se analizan deben cumplir con el principio de electroneutralidad, es decir, la suma de las cargas de todos los cationes debe ser igual a la suma de las cargas de todos los aniones, deben ser eléctricamente neutras, la amplitud de variación del porcentaje de electroneutralidad puede ser hasta del  $\pm 10\%$ .

##### **2.4.1.1.2 pH**

Medina *et al.* (2016) indican que el pH no es un factor fundamental para determinar la calidad del agua, pero sirve para evaluar las concentraciones relativas de las especies disueltas de carbonato. Además Ortega *et al.* (2002) establece que sus valores tienen implicaciones importantes sobre la disponibilidad y manejo de nutrimentos, ya que Ayers y Westcot (1987) señalan que los valores normales de las aguas para uso agrícola oscilan entre 6.5 a 8.4.

##### **2.4.1.1.3 Conductividad eléctrica**

Can *et al.*, (2014) establece que la CE es un parámetro que se relaciona con la cantidad de sales solubles en el agua de riego y que pueden afectar la absorción de agua a través de su efecto sobre el potencial osmótico además al momento de precipitarse pueden causar la salinización de los suelos si se encuentran en altas concentraciones, por lo tanto la CE se clasifica en las categorías Clase C1:  $< 250 \mu\text{S cm}^{-1}$ , agua de baja salinidad; Clase C2:  $250 - 750 \mu\text{S cm}^{-1}$ , agua de salinidad media; Clase C3:  $750 - 2$

250  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , agua de salinidad alta y Clase C4:  $> 2\ 250\ \mu\text{S cm}^{-1}$ , agua de salinidad muy alta (Richards, 1990).

#### **2.4.1.1.4 Sólidos totales disueltos**

Este parámetro se utiliza para apreciar la salinidad de las aguas de riego ya que depende de la presencia de agua higroscópica en la mezcla de sales, su rango aceptable para uso agrícola va de  $\leq 450$  a  $2000\ \text{mgL}^{-1}$  (FAO, 1976).

#### **2.4.1.1.5 Salinidad efectiva y potencial**

La salinidad efectiva mide el peligro de que al precipitarse las sales de carbonatos y bicarbonatos de Ca y Mg permanecen en solución las sales de  $\text{Na}^+$ , los cloruros de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  y el sulfato de  $\text{Mg}^+$  ya que estas tienen un punto de saturación más alto y pueden contribuir ampliamente en los procesos de salinización del suelo. Si  $\text{SE} \leq 3.0$  a  $\leq 15\ \text{meq L}^{-1}$  se encuentra dentro de los niveles aceptables para uso agrícola (Ortiz, 1997).

La salinidad potencial estima el riesgo de que se formen sales de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  ya que son las últimas en precipitarse cuando la solución del suelo se va concentrando causando el incrementándose de la presión osmótica. Si  $\text{SP} \leq 3.0$  a  $\leq 15\ \text{meq L}^{-1}$  se encuentra entre de las concentraciones aceptables para uso agrícola (INIFAP, 2009).

#### **2.4.1.1.6 Relación de adsorción de sodio**

Acorde con Ayers & Westcot (1987) este parámetro mide el peligro potencial cuando se presenta un exceso de  $\text{Na}^+$  sobre el  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  ya que un alto contenido de sodio en el agua de riego puede causar un problema severo de permeabilidad del suelo y bajos rendimientos en los cultivos que sean poco tolerantes a este elemento, para agua de riego se clasifica en cuatro clases relacionadas con la CE que son S1: 0-10 baja en sodio, S2: 10-18 media en sodio, S3: 18-26 alta en sodio y S4:  $26 - \geq 30$  muy alta en sodio.

#### **2.4.1.1.7 Carbonato de sodio residual**

Este indicador se emplea para predecir la tendencia del Ca y Mg a ser desplazados por el  $\text{CO}_3$  y  $\text{HCO}_3$  formando Ca-Mg  $\text{CO}_3$ . al precipitarse en el suelo cuando se riega con aguas altamente carbonatadas por lo que la proporción de  $\text{Na}^+$  aumentará al igual que el valor de RAS originando un mayor el riesgo de sodificación del suelo. En cuanto a su clasificación para uso agrícola si CSR es  $< 1.25$  es buena,  $1.25-2.5$  es condicionada y  $> 2.5$  es no recomendable (Ayers & Westcot, 1987).

#### **2.4.1.1.8 Porcentaje de sodio posible**

Es un indicador que trata de predecir el riesgo potencial del desplazamiento de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  por  $\text{Na}^+$  en el complejo de intercambio y comienza cuando el contenido de sodio en solución representa más del 50% de los cationes disueltos (Valle, 1992).

#### **2.4.1.1.9 Boro**

El Boro es un ion requerido por las plantas en cantidades muy pequeñas, no obstante cuando se encuentra presente en el agua de riego en cantidades mayores a las necesarias puede ser tóxico para el cultivo. Para este estudio se consideró que el chile es un cultivo semi tolerante y puede tolerar hasta  $2 \text{ mg l}^{-1}$  de B en el agua de riego (Ayers & Westcot, 1987).

#### **2.4.1.1.10 Fósforo**

En relación a los criterios para interpretar la calidad del agua para riego, Ayers y Westcot (1987) establecen que el contenido de fósforo normalmente aceptable es hasta  $2.0 \text{ mg l}^{-1}$ .

#### **2.4.1.1.1 1Clasificación hidrogeoquímica del agua**

De acuerdo con Can *et al.* (2014) las evaluaciones hidroquímicas o hidrogeoquímicas ayudan a determinar el origen de la composición química del agua y la relación que existe entre el agua y la constitución química de las rocas.

#### **2.4.2 Reducción de la calidad del suelo**

Prieto *et al.*, (2013) establecen que el suelo es un sistema estructurado, heterogéneo y discontinuo, fundamental e irremplazable, desarrollado a partir de una mezcla de materia orgánica, minerales y nutrientes capaces de sostener el crecimiento de los organismos y los microorganismos. Por su parte, Roveda *et al.*, (2012) indican que la calidad del suelo debe interpretarse como la utilidad del suelo para un propósito específico en una escala amplia de tiempo. El estado de las propiedades dinámicas del suelo como contenido de materia orgánica, diversidad de organismos, o productos microbianos en un tiempo particular constituyen la salud del suelo. La definición común de suelo fértil plantea que es aquel que tiene la capacidad de suministrar los nutrientes suficientes al cultivo, asegurando su crecimiento y su desarrollo.

Sin embargo, los procesos intensivos de los sistemas de producción agrícola en los últimos años han provocado que muchos terrenos fértiles, se hayan degradado mediante la erosión y la lixiviación de sus nutrimentos. Esto da como resultado que disminuya la cantidad de terrenos disponibles y eficientes

para las actividades agrícolas. Por lo tanto, muchos suelos ya no se pueden aprovechar para la agricultura debido a la mala planificación que se les ha dado (Larson, & Pierce, 1991).

De igual forma Prieto *et al.*, (2013) señalan que la actividad agrícola es una de las principales fuentes de ingresos económicos para la nuestro país, no obstante, en las últimas décadas, las actividades humanas han provocado un desequilibrio en la ecología, cada vez se hace más difícil que los cultivos se desarrollen y se logren obtener buenas cosechas. Por eso para un manejo adecuado del suelo es necesario conocer las cantidades de los diferentes minerales (nutrientes inorgánicos) que éste contiene, para así fertilizar los terrenos de manera adecuada y compensar la degradación de éste debido a la erosión y a la mala rotación de los cultivos.

La evaluación de la calidad permite mejorar la respuesta de los recursos como son la pérdida de suelo por erosión, reducción de la infiltración, endurecimiento de la capa superficial, pérdida de nutrientes, transporte de agroquímicos, cambios en el pH, pérdida de materia orgánica ya que la calidad del suelo se puede ver afectada por el manejo del suelo como uso de maquinaria, utilización de fertilizantes, agroquímicos y enmiendas orgánicas y tipo de cultivo (Vázquez, & Vignolles, 2015).

#### **2.4.2.1 Parámetros físicos y químicos para la evaluación de la calidad del suelo agrícola**

##### **2.4.2.1.1 pH**

Pérez (2013) asevera que el pH mide en el suelo la actividad química, biológica, límites para el crecimiento de las plantas y actividad microbiana. SEMARNAT (2002) indica que la evaluación electrométrica del pH se basa en la determinación de la actividad del ion H mediante el uso de un electrodo cuya membrana es sensitiva al H. En el caso de los suelos el pH se mide potenciométricamente en la suspensión sobrenadante de una mezcla de relación suelo: agua 1:2. El pH es una de las mediciones más comunes e importantes en los análisis químicos rutinarios de suelo, ya que controla reacciones químicas y biológicas en el suelo. La determinación del pH es afectada por varios factores tales como: el tipo y cantidad de constituyentes orgánicos e inorgánicos que contribuyen a la acidez del suelo, la concentración de sales en la solución.

##### **2.4.2.1.2 Conductividad eléctrica**

Celaya & Castellanos (2011) hacen énfasis en que la conductividad eléctrica permite dar una idea aproximada de la cantidad de sales solubles existentes en el suelo, basándose en la propiedad que tienen las sales, de conducir la electricidad al ionizarse.

De acuerdo con SEMARNAT (2002), el término de sales solubles del suelo se usa para referirse a los constituyentes inorgánicos del suelo que son apreciablemente solubles en el agua. El extracto de saturación es una solución acuosa importante porque muchas propiedades del suelo como la composición de las sales solubles y la conductividad eléctrica del extracto de saturación están relacionadas con la respuesta de los cultivos a la salinidad.

#### **2.4.2.1.3 Materia orgánica**

Para García *et al* (2012), la materia orgánica ejerce una influencia de control sobre las propiedades del suelo. Sin ella difícilmente podría denominarse correctamente como suelo a la capa superficial de la tierra. Es uno de los elementos más importantes que contienen los suelos y también uno de los recursos de los mismos que mas fácilmente se agota. La mayor parte de la MO del suelo está constituida por raíces, hojas y tallos de plantas en distintas fases de desintegración.

Ibarra *et al.*, (2007) señalan que la materia orgánica (MO), además de ser un indicador de la fertilidad del suelo, mejora la estructura edáfica, la cual, a su vez, influye en la formación de micro y macroagregados, la continuidad de poros hacia la superficie y la infiltración de agua a todo el perfil. Por otra parte, mejora las condiciones de los suelos minerales; en los arenosos incrementa la capacidad de retención de agua y de nutrimentos, mientras que en los arcillosos los hace menos pesados y mejora su labranza. La MO actúa como la reserva principal de nutrimentos del suelo y permite que las partículas se agrupen en forma de agregados; además, reduce considerablemente la erosión del suelo, aumenta su fertilidad (por el contenido de humus), mejora la estructura e incrementa la captación de humedad.

Por su parte, SEMARNAT (2002) indica que la determinación de materia orgánica del suelo se evalúa a través del contenido de carbono orgánico con el método de Walkley y Black. Este método se basa en la oxidación del carbono orgánico del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio y el calor de reacción que se genera al mezclarla con ácido sulfúrico concentrado. Después de un cierto tiempo de espera la mezcla se diluye, se adiciona ácido fosfórico para evitar interferencias de  $Fe_{3+}$  y el dicromato de potasio residual es valorado con sulfato ferroso. Con este procedimiento se detecta entre un 70 y 84% del carbón orgánico total por lo que es necesario introducir un factor de corrección, el cual puede variar entre suelo y suelo.

#### **2.4.2.1.4 Nitrógeno**

Celaya & Castellanos (2011) manifiestan que el nitrógeno es, después del agua, el nutriente más limitante para la productividad de las plantas de zonas áridas y semiáridas. En forma natural, el

nitrógeno se encuentra en la atmósfera como gas, en un reservorio no disponible para las plantas, por lo que para poder utilizarlo, las plantas requieren establecer simbiosis con algunas especies de bacterias, lo que sucede por ejemplo en diversas especies de la familia de las leguminosas entre otras, lo que les permite aportar materia orgánica rica en nitrógeno al suelo de zonas áridas.

Duran *et al.*, (2009) revelan que la transformación de nitrógeno ocurre por la descomposición y mineralización llevada a cabo por los microorganismos del suelo, sin embargo en los ambientes áridos, no tienen siempre condiciones ideales para su actividad en cuanto a temperatura y humedad. No es fácil conocer la disponibilidad real de nitrógeno por las dificultades que ocurren con los diferentes métodos para medir la mineralización, como son perturbar el suelo, eliminar raíces, limitar la aireación y el flujo del agua. A diferencia de otros ecosistemas, la mineralización de nitrógeno en ecosistemas áridos y semiáridos se da en parches, de manera heterogénea, en respuesta a condiciones de microclima.

El método para la determinación de nitrógeno inorgánico extraíble se realiza con el procedimiento micro-Kjeldahl ya que se utiliza como índice de disponibilidad de nitrógeno en el suelo. Su evaluación permitirá generar recomendaciones de fertilización ya que el nitrógeno inorgánico determinado con este procedimiento ha mostrado una alta relación con la respuesta de la planta en estudios de correlación de métodos químicos el cual se basa en la extracción del amonio intercambiable por equilibrio de la muestra de suelo con  $KCl_2 N$  y su determinación por destilación mediante arrastre de vapor en presencia de  $MgO$  (SEMARNAT, 2002).

#### **2.4.2.1.5 Fósforo**

Holford *et al.*, (1994) manifiestan que el fósforo desempeña un papel fundamental en gran número de reacciones enzimáticas. Es un constituyente del núcleo celular y para el desarrollo de tejidos, en los cuales puede demostrarse su presencia utilizando como fertilizante fósforo radiactivo. El fósforo (P) está firmemente unido a los suelos, debido a la precipitación de P con iones de calcio en el suelo calcáreo, y debido a la adsorción de P por Fe y Alóxidos en el suelo ácido. Como resultado, solo una fracción relativamente pequeña del suelo el fósforo está disponible para las plantas. En respuesta, se han aplicado cantidades masivas de fertilizante fosfatados en zonas de origen calcáreo para aumentar en el suelo el fósforo disponible durante el siglo pasado. Sin embargo, el aumento de fósforo en el suelo incrementa el riesgo de erosión, flujo terrestre y lixiviación, lo que contribuye a la eutrofización de las aguas superficiales. Además, los recursos de roca P utilizados para la fabricación de fertilizantes fosfatados son finitos y pueden agotarse. El suelo deficiente en P, se necesita ser adicionado para elevarse y poder satisfacer las necesidades del cultivo dependiendo del tipo de suelo.

El fósforo se puede medir con procedimiento fósforo-olsen, ya que éste ha mostrado una estrecha relación con la respuesta de los cultivos. El fósforo es extraído del suelo con una solución de  $\text{NaHCO}_3$  0.5 M ajustada a un pH de 8.5. En suelos neutros, calcáreos o alcalinos, conteniendo fosfatos de calcio, este extractante disminuye la concentración de Ca en solución a través de una precipitación del  $\text{CaCO}_3$ , por tanto la concentración de P en solución se incrementa. En suelos ácidos conteniendo fosfatos de Al y Fe tales como la variscita y estregita, la concentración de P en solución, se incrementa conforme el pH se eleva. Este extractante evita que se presenten reacciones secundarias en suelos ácidos y calcáreos debido a que el nivel de Al, Ca y Fe se mantiene muy bajo en dicha solución (SEMARNAT, 2002).

#### **2.4.2.1.6 Potasio**

Aguado *et al.*, (2002), establecen que el Potasio es uno de los elementos nutritivos más importantes en la vida de las plantas, en conjunto con el nitrógeno y fósforo forma la base del crecimiento vegetal. Es uno de los elementos del suelo que contribuyen a darle su fertilidad para permitir el desarrollo de las plantas. En la agricultura intensiva el aporte de K de los suelos no siempre es suficiente para satisfacer la demanda de los cultivos. Aun cuando el contenido de K total del suelo puede ser 4% o más, este tipo de K no se relaciona directamente con el K disponible para las plantas. Las fracciones de K importantes para la nutrición de los cultivos son la  $K_s$ ,  $K_i$  y  $K_{ni}$ ; si las dos primeras son bajas, los suelos deben ser complementados con fertilizantes potásicos para incrementar su disponibilidad.

Por su parte, SEMARNAT (2002) señala que el consumo de fertilizante potásico en México ha aumentado en los últimos años y se debe a que dicho aumento es consecuencia del agotamiento de los reservorios de K en los suelos cultivados y porque los productores han observado que los cultivos responden a la adición de esos materiales. En el país se conoce poco acerca del funcionamiento del K en el sistema suelo-planta, y parece conveniente estudiarlo más profundamente para mejorar la capacidad de diagnóstico del estado de este elemento en el suelo y afinar las dosis recomendadas de este elemento. El método para la determinación de K en suelos acorde con la norma oficial mexicana NOM-21-SEMARNAT-2000 se realiza a través del método de espectrofotometría de emisión de flama.

#### **2.4.2.1.8 Capacidad de intercambio catiónico**

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) es una propiedad química a partir de la cual es posible inferir acerca del tipo de arcilla presente, de la magnitud de la reserva nutrimental y del grado

de intemperismo de los suelos. El resultado numérico de la determinación sirve además como base en el cálculo del porcentaje de saturación de bases que es un dato ampliamente usado en los estudios pedológicos y de fertilidad. Para poder inferir sobre los minerales arcillosos presentes en los suelos hay que considerar la medición hecha por Grim (1953) en los silicatos laminares del tipo 1:1 y 2:1 empleando acetato de amonio 1N, pH 7.0. (SEMARNAT, 2002).

Con respecto al grado de intemperismo se considera que un valor de CIC inferior a 10 Cmol (+) Kg<sup>-1</sup> de suelo en un horizonte B con más de 30 a 40% de arcilla indica la ausencia de minerales primarios intemperizables y la acumulación de minerales secundarios del grupo caolinítico y óxidos libres. Por lo que respecta a la reserva nutrimental se considera que ésta es abundante cuando la CIC es mayor de 25 Cmol (+) Kg<sup>-1</sup> de suelo. La fertilidad se realizará de conformidad con clasificación elaborada con los resultados analíticos obtenidos con métodos apropiados tanto en suelos ácidos como alcalinos (SEMARNAT. 2002).

#### **2.4.2.1.9 Bases intercambiables**

García *et al* (2012) indican que el grado de acidez del suelo y las condiciones fisiológicas que la acompañan, se debe a la ausencia o inactividad de ciertos cationes metálicos, especialmente del calcio y magnesio que tienden a reducir la concentración de hidrogeniones en la solución del suelo. El estado fisiológico de un suelo ácido se puede corregir agregándole compuestos que contengan calcio y magnesio para modificar el complejo coloidal, ya que a medida que se pierden el calcio y magnesio del suelo por agotamiento, aumenta gradualmente la acidez. Desde el punto de vista químico, el término cal se refiere a un solo compuesto; el óxido de calcio y magnesio utilizados en la práctica, no solo para elevar el pH de un suelo excesivamente ácido, si no para corregir su estado fisiológico.

SEMARNAT (2002) señala que el método para determinar las bases intercambiables (Ca, Mg, Na y K) en los suelos ácidos y calcáreos se realiza empleando tiourea de plata como solución saturada. El procedimiento consiste en equilibrar una muestra de suelos con una solución de Ag TU 0,01M. La afinidad de este reactivo por las cargas negativas de las partículas del suelo permite una completa saturación, aun cuando el suelo contenga relativamente altas concentraciones de otras sales. Esto requiere de una sola etapa, o sea, la extracción y centrifugación para que el intercambio sea completo. Por lo tanto, el sobrante contendrá todos los cationes intercambiables.

#### **2.4.2.1.10 Relación de adsorción de sodio y porcentaje de sodio intercambiable**

Aguado *et al.*, (2002) hacen referencia a que la sodicidad se mide en relación a la concentración relativa del sodio con respecto a otros cationes. Una proporción alta de Na sobre el Ca produce descenso en la infiltración como consecuencia de su efecto dispersante sobre los agregados del suelo. El sodio respecto al calcio y magnesio, cationes divalentes que compiten con el sodio por los lugares de intercambio del suelo. La afectación de la estructura del suelo por cationes monovalentes como el sodio, se produce por un enriquecimiento del complejo de cambio del suelo en cuestión (sustitución de los iones calcio y magnesio por sodio). La capacidad de intercambio de un catión depende tanto de las propiedades de dicho catión como de los intercambiadores del suelo. El sodio por su baja carga, elevada capa de hidratación y baja polaridad.

Para Tarabull y Betancourt (2016) la toxicidad del sodio depende en gran medida de los niveles de calcio y magnesio. Si el magnesio y calcio son altos, éstos atenúan el efecto dañino del sodio; esto explica que para un RAS (Relación de Absorción de Sodio) dada, la infiltración del agua aumenta conforme la salinidad se incrementa. Los valores altos de RAS pueden ser tolerados cuando la salinidad del agua de riego aumenta. Contrariamente, baja RAS del agua puede ser peligrosa en el suelo si la CE es baja. Por su parte, el porcentaje de sodio posible es un indicador que también se usa para evaluar el riesgo producido por el sodio. Altos valores causan defloculación y afectan la permeabilidad del suelo. También limitan la circulación del aire y el agua en condiciones de alta humedad. Altos niveles de sodio intercambiable (PSI) causan hinchamiento y dispersión de las arcillas, ocasionando problemas de encostramiento, reducción de la infiltración, incremento de la erodabilidad (laminar, en surcos y en cárcavas), pérdida de estabilidad estructural y reducción en el crecimiento de las plantas debido a estas alteraciones y a la toxicidad específica del Na<sup>+</sup>.

#### **2.4.2.1.11 Textura**

SEMARNAT (2002) señala que la textura del suelo se define como la proporción relativa de grupos dimensionales de partículas. Este indicador proporciona una idea general de las propiedades físicas del suelo como retención y transporte de agua y minerales y erosión del suelo a partir de su influencia en el tipo de estructura, la cantidad y tamaño de poros. El método para la determinación de la textura del suelo por el procedimiento de Bouyoucos. Su determinación es rápida y aproximada. En general el problema es separar los agregados y analizar sólo las partículas. En el presente método se elimina la agregación debida a materia orgánica y la floculación debida a los cationes calcio y magnesio. No se eliminan otros cementantes como carbonatos. El tiempo de lectura se ha escogido de

40 segundos para la separación de partículas mayores de 0.05 mm (arena) y de 2 horas para partículas de diámetro mayores de 0.002 mm (limo y arena).

## **2.5 Literatura citada**

- Ayala, A., Schwentesius, R., De la O, P., Almaguer, G., & Rivas, P. (2013) Análisis de rentabilidad de la producción de maíz en la región de Tulancingo, Hidalgo, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 10(4), 381-395.
- Tartabull, T., & Betancourt, C. (2016). La calidad del agua para el riego. Principales indicadores de medida y procesos que la impactan. *Revista Científica Agroecosistemas*, 4 (1), 47-61. Recuperado de: <http://aes.ucf.edu.cu/index.php/ras>
- García, Y., Ramírez, W. & Sánchez, S. (2012) Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35 (2), 125-138.
- Aguado, G., Etchevers, J., Hidalgo, C., Galvis, A., & Aguirre, A. (2002) Dinámica del potasio en suelos agrícolas. *Agrociencia* 36: 11-21.
- Holford I., Schweitzer B., Crocker G. (1994) Long-term effects of lime on soil phosphorus solubility and sorption in eight acidic soils. *J Soil Res* 32:795–803.
- Durán, J., A. Rodríguez, J. M. Fernández-Palacios, and A. Gallardo (2009) Changes in net N mineralization rates and soil N and P pools in a pine forest wildfire chronosequence. *Biol. Fert. Soils* 45: 781-788. doi:10.1007/s00374-009-0389-4.
- Celaya, H., & Castellanos, A. (2011) Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. *Terra Latinoamericana*, 29(3), 343-356.
- Vázquez, P. & Vignolles, M. (2015) Establecimiento agroproductivo ecológico vs agricultura convencional, partido de Tandil, provincia de Buenos Aires. *Sociedad & Naturaleza*, 27 (2), 267-280.
- Ibarra, D., Ruiz, J., Flore, J., González, D., (2007) Distribución espacial del contenido de materia orgánica de los suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco. *Terra Latinoamericana*, 25(2), 187-194.
- SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002) Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial*, martes 31 de diciembre 2002, primera sección 7-74. México, D. F.

- Larson, W., and F. Pierce (1991). Conservation and enhancement of soil quality. In: Evaluation for sustainable land management in the developing world. Vol.2. IBSRAM Proc.12(2). International Board for Soil Resources and Management. Bangkok, Thailand.
- Prieto, J., Prieto, F., Acevedo O., Méndez, M (2013) Indicadores e índices de calidad de los suelos (ICS) cebaderos del sur del estado de Hidalgo, México. *Agronomía Mesoamericana* 24(1), 83-91.
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1987). La calidad del agua y su uso en la agricultura (Vol. 29, 81 p). Estudio FAO Riego y Drenaje, Roma.
- Valle, F.H. (1992) El agua en la Naturaleza. Serie Apoyos Académicos No. 16. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México.
- Roveda, Gabriel; Peñaranda, Andrea; Ramírez, Margarita; Baquero, Irma; Galindo P., Ricardo (2012) Diagnóstico de la fertilidad química de los suelos de los municipios de Granada y Silvania para la producción de uchuva en Cundinamarca Corpoica. *Ciencia y Tecnología Agorpecuaria*, vol. 13, núm. 2, julio-diciembre, 2012, pp. 179-188.
- FAO (1976) Water quality for agriculture. Irrigation and drainage. American Food Organization. Paper No. 29. Rome.
- Ávila, J. R., Mojarro, F., Moriasi, D. N., Gowda, P. H., Bautista, C., Echavarría, F. G., Garbrecht, J. D., Steiner, J. L., Howell, T. A., Kanemasu, E. T., Verser, A. J., Wagner, K., & Hernandez, J., (2012) Calibration of SWAT2009 Using Crop Biomass, Evapotranspiration, and Deep Recharge: Calera Watershed in Zacatecas, Mexico Case Study. *Journal of Water Resource and Protection*, 4, 439-450. DOI: 10.4236/jwarp.2012.47051.
- Bedmar, F., Gianelli, V., Angelini, H., & Vigilanchino, L. (2015) Riesgo de contaminación del agua subterránea con plaguicidas en la cuenca del arroyo El Cardalito, Argentina. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 41(1), 70-82. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5052348>
- Berlijn, J. (2002) Administración de empresas agropecuarias (séptima impresión, 2010). México: Ed Trillas. 134 p.
- Ortega, A., Castellanos, J., Aguilar R., Vázquez, A., Alanis, E., Vargas, C., & Urrutia, F. (2002) A Conceptual Model for Increases of Sodium, Sar, Alkalinity and ph at the Independence Aquifer in Guanajuato. *Terra*, 20, 199-207. Recuperado de: <https://chapingo.mx/terra/contenido/20/2/art199-207.pdf>

- Medina, E. K., Mancilla, O. R., Larios, M. M., Guevara, R. D., Olguín J. L. & Barreto, O. A. (2016) Calidad del agua para riego y suelos agrícolas en Tuxcacuesco, Jalisco. IDESIA (Chile), 34(6), 51-59. Recuperado de: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/idesia/v34n6/aop3516.pdf>
- Can, A., Ortega, H. M., García, N. E., Reyes, A. L., González, V. A., & Flores, D. (2011) Origen y calidad del agua subterránea en la cuenca oriental de México. Terra Latinoamericana, 29(2), 189-200. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v29n2/2395-8030-tl-29-02-00189.pdf>
- Can, A., Ortega, H. M., Sánchez, E. I., & Cruz, E. (2014) Calidad del agua para riego en la Sierra Norte de Puebla, México. Tecnología y Ciencias del Agua, 5(5), 77-96. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v5n5/v5n5a5.pdf>
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua (2002) Modelo de Simulación Hidrodinámica de los Acuíferos Chihuahua-Sacramento, Chihuahua, Calera y Chupaderos, Zac. Elaborado por la empresa Ariel Consultores S.A., según contrato No. GAS-014-PRO-0.
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua (2009) Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea Acuífero (3225) Calera, estado de Zacatecas. Comisión Nacional del Agua [En línea] disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/disponibilidad.aspx?n1=3&n2=62&n3=112>
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua (2012) Prontuario de aguas subterráneas 2012. Comisión Nacional del Agua, [En línea] disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Prontuario%20de%20aguas%20subterr%C3%A1neas.pdf>
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua (2014) Registro Público de Derechos de Agua (REPGA). Títulos y Permisos de Extracción de Aguas Nacionales y sus Bienes Públicos Inherentes Comisión Nacional del Agua, [En línea] disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/Repda.aspx?n1=5&n2=37&n3=115>
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua (2015) Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero (3225) Calera, Estado de Zacatecas., Reporte interno: Comisión Nacional del Agua.
- Duval, M., Galantini, J., ; Martínez, J. & Iglesias, J. (2016) Comparación de índices de calidad de suelos agrícolas y naturales basados en el carbono orgánico. Ciencia del suelo (Argentina) 34(2): 197-209.

- FAO (2007) Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2007, 130 p.
- Hernández, J., Gowda, P., Howell, T., Steiner, J., Mojarro, F., Núñez, E., & Avila, J. (2012) Modeling Groundwater levels on the Calera aquifer region in central Mexico using ModFlow. *Journal of Agricultural Science and Technology B*, 2(1), 52-61. Recuperado de [https://scholarworks.boisestate.edu/civileng\\_facpubs/36/](https://scholarworks.boisestate.edu/civileng_facpubs/36/)
- Hoz, B., Ferrer, M., & Hoz, A. (2008) Indicadores de rentabilidad: herramientas para la toma decisiones financieras en hoteles de categoría media ubicados en Maracaibo. *Revista de Ciencias Sociales*. 14(1): 88-109.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2004) Guía para la Interpretación Cartográfica de Edafología, México 2004, 30 p.
- INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2007) CENSO Agropecuario. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México 2007. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/sistemas/TabuladosBasicos/Default.aspx?c=17177&s=est>
- INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2011) México en Cifras. Información Nacional por Entidad Federativa y Municipios. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México, 2011. Recuperado el 21 de enero de 2015 de <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx>
- INIFAP, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (2006) Tecnología de producción de chile seco. Libro técnico No. 05. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 2007. 232 p. Recuperado de: [http://www.zacatecas.inifap.gob.mx/publicaciones/Tecnologia de produccion de chile seco.pdf](http://www.zacatecas.inifap.gob.mx/publicaciones/Tecnologia%20de%20produccion%20de%20chile%20seco.pdf)
- Molina de P., O. (2009) La papa: Diversos elementos que intervienen en la cuantificación de su costo de producción. *Actualidad Contable Faces*. 12(18), 73-80.
- Reyes, E., Bravo, A., Salinas, H., & Padilla, E. (2006) Rentabilidad del chile seco en Zacatecas, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29 (2), 137-144.
- Peña, Y., Santacruz, J., & Charcas, H. (2012) Calidad de agua en pozos de la red de monitoreo del Acuífero del valle de San Luis Potosí, Mexico. *Aqua-LAC*, 4(1), 49-59. Recuperado de

<http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/Art6-Pena-49-59.pdf>

- SIAP (2013) Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera; Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Disponible en: [http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com\\_wrapper&view=wrapper&Itemid=351](http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=351)
- SNIM (2010) Sistema Nacional de Información Municipal. Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal. Secretaría de Gobernación (SEGOB). Disponible en: <http://www.snim.rami.gob.mx/>
- Pérez, E. (2013) Análisis de fertilidad de suelos en el laboratorio de Química del Recinto de Grecia, Sede de Occidente, Universidad de Costa Rica. InterSedes: Revista de las Sedes Regionales, 14(29), 6-18.
- Terrones, A. & Sánchez Y. (2011) Análisis de la rentabilidad económica de la producción de jitomate bajo invernadero en Acaxochitlán, Hidalgo. Revista Mexicana de Agronegocios. 29(15), 752-761.
- Navarro, L. E., Nuñez, A., Cardona, J., Castro, E., Villalpando & Bueno, A. (septiembre, 2005) Análisis y distribución de elementos mayores en el agua subterránea del acuífero de Calera, Zacatecas. Instituto Nacional de Geoquímica, XV Congreso Nacional de Geoquímica INAGEQ. Simposio llevado a cabo en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.
- Vélez, A. (2012) Tipificación tecnológica de los productores agrícolas usuarios de los acuíferos de Calera y Chupaderos y su disposición a aceptar ahorrar agua. Tesis de Doctorado, Unidad Académica de Contaduría y Administración. Universidad Autónoma de Zacatecas. 2012, 141 p.

### **3. RENTABILIDAD DE LA PRODUCCIÓN DE FRIJOL (*Phaseolus vulgaris* L.), MAÍZ (*Zea mays* L.) Y CHILE (*Capsicum annuum*.) EN EL MUNICIPIO DE MORELOS, ZACATECAS.**

#### **3.1 Resumen**

El objetivo del presente trabajo fue caracterizar los sistemas de producción agrícola del municipio de Morelos, Zacatecas y calcular la rentabilidad de sus tres principales cultivos (frijol, maíz y chile), bajo un sistema convencional, durante el año agrícola 2013. Se realizó un muestreo aleatorio simple a 26 agricultores que producen los tres cultivos durante el mismo ciclo agrícola. Se tipificaron a los productores y se estimaron los costos de producción por hectárea, el porcentaje de rentabilidad y la relación beneficio-costos B/C, los resultados demuestran que los tres cultivos son rentables. El cultivo de chile es el que requiere de una inversión mayor, pero es el que genera la rentabilidad más alta. De igual forma se observó que la experiencia de los productores, la incorporación de nuevas tecnologías y algunas prácticas de conservación del suelo, son factores que permiten un alto nivel de productividad del municipio.

**Palabras clave:** Rentabilidad, costo de producción, maíz, frijol y chile.

#### **3.2 Introducción**

Por superficie destinada a su producción en México, el maíz grano (*Zea mays* L.) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) se sitúan en el primero (7, 567,017 ha) y segundo lugar (1,676,658 ha); mientras que el chile (*Capsicum annuum*) se ubica en el décimo lugar (160,483 ha) (SAGARPA, 2017). El consumo promedio diario per cápita de maíz es de 343 g lo que equivale al 72% del total de cereales consumidos en el país (Damián *et al.*, 2013); mientras que el cultivo de chile sitúa a México como el segundo mayor productor del planeta, siendo éste el segundo cultivo hortícola socioeconómicamente más importante debido a que participa con cerca del 20% de la producción hortícola del país, y su consumo per cápita es de 16 kg anuales (SAGARPA, 2017) además genera el 39% de la población económicamente activa (INEGI, 2011<sup>a</sup>).

Por su parte, la producción interna de frijol abastece al 89.24% de los requerimientos nacionales y a pesar de los cambios de hábitos de alimentación en la población mexicana, su consumo anual per cápita es de 9.9 kg, manteniéndose como la leguminosa de mayor consumo en México (SAGARPA, 2017).

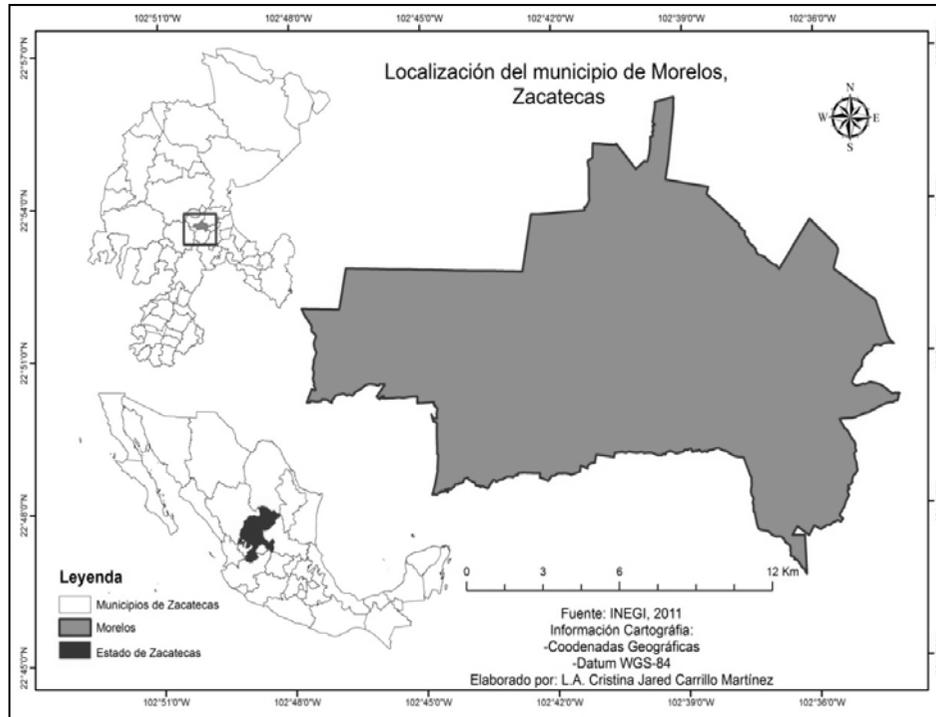
En lo que respecta al estado de Zacatecas, contribuye con el 6% de la superficie cultivada del territorio nacional y es el principal productor de frijol generando el 28% del volumen de la producción así mismo, aporta el 15% de la producción de chile y el 1.3% de maíz a nivel nacional (INEGI, 2012). En el estado hay ocho distritos de desarrollo rural (DDR) y en el DDR 189, localizado en el extremo oriental, se concentra el 50% de la superficie agrícola en riego y el 40% de la superficie cultivada con fertilizantes y agroquímicos; este DDR se integra por los municipios de Calera, Enrique Estrada, Guadalupe, Pánuco, Vetagrande, Trancoso, Villa de Cos, Zacatecas y Morelos (SAGARPA, 2016; SAGARPA, 2017).

Los principales cultivos del DDR 189 son el frijol, maíz, y chile (Pineda, Echavarría, Bustamante & Badillo, 2013; SAGARPA, 2017). En particular, en el municipio de Morelos, en los últimos diez años la producción de chile ha generado el 53% del valor de la producción estatal; el frijol abarca el 38% de la superficie agrícola del municipio, y el 90% de los agricultores producen maíz bajo riego (SAGARPA, 2017).

La trascendencia del municipio de Morelos como productor de frijol, maíz y chile se basa en el esfuerzo que los campesinos realizan durante el proceso de producción para generar altos rendimientos en sus cosechas (Reyes, Salinas, Bravo & Padilla, 2001). Sin embargo, para lograr lo anterior, se requieren paquetes tecnológicos, sistemas de labranza convencional y sistemas de riego, que incrementan los costos de producción (INEGI, 2007). Es por ello que el objetivo del presente trabajo se enfocó en caracterizar los sistemas de producción agrícola del municipio y calcular la rentabilidad de sus tres principales cultivos: frijol, maíz y chile bajo un sistema convencional, durante el año agrícola de 2013.

### **3.3 Materiales y métodos**

El estudio se realizó en el municipio de Morelos, Zacatecas (102° 36' 45" LO y 22° 53' 12" LN, a 2,348 msnm. Figura 1). El clima predominante es semiseco templado con lluvias en verano, su temperatura oscila de 14 a 18°C (INEGI, 2010) y la precipitación pluvial va de 400 a 500 mm (INEGI, 2005).



**Figura 6. Localización del municipio de Morelos, Zacatecas**

Se elaboró un cuestionario estructurado, y se utilizó la técnica de entrevista directa propuesta por Aguirre (1979) como herramienta para registrar información sobre las variables cualitativas y cuantitativas, así como para identificar las características de los productores, procesos, estrategias y costos de producción de cada sistema analizado. Se visitaron las parcelas con el objetivo de corroborar y complementar la información de los entrevistados, al mismo tiempo se ubicaron geográficamente los puntos visitados.

La población de estudio se determinó con base en el listado de beneficiarios por el Programa de Apoyos Directos al Campo (PROCAMPO). Se identificó, a los productores que a su vez cultivan frijol, maíz y chile bajo sistemas que incluyen el uso de diversos productos agroquímicos, maquinaria, semilla mejorada y sistemas de riego para generar mayores rendimientos y alcanzar una ganancia económica significativa (Vázquez & Vignolles, 2015). El tamaño de muestra se determinó a través de la siguiente fórmula (Sweeney & Williams, 2008):

$$n = \frac{NZ^2_{\alpha/2}S^2}{Nd^2 + Z^2_{\alpha/2}S^2}$$

Donde:

$n$  = tamaño de la muestra

$d$  = precisión

$N$  = tamaño de población

$Z_{\alpha/2}$  = confiabilidad

$S^2$  = Varianza

Para calcular el tamaño de la muestra se fijó una precisión del 10% y una confiabilidad del 95%, el resultado fue un tamaño de muestra de 26 productores de una población de 96. La superficie agrícola cultivada de Morelos se integra por un total de 15, 995.72 ha (INEGI, 2007) de las cuales se analizaron 1,653.6 ha, equivalentes al 16% del total

Se identificaron y clasificaron los costos directos e indirectos que intervinieron en la producción de una hectárea de frijol, maíz y chile en el año agrícola de 2013 según las directrices de Berlijn (2002). Los costos directos se integraron por los insumos, preparación del terreno, siembra (para el caso del frijol y maíz) o trasplante (para el caso del chile), labores culturales y de cosecha, riego y mano de obra.

En lo concerniente a insumos se consideraron los precios comerciales locales de fertilizantes, agroquímicos y semilla mejorada que utilizaron los productores de Morelos por hectárea de cada cultivo. Respecto a la preparación del terreno y labores culturales se tomó en cuenta el precio del combustible y cantidades requeridas para cada labor de cultivo.

Para el caso del maíz y frijol se tomó en cuenta el costo por la renta de trilladora para efectuar sus labores de cosecha. Respecto a los costos originados por el consumo energético que requieren los pozos para el abastecimiento del recurso hídrico hacia los cultivos se contempló el número de riegos que necesita cada cultivo (chile, maíz y frijol), el tiempo promedio de cada riego, la tarifa energética con la que cuenta el productor, la eficiencia electromagnética de la bomba del pozo y la cantidad de kilowatts-hora (kWh) consumidos. Para la mano de obra, se consideró el pago del jornal diario que fue de \$150.00, los requeridos por hectárea y el número de jornales necesarios para terminar cada tarea.

Para el cálculo de los costos indirectos se consideró el mantenimiento anual de las instalaciones del sistema de riego, el pago de las contribuciones de los terrenos, el mantenimiento de las instalaciones y el pago del predial  $ha^{-1}$ , con base en las cuotas estipuladas en la ley de ingresos del 2013 para el municipio de Morelos, Zacatecas.

El costo total de producción por hectárea para los cultivos de frijol, maíz y chile se determinó por la suma de los costos directos e indirectos. Posteriormente, se elaboró un análisis para identificar el porcentaje de rentabilidad de cada uno de los cultivos a partir de las siguientes expresiones:

$$\text{Ingreso total (\$)} = \text{Rendimiento estimado (kg ha}^{-1}\text{)} \times \text{Precio de venta (\$ kg}^{-1}\text{)}$$

$$\text{Ingreso neto (\$)} = \text{Ingreso total (\$)} - \text{Costo total (\$)}$$

$$\text{Margen bruto (\$)} = \text{Ingreso total (\$)} - \text{Costos directos (\$)}$$

$$\text{Costo medio (\$)} = \text{Costo total (\$)} / \text{Rendimiento estimado (kg)}$$

$$\text{Rentabilidad (\%)} = \text{Ingreso neto} / \text{Costo total} \times 100$$

Para obtener el rendimiento estimado se consideró el promedio de los rendimientos generados por los productores para cada uno de los tres cultivos y el precio de venta se fijó con la información del Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados (SNIIM) para el año de 2013. No obstante, para registrar las utilidades, al ingreso neto por productor se le restó el valor de la depreciación de los bienes.

Respecto al cálculo de la depreciación basada en el valor de adquisición de los medios de producción duraderos se clasificaron los bienes móviles e inmóviles. Los bienes móviles se integraron a grandes rasgos por los equipos necesarios para la preparación del terreno y labores culturales como lo es el tractor, arado, pulverizadora y sembradora y en cuanto a los bienes inmóviles se tomó en cuenta el sistema de irrigación que poseen la mayoría de los productores del municipio; se identificó para cada uno de los elementos de ambos bienes su ciclo de vida útil y su valor de adquisición promedio. La siguiente fórmula se aplicó para estimar el valor en pesos que se pierde anualmente por el uso de estos equipos (Berlijn, 2002):

$$D = \frac{VA}{VE}$$

Donde:

$D$  = Depreciación

$VA$  = Valor de adquisición

$VE$  = Vida económica

Finalmente, para determinar la rentabilidad de la producción de frijol, maíz y chile, se consideró la relación beneficio-costo como indicador de su viabilidad económica, ésta se estimó mediante la siguiente fórmula (Oxenfeldt, 1985; Varela, 1989; Bierman & Smidt, 1993; Sapag, 2007):

$$B/C = \frac{\sum_{i=1}^{j=n} Q_i P_i}{\sum_{h=1}^{k=n} C_h}$$

Donde:

$B/C$  = Beneficio-Costo

$Q_i$  = Es la cantidad de frijol, maíz o chile vendida del  $i$ -ésimo corte

$P_i$  = Es el precio de venta del frijol, maíz o chile del  $i$ -ésimo corte

$C_h$  = Es el costo debido al rubro h (h=inversión inicial, fertilizantes, siembra, trabajador permanente, comercialización, cosecha, pos cosecha, plaguicidas/fungicidas, luz y riego) requeridos para cada uno de los tres cultivos.

Si  $B/C=1$ , significa que su producción no genera pérdidas ni ganancias, es decir, lo que se invierte se recupera. Si  $B/C < 0$  implica que su producción genera pérdidas y si  $B/C > 0$ , su producción presenta rentabilidad económica es decir, genera ganancias (Perdomo, 2001).

### **3.4 Resultados y discusión**

#### **3.4.1 Características generales de los productores**

Los productores del área de estudio tienen una edad promedio de 48 años, datos que coinciden con lo que reportan Ayala, Schwentesius, Almaguer & Rivas (2013) para el estado de Hidalgo en el que también se realizó la evaluación de un sistema de producción convencional. Además, los productores cuentan con una experiencia promedio de 28 años y se observa la incorporación de jóvenes al proceso productivo para continuar con la tradición familiar, esta información concuerda con la generada por Tucuch, Ku Naal, Estrada & Palacios (2007). Ruiz, Medina, Gonzalez & Ortíz (2001) quienes encontraron que la edad del productor es determinante para la adopción de nuevas prácticas agrícolas, y a medida que los productores sean más jóvenes habrá una mayor incorporación de estrategias convencionales a la dinámica agrícola para incrementar el rendimiento de cada cultivo.

En promedio el grado de escolaridad es de 12 años lo que equivale a preparatoria terminada, valor que supera a la media estatal cuyo promedio de estudios es únicamente de 7.9 años, equivalente a segundo año de secundaria, Morelos es uno de los municipios del estado con una mayor proporción de profesionistas con relación a su población al registrar un 28% (INEGI, 2010).

Se encontró que ninguno de los agricultores entrevistados determina sus costos de producción y por consiguiente desconocen sus márgenes brutos de ganancia, esta información coincide con la obtenida por Reyes *et al.*, (2006) en un estudio de rentabilidad de producción de chile seco realizado en la región central del estado de Zacatecas; los productores del municipio manifestaron que es una labor tediosa y complicada, por lo que solo se limitan a identificar al final del ciclo si se obtuvieron ganancias.

#### **3.4.2 Características generales de la producción**

El 100% de los agricultores practican el sistema de labranza convencional pues consideran que esta actividad destruye los residuos de la cosecha anterior y les proporciona una estructura del suelo

apta durante el ciclo de cultivo. Por su parte FAO (2008) establece que la estructura deseable del suelo para fines agrícolas es aquella que proporciona una buena cama de siembra para los cultivos, donde los poros aseguran la infiltración del agua, el drenaje adecuado y la aireación del suelo.

Todos los productores entrevistados en cada ciclo productivo practican la rotación de cultivos, la intercalación de cultivos, deshierbes manuales y aprovechamiento de arvenses mediante su incorporación al suelo como los quelites (*Chenopodium*), diente de león (*Taraxacum officinale*) y Gordolobo (*Verbascum thapsus*). El 73% efectúa labores para el control de erosión y salinidad como orientación de los surcos y/o camas y aplicación de materia orgánica al suelo para mejorar su estructura. También establecen barreras cortavientos con nopal (*Opuntia ssp.*) para controlar la erosión hídrica y eólica, esto concuerda con la información obtenida por Baltazar *et al.*, (2011) en tres municipios de Aguascalientes, México durante la evaluación del cultivo de maíz en riego, ya que los agricultores señalaron la importancia de la conservación del suelo como una estrategia para incrementar sus niveles de productividad y mejorar sus ingresos.

Los productores entrevistados no forman parte de organizaciones que apoyen la actividad agrícola, y el 87% solamente recibe asistencia técnica por parte de las casas comerciales de agroquímicos, esta situación difiere de los resultados generados por Galindo, Tabares & Gómez (2000) en seis DDR del estado de Zacatecas, quienes reportaron que la asesoría que recibieron los agricultores fue proporcionada por el programa gubernamental PROCAMPO de la que antes era la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural (SAGAR) por lo que ahora ese tipo de apoyo se encuentra discontinuado.

Por su parte, Torres *et al.*, (2013), establecieron que para obtener insumos a bajo costo y asesoría técnica proveniente de instituciones gubernamentales se deben constituir organizaciones de productores; sin embargo, durante el estudio, los agricultores manifestaron no estar interesados en formar una asociación debido a que anteriormente ya se han efectuado intentos fallidos debido a la falta de acuerdos en las obligaciones y beneficios de cada socio.

En cuanto al destino de la producción el 100% se vende a intermediarios, quienes determinan el precio del producto, este contexto es similar al descrito por Ayala *et al.*, (2013) para maíz en el estado de Hidalgo y Baltazar *et al.*, (2011) con relación a chile en el estado de Aguascalientes; por lo que se puede evidenciar que esta situación ocurre en todo el país y en cada cultivo, particularmente en el municipio de Morelos se debe a la falta de organización y compromiso por parte de los productores de Morelos para formar una asociación y poder integrar economías de escala.

### 3.4.3 Tenencia de la tierra

El 53% del territorio analizado corresponde a propiedad privada y el 47% es ejidal, por lo tanto su distribución es altamente equitativa. Esto concuerda con lo que reporta Cotler & Fregoso (2006) en la cuenca Lerma-Chapala ya que el 50% de la superficie analizada fue de carácter ejidal. Con un promedio y desviación estándar, los agricultores de Morelos destinan  $16 \pm 4$ ,  $18 \pm 0$  y  $13 \pm 6$  hectáreas para la producción en riego de chile, frijol y maíz respectivamente, estos resultados coinciden con los obtenidos por Galindo *et al.*, (2000) en la región central del estado de Zacatecas ya que los productores cultivaron en promedio una superficie de 15 hectáreas. Así mismo, Reyes *et al.*, (2006) y Tucuch *et al.*, (2007) establecen que los productores que cultivan más de 15 hectáreas son los que generan mayores rendimientos debido a que el tamaño del predio tiene gran influencia en la inversión en tecnología, puesto que en la medida que los agricultores trabajan una mayor superficie es necesario mecanizar algunos procesos como pueden ser la cosecha o la aplicación de agroquímicos.

### 3.4.4 Costo de producción

Para los cultivos de frijol y maíz los insumos abarcaron la mayor proporción de los costos de producción (Tabla 3), ya que los productores señalaron que se aplican varios agroquímicos mediante fertirrigación para incrementar la productividad, esta información corresponde con la generada por Guzmán, De la Garza, González & Hernández (2014) en la región Bajío de Guanajuato y obtenida por De los Santos, Romero & Bobadilla (2017) a nivel nacional, ya que para ambos casos se aplican nutrientes derivados de diversas fuentes inorgánicas para incrementar su productividad, lo que eleva los costos de producción.

No obstante, difiere de los resultados obtenidos por Ayala *et al.*, (2013) la región de Tulancingo, Hidalgo, México y Ugalde, Tosquy, López & Francisco (2011) en el estado de Veracruz; quienes encontraron que las labores mecanizadas son las que abarcan la mayor proporción en los costos de producción, reportando un limitado uso de agroquímicos debido a la falta de sistemas de riego eficientes para suministrar altas dosis de fertilizante por medio del fertiriego.

Para el cultivo de chile se encontró que la mayor proporción de su costo de producción se concentró en la mano de obra ya que éste solicitó 55 jornales  $ha^{-1}$  durante su ciclo de desarrollo para satisfacer las necesidades del cultivo tales como preparación del terreno, producción de plántula, trasplante, deshierbas manuales, aplicación de agroquímicos, corte y empacado. En contraste de lo reportado por Reyes *et al.*, (2006) en la misma región donde se localiza el municipio de Morelos reportó una necesidad de 140 y 148 jornales  $ha^{-1}$  para efectuar las mismas labores y posicionar

rápida mente la cosecha en el mercado, antes que los demás lo hagan para que alcance mayores precios de venta.

Por su parte, los cultivos de frijol y maíz demandan entre 11 y 18 jornales  $ha^{-1}$  para realizar labores como preparación del terreno, siembra, deshierbes mecánicos, aplicación de agroquímicos y recolección de la cosecha, éstos solicitan pocos jornales como consecuencia de la mecanización de sus procesos, por la misma naturaleza de estos cultivos. De los Santos *et al.*, (2017) encontraron que a nivel nacional las labores mencionadas se llevan a cabo de manera automatizada cuando se trabaja bajo un sistema de producción convencional.

**Tabla 3. Estimación de los costos de producción de frijol, maíz y chile por hectárea, año agrícola 2013.**

Concepto	$ha^{-1}$					
	Frijol		Maíz		Chile	
	\$	%	\$	%	\$	%
<b>I. COSTOS DIRECTOS</b>						
<i>Insumos (agroquímicos y semilla mejorada)</i>	7,115	36	9,923.50	47	9,735.00	27
<i>Preparación del terreno y siembra</i>	958.8	5	958.8	4	958.8	3
<i>Labores culturales y de cosecha</i>	916	5	1,515.84	7	146.64	0.4
<i>Riego</i>	3,000	15	2,400	11	9,000	25
<i>Mano de obra</i>	3,450	18	2,400	11	11,550	33
<b>II. COSTOS INDIRECTOS</b>						
<i>Mantenimiento de instalaciones y predial</i>	4,125	21	4,125	19	4,125	12
<b>III. COSTO TOTAL</b>	<b>19,565</b>	<b>100</b>	<b>21,323.3</b>	<b>100</b>	<b>35,515</b>	<b>100</b>

El paquete tecnológico que los productores utilizan para el cultivo de frijol no coincide con las recomendaciones técnicas generadas por INIFAP (2008) (Tabla 2), ya que la fórmula de fertilización que se sugiere para el cultivo en la región es de 40N-40P-00K, la cual se puede obtener con 100 kg  $ha^{-1}$  de urea y 100 kg  $ha^{-1}$  de superfosfato triple o bien, con 200 Kg  $ha^{-1}$  de amonio y 100 kg  $ha^{-1}$  de superfosfato triple.

No obstante, los productores del municipio están aplicando casi el doble de lo recomendado, considerando que obtendrán mayores rendimientos si suministran altas cantidades de nutrientes. Además, se recurre al uso de abonos orgánicos y semilla híbrida como estrategias complementarias para asegurar una alta productividad. Los rendimientos obtenidos durante el año de evaluación fue de 2,600 kg  $ha^{-1}$ ; rendimientos que según SAGARPA (2014) superaron en un 23% a la media estatal. Esta información concuerda con la reportada por Jiménez & Acosta (2013) en el estado de Chihuahua, ya

que también se alcanzaron altos rendimientos atribuidos al suministro de nutrientes por medio de fertirrigación.

En cuanto al cultivo de maíz, tampoco se atienden las recomendaciones de INIFAP (2013) que sugiere la fórmula 300N-100P-100K; con base en fosfonitrato, ácido fosfórico y sulfato para su fertilización, la cual se puede alcanzar con 938 kg ha<sup>-1</sup> de fosfonitrato, 217 kg ha<sup>-1</sup> de fosfato monoamónico y 200 kg ha<sup>-1</sup> de sulfato de potasio, para el control de plagas y enfermedades como Gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) y Roya del maíz (*Puccinia sorghi*, *P. polyspora*, *Physopella zae*) se indican 0.75 Lha<sup>-1</sup> de lersban 480 EM y 0.5 L ha<sup>-1</sup> de malatión 1000E.

Por su parte, los agricultores aplicaron menores cantidades e insumos diferentes a los recomendados y aún así sus rendimientos se posicionaron un 14% por encima de la media estatal de acuerdo con SAGARPA (2014) al obtener 6,000 kg ha<sup>-1</sup>. Esta situación pudo ser consecuencia de factores como el uso de las variedades mejoradas (NM1078 para maíz blanco y Advance 2033 para maíz amarillo), las cuales requieren de un paquete tecnológico específico, el suministro de nutrientes orgánicos e inorgánicos y una adecuada lámina de riego. Estos datos difieren con los obtenidos por Ríos *et al.*, (2010) en la región de la Laguna, México, ya que sus rendimientos fueron menores, lo cual pudo ser efecto del rechazo al uso de variedades mejoradas ya también se realizan varias labores mecanizadas para la preparación de terreno, y suministro de nutrientes con fertirrigación.

Respecto a la producción de chile se pudo apreciar que al igual que los cultivos anteriores el paquete tecnológico usado tampoco cumplió con los señalamientos de INIFAP (2006) pues, se recomienda 180N-90P-00K. Esta fórmula se puede adecuar con 54 Kg ha<sup>-1</sup> de fosfonitrato y 11 Kg ha<sup>-1</sup> de ácido fosfórico, así como 1 L ha<sup>-1</sup> de agroquímicos para el control de plagas y enfermedades. En consecuencia, la excesiva cantidad de agroquímicos empleados durante el ciclo productivo (Tabla 4.) superó en 600% la recomendación para fósforo y los rendimientos superaron en un 50% al promedio estatal, de acuerdo con SAGARPA (2014).

Los resultados encontrados en la producción de chile pueden atribuirse a diversos factores como dosis altas de fertilización, aplicación de orgánicos, estrategias de conservación del suelo como control de erosión y salinidad, adecuado abastecimiento de agua para el cultivo, y el uso de semilla criolla seleccionada por cada productor. Cabe resaltar que el uso de variedades mejoradas es mínimo por que los cultivares criollos producen frutos de mejor calidad para el mercado nacional, que demanda textura más carnosa, sabor picante y color rojo intenso. Esta información concuerda con la registrada por Reyes

et al., (2006) en la misma región donde se observó que los niveles de tecnología aplicados mostraron una influencia directa sobre el volumen de producción.

Para los tres cultivos descritos, los productores no atienden las recomendaciones de INIFAP debido a una marcada lealtad en la asesoría técnica de las casas comerciales de agroquímicos ya que tienen una amplia experiencia en la venta de insumos en la región y conocen a profundidad las necesidades de sus clientes; sin embargo, los técnicos recomiendan una gran cantidad de insumos, aunque excedan los requerimientos de nutrientes del cultivo.

Aun así, los agricultores de la región han conseguido altos rendimientos como resultado de un elevado consumo de fertilizantes y agroquímicos, tal como lo establece Imas (1999), ésta situación en conjunto con las estrategias de conservación del suelo que se han identificado anteriormente.

**Tabla 4. Desglose de los Insumos empleados en la producción de una hectárea de frijol, maíz y chile.**

	<i>Fertilizantes</i>	<i>Herbicidas</i>	<i>Plaguicidas</i>	<i>Total (\$)</i>
<b>Frijol</b>	300 Kg/ha DAP (18-46-08)	2 Lha <sup>-1</sup> Flex	2 L/ha <sup>-1</sup> Tamaron	
	100 Kg/ha Fosfonitrato (33-00-00)		20 Kg/ha Carbofurán	
	50 Kg/ha MAP Técnico (11-52-00)			
	50 Kg/ha Cloruro de Potasio soluble (00-00-62)			<b>7,115</b>
<b>Maíz</b>	500 Kg/ha De base (10-20-10)	2 L/ha <sup>-1</sup> Esterón (Aminas)	2 L/ha Lorsban	
	300 Kg/ha Urea (46-00-00)		20 Kg/ha <sup>-1</sup> Carbofurán	
	150 Kg/ha Cloruro de Potasio soluble (00-00-62)			<b>9,923.50</b>
<b>Chile</b>	100 Kg/ha Map Técnico (11-52-00)		2 L/ha <sup>-1</sup> Tamaron	
	100 Kg/ha Ultrasol NKS (12-00-46)		20 Kg/ha Carbofurán	
	300 Kg/ha Fosfonitrato (33-00-00)			
	500 Kg/ha Mineralgold (15-20-15)			<b>9,735</b>

No obstante, de acuerdo con Caamal, Casas, & Urbano ( 2014 ) el exceso de fertilización puede originar contaminación por nitrógeno y fósforo en la ecosfera, además, cuando el abonado nitrogenado y/o fosforado excede las necesidades del cultivo y la capacidad de nitrificación del suelo, el nitrógeno y fósforo sobrantes normalmente en las formas de nitratos y fosfatos pueden incurrir en los procesos de

salinización, contaminar acuíferos, cuerpos de agua superficiales y cursos fluviales debido a los procesos de infiltración, lixiviación y percolación.

Respecto a las labores de preparación de terreno, siembra, cuidados culturales y de cosecha, la Tabla 5 muestra que todas las actividades se efectúan de manera mecánica y consumen la misma cantidad de combustible para los tres cultivos, lo cual difiere de los resultados generados por Aguilar & Esparza (2010) y Ayala *et al.*, (2013) ya que ellos reportaron más del doble de las cantidades que se utilizan en el municipio.

El uso de cantidades más limitadas de combustible en la región se debe a que los productores entrevistados efectúan solo un pase de rastreo y no realizan subsoleo para la preparación del terreno. Los agricultores manifestaron que el suelo en la mayoría de sus parcelas presenta una buena estructura por las prácticas de conservación del suelo que realizan como la aplicación de materia orgánica, incorporación de arvenses y control de erosión, lo que les permite realizar menos labores de preparación del suelo, ya que INIFAP (2003) asevera que las condiciones del terreno y el tipo de cultivo definen en gran medida las tecnologías a utilizar.

**Tabla 5. Cantidad de combustible para las actividades mecánicas en la producción de una hectárea de frijol, maíz y chile.**

<i>Concepto</i>	<i>Lha<sup>-1</sup></i>
<b><i>Preparación del terreno</i></b>	
<i>Rotura</i>	25
<i>Mullido</i>	8
<i>Alisado</i>	10
<i>Cruce</i>	25
<i>Mullido</i>	8
<i>Surcado/acamado</i>	9
<b><i>Cuidados culturales y de cosecha</i></b>	
<i>Aplicación de fertilizantes</i>	10
<i>Aplicación de herbicidas</i>	3
<i>Aplicación de plaguicidas</i>	3
<i>Deshierbas mecánicas</i>	12
<b><i>Total</i></b>	<b>113</b>

Con relación a la mano de obra utilizada (Tabla 6), los resultados obtenidos para el municipio de Morelos, difieren de los que reportan Guzmán *et al.*, (2014) en la región Bajío de Guanajuato, Ugalde *et al.*, (2011) en el estado de Veracruz y Aguilar & Esparza (2010) en la región central del estado de Zacatecas, ya que en Morelos se demanda menos de la mitad de los jornales registrados para la investigaciones señaladas, debido a que los productores entrevistados indicaron que la mayor parte de la

mano de obra es familiar y sólo se contrata personal para los deshierbes manuales. Casi todas las labores mecanizadas las efectúa una sola persona la cual realiza varias tareas a su vez como la preparación del terreno y aplicación de fertilizante y siembra, con esto se ahorran costos de producción y se busca hacer más eficiente el proceso.

Particularmente la producción de chile requiere más jornales en comparación con los cultivos de frijol y maíz debido a que hay necesidad de mano de obra para la colocación de almácigos, trasplante, corte, recolección de la cosecha y deshierbes manuales. No obstante, se ha identificado que en el municipio de Morelos la cantidad de mano de obra empleada es mucho menor a la reportada por Reyes *et al.*, (2006) e INIFAP (2006) para la misma región, principalmente porque existe una evidente escasez de jornales, sobre todo al momento de la recolección de la cosecha ya que éstos prefieren prestar sus servicios a productores que cultivaron más de 20 hectáreas para garantizar su ocupación por el mayor tiempo posible.

**Tabla 6. Cantidad de jornales por hectárea requeridos para las labores demandadas en la producción de frijol, maíz y chile.**

<i>Concepto</i>	<i>ha<sup>-1</sup></i>		
	<i>Frijol</i>	<i>Maíz</i>	<i>Chile</i>
<i>Preparación del terreno</i>	1	1	1
<i>Colocación de almácigos</i>	-	-	7
<i>Siembra</i>	1	1	
<i>Trasplante</i>	-	-	10
<i>Corte y/o recolección</i>	7	1	25
<i>Deshierbas manuales</i>	5	5	10
<i>Aplicación de fertilizantes</i>	1	1	1
<i>Aplicación de herbicidas</i>	1	1	
<i>Aplicación de plaguicidas</i>	1	1	1
<i>Deshierbas mecánicas</i>	1	1	
<b><i>Total</i></b>	<b>18</b>	<b>11</b>	<b>55</b>

Además, la mayoría de los jornales que se contratan en el municipio de Morelos, provienen de comunidades de municipios aledaños como Pánuco, Calera de Victor Rosales y Villa de Cos, los cuales forman cuadrillas para incrementar sus ingresos por el cobro del transporte. Ante esta problemática los productores de los tres cultivos tratan de recurrir a mano de obra familiar y complementariamente contratan poco personal en cada ciclo, para que realicen paulatinamente las actividades para el levantamiento de la cosecha aunque demore la venta de su producción y su precio alcance niveles más

bajos respecto a las primeras cosechas comercializadas en la región como lo han manifestado los productores.

En cuanto al consumo de agua registrado para los cultivos de frijol y el maíz solicitaron en promedio un riego a la siembra y cuatro o cinco riegos de auxilio durante su ciclo de producción, cada riego mostró una duración alrededor de ocho horas lo que equivale a  $3,168 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$  y  $3,802 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$  respectivamente, mismos que se reflejaron en los costos por el consumo energético ya que los agricultores poseen subsidio en las tarifas energéticas.

Esta información contrasta con la generada por CONAGUA (2009) ya que el consumo de agua que se reporta para frijol y maíz en DDR 189 supera en promedio los  $4,900 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ , por lo que se infiere que los productores del municipio para ambos cultivos registraron un menor abastecimiento de agua que puede atribuirse al uso de semilla mejorada, ya que uno de sus objetivos es aprovechar una lámina de riego más baja para generar mayores rendimientos además, el ciclo de cultivo de las variedades mejoradas se acorta y por lo tanto se requiere una menor cantidad de agua para su abastecimiento.

Así mismo, todos los productores entrevistados cuentan con el sistema de riego por goteo, el cual según Burt, O'Connor & Ruehr (1998) hace más eficiente el uso del agua, ya que permite controlar las condiciones de humedad del suelo y proteger a las plantas del estrés causado por la deshidratación o el exceso de agua.

Para la producción de chile en el municipio, se requiere aproximadamente un consumo de agua de  $9,504 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$  distribuidos en quince riegos de ocho horas cada uno durante el ciclo sin embargo, esta información varía con la reportada por Ávila *et al.*, (2012) para el mismo cultivo en el estado de Zacatecas ya que reportaron en promedio una lámina de riego de  $5,870 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ . Se asume que en parte el elevado consumo de agua en la zona de estudio se debe a que es el cultivo al que se aplica la mayor cantidad de agroquímicos por medio de fertirrigación, según SAGARPA (2013). No obstante, el número de riegos que se aplican en el municipio están destinados a satisfacer los elevados requerimientos nutricionales y no los hídricos del cultivo. Por lo tanto, el consumo de agua es mayor aunque el sistema de riego sea por goteo. Otro factor que influye en la lámina de riego porque la mayoría de los agricultores usan semilla criolla en lugar de variedades híbridas como Guajillo Marseed que tienen un menor requerimiento hídrico.

En relación a los costos indirectos, el mantenimiento de las instalaciones fue el más elevado para los tres cultivos puesto que el sistema de irrigación que predomina en el municipio es por goteo y requiere que en cada ciclo se reemplace la cintilla, manguera lay flat y los conectores más deteriorados.

### 3.4.5 Rentabilidad

El análisis de rentabilidad del cultivo de frijol reveló que B/C fue de 1.73, lo que indica que por cada peso que los agricultores invirtieron generaron 73 centavos de ganancia lo que equivale al 73% de rentabilidad al recuperar la inversión y generar ingresos. Esta información concuerda con la establecida por Ugalde *et al.*, (2011) en el estado de Veracruz quienes también aplicaron altas dosis de nutrientes por medio de fertirrigación, causando un incremento en sus costos de producción, no obstante los rendimientos que se generaron sirvieron para cubrir la inversión y generar ganancias.

Para maíz se estimó que B/C fue de 1.38, por lo tanto el porcentaje de rentabilidad alcanzó un 38% y también se considera como un cultivo rentable. Esta información contrasta con la reportada por Ayala *et al.*, (2013) en el estado de Veracruz y Guzmán *et al.*, (2014) en el estado de Guanajuato ya que en sus estudios reportaron que la inversión no es recuperada por los productores, debido a rendimientos muy bajos en comparación con los del municipio de Morelos, lo que puede atribuirse al suministro inadecuado de fertilizantes y uso de semilla criolla.

El análisis de rentabilidad para el cultivo de chile reveló una relación B/C de 4.38 por lo tanto, se obtuvo un porcentaje de rentabilidad del 380%. De esta forma se considera como el cultivo más rentable de los tres al recuperar su inversión y reportar casi el cuádruple de ganancias respecto a su inversión. Esta información difiere de la encontrada por Reyes *et al.*, (2006) en la región central del estado de Zacatecas, quienes registraron una menor relación B/C en comparación con el municipio de Morelos, pues sus productores manifestaron que para el año de 2013 se alcanzó un precio de venta por kg de chile superior a años anteriores debido a que se presentaron intensas lluvias que terminaron con la mayoría de la producción de chile en el estado de Zacatecas y los que sí pudieron levantar su cosecha la vendieron casi al triple de lo que generalmente se comercializa.

### 3.4.6 Depreciación

Se identificó que los bienes tanto móviles como inmóviles tienen un ciclo de vida útil aproximada de 15 años, para el caso el municipio de Morelos su depreciación alcanzó los \$ 14,644 año<sup>-1</sup>, se debe tomar en consideración que los tres cultivos utilizan los mismos bienes y por consiguiente a los ingresos totales por productor se le debe disminuir esta cantidad para identificar sus ingresos exactos contando las pérdidas que genera la depreciación de sus bienes.

### **3.4.7 Análisis socioeconómico**

Socioeconómicamente el sistema de producción de cosechas del municipio de Morelos influye significativamente en la calidad de vida de sus habitantes ya que se ha alcanzado un índice de desarrollo humano alto posicionándolo en el tercer lugar estatal y en el 199 nacional de igual forma, se cuenta con un índice de marginación muy bajo situándolo en el antepenúltimo lugar estatal (INEGI, 2010) por lo que se puede inferir que los productores conocen muy bien todos los factores internos y externos de su dinámica agrícola ya que las estrategias que se están realizando continuamente han permitido generar ingresos para recuperar su inversión y alcanzar márgenes de utilidad.

Con relación a los canales de comercialización, el 100% de los agricultores manifestaron su inconformidad por la venta de su cosecha a intermediarios, no obstante sólo el 20% ha tratado de posicionarla directamente en los principales mercados mayoristas del país sin conseguir resultados favorables ya que manifestaron que existe una fuerte organización en estos lugares para evitar a toda costa la reducción de los eslabones de la cadena de distribución, por lo que nadie adquiere la mercancía si no proviene de un intermediario. Ante esta situación a los productores le es más rentable la venta a intermediarios ya que se evita el costo por el flete para llevar la mercancía y regresarla por la nula aceptación para adquirirla de esta manera. Los agricultores deben organizarse y evitar anteponer sus intereses personales para formar amplias asociaciones para acabar con esta colusión y e incrementar sus ingresos.

### **3.5 Conclusiones**

El sistema de producción de cosechas del municipio de Morelos, Zacatecas es rentable, por los altos rendimientos que se alcanzan. Los productores se han adecuado al contexto y han generado estrategias diseñadas para incrementar la productividad de la superficie cultivada, tratando de integrar estrategias de conservación del suelo para evitar su deterioro.

Se recomienda integrar una organización social para gestionar apoyos gubernamentales, regular los precios de manera local, disminuir la venta a intermediarios e integrar economías a escala, pues la venta a intermediarios provoca una reducción en los ingresos de los productores.

### **3.6 Literatura citada**

Aguirre, J. R. (1979) Metodología para el registro de conocimiento empírico de los campesinos en relación con el uso de recursos naturales renovables. Documento de Trabajo 03. CREZAS-CP. Salinas de Hidalgo, S.L.P. 05 p.

- Aguilar, R. & Esperza, G. (2010) Situación y perspectivas de la producción de chile seco en Zacatecas. *Revista de Geografía Agrícola*, 45, 19-38.
- Ayala, A., Schwentesius, R., De la O, P., Almaguer, G., & Rivas, P. (2013) Análisis de rentabilidad de la producción de maíz en la región de Tulancingo, Hidalgo, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 10(4), 381-395.
- Ávila, J., Dávila, F., Moriasi, D., Gowda, P., Bautista, C., Echavarría, F., Garbrecht, J., Steiner, J., Howell, T., Kanemasu, E., Verser, A., Wagner K., & Hernandez, J. (2012) Calibration of SWAT2009 Using Crop Biomass, Evapotranspiration, and Deep Recharge: Calera Watershed in Zacatecas, Mexico Case Study. *Journal of Water Resource and Protection*, 4, 439-450.
- Baltazar, B., Maciel, L., Macías, L., Cortés, M., Domínguez, R., & Escobedo, F. (2011) Caracterización de productores de tres municipios de Aguascalientes. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1, 31-40.
- Berlijn, J. (2002) Administración de empresas agropecuarias (séptima impresión, 2010). México: Ed Trillas.
- Bierman, Y. & Smidt., S. (1993) The capital budgeting decision. Economic analysis of investment projects. Macmillan, New York.
- Burt, C., O'Connor, K., & Ruehr., T. (1998) Fertigation. The irrigation training and research center. California Polytechnic State University. San Luis Obispo, CA, USA. 295 p.
- Caamal, Z.; Casas, R.; y Urbano, B. (2014) Optimización económica y ambiental de la fertilización en explotaciones de una región europea. *Revista Chapingo. serie horticultura*, 20(1), 117-129.
- CONAGUA (2009) Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea; acuífero (3225) Calera, estado de Zacatecas. Comisión Nacional del Agua [En línea] disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/disponibilidad.aspx?n1=3&n2=62&n3=112> [Accesado 01 de abril de 2015].
- Cotler, H., & Fregoso., J. (2006) Análisis de los sistemas de producción en la cuenca Lerma-Chapala. Dirección de Manejo Integral de Cuencas Hídricas. Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas. Instituto Nacional de Ecología, 28 p.
- De los Santos, M., Romero, T., Bobadilla, E. (2017) Dinámica de la producción de maíz y frijol en México de 1980 a 2014. *Agronomía Mesoamericana*. 28(2), 439-453.

- Damián, M., Cruz, A., Ramírez, B., Romero, O., Moreno, S., & Reyes, L. (2013) Maíz, alimentación y productividad: modelo tecnológico para productores de temporal de México Agricultura. *Sociedad y Desarrollo*. 10(2), 157-176.
- FAO (2008) Manual de agricultura de conservación. American Food Organization, 2008, 53 p.
- Galindo, G., Tabares, W., & Gómez, G. (2000) Caracterización de productores agrícolas de seis distritos de desarrollo rural de Zacatecas. *Terra*, 18 (1), 83-92.
- Guzmán, S., De la Garza, M., González, J., & Hernández, J., (2014) Análisis de los costos de producción de maíz en la región bajío de Guanajuato. *Análisis Económico*, 29 (70), 145-156.
- Imas, P. (1999) Manejo de nutrientes por fertirriego en sistemas frutihortícolas. In XXII Congreso Argentino de Horticultura (en línea). Internacional Potash Institute IPI. Tucumán, Argentina. Consultado 9 set. 2004. Disponible en <http://www.ipipotash.org/presentn/mdnfpfesf.html>
- INEGI (2007) CENSO Agropecuario. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México 2007. Recuperado el 22 de enero de 2015 de <http://www.inegi.org.mx/sistemas/TabuladosBasicos/Default.aspx?c=17177&s=est>
- INEGI (2005) Prontuario de Información Geográfica Municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Morelos, Zacatecas, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 201. Recuperado el 23 de enero de 2015 de <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/32/32032.pdf>
- INEGI (2010) Síntesis Estadística Municipal. Morelos, Zacatecas 2010, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. Recuperado el 23 de enero de 2015 de <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/sem11/default.htm>
- INEGI (2011a) México en Cifras. Información Nacional por Entidad Federativa y Municipios. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México, 2011. Recuperado el 21 de enero de 2015 de <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx>
- INEGI (2011b) Carta de uso de suelo y vegetación, escala 1:250,000 serie V, en formato shp 2011. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. Recuperado el 25 de noviembre de 2013 de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/ususuelo/Default.aspx>
- INEGI (2012) Anuario estadístico de los Estados Unidos Mexicanos. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. Recuperado el 25 de noviembre de 2013 de <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/productos/default.aspx?c=265&s=inegi&upc=702825046385&pf=Prod&ef=&f=2&cl=0&tg=8&pg=0>

- INIFAP (2003) La preparación del suelo para la siembra. Resultados de Investigación 1975-2002. Folleto técnico No. 12. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Zacatecas. 2003, 24 p.
- INIFAP (2006) Tecnología de producción de chile seco. Libro técnico No. 05. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 2007. 232 p. Recuperado el 23 de enero de 2015 de [http://www.zacatecas.inifap.gob.mx/publicaciones/Tecnologia de produccion de chile seco.pdf](http://www.zacatecas.inifap.gob.mx/publicaciones/Tecnologia%20de%20produccion%20de%20chile%20seco.pdf)
- INIFAP (2008) Tecnología para la producción de frijol en el norte y centro de México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Libro Técnico No.04, 2008. 216 p.
- INIFAP (2013) Paquete tecnológico para maíz de riego (fertirriego) altiplano potosino, ciclo agrícola primavera verano, 2013. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Recuperado el 03 de febrero de 2015 de <http://www.inifapcirne.gob.mx/Biblioteca/Paquetes2012/98.pdf>
- INIFAP (2012) Paquete tecnológico para frijol de riego. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Recuperado el 03 de febrero de 2015 de <http://sites.securemgr.com/folder11341/index.cfm?id=1093359&fuseaction=browse&pageid=50>
- Iturriaga, J. (2006) Cocina mexicana y cultura. Raíces gastronómicas comunes del norte de México y sur de los Estados Unidos. *Patrimonio Cultural y Turismo*, 15, 228-237.
- Jiménez, J. & J., Acosta (2013) Efecto de la densidad de cosecha en rendimiento de frijol Pinto Saltillo de riego en Chihuahua, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4(2), 243-257.
- Ley de Ingresos Municipales (2013) Diario Oficial de la Federación. Decreto # 53 ley de ingresos 2013, Morelos, Zacatecas. Recuperado el 03 de julio de 2014 de <http://transparenciamoreloszacatecas.org/wp-content/uploads/2014/11/LEY-DE-INGRESOS-2014-ART.11-FRACC.-XVXVI-ART.15-FRACC.-IV.pdf>
- Oxenfeldt, A. (1985) Análisis de costo-beneficio para la toma de decisiones. Bogotá: Norma.
- Perdomo, A. (2001) Métodos y modelos básicos de planeación financiera. México: PEMA.
- Pineda, L., Echavarría, F., Bustamante, J., & Badillo, L. (2013) Análisis de la producción agrícola del DDR 189 de la región semiárida en Zacatecas, México, 2013. *Agrociencia*, 47, 181-193.

- Reyes, E., Salinas, H., Bravo, A., & Padilla, L. (2001) Tecnología de producción de chile seco en el estado de Zacatecas, México. *Terra*, 19 (19), 83-88.
- Reyes, E., Bravo, A., Salinas, H., & Padilla, E. (2006) Rentabilidad del chile seco en Zacatecas, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29 (2), 137-144.
- Ríos, J., Torre, M., Cantú, J., Caamal, I., Jerónimo, F., Cruz, A. (2010) Producción, productividad y rentabilidad de maíz grano (*Zea mays*) bajo riego por bombeo en la Laguna, México de 1990 a 2006. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 9(1), 21-27.
- Ruiz, J., Medina, G., González, I., & Ortiz, C. (2001) Requerimientos agroecológicos de cultivos. INIFAP-SAGAR. Libro Técnico Núm. 3. Guadalajara, Jalisco, México. 324 p.
- SAGARPA (2016) Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Tecnificación. Uso de tecnología y servicios en el campo. Archivo de matrices tabulares con la estadística de uso tecnología y de servicios en el campo. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Recuperado el 10 de abril de 2015 de <http://www.siap.gob.mx/tecnificacion/>
- SAGARPA (2017) Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP); Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Recuperado el 31 de marzo de 2017 de [http://infosiap.siap.gob.mx/agricola\\_siap\\_gb/icultivo/index.jsp](http://infosiap.siap.gob.mx/agricola_siap_gb/icultivo/index.jsp)
- Sapag, N. (2007) Proyectos de inversión: Formulación y evaluación. México: Prentice Hall.
- SNIIM (2017) Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados. Secretaría de Economía. Recuperado el 27 de enero de 2017 de <http://www.economia-sniim.gob.mx/nuevo/>
- Sweeney, D., & T. Williams, (2008) Estadística para Administración y Economía (décima edición), M. Hano (trad). CENGAGE Learning. México, D. F., 2008, 1,091 p.
- Torres, E., Quisphe, D., Sánchez, A., Reyes, M., González, B., & Torres, A. (2013) Caracterización de la producción de frijol en la provincia de Cotopaxi Ecuador: Caso Comuna Panyatug. *Ciencia y Tecnología*, 6 (1), 23-31.
- Tucuch, F., Ku Naal, R., Estrada, J., & Palacios, A. (2007) Caracterización de la producción de maíz en la zona centro-norte del estado de Campeche, México. *Agronomía Mesoamericana*, 18 (2), 263-270.
- Ugalde, F., Tosquy, O., López, E., & Francisco, N. (2011) Productividad y rentabilidad del cultivo de frijol con fertirriego en Veracruz, México. *Agronomía Mesoamericana*, 22 (1), 29-36.
- Varela, R. (1989) Evaluación económica de inversiones. Norma, Bogota.

Vázquez, P. & Vignolles, M. (2015) Establecimiento agroproductivo ecológico vs agricultura convencional, partido de Tandil, provincia de Buenos Aires. *Sociedad & Naturaleza*, 27 (2), 267-280.

## 4. CALIDAD DEL AGUA PARA RIEGO AGRÍCOLA EN LA REGIÓN DEL ACUÍFERO CALERA

### 4.1 Resumen

En la región que comprende el acuífero Calera, Zacatecas, la producción intensiva del cultivo de chile (*Capsicum sp*) es de suma importancia económica y depende totalmente del agua subterránea para su realización. Por lo anterior, es muy importante analizar la calidad del agua de los pozos de riego y al mismo tiempo evaluar si el sistema de producción de chile incide en la calidad del agua del acuífero. De esta forma el objetivo de este trabajo fue evaluar la calidad química del agua de los pozos de riego y determinar su aptitud para uso agrícola mediante criterios de salinidad, sodicidad y toxicidad. Durante dos ciclos consecutivos se realizó un muestreo según la norma NOM-014-SSA1-1993 a los pozos que frecuentemente se usan para irrigación de chile y se tipificaron cinco estratos cuya profundidad va de 50 a 280 m sobre el nivel estático. Se obtuvo la clasificación de calidad en un diagrama de Richards y su hidrogeoquímica mediante un diagrama de Piper. Se realizó un análisis estadístico con el programa Statistical Analysis System para identificar los parámetros que inciden considerablemente en la calidad del agua. Los resultados evidenciaron que el cultivo de chile no ha impactado la calidad del agua de acuífero y que la profundidad de los pozos no influye en ésta, más bien depende de la región en donde se ubica cada pozo, procesos de recarga, geología de la región, velocidad de las corrientes subterráneas y la infiltración por la acción de fallas y fracturas geológicas.

**Palabras clave:** Acuífero Calera, calidad de agua, producción de chile.

### 4.2 Introducción

El agua subterránea constituye una de las fuentes de agua dulce más importantes de abastecimiento para el hombre así mismo, su uso se ha incrementado significativamente como consecuencia del desarrollo y el crecimiento de la población alrededor del planeta que demanda cada vez más alimentos del sector productivo agrícola el cual consume cerca del 70 % del requerimiento mundial de agua dulce para el riego de cultivos. En México, más de la mitad del agua subterránea que se destina para uso agrícola proviene de acuíferos sobreexplotados, ésta puede originar problemas de salinización en los suelos y la presencia de aguas subterráneas salobres. La mayor parte de los acuíferos sobreexplotados o con intrusión salina están ubicados en el norte y centro de nuestro país (Vivot *et al.*, 2010; Diaz *et al.*, 2013).

En las zonas semiáridas de México, la agricultura de riego intensiva se caracteriza por una alta inversión de recursos para poder mantener un aceptable margen de producción, competitividad y calidad de los productos generados, por lo que es absolutamente necesario el uso de fertilizantes y agroquímicos para mantener altos rendimientos en los cultivos. Sin embargo, de todas las actividades humanas que tienen influencia en la calidad del agua, la actividad agrícola es la más importante debido a que puede alterar las propiedades químicas del agua por el uso de fertilizantes y plaguicidas, ya que estos dependiendo del tiempo de tránsito a través de la zona no saturada y de la capacidad de los suelos para retardar el movimiento de los agroquímicos, pueden percolar a los mantos acuíferos ocasionando un aumento en la cantidad de sólidos totales, y sales de nitratos, sulfatos, cloruros y sodio (Bermejillo *et al.*, 2012; Torres *et al.*, 2014 y Bedmar, 2015).

Entre las sales más frecuentes en las aguas de riego los carbonatos y bicarbonatos de calcio y magnesio así como sulfato de calcio son las menos solubles por lo tanto, el aumento de la concentración de sales en la solución del suelo como resultado de la evapotranspiración es menor que con las sales altamente solubles pues las que presentan una menor solubilidad son las primeras en alcanzar su límite de disolución. En caso de que la percolación sea poca, la posibilidad de acumulación de sales en el fondo del perfil se incrementa, y si abundan las sales de sodio por su amplia solubilidad las posibilidades de su concentración en la solución del suelo con respecto a las de calcio y magnesio se elevan y con ello los riesgos de sodificación, de esta forma los problemas de salinidad o de acumulación de sodio en exceso ocasionan pérdidas en la producción agrícola, así como un deterioro acelerado en la calidad de los suelos (Villafañe, 2011; Silva *et al.*, 2006).

El desarrollo de una agricultura con una alta tecnología en áreas caracterizadas por climas áridos y semiáridos depende de la disponibilidad de agua para riego, que sea suficiente en términos de cantidad y aceptable en términos de calidad por lo tanto, un sistema intensivo de explotación agrícola tiene que asumir características sostenibles, y para lograrlo en primera instancia se debe medir la disponibilidad del agua desde el punto de vista económico, político y ecológico para hacer eficiente el uso de los recursos subterráneos teniendo en cuenta la conservación y preservación de las fuentes de agua dulce (Castellanos *et al.*, 2002; Bermejillo *et al.*, 2012).

Posteriormente se debe evaluar la calidad química del agua ya que ésta se integra por la concentración de sales y la proporción de diferentes iones en solución que podrían afectar a los recursos suelo y cultivo en su uso a largo plazo. Su conocimiento permite determinar si se puede recomendar para uso agrícola ya que agua juega un papel importante en el manejo de la fracción de riego y

lixiviación, así como en el tratamiento del agua en sí, a fin de lograr un nivel óptimo de producción en situaciones donde se utilizan sistemas de riego (Tartabull y Betancourt, 2016; Castellanos *et al.*, 2002).

Para estimar la aptitud del agua para riego agrícola se debe contemplar su salinidad debido a que ésta se considera como un factor importante que afecta el rendimiento de los cultivos pues dificulta la absorción del agua por parte de la planta. Otro aspecto importante que se debe tomar en cuenta es la sodicidad del agua, la cual se origina cuando se presentan elevadas concentraciones del catión sodio ya que éste puede desplazar al calcio o bien, favorecer la precipitación de bicarbonatos de calcio y magnesio provocando que las partículas de suelo tiendan a disgregarse una vez que el sodio precipite, ocasionando una reducción en la velocidad de infiltración del agua, que puede implicar poca disponibilidad de agua en el suelo (Vivot *et al.*, 2010; Tarabull y Betancourt, 2016; Balmaseda *et al.*, 2013).

De igual forma, se deben valorar algunos iones como cloro, fósforo y boro, ya que estos se pueden acumular en los cultivos en concentraciones suficientemente altas como para reducir el rendimiento de las cosechas y facilitar la obstrucción de algunos sistemas de riego. No obstante, el problema frecuente en el caso del riego agrícola, es que generalmente no se especifica con qué calidad química se debe utilizar el agua, sino que solamente se da importancia a la calidad agronómica determinada por el cultivo a regar, condiciones climatológicas, métodos de riego, condiciones de drenaje del suelo y prácticas de manejo de agua, suelo y plantas (Balmaseda *et al.*, 2013; Castellón *et al.*, 2015). Por lo tanto, el objetivo de este estudio se concentró en evaluar la calidad química del agua subterránea y determinar su aptitud para uso agrícola mediante los criterios de salinidad, sodicidad y toxicidad en la región con mayor intensificación productiva del cultivo de chile (*Capsicum ssp*) en el estado de Zacatecas, ubicada sobre el acuífero Calera.

## **4.3 Materiales y métodos**

### **4.3.1 Ubicación y caracterización del área de estudio**

El acuífero Calera pertenece a la Región Hidrológica No. 37 El Salado, cuenca Fresnillo-Yescas, subcuenca Fresnillo, se localiza en la porción oriental del estado de Zacatecas entre los 22°41' y 23° 24' de latitud norte y 102°33' y 103° 01' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 2,226 km<sup>2</sup> que equivale a 3% de la superficie estatal. Geopolíticamente, el área que cubre el acuífero, comprende la totalidad de los municipios General Enrique Estrada y Morelos, la mayor parte de Calera, Fresnillo y Zacatecas, así como porciones menores y pequeñas de Pánuco, Vetagrande, Jerez y Villa de

Cos (Hernández *et al.*, 2012). El acuífero es una cuenca cerrada y todas las vías fluviales son arroyos no perennes, por lo tanto no hay grandes reservorios y ríos en el área de estudio, con excepción de la laguna de Santa Ana (Nuñez *et al.*, 2004).

#### **4.3.1.1 Clima**

El clima en la región es semiárido y en los últimos 80 años ha presentado una precipitación que varía entre los 400 y 450 mm anuales, su temperatura asciende a los 16°C en promedio, ya que mayo y junio son los meses más cálidos del año mientras que enero es el mes más frío. Se ha registrado una evaporación de 2330.7 mm por año, lo que equivale a más de cinco veces la precipitación promedio de esta zona, de esta forma hay poca agua para la recarga subterránea ya que la disponibilidad de agua superficial es limitada, porque se evapora rápidamente debido al clima seco que predomina en la zona (INIFAP, 2010; Hernández *et al.*, 2012; CONAGUA, 2015).

#### **4.3.1.2 Geología y tipos de suelo**

La altitud del acuífero Calera varía entre los 600 y 2000 m, el cual presenta unidades de origen volcánico pertenecientes a la Sierra Madre Occidental, además se forma por basaltos, materiales aluviales y lacustres de arcilla, limo, arena, grava y conglomerados de arena y grava cementados con arcilla calcárea. La litología de las rocas corresponde a conglomerados polimícticos del período Cuaternario fusionados con las ígneas, calizas, dolomitas y rocas metamórficas fracturadas de los períodos triásico y cretácico por movimientos tectónicos (Ávila *et al.*, 2012; Hernández *et al.*, 2012). Entre los diferentes tipos de suelo que se han registrado en la región se encuentra el Regosol calcárico, Regosol eútrico, Xerosol cálcico, Xerosol lúvico y el que tiene un mayor predominio es el Catañozen lúvico ya que es producto del arrastre del material aluvial que conforma la región (INEGI, 2014).

#### **4.3.1.3 Marco hidrogeológico**

Se puede establecer la presencia de un acuífero de tipo libre, heterogéneo y anisótropo, que presenta condiciones locales de semiconfinamiento constituido en su porción superior por sedimentos aluviales y fluviales, de granulometría variada, conglomerados y depósitos lacustres cuyo espesor puede alcanzar hasta 500 m en el centro de los valles tectónicos (Navarro *et al.*, 2005). En la fracción inferior se encuentra una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Se pueden distinguir tres diferentes medios por donde circula el agua subterránea, los cuales son: medio poroso con permeabilidad primaria y secundaria e intergranular y de fracturas; medio fracturado con permeabilidad secundaria, y medio de doble porosidad con permeabilidad

combinada, intergranular y de fracturas (CONAGUA, 2015). Por otra parte, las corrientes subterráneas del acuífero fluyen de sur a norte y se tiene registrada una tasa de abatimiento promedio de 1.90 m por año (Ávila *et al.*, 2012).

#### 4.3.1.4 Actividad agrícola

El acuífero Calera es uno de los 101 acuíferos que se encuentran sobreexplotados a nivel nacional, ya que los niveles de extracción superan en un 50% su recarga. Cuenta con una concesión de 151 Mm<sup>3</sup> por año para su explotación, sin embargo el 82% de la extracción se destina para la actividad agrícola, principalmente para la irrigación de cultivos como frijol, maíz, avena, zanahoria, papa, ajo, tomate, cebolla y alfalfa, además en ésta región se concentra casi el 50% de la superficie del estado destinada para la producción de chile (*Capsicum Ssp.*) y únicamente este cultivo consume el 33% de la concesión de agua destinada para actividades agrícolas (CONAGUA, 2015; SAGARPA 2016).

#### 4.3.2 Muestreo de agua y métodos analíticos

Se realizó un muestreo estratificado con asignación proporcional según las directrices de Sukhatme y Sukhatme (1970). Así mismo, se definió una población de 592 pozos agrícolas activos y que frecuentemente se destinan para la irrigación de chile por lo que se diseñaron cinco estratos con una profundidad que va de los 50 a los 280 m sobre el nivel estático. (E1= Estrato1 de 50 a 80 m; E2 = Estrato 2 de 81 a 110 m; E3 = Estrato 3 de 111 a 140 m; E4 = Estrato 4 de 141 a 170 m; E5 = Estrato 5 de 171 a  $\geq$  210 m). En cuanto a la localización de los pozos con estas características se consultó la base de datos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) y la base de datos del Programa de Apoyos Directos al Campo (PROCAMPO) de los años 2016 y 2017, de esta forma se seleccionaron 15 pozos profundos y someros, que se ubicaron con un GPS (Tabla 7.)

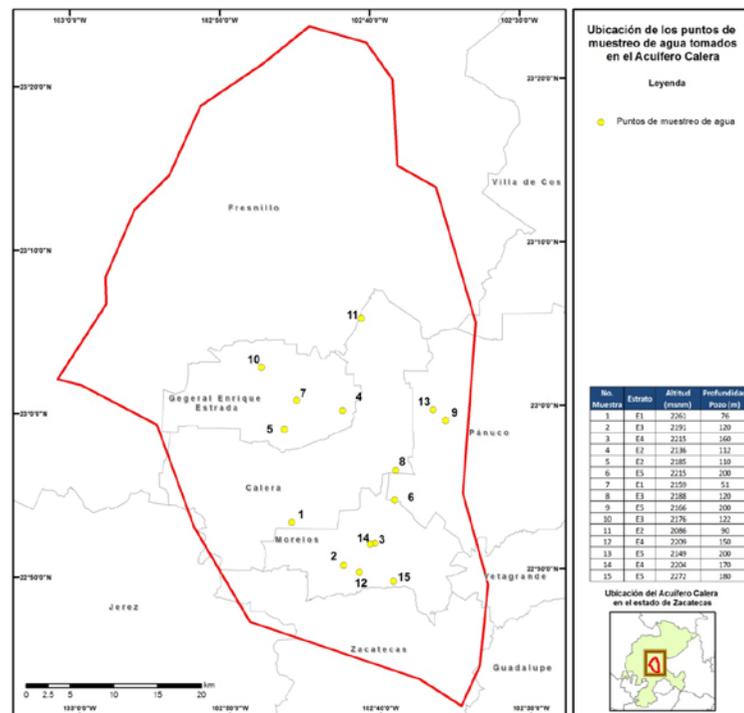
**Tabla 7. Localización de los pozos de muestreo en la región que comprende el acuífero, Calera.**

No.	Propietario	Localización		Estrato	Altitud (m)	Profundidad del pozo (m)
		N	W			
1	Álvaro Castañón González	22°53.117'	102°45.697'	E1	2261	76
2	Sergio Vázquez Luján	22°50.430'	102°42.298'	E3	2191	120
3	Gustavo Carrillo Acuña	22°51.741'	102°40.199'	E4	2215	160
4	Octavio Menchaca Trejo	22°59.900'	102°42.215'	E2	2136	112
5	Pascual Bañuelos Carrillo	22°58.792'	102°46.101'	E2	2185	110
6	Manuel Campos	22°54.382'	102°38.833'	E5	2215	200
7	José Manuel Martínez Valadez	23°00.564'	102°45.266'	E1	2159	51
8	Juan Bautista Ruíz Hernández	22°56.197'	102°38.737'	E3	2188	120
9	Mario Mauricio	22°59.199'	102°35.374'	E5	2166	200

10	Enrique Reyes	23°02.616'	102°47.585'	E3	2176	122
11	Hilario Loera Trejo	23°05.514'	102°40.877'	E2	2086	90
12	Rafael Trejo Hernández	22°49.981'	102°41.261'	E4	2209	150
13	José Trinidad Sandoval	22°59.850'	102°36.185'	E5	2149	200
14	Javier Carrillo Acuña	22°51.695'	102°40.523'	E4	2204	170
15	Raudel Menchaca Trejo	22°49.418'	102°39.011'	E5	2272	180
*16	Blanco 1	22°57.809'	102°36.568'	E5	2179	300
*17	Blanco 2	22°51.833'	102°39.426'	E5	2216	250

\* Blanco.

Para el segundo muestreo se seleccionaron dos blancos, los cuales corresponden a pozos que son utilizados para uso y consumo humano, el blanco 1 abastece a la localidad de Pozo de Gamboa, Pánuco, Zacatecas así mismo el blanco 2., da suministro al municipio de Morelos, Zacatecas, en la Figura 7, se muestra la ubicación de cada pozo incluyendo los blancos distribuidos en la región que abarca el acuífero Calera. En cuanto a la toma de muestras de agua se realizó con base en la norma NOM-014-SSA1-1993 al final de los ciclos de producción de chile de 2016-2017 y 2017- 2018. Se recolectaron dos muestras con recipientes de polietileno de 250 mL en cada pozo y posteriormente se analizó cada muestra por triplicado.



**Figura 7. Ubicación de los pozos muestreados en el acuífero Calera.**

Para identificar la calidad del agua del acuífero se midió el pH, se determinaron las concentraciones en meq L<sup>-1</sup> de los cationes Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup> y de los aniones CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, así como la conductividad eléctrica (CE) en μS cm<sup>-1</sup>, boro (B) y fósforo (P) en mg L<sup>-1</sup> (Tabla 8.), posteriormente con base en estos parámetros se estimaron los indicadores correspondientes para evaluar los criterios de salinidad, sodicidad y toxicidad propuestos por Ayers y Westcot (1987) y se estableció la clasificación hidrogeoquímica del agua de riego.

**Tabla 8. Marchas analíticas utilizadas para la determinación de los parámetros en el agua subterránea del acuífero Calera.**

Determinación	Método	Referencias
pH	Potenciométrico	NMX-AA-008-SCFI-2011
Conductividad eléctrica	Conductimetría	NMX-AA-093-SCFI-2000
Calcio y magnesio	Volumetría	Richards, 1990
Sodio y potasio	Flamometría	NOM-021-SEMARNAT-2000
Carbonatos y bicarbonatos	Volumetría	NOM-021-SEMARNAT-2000
Cloruros	Volumetría	Richards, 1990
Sulfatos	Turbidimetría	NOM-021-SEMARNAT-2000
Boro	Colorimetría	NOM-021-SEMARNAT-2000
Fósforo	Colorimetría	Rodier, 1990
Nitrato	Turbidimetría	Robarge <i>et al.</i> 1983

### 4.3.3 Condición de electroneutralidad

De acuerdo con Peña *et al.* (2012) Las soluciones de las muestras que se analizan deben cumplir con el principio de electroneutralidad, es decir, la suma de las cargas de todos los cationes debe ser igual a la suma de las cargas de todos los aniones, deben ser eléctricamente neutras, la amplitud de variación del porcentaje de electroneutralidad puede ser hasta del ±10% el cual fue considerado para este análisis. Se realizó el balance iónico por medio de la siguiente ecuación Freeze y Cherry, (1979):

$$\% \text{ de electroneutralidad} = \frac{(\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones})}{(\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones})} \times 100$$

### 4.3.4 pH

De acuerdo con Bucaro *et al.* (2006) citado por Medina *et al.* (2016) el pH no es un factor fundamental para determinar la calidad del agua, pero sirve para evaluar las concentraciones relativas de las especies disueltas de carbonato. Además Ortega *et al.* (2002) establece que sus valores tienen

implicaciones importantes sobre la disponibilidad y manejo de nutrimentos, ya que Ayers y Westcot (1987) señalan que los valores normales de las aguas para uso agrícola oscilan entre 6.5 a 8.4.

#### **4.3.5 Criterio de salinidad**

Mide la cantidad de sales solubles en el agua de riego ya que si se encuentran en cantidades excesivas pueden acumularse en las raíces del cultivo disminuyendo sus rendimientos ya que la extracción del agua de la solución del suelo es más complicada (Ayers y Westcot, 1987). Para evaluar este criterio se tomaron en cuenta los parámetros de conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (STD), salinidad efectiva (SE) y salinidad potencial (SP).

#### **4.3.6 Criterio de sodicidad**

Estima si el agua de riego presenta altas cantidades de sodio que puedan ser absorbidas por el suelo a medida que se irriga a los cultivos (Richards, 1990), así mismo se midieron los parámetros de relación de adsorción de sodio normal (RAS), ajustada (RAS aj) y corregida (RAS<sup>o</sup>), carbonato de sodio residual (CSR) y porcentaje de sodio posible (PSP). Así mismo, con base en las concentraciones registradas para RAS y CE se mostró su clasificación a través de un diagrama de Richards el cual se elaboró con el programa QualiGraf en su versión 1.17, de acceso gratuito en idioma portugués.

#### **4.3.7 Criterio de toxicidad**

Un problema de toxicidad en el cultivo ocurre como resultado de la absorción y acumulación de ciertos componentes provenientes del agua de riego que pueden reducir los rendimientos y causar daños en los cultivos sensibles a estos (Geraldson, 1954). Para la evaluación de este criterio se consideraron las concentraciones de boro (B), fósforo (P) y nitrato (NO<sub>3</sub>.) ya que de acuerdo con Ayers y Westcot (1987) y Pérez y Pacheco (2004) son iones requeridos por las plantas en cantidades muy pequeñas no obstante, cuando se encuentran presentes en el agua de riego en cantidades mayores a las necesarias pueden ser tóxicos para el cultivo ya que generalmente su presencia en altas cantidades en el agua de riego proviene de la contaminación urbana, rural e industrial y de los abonos agrícolas. En la tabla 9., se muestra para los tres criterios la aptitud de cada parámetro evaluado para uso agrícola según los valores obtenidos durante su análisis.

**Tabla 9. Clasificación de los parámetros de calidad de agua para uso agrícola.**

Parámetro	Unidad	Clase			Referencia
		Aceptable	Condicionada	Inaceptable	
Conductividad eléctrica	$\mu\text{S cm}^{-1}$	< 250	250-2250	> 2250	Richards, 1990
Sólidos totales disueltos	$\text{mg L}^{-1}$	< 450	450-2000	> 2000	FAO, 1976
Salinidad efectiva	$\text{meq L}^{-1}$	$\leq 3$	3.0-15	> 15	Ortiz, 1997
Salinidad potencial	$\text{meq L}^{-1}$	$\leq 3$	3.0-15	> 15	INIFAP, 2009
Relación de adsorción de sodio	$\text{meq L}^{-1}$	0-10	10—18	18 - $\geq$ 30	Richards, 1990
Carbonato de sodio residual	$\text{meq L}^{-1}$	< 1.25	1.25-2.5	> 2.5	Palacios y Aceves, 1970
Porcentaje de sodio posible	%	0-25	25-50	> 50	Valle, 1992
Boro	$\text{mg L}^{-1}$	0-1	1—2	> 2	Ayers y Westcot, 1987
Fósforo	$\text{mg L}^{-1}$	0-1	1—2	> 2	Ayers y Westcot, 1987
Nitrato	$\text{mg L}^{-1}$	0-22	22-45	> 45	NOM-127-SSA1; Wakida y Lerner (2005)

Tomado de Castellón *et al.*, (2015)

#### 4.3.8 Clasificación hidrogeoquímica del agua

De acuerdo con Can *et al.* (2014) las evaluaciones hidroquímicas o hidrogeoquímicas ayudan a determinar el origen de la composición química del agua y la relación que existe entre el agua y la constitución química de las rocas. La clasificación de familias de agua se realizó mediante el diagrama de Piper, el cual según Peña *et al.*, (2012) se integra por dos triángulos equiláteros ubicados a los lados y un rombo al centro. El triángulo izquierdo representa las concentraciones de los cationes, el derecho las de los aniones y el rombo representa la intersección de las concentraciones de los cationes y aniones para definir la familia de agua a la que pertenece la muestra. El diagrama se realizó con el programa GW\_Chart Water Resources – USGS en su versión 1.29.0, para esto se efectuó la suma de las concentraciones de los cationes, aniones y sólidos totales disueltos, posteriormente se graficaron para determinar el ion dominante y las familias del agua.

#### 4.3.9 Análisis estadístico

El análisis de los datos obtenidos fue para un diseño en bloques completos al azar comparando ambos ciclos de producción para identificar si se presentaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en los parámetros de calidad de agua durante el periodo evaluación, así mismo, compararon los estratos por ciclo, para evaluar si la calidad del agua depende de la profundidad de cada pozo, dichos análisis se realizaron con el programa SAS 9.2. Posteriormente se elaboró un análisis por componentes principales

para identificar las principales variables de los tres criterios que tienen una mayor incidencia en la calidad del agua del acuífero Calera. Finalmente se realizó un análisis clúster para identificar grupos de pozos con características similares y establecer si la profundidad de cada pozo está relacionada con la clasificación de los parámetros evaluados en cada muestra.

#### 4.4 Resultados y discusión

##### 4.4.1 Condición de electroneutralidad

Todas las muestras en ambos ciclos evaluados presentaron la condición de electroneutralidad ya que ninguna estuvo por encima del 10%, porcentaje aceptable para los valores obtenidos durante el estudio (Tablas 10 y 11). De esta manera cumplen la condición necesaria para ser evaluadas en el análisis de la composición química del agua. Esta situación es similar a la que reporta Peña *et al.* (2012) en su evaluación de calidad de agua en pozos de la red de monitoreo del acuífero del valle de San Luis Potosí, y Morán *et al.* (2013) en su estudio sobre comportamiento hidrogeoquímico de flujos subterráneos en acuíferos cársticos fracturados, en la Huasteca Potosina.

**Tabla 10. Concentración iónica del agua subterránea en el acuífero Calera, Zacatecas. Ciclo 2016.**

No.		pH	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SUMA	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SUMA	ERROR
	Estrato		μS cm <sup>-1</sup>	meq L <sup>-1</sup>				Cationes	meq L <sup>-1</sup>				Aniones	%
1	E1	8.06	314	1.73	0.83	1.50	0.75	4.82	1.00	6.33	0.48	0.19	8.01	2
2	E3	8.08	725	3.17	4.00	1.58	0.82	9.57	1.00	4.83	1.08	1.34	8.25	8
3	E4	8.18	386	1.93	2.27	2.00	0.39	6.59	1.00	5.33	0.60	0.43	7.37	6
4	E2	8.18	321	2.07	0.17	3.50	0.65	6.38	1.00	5.33	0.37	0.32	7.02	4
5	E2	8.03	475	1.53	0.57	7.00	0.50	9.60	1.00	6.67	0.45	0.43	8.55	6
6	E5	8.32	508	1.80	3.43	2.67	0.29	8.19	1.00	4.67	0.88	0.68	7.23	6
7	E1	8.14	311	1.60	1.00	3.50	0.58	6.68	1.00	4.00	0.10	0.25	5.35	10
8	E3	8.29	474	2.43	2.47	2.92	0.35	8.16	1.00	5.50	0.33	0.49	7.33	6
9	E5	8.28	399	1.47	1.33	4.17	0.63	7.60	1.00	4.33	0.55	0.46	6.35	9
10	E3	8.26	279	1.73	0.27	3.50	0.51	5.65	1.00	3.00	0.57	0.36	4.92	7
11	E2	8.06	337	1.67	0.63	3.75	0.74	6.79	1.00	3.83	0.62	0.35	5.80	8
12	E4	8.26	433	2.03	2.37	2.92	0.39	7.71	1.00	4.67	0.70	0.53	6.90	6
13	E5	8.32	448	1.50	2.13	4.33	0.32	8.29	1.00	4.33	0.85	0.57	6.75	10
14	E4	8.28	380	1.90	1.97	2.75	0.39	7.01	1.00	4.00	0.82	0.44	6.26	6
15	E5	8.03	623	3.20	3.47	3.00	0.23	9.90	1.00	4.50	1.63	0.94	8.07	10

**Tabla 11. Concentración iónica del agua subterránea en el acuífero Calera, Zacatecas. Ciclo 2017.**

No.		PH	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SUMA	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SUMA	ERROR
	Estrato		μS cm <sup>-1</sup>	meq L <sup>-1</sup>			Cationes			meq L <sup>-1</sup>			Aniones	%
1	E1	7.45	359	2.20	0.13	1.0	0.32	3.66	0.00	3.17	1.07	0.11	4.34	-9
2	E3	7.35	1247	5.97	4.53	3.0	0.47	13.97	0.00	4.87	3.20	0.53	8.59	10
3	E4	7.68	443	1.27	1.30	2.0	0.20	4.77	0.00	3.17	0.87	0.39	4.42	4
4	E2	7.45	361	1.73	0.23	1.0	0.30	3.26	0.00	3.03	0.73	0.14	3.90	-9
5	E2	7.31	576	1.83	0.77	4.0	0.22	6.82	0.00	4.97	0.93	0.27	6.17	5
6	E5	8.03	609	1.33	3.23	1.0	0.15	5.72	0.43	3.50	1.90	0.50	6.34	-5
7	E1	7.62	349	1.73	0.47	1.0	0.27	3.47	0.23	2.90	0.73	0.14	4.00	-7
8	E3	7.70	496	1.00	3.47	1.0	0.15	5.62	0.41	3.77	1.07	0.30	5.54	1
9	E5	7.68	442	1.07	1.50	2.0	0.27	4.84	0.33	2.88	1.33	0.31	4.85	0
10	E3	7.64	305	1.30	0.17	1.0	0.27	2.74	0.53	2.00	0.63	0.16	3.33	-10
11	E2	7.62	396	1.47	1.17	2.0	0.37	5.01	0.40	2.87	0.80	0.16	4.22	8
12	E4	7.47	480	1.77	2.67	1.0	0.20	5.63	0.00	3.80	0.97	0.34	5.11	5
13	E5	7.62	477	0.97	2.67	2.0	0.17	5.81	0.00	3.63	1.10	0.32	5.05	7
14	E4	7.60	425	1.77	2.20	0.0	0.22	4.19	0.00	3.27	1.07	0.25	4.59	-5
15	E5	7.85	672	3.27	3.20	0.0	0.15	6.62	0.37	2.93	1.83	0.28	5.41	10
*16	E5	7.86	426	0.83	1.27	3.0	0.12	5.22	0.40	2.90	1.07	0.28	4.65	6
*17	E5	7.76	466	1.27	2.27	1.0	0.20	4.73	0.37	2.97	1.83	0.26	5.43	-7

\*Blanco.

#### 4.4.2 Clasificación del agua respecto a su pH

En el primer ciclo acorde con la NOM-021-SEMARNAT-2000, se pudo establecer que todas las muestras presentaron un pH medianamente alcalino, ya que se alcanzaron valores de 8.03 a 8.32. Durante el segundo año de muestreo se observó que el pH en la totalidad de las muestras se redujo ya que se situó entre 7.31 y 7.85 de las cuales el 87% siguen considerándose como medianamente alcalinas y el 13% restante como neutras. Siendo así, el agua del acuífero Calera se considera apta para uso agrícola en ambos periodos, ya que Ayers y Westcot (1987) revelan que los valores normales de pH fluctúan entre 6.5 y 8.4.

La alcalinidad que se evidenció en el agua se debe a la litología del acuífero Calera la cual está relacionada con la presencia de rocas con carbonatos, como calizas y dolomitas, de esta forma incrementan las concentraciones de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de los iones Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup> (Hernández *et al.*, 2012; Pérez, 2016). Por su parte, Ortega *et al.* (2002) en la investigación que se realizó en el acuífero de la Independencia en Guanajuato encontraron que la alcalinidad en el agua de igual forma es causada por las altas concentraciones de carbonatos y bicarbonatos.

Para el caso del área de estudio, la variación del pH de un ciclo a otro está ligado a la reducción de las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ , tal como se muestra en las tablas 10 y 11. Esto podría ser consecuencia de la interacción de diversos factores que señalan Tarabull y Betancourt (2016) e INIFAP (2006), como la fotosíntesis de plantas acuáticas, lluvias ácidas, degradación de la materia orgánica y lixiviación de la aplicación de cantidades excesivas de fertilizantes.

En la región el cultivo de chile registró cantidades que exceden en un 373% la aplicación recomendada de nitrógeno, 600% de fósforo y 452% de potasio. Los agricultores manifestaron que ésta práctica se efectúa con la finalidad de proporcionarle al cultivo suficientes nutrientes como NPK para asegurar su producción debido a que éstos se encuentran mayormente disponibles en suelos con pH ácido que en los de origen calcáreo, como es el caso de la zona que comprende el acuífero Calera, por lo que Criswell (1998) manifiesta que estos macronutrientes pueden llegar hasta el agua subterránea a través de sus fallas y fracturas geológicas disminuyendo la alcalinidad del agua de riego.

Esta información es similar a la reportada en los estudios de calidad de agua subterránea realizados por Medina *et al.* (2016) en el municipio de Tuxcacuesco en el estado de Jalisco, Sánchez *et al.* (2016) en las subregiones hidrológicas Bahía de Chetumal y Cuencas Cerradas en el estado de Quintana Roo, Castellón *et al.* (2015) en varios municipios del estado de Tlaxcala, Sandeep *et al.* (2011) en la Ciudad de Jhansi, región de Bundelkhand y Castellanos *et al.* (2002) en la región del Bajío en el estado de Guanajuato quienes registraron que, el pH de la mayoría de sus muestras se mostró moderadamente alcalino.

#### **4.4.3 Criterio de salinidad**

##### **4.4.3.1 Conductividad eléctrica**

Durante el primer muestreo la CE registró un promedio de  $427 \pm 123 \mu\text{S cm}^{-1}$ , un máximo de  $725 \mu\text{S cm}^{-1}$  y un mínimo de  $279 \mu\text{S cm}^{-1}$  clasificándola como C2 correspondiente a agua de salinidad media, así mismo se pudo apreciar que para el segundo periodo de evaluación en su totalidad los valores presentaron un incremento alcanzando un promedio de  $509 \pm 228 \mu\text{S cm}^{-1}$ , un máximo de  $1,247 \mu\text{S cm}^{-1}$  y un mínimo de  $305 \mu\text{S cm}^{-1}$  clasificando catorce de las quince muestras como C2 ya que al ser de este tipo Medina *et al.* (2016) en su estudio establece que puede usarse para obtener rendimientos agrícolas apropiados siempre y cuando exista un grado moderado de lavado y suficiente drenaje.

No obstante, el incremento de CE de un ciclo a otro (Tabla 12), puede ser consecuencia de varios procesos complejos de redistribución de sales los cuales según Tarabull y Betancourt (2016)

dependen de las condiciones naturales, características del sistema, prácticas agrícolas y manejo del riego y del drenaje, por lo que se infiere que la excesiva aplicación de fertilizantes en la región está influyendo en el incremento de los procesos de salinización del agua de riego.

Para la muestra 02 catalogada como C3 la cual es agua altamente salina, INIFAP (2009) señala que aún con el drenaje adecuado se pueden necesitar prácticas especiales de control de la salinidad y se deben seleccionar únicamente aquellas especies muy tolerantes a sales con una CE de 750 a 2,250  $\mu\text{S cm}^{-1}$  como es el caso del cultivo de chile, pues acorde con Ayers y Westcot (1987) puede tolerar hasta 850  $\mu\text{S cm}^{-1}$ .

Con base en lo anterior se puede establecer que el agua del acuífero Calera es apta para la irrigación de este cultivo, debido a que, en su mayoría, las muestras de ambos ciclos presentaron menos de 750  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , estos resultados coinciden con los reportados para agua subterránea por Ortega *et al.* (2002), Medina *et al.* (2016) y Castellón *et al.* (2015) en los estados de Guanajuato, Jalisco y Tlaxcala, respectivamente, que registraron una clasificación C2 para la mayoría de sus muestras.

Al utilizar el agua de riego para la fertirrigación, se debe considerar la concentración iónica para ajustar el contenido de fertilizante a disolver, ya que al contener una buena proporción de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , estas pueden complementar el requerimiento nutrimental. Por su parte, los blancos presentaron valores de 426 y 466  $\mu\text{S cm}^{-1}$  los cuales se encuentran dentro de la escala aceptable para uso y consumo humano de acuerdo con la norma NOM-127-SSA1-1994.

**Tabla 12. Concentraciones observadas en los parámetros que integran el criterio de salinidad durante los muestreos de 2016-2017 en el acuífero Calera.**

No	Estrato	pH	2016				pH	2017			
			CE	STD	SE	SP		CE	STD	SE	SP
			$\mu\text{S cm}^{-1}$	$\text{mg L}^{-1}$	$\text{meq L}^{-1}$	$\text{meq L}^{-1}$		$\mu\text{S cm}^{-1}$	$\text{mg L}^{-1}$	$\text{meq L}^{-1}$	$\text{meq L}^{-1}$
1	E1	8.06	314	200.7	2.2	0.6	7.45	359	229.8	1.3	1.1
2	E3	8.08	725	463.9	3.7	1.8	7.35	1247	798.1	8.0	3.5
3	E4	8.18	386	246.7	2.4	0.8	7.68	443	283.3	2.2	1.1
4	E2	8.18	321	205.4	4.2	0.5	7.45	361	231.3	1.3	0.8
5	E2	8.03	475	303.7	7.5	0.7	7.31	576	368.4	4.2	1.1
6	E5	8.32	508	325.2	3.0	1.2	8.03	609	389.5	1.8	2.2
7	E1	8.14	311	199.0	4.1	0.2	7.62	349	223.1	1.3	0.8
8	E3	8.29	474	303.0	3.3	0.6	7.70	496	317.2	1.4	1.2
9	E5	8.28	399	255.6	4.8	0.8	7.68	442	282.9	2.3	1.5
10	E3	8.26	279	178.5	4.0	0.7	7.64	305	195.4	1.3	0.7
11	E2	8.06	337	215.7	4.5	0.8	7.62	396	253.4	2.4	0.9
12	E4	8.26	433	277.1	3.3	1.0	7.47	480	307.2	1.8	1.1
13	E5	8.32	448	286.9	4.7	1.1	7.62	477	305.1	2.2	1.3

14	E4	8.28	380	243.0	3.1	1.0	7.60	425	272.2	0.9	1.2
15	E5	8.03	623	398.6	4.4	2.1	7.85	672	429.9	3.3	2.0
*16	E5						7.86	426	272.9	3.1	1.2
*17	E5						7.76	466	298.2	1.4	2.0

\*Blanco.

#### 4.4.3.2 Sólidos totales disueltos

En relación al primer ciclo de muestreo, para STD se registró una concentración media de  $274 \pm 79$  mg L<sup>-1</sup>, una máxima de 464 mg L<sup>-1</sup> y una mínima de 179 mg L<sup>-1</sup> en el agua del acuífero, por lo que todas las muestras se ubicaron dentro de la escala aceptable para uso agrícola, sin restricción alguna. Para el segundo ciclo se observó un ligero incremento en la concentración de STD generando una media de  $326 \pm 146$  mg L<sup>-1</sup>, una máxima de 798 mg L<sup>-1</sup> y una mínima de 195 mg L<sup>-1</sup>, no obstante, aún con el incremento la mayoría de las muestras se localizan entre los valores admisibles para actividades agrícolas y consumo humano, sólo la muestra 02 presenta un ligero grado de restricción, pero en general el agua del acuífero Calera respecto al parámetro de STD es aceptable, ya que en conjunto con la CE hasta el momento no presentan un peligro latente de salinidad para el suelo, sin embargo se debe monitorear su adecuado drenaje.

Sandeep *et al.* (2011) y Oyedotun y Obatoyinbo (2012) encontraron en sus investigaciones sobre calidad de agua subterránea en las ciudades de Jhansi, Uttar Pradesh, India y Akoko de Ondo, Nigeria concentraciones de 110 a 280 mg L<sup>-1</sup> en STD para la temporada de estiaje, las cuales no mostraron ningún tipo de restricción para uso agrícola y consumo humano, similar al contexto del acuífero Calera.

El incremento de STD de un periodo a otro en el acuífero, se debe a su relación con la conductividad eléctrica (CE), ya que de acuerdo con Silva *et al.* (2006) la CE es directamente proporcional al contenido de sólidos totales disueltos en el agua subterránea y éstos se incrementan con la evolución del agua subterránea, o por efecto de la contaminación natural o antropogénica, además Porras *et al.* (1985) señala que la temperatura puede influir en el incremento o decremento de la solubilidad de las sustancias presentes, en específico su conductividad eléctrica. Por lo que se infiere que la dinámica agrícola podría ser un factor importante que paulatinamente puede contribuir al decrecimiento de la calidad del agua de la región.

#### 4.4.3.3 Salinidad efectiva y potencial

Respecto a la salinidad efectiva para el ciclo de muestreo de 2016 se estimó una media de  $4 \pm 1$  meq L<sup>-1</sup>, una máxima de 8 meq L<sup>-1</sup> y una mínima de 2.2 meq L<sup>-1</sup> siendo así, la mayoría de las muestras no se consideraron aptas para riego agrícola debido a que en este periodo se presentaron mayores

concentraciones de  $\text{Na}^+$  que de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , por lo tanto, Ortiz *et al.* (1997) señalan que se puede correr el riesgo de formar sales de  $\text{Na}^+$ , por ser de las últimas en precipitar.

En contraste, durante el ciclo de 2017, solo las muestras 2 y 5 presentaron elevados niveles de SE ya que se estimó un promedio de  $2 \pm 2$  meq  $\text{L}^{-1}$ , y su valor máximo y mínimo fue de 8 y 0.92 meq  $\text{L}^{-1}$  respectivamente, colocando a la mayoría de las muestras como aceptables para fines agrícolas pues, aunque en este periodo se detectó que las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  fueron más bajas que las de  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , lograron superar el contenido de  $\text{Na}^+$  y se puede inferir que se presentó un menor riesgo de formar sales carbonatadas y bicarbonatadas de  $\text{Na}^+$  ya que Palacios y Aceves (1970) las califican como altamente dañinas para el cultivo y favorables para los procesos de salinización y defloculación del suelo ya que su punto de saturación es muy elevado.

Silva *et al.* (2006) en la Ciénega de Chapala registraron valores de SE entre 1 a 15 meq  $\text{L}^{-1}$  para la mayoría de las muestras de agua subterránea, clasificándolas como condicionadas para uso agrícola al igual que Balmaseda y García (2013) en la cuenca del río Naranjo, por su parte Castellón *et al.* (2015) en el estado de Tlaxcala obtuvo concentraciones de 0.4 a 4.2 meq  $\text{L}^{-1}$  las cuales pueden usarse para la irrigación de la mayoría de los cultivos, situación que es similar a la del acuífero Calera.

En cuanto al parámetro de salinidad potencial durante el primer ciclo de muestreo se identificó una media de  $0.9 \pm 0.4$  meq  $\text{L}^{-1}$ , un valor máximo de 2.1 meq  $\text{L}^{-1}$  y un mínimo de 0.2 meq  $\text{L}^{-1}$ , todos dentro de la escala aceptable para uso agrícola a pesar de que el contenido de  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  fue mayor respecto al de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  por lo que se pudo presentar la posibilidad de formar sales de  $\text{CaSO}_4$  en el suelo, pues Salgado *et al.* (2012) en el acuífero Valle de Guadalupe observó que esta situación es más frecuente en suelos de origen calcáreo, sobre todo después de haber precipitado  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  del suelo con los  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$  provenientes del agua de riego.

Para el segundo ciclo de evaluación la SP presentó un ligero incremento, ya que se obtuvo una media de  $1.4 \pm 0.74$  meq  $\text{L}^{-1}$  y sus valores máximo y mínimo ascendieron a 3 y 0.7 meq  $\text{L}^{-1}$  respectivamente, sin dejar de ubicarse en la escala aceptable para riego. Durante este periodo se observó un amplio incremento en las concentraciones de  $\text{Cl}^-$  respecto al  $\text{SO}_4^{2-}$  por lo que de acuerdo con Castellón *et al.* (2015) existe la posibilidad de que gradualmente se formen y acumulen sales de  $\text{Cl}^-$  después de precipitarse.

Durante la evaluación que realizó Robles (2002) en el Distrito de riego Tehuantepec, Oaxaca, la salinidad potencial del agua se clasificó como aceptable ya que se reportaron valores de 1 a 3 meq  $\text{L}^{-1}$ . Las muestras del acuífero Calera se encuentran en este intervalo, y también corresponden al periodo de

estiaje, no obstante, se debe monitorear frecuentemente este parámetro para evitar posibles daños a la estructura del suelo por la acumulación de sales de Cl<sup>-</sup> y evitar su uso durante el periodo de estiaje. En general el criterio de salinidad durante ambos periodos se mostró aceptable para uso agrícola.

#### 4.4.4 Criterio de sodicidad

##### 4.4.4.1 Relación de adsorción de sodio

Durante el primer periodo evaluado se estimó en promedio un RAS de 2.6±1.4 con sus valores máximo y mínimo de 6.8 y 0.8 respectivamente. La mayoría de las muestras respecto a las tres variaciones de RAS mostraron bajo contenido de sodio y en conjunto con la CE se clasificaron como C2-S1, agua de salinidad media baja en sodio con un riesgo moderado de salinización del suelo (Figura 8). Para el segundo ciclo se identificó un incremento en las concentraciones de Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> y una baja en las de Na<sup>+</sup> y consecuentemente se produjo una reducción en RAS ya que se observó una media de 1±0.8, además, todas las muestras en las tres variantes de RAS al igual que el ciclo anterior permitieron clasificar el agua nuevamente como C2-S1 (Figura 9).

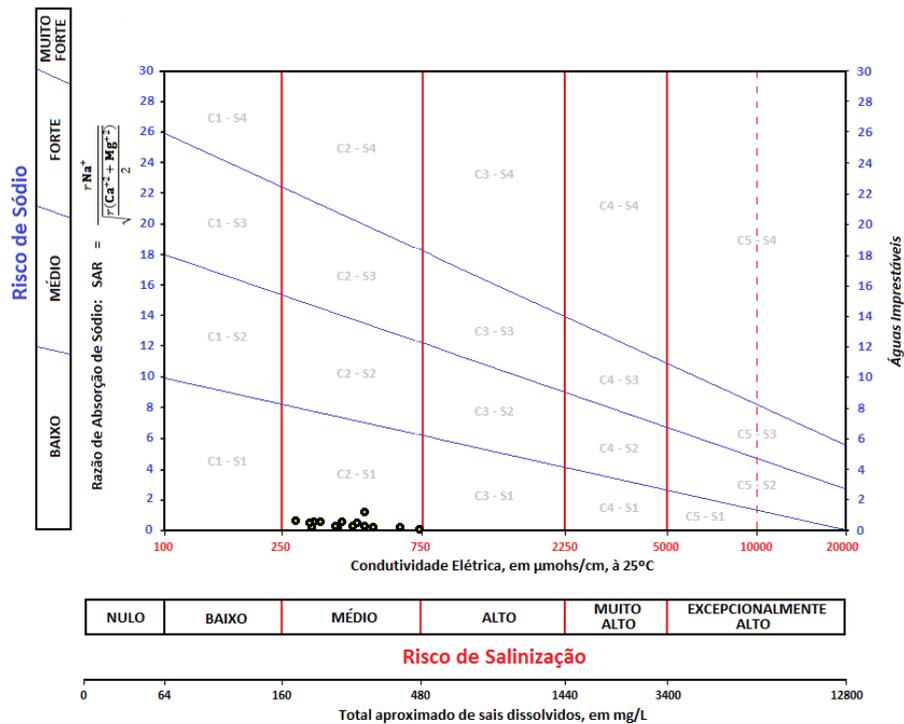
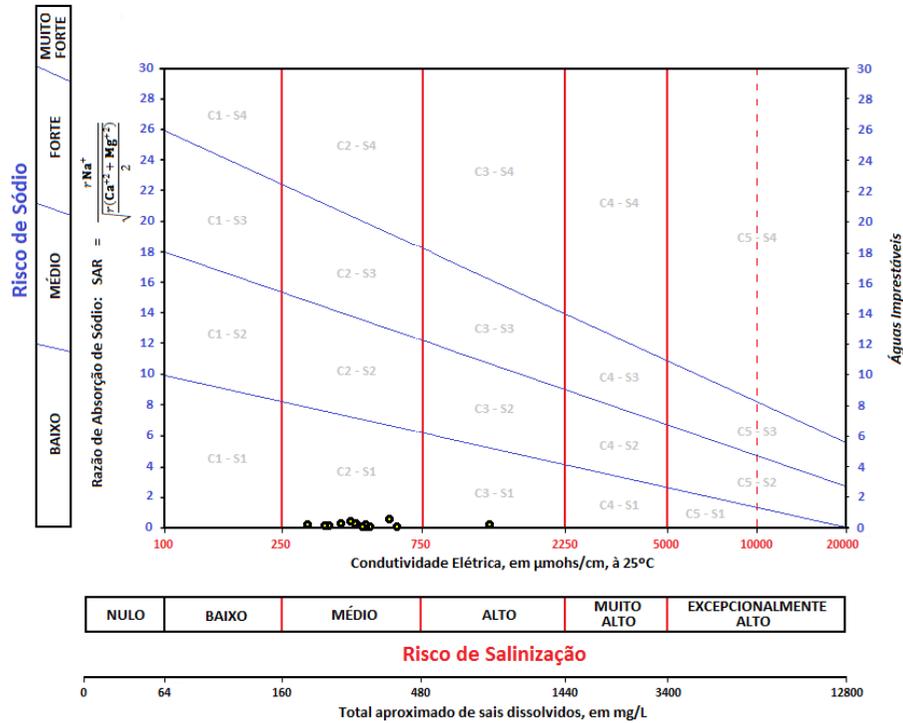


Figura 8. Clasificación del agua del acuífero Calera en cuanto a su CE y RAS en el ciclo 2016.



**Figura 9. Clasificación del agua del acuífero Calera en cuanto a su CE y RAS en el ciclo 2017.**

Silva *et al.* (2013) en su evaluación sobre calidad química del agua subterránea y superficial en la cuenca del río Duero, Michoacán, mostraron resultados similares y mencionan que el agua al ser de clase C2-S1 puede ser empleada casi en cualquier tipo de suelo sin riesgo elevado de alcanzar grados peligrosos de sodio intercambiable que afecten sus propiedades, siempre y cuando se realicen lavados frecuentes para evitar posibles problemas de salinización.

Sin embargo, Can *et al.* (2011) en su estudio sobre origen y calidad del agua subterránea en la cuenca Oriental de México, enfatizan que después de haber precipitado los carbonatos, bicarbonatos y sulfatos, el sodio permanece en solución y se va acumulando en las primeras capas del suelo, donde influye sobre la estabilidad de los agregados y la estructura del suelo por ser de las últimas sales en precipitar. Por lo tanto, aunque RAS fue aceptable para las muestras de agua del acuífero Calera, se debe considerar analizar frecuentemente este parámetro en los suelos de la región para evitar su acumulación y posibles daños a su estructura debido a que Castellanos *et al.* (2002) en su investigación de calidad de agua subterránea para uso agrícola en el estado de Guanajuato, encontraron que las aguas subterráneas están incrementando significativamente la concentración de sodio, el RAS y el pH a través del tiempo, así como el daño potencial a la estructura del suelo.

#### 4.4.4.2 Carbonato de sodio residual

Atendiendo al parámetro de CSR, durante el primer ciclo evaluado se mostró un promedio de  $2\pm 2$  meq L<sup>-1</sup> registrando valores muy contrastantes con un máximo y mínimo de 5.6 y 0.4 meq L<sup>-1</sup> respectivamente, debido a esta situación el 13% de las muestras no fueron aptas para uso agrícola, y el 86% se clasificaron como condicionadas ya que se detectaron elevadas concentraciones de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> respecto a las de Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> (Tabla 13), situación que acuerdo con Castellanos *et al.* (2002) y Can *et al.* (2014) pudo haber formado sales de carbonato de sodio por su alta solubilidad una vez que precipitaron al suelo calcio y magnesio como bicarbonatos, por lo que se debe poner mayor cuidado al usar esta agua para riego agrícola en el acuífero Calera en temporada de estiaje, debido a que Cuellar *et al.* (2015) en su evaluación de la relación de adsorción de sodio de las aguas de la red hidrográfica del Valle del Mezquital, Hidalgo encontraron que el agua de este tipo es altamente dañina para la estructura del suelo y procesos de infiltración.

Contrario a lo anterior, para el periodo de 2017 se observó que las concentraciones de Na<sup>+</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> disminuyeron en relación a las de Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> y que el Mg<sup>2+</sup> aumentó considerablemente originando en CSR una media de  $0.19\pm 1.9$  meq L<sup>-1</sup> con sus respectivos valores máximo y mínimo de -5.63 y 2.37 meq L<sup>-1</sup>, ubicando a la mayoría de las muestras como aptas para la irrigación del cultivo de chile, esta situación pudo ser causa de la interacción del acuífero con su recarga antes del ciclo de evaluación.

Estos valores coinciden con los reportados por Can *et al.* (2014) en la Sierra Norte de Puebla, México, ya que señalan que las muestras de este tipo son cálcico-magnésicas y magnésico-cálcicas las cuales ostentan cantidades superiores de Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> respecto a los CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, y que los valores positivos indican que calcio y magnesio precipitan al suelo como carbonatos y bicarbonatos, existiendo sólo sales de sodio en solución, a las cuales se debe poner mayor cuidado al hacer uso de éstas para riego, ya que pueden formar CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> de Na<sup>+</sup>, sales que según Cuellar *et al.* (2015) son altamente dañinas para la estructura del suelo, ya que la infiltración disminuye con las concentraciones sódicas. Por su parte Nishanthiny *et al.* (2010) menciona que la principal fuente de carbonatos es la dilución de rocas carbonatadas y por ello el agua del acuífero Calera puede contener mayores concentraciones de Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> originando valores negativos en el CSR

#### 4.4.4.3 Porcentaje de sodio posible

Durante el primer ciclo se encontró que la mayoría de las muestras con excepción de la 02, superaron el 50% de sodio posible, por lo que se clasificaron como de uso condicionado al registrar una

media de  $82\pm 13\%$ , un valor máximo del 93% y un mínimo del 42%, esta situación se hace más evidente al observar que las concentraciones de  $\text{Na}^+$  superaron casi al doble las de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  y como consecuencia en este periodo se infiere el desplazamiento de los cationes de calcio y magnesio por el sodio en el complejo de intercambio por sus elevadas cantidades.

No obstante, durante el segundo ciclo las concentraciones de  $\text{Na}^+$  se redujeron casi al 50% al generar una media de  $65\pm 31\%$ , un valor máximo de 96% así como un valor mínimo del 0% que sólo lo registraron dos muestras, las demás siguieron siendo de clase condicionada para uso agrícola, así mismo, se distinguió el descenso de las cantidades de  $\text{Na}^+$  y  $\text{HCO}_3^-$  y el incremento de  $\text{Mg}^{2+}$  por lo que se minimizó el riesgo de formar sales de bicarbonato de sodio y se incrementó la posibilidad de formar sales de carbonato de magnesio en el extracto de intercambio, las cuales, de acuerdo con Cuellar *et al.* (2015) son menos peligrosas para la estructura del suelo por que favorecen los procesos de infiltración.

En el estudio realizado por Robles (2002) en el Distrito de riego no. 19 de Tehuantepec, Oaxaca, se registraron altos valores de PSP, al igual que en el acuífero Calera, por lo que se debe considerar medir frecuentemente este parámetro sobre todo cuando el agua se aplique para el riego de terrenos con suelos de texturas pesadas ya que puede ocasionarle problemas en su estructura.

**Tabla 13. Valores registrados en los parámetros que integran el criterio de sodicidad durante los ciclos 2016-2017 en el acuífero Calera.**

No	Estrato	2016					2017				
		RAS	RAS aj.	RAS°	CSR	PSP	RAS	RAS aj.	RAS°	CSR	PSP
		meq L <sup>-1</sup>			%	meq L <sup>-1</sup>			%		
1	E1	1	3	2	5	67	1	2	1	1	76
2	E3	1	2	1	-1	42	1	3	2	-6	38
3	E4	1	3	2	2	84	2	3	2	1	91
4	E2	3	7	6	4	84	1	2	1	1	77
5	E2	7	14	8	6	93	4	7	4	2	95
6	E5	2	4	2	0	90	1	1	1	-1	56
7	E1	3	6	4	2	86	1	2	1	1	79
8	E3	2	4	2	2	89	1	1	1	0	69
9	E5	4	7	4	3	87	2	3	2	1	88
10	E3	3	6	4	2	87	1	2	1	1	79
11	E2	3	7	4	3	84	2	3	2	1	84
12	E4	2	4	2	1	88	1	1	1	-1	55
13	E5	3	7	4	2	93	1	3	2	0	92
14	E4	2	4	2	1	88	0	0	0	-1	0
15	E5	2	4	2	-1	68	0	0	0	-3	0
*16	E5						3	5	3	1	96
*17	E5						1	2	1	0	71

\*Blanco

#### **4.4.5 Criterio de toxicidad**

##### **4.4.5.1 Boro**

A través de los dos muestreos se detectó que el contenido de boro en el agua fue muy bajo pues, para ambos periodos el promedio de las concentraciones se mostró inferior a los  $0.67 \text{ mg L}^{-1}$  posicionando el agua del acuífero Calera como apta para cultivos semitolerantes a este elemento (Tabla 14) ya que el cultivo de Chile según Ayers y Westcot (1987) puede soportar hasta  $2 \text{ mg L}^{-1}$  de boro provenientes del agua de riego. La información generada en este estudio en cuanto a este parámetro coincide con los valores registrados por Can *et al.* (2011) en la Cuenca Oriental de México, Medina *et al.* (2016) en Tuxcacuesco, Jalisco y Castellón *et al.* (2015) en el estado de Tlaxcala, México, pues detectaron en promedio concentraciones menores a  $0.45 \text{ mg L}^{-1}$  en el agua subterránea la cual puede usarse sin restricción alguna.

##### **4.4.5.2 Fósforo**

Durante el ciclo de 2016 se encontraron altas cantidades de fósforo en el agua de riego del acuífero Calera pues se alcanzó una media de  $4 \pm 3$  debido a que el 50% de las muestras presentaron concentraciones por encima de los  $2 \text{ mg L}^{-1}$  clasificándose como altamente concentradas en fósforo y no aptas para la irrigación del cultivo de Chile. Estos valores podrían ser consecuencia de la excesiva fertilización fosfatada que frecuente reciben las parcelas de Chile de la región, la escorrentía superficial, los procesos de lixiviación, la ubicación de las fallas y fracturas geológicas y el movimiento de las corrientes subterráneas debido a que Tunney *et al.* (2003) en su evaluación para calcular el balance de P a escala de campo en Europa observó que la presencia de fósforo en aguas subterráneas fue consecuencia principalmente de la movilidad por lixiviación de ciertas cantidades de fósforo de suelos agrícolas, sobre todos aquellos que han recibido durante décadas fertilización fosfatada, orgánica o mineral.

Contrario a lo anterior, en 2017 las muestras e incluso los blancos no presentaron altas concentraciones de fósforo, por el contrario se registró una media de  $0.04 \pm 0.05$  ubicándose dentro del rango aceptable para uso agrícola por lo que se infiere que la calidad del agua del acuífero Calera está fuertemente ligada con sus procesos de recarga, sobre todo los relacionados con la cantidad de lluvia. Los resultados del segundo periodo coinciden con los registrados por Oyedotun y Obatoyinbo (2012) durante su evaluación hidrogeoquímica de la calidad del agua subterránea en el área del gobierno local

de Akoko Noroeste del estado de Ondo, Nigeria, ya que mostraron valores por debajo de los 2 mg L<sup>-1</sup> los cuales no representan un grado de restricción para la irrigación de cualquier cultivo. Sin embargo, hasta el momento no se han identificado estudios donde se reporten cantidades superiores a los 2 mg L<sup>-1</sup> de P en aguas subterráneas.

#### 4.4.5.3 Nitrato

Las concentraciones de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el agua del acuífero fueron muy bajas ya que se observó una media de 2±1 mg L<sup>-1</sup>, con un valor máximo de 4 mg L<sup>-1</sup> y un mínimo de 0.5 mg L<sup>-1</sup> por lo que el agua en cuanto a este parámetro, no representa un riesgo para la salud humana de acuerdo con los lineamientos de la Organización Mundial de la Salud (WHO, 1985) y de la norma NOM-127-SSA1 ya que las muestras no superaron el límite de 45 mg L<sup>-1</sup> que son aptos para uso agrícola, por lo que se infiere que las cantidades aplicadas en cuanto a fertilización nitrogenada hasta el momento no han impactado la calidad del agua del acuífero Calera por efecto de lixiviación y percolación del agua, tal como lo señala Saleem *et al.* (2016). Además las cantidades de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> encontradas en el acuífero Calera se encuentran por debajo de las que han identificado Sarabia *et al.* (2011) y Peña *et al.* (2012) en el acuífero del valle de San Luis Potosí, y Pérez y Pacheco (2004) en el estado de Yucatán pues, mostraron concentraciones promedio de 5.0, 6.2 y 21.3 mg L<sup>-1</sup> respectivamente, todas aptas para fines agrícolas.

**Tabla 14. Cantidades obtenidas en los parámetros que integran el criterio de toxicidad para los ciclos 2016-2017 en el acuífero Calera.**

No.	Estrato	2016		2017		NO <sub>3</sub>
		B	P	B	P	
mg L <sup>-1</sup>						
1	E1	0	6	0	0	1
2	E3	0	6	0	0	3
3	E4	0	7	0	0	1
4	E2	0	9	0	0	3
5	E2	0	8	1	0	1
6	E5	-1	9	0	0	3
7	E1	0	0	0	0	2
8	E3	0	6	0	0	1
9	E5	0	4	1	0	3
10	E3	-1	1	0	0	1
11	E2	-1	1	0	0	2
12	E4	-1	0	0	0	3
13	E5	0	1	1	0	2
14	E4	-1	1	0	0	2
15	E5	-1	0	0	0	4

*16	E5	0	0	2
*17	E5	0	0	2

\* Blanco

#### 4.4.6 Clasificación hidrogeoquímica

Durante el muestreo de 2016 se identificaron dos facies hidroquímicas debido a que el 53% de las muestras correspondió a aguas del tipo no dominantes bicarbonatadas y el 47% restante se consideraron como sódico bicarbonatadas tal como se muestra en la Figura 10, cabe señalar que para el segundo periodo de evaluación en la Figura 11 se pueden observar cuatro facies hidroquímicas en las que predominaron las aguas de índole no dominantes bicarbonatadas con el 47% seguido de las de carácter cálcico bicarbonatadas con un 24% y las de origen magnésico bicarbonatada y sódico bicarbonatada con el 17 y 12% respectivamente.

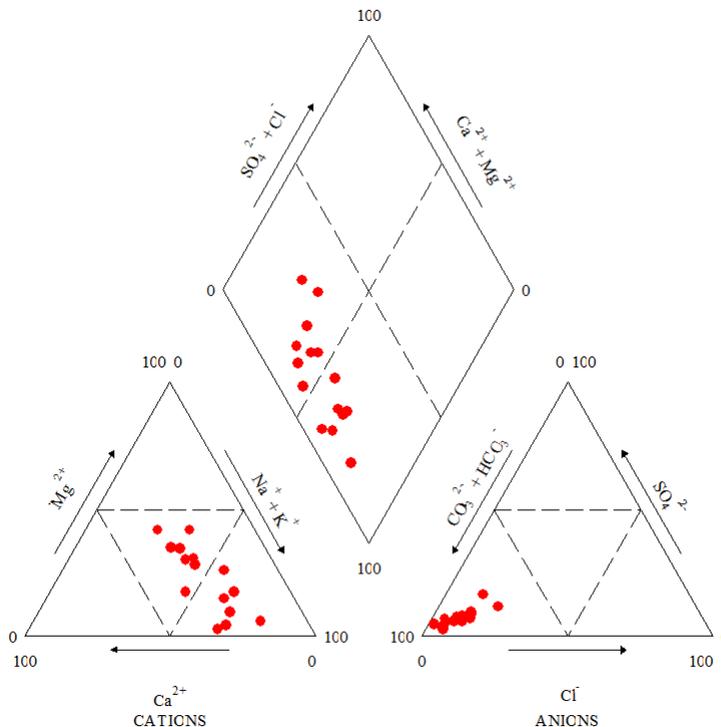
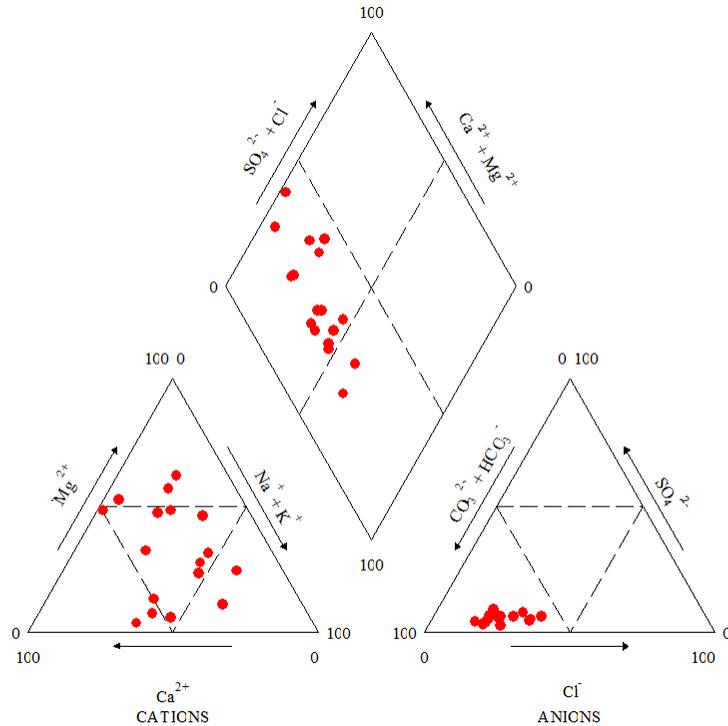


Figura 10. Clasificación hidrogeoquímica del agua del acuífero Calera en el ciclo de 2016.



**Figura 11. Clasificación hidrogeoquímica del agua del acuífero Calera en el ciclo de 2017.**

Contreras *et al.* (2012) en su estudio sobre las propiedades hidrogeoquímicas e isotópicas del agua subterránea en la parte media de la cuenca del río Tulián, en Honduras, observaron que en general en su mayoría las aguas de tipo bicarbonatada tienen un corto tiempo de permanencia en el terreno en las zonas de recarga, por su parte Padilla y García (2012) y Moran *et al.* (2013) en sus respectivos estudios sobre hidrogeoquímica en las cuencas del río Quiscab, Guatemala y Huasteca Potosina, México, encontraron que este tipo de agua se caracteriza por la interacción con rocas calcáreas sedimentarias.

Ambos contextos son similares a los del acuífero Calera pues, presenta una geología de origen calcáreo y el carácter bicarbonatado de su agua podría deberse a su interacción con este tipo de rocas y a su apresurada infiltración por la acción de las fallas y fracturas geológicas de la región y una rápida fluidez en el movimiento de las corrientes subterráneas, pues el promedio de desplazamiento del agua para la región es de  $64 \text{ cm día}^{-1}$ .

Posteriormente Moran *et al.* (2013) registraron que las aguas de tipo magnésico bicarbonatadas son aguas que obedecen a incorporación de sustancias a través del material geológico con el cual están en contacto, además estas tienen un mayor tiempo de recorrido en el acuífero que las cálcico bicarbonatadas y finalmente de acuerdo con Freeze y Cherry, (1979) según la secuencia de Chebotarev

el agua catiónicamente evoluciona desde el tipo cálcico, pasando al magnésico, para posteriormente finalizar en sódico, aguas consideradas como típicas de ambientes geológicos volcánicos.

Acorde con lo establecido por Padilla y García (2012) el incremento de familias de agua de un periodo a otro en el acuífero Calera puede ser consecuencia de la interacción del agua con la composición de la matriz geológica con la cual está en contacto durante su recorrido por el medio y por las reacciones que se llevan a cabo a medida que un agua evoluciona, pues durante el segundo ciclo se presentaron intensas precipitaciones pluviales, por lo que se infiere que las aguas interaccionaron con los materiales calcáreos del área, diluyendo el calcio y de acuerdo con Can *et al.* (2014) esta situación fue la que pudo originar el carácter de las aguas cálcicas bicarbonatadas.

Por su parte las aguas bicarbonatadas sódicas se encuentran asociadas con la presencia de minerales de arcilla que afectan principalmente los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^+$ , y  $\text{Mg}^{2+}$ , ya que Contreras *et al.* (2012) expone que el terreno cede iones de  $\text{Na}^+$  y toma del agua iones  $\text{Ca}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$  y como resultado el agua se ablanda y tiende a convertirse en sódica. Por lo tanto, a lo largo del flujo del acuífero Calera se está dando un intercambio catiónico que podría ser el responsable de que las aguas muestreadas en algunos puntos sean del tipo bicarbonatada sódica, la cual es considerada como la que ha tenido un mayor periodo de permanencia en el acuífero. No obstante, se debe poner mayor atención al hacer uso de esta ya que muestra altas concentraciones de  $\text{Na}^+$  que podrían precipitar en el suelo originando su defloculación.

#### **4.4.7 Análisis estadístico**

El análisis por bloques completos al azar reveló que la mayoría de los parámetros se mostraron estadísticamente diferentes de un periodo a otro con excepción de C.E.,  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y PSP (Tabla 15) por lo que se puede establecer que en general la calidad del agua del acuífero Calera se incrementó en el ciclo productivo de 2017 con respecto al de 2016 ya que se registraron concentraciones más aceptables para uso agrícola. Por su parte, el análisis de bloques completos al azar por estratos, hasta el momento ha evidenciado que la profundidad de los pozos no ha influido en las concentraciones obtenidas en los parámetros evaluados ya que en su mayoría los cinco estratos se mostraron como estadísticamente iguales, así mismo, las cantidades de  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , RAS, RASaj, RAS° y CSR de los estratos más someros se observaron como estadísticamente iguales a las de los más profundos (Tabla 16).

**Tabla 15. Análisis estadístico por bloques de las muestras de agua del acuífero Calera. Ciclos de producción 2016-2017.**

Parámetro	Periodo de evaluación		Parámetro	Periodo de evaluación	
	2016	2017		2016	2017
<b>pH</b>	8.1 ± 0.1 a	7.6 ± 0.1 b	<b>B</b> (mg L <sup>-1</sup> )	-0.5 ± 0.3 a	0.3 ± 0.1 b
<b>CE</b> (μS cm <sup>-1</sup> )	427 ± 123 a	502 ± 214 a	<b>P</b> (mg L <sup>-1</sup> )	3.9 ± 3.5 a	0.04 ± 0.05 b
<b>Ca<sup>2+</sup></b> (meqL <sup>-1</sup> )	1.9 ± 0.5 a	1.9 ± 1.3 a	<b>STD</b> (mg L <sup>-1</sup> )	274 ± 79 a	326 ± 146 b
<b>Mg<sup>2+</sup></b> (meqL <sup>-1</sup> )	1.8 ± 1.2 a	1.9 ± 1.4 a	<b>SE</b> (meqL <sup>-1</sup> )	3.9 ± 1.2 a	2.3 ± 1.6 b
<b>Na<sup>+</sup></b> (meqL <sup>-1</sup> )	3.2 ± 1.3 a	1.5 ± 1.0 b	<b>SP</b> (meqL <sup>-1</sup> )	0.9 ± 0.4 a	1.3 ± 0.7 b
<b>K<sup>+</sup></b> (meqL <sup>-1</sup> )	0.5 ± 0.2 a	0.2 ± 0.1 b	<b>RAS</b> (meqL <sup>-1</sup> )	2.6 ± 1.4 a	1.1 ± 0.8 b
<b>Tcat</b> (meqL <sup>-1</sup> )	7.5 ± 1.5 a	5.4 ± 2.5 b	<b>pHc</b> (meqL <sup>-1</sup> )	7.2 ± 0.1 a	7.4 ± 0.2 b
<b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></b> (meqL <sup>-1</sup> )	1.0 ± 0 a	0.1 ± 0.2 b	<b>RASaj.</b> (meqL <sup>-1</sup> )	5.4 ± 2.8 a	2.2 ± 1.7 b
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b> (meqL <sup>-1</sup> )	4.7 ± 0.9 a	3.3 ± 0.7 b	<b>RAS°</b> (meqL <sup>-1</sup> )	3.2 ± 2.0 a	1.3 ± 1.0 b
<b>Cl<sup>-</sup></b> (meqL <sup>-1</sup> )	0.6 ± 0.4 a	1.2 ± 0.7 b	<b>CSR</b> (meqL <sup>-1</sup> )	2.0 ± 1.9 a	-0.19 ± 1.9 b
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b> (meqL <sup>-1</sup> )	0.5 ± 0.2 a	0.2 ± 0.1 b	<b>PSP</b> (%)	82 ± 13 a	65 ± 31 a
<b>Tanio</b> (meqL <sup>-1</sup> )	6.9 ± 1.1 a	5.0 ± 1.2 b			

Nota: no se consideró el NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en este análisis ya que solo se evaluó durante un periodo.

Los parámetros con diferente literal son estadísticamente diferentes de un ciclo a otro.

Por su parte, el análisis de componentes principales reveló que 88% de la calidad de agua del acuífero en el ciclo de 2016 se distribuyó en los tres primeros componentes, los cuales se relacionaron con las variables de los criterios de sodicidad, salinidad y condiciones ambientales (Tabla 17), así mismo, se observó que tan solo el 52% de la calidad del agua del acuífero dependió de variables que atendieron al criterio de sodicidad, por lo tanto se identificó una correlación negativa para este periodo ya que a menor concentración de los parámetros de sodicidad, la calidad del agua se mostró mayormente aceptable para uso agrícola en la región.

**Tabla 16. Análisis estadístico por bloques estratificados en los parámetros de las muestras de agua del acuífero Calera. Ciclos de producción 2016-2017.**

Parámetro	E1	E2	E3	E4	E5
<b>pH</b>	7.8 a	7.7 a	7.8 a	7.9 a	7.9 a
<b>CE</b> (μS cm <sup>-1</sup> )	333.2 a	411 a	587.6 a	424.5 a	507 a
<b>Ca<sup>2+</sup></b> (meqL <sup>-1</sup> )	1.8 a	1.7 a	2.6 a	1.7 a	1.6 a
<b>Mg<sup>2+</sup></b> (meqL <sup>-1</sup> )	0.6 b	0.5 b	2.4 a	2.1 ab	2.4 a
<b>Na<sup>+</sup></b> (meqL <sup>-1</sup> )	1.7 a	3.5 a	2.1 a	1.7 a	2.3 a
<b>K<sup>+</sup></b> (meqL <sup>-1</sup> )	0.4 a	0.4 a	0.42 ab	0.29 ab	0.25 b
<b>Tcat</b> (meqL <sup>-1</sup> )	4.6 a	6.3 a	7.6 a	5.9 a	6.6 a
<b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></b> (meqL <sup>-1</sup> )	0.5 a	0.5 a	0.6 a	0.5 a	0.5 a
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b> (meqL <sup>-1</sup> )	4.1 a	4.4 a	3.9 a	4.0 a	3.6 a
<b>Cl<sup>-</sup></b> (meqL <sup>-1</sup> )	0.5 a	0.6 a	1.1 a	0.8 a	1.2 a

<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b> (meqL <sup>-1</sup> )	0.1 b	0.2 ab	0.5 a	0.3 ab	0.4 ab
<b>Tanio</b> (meqL <sup>-1</sup> )	5.4 a	5.9 a	6.3 a	5.7 a	6.0 a
<b>B</b> (mg L <sup>-1</sup> )	0.02 a	- 0.03 a	- 0.14 a	- 0.24 a	- 0.00
<b>P</b> (mg L <sup>-1</sup> )	1.4 a	3.0 a	2.1 a	1.3 a	1.4 a
<b>STD</b> (mg L <sup>-1</sup> )	213.1 a	262.9 a	376 a	271.5 a	324.4 a
<b>SE</b> (meqL <sup>-1</sup> )	2.2 a	4.0 a	3.6 a	2.2 a	3.0 a
<b>SP</b> (meqL <sup>-1</sup> )	0.6 a	0.7 a	1.4 a	1.0 a	1.5 a
<b>RAS</b> (meqL <sup>-1</sup> )	1.5 ab	3.3 a	1.5 ab	1.2 b	1.7 ab
<b>pHc</b> (meqL <sup>-1</sup> )	7.5 a	7.5 a	7.2 a	7.3 a	7.3 a
<b>RASaj.</b> (meqL <sup>-1</sup> )	3.0 b	6.4 a	3.1 ab	2.7 b	3.5 ab
<b>RAS°</b> (meqL <sup>-1</sup> )	1.8 b	4.3 a	1.8 b	1.4 b	1.8 b
<b>CSR</b> (meqL <sup>-1</sup> )	2.2 ab	2.7 a	(-)0.4 b	0.6 ab	0.1 ab
<b>PSP</b> (%)	76.6 a	86.2 a	67.3 a	67.4 a	74.2 a

Nota: no se consideró el NO<sub>3</sub>- en este análisis ya que solo se evaluó durante un periodo. La comparativa se realizó entre los estratos por cada parámetro. Las variables con diferente literal por filas son estadísticamente diferentes entre los estratos.

Sin embargo, para el ciclo de 2017 el análisis observó que el porcentaje que evaluó la calidad del agua del acuífero Calera se incrementó y de igual forma se mostró fuertemente ligado a los tres primeros componentes al concentrar el 90% de los cuales el componente uno registró una mayor presencia con el 43%, éste se integró por las variables del criterio de salinidad, posteriormente los parámetros referentes a sodicidad y condiciones ambientales contribuyeron con el 30 y 17% respectivamente. Así mismo, esta situación nuevamente evidenció una correlación negativa pues, en general para este periodo, al observar menores concentraciones de salinidad, la calidad del agua del acuífero Calera se consideró mayor.

Ambos análisis estadísticos concuerdan con los resultados obtenidos en los periodos evaluados ya que para el ciclo de 2016 se registraron valores más altos en las concentraciones de los parámetros de sodicidad y durante el ciclo de 2017 se identificó un incremento en algunos parámetros de salinidad y una reducción en los de sodicidad, como ya se mencionó anteriormente de acuerdo con Can *et al.* (2014) esta situación pudiera deberse a varios procesos de redistribución de sales ligados a la cantidad de precipitación fluvial, ya que durante el segundo periodo se detectó un incremento del 86% en la cantidad de lluvia.

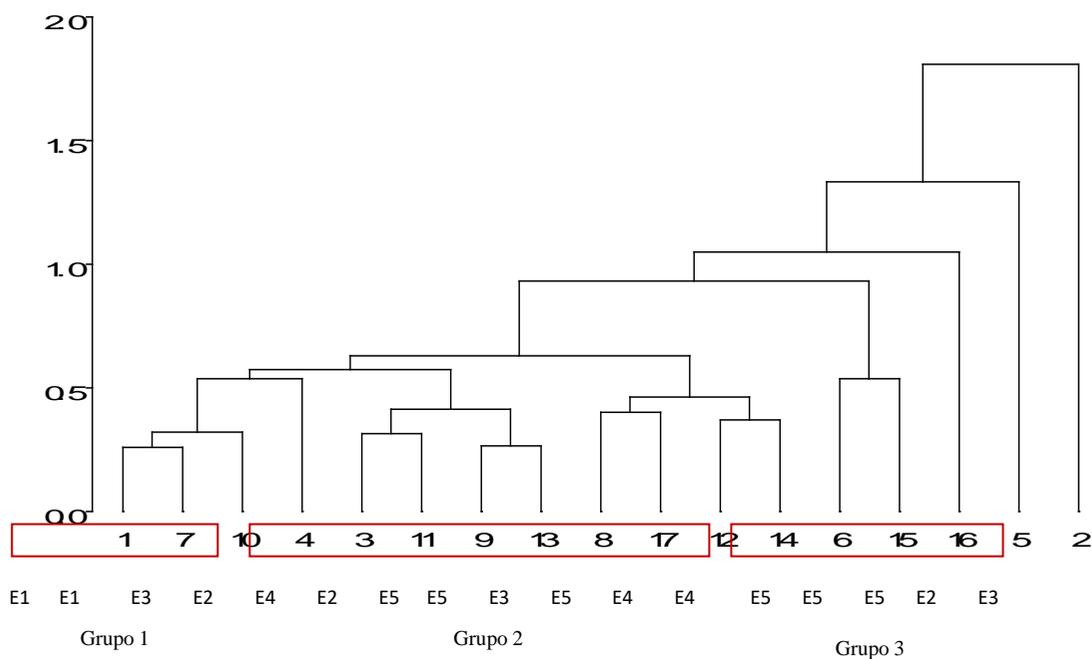
**Tabla 17. Análisis estadístico por componentes principales en los parámetros de las muestras de agua del acuífero Calera. Ciclos de producción 2016-2017.**

Variables	Componentes Principales					
	2016			2017		
	1	2	3	1	2	3
	%					
<b>Prof.</b>	-4	15	54	-8.5	-21	48
<b>pH</b>	-18	20	51	2	-4	66
<b>CE</b>	-6	-19	58	-6.8	-26	47
<b>STD</b>	-26	43	-16	43	5	1
<b>SE</b>	-32	43	-16	43	5	1
<b>SP</b>	-29	35	8	37	24	5
<b>RAS</b>	-29	34	2	30	-6	12
<b>pHc</b>	35	27	6	-5.4	49	21
<b>RAS aj.</b>	32	-14	10	-38	9	0
<b>RAS°</b>	34	30	6	1	50	16
<b>CSR</b>	35	27	0.8	-2.9	51	12
<b>P</b>	-5	7	4	-10	0	4
<b>B</b>	-8	6	9	-2	0	0
<b>NO<sub>3</sub>-</b>				-39	20	1

Nota: Cada una de las variables ocupa un porcentaje de incidencia en la calidad del agua del acuífero no obstante, no representan el porcentaje por componente, el cual se obtiene del programa estadístico.

El análisis estadístico clúster en ambos ciclos reveló tres grupos de pozos los cuales no están correlacionados por su profundidad, más bien esta clasificación se originó por las concentraciones obtenidas en cada parámetro y por la región donde se ubican los diferentes pozos evaluados, de esta forma durante el periodo de 2016 se identificó que el grupo uno correspondió a las concentraciones más elevadas de SE, SP y CSR y las más bajas en cuanto a C.E. y STD, posteriormente en los otros grupos no se observó alguna otra tendencia en la distribución de las concentraciones para cada uno de sus parámetros.

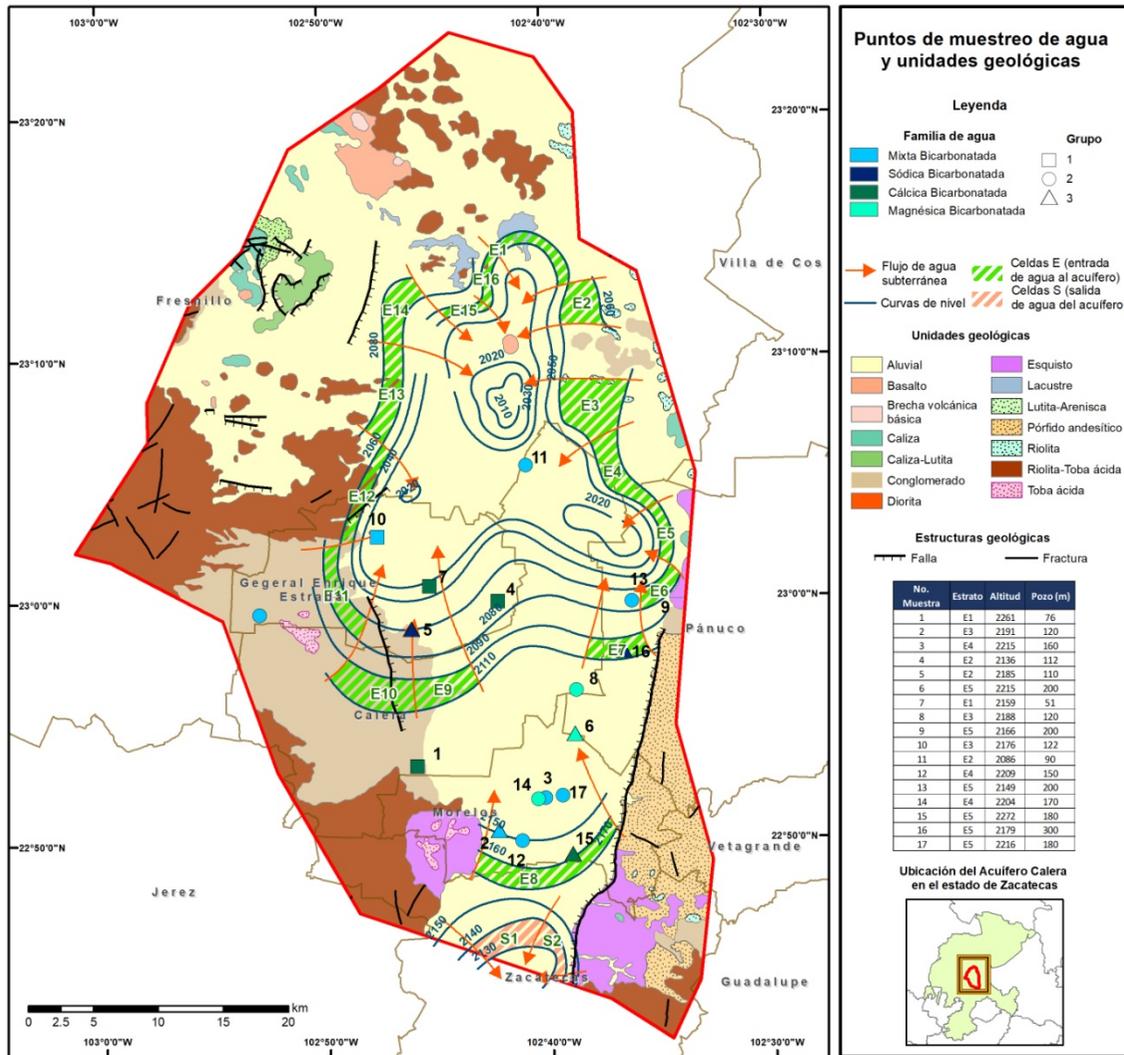
Respecto al periodo de 2017, se encontró que en el grupo uno se posicionaron las concentraciones más bajas para C.E., SE, SP, RAS y CSR, posteriormente en el grupo dos se ubicaron medianas concentraciones y en el grupo tres se evidenció la presencia de las concentraciones más elevadas en los mismos parámetros (Figura 12).



**Figura 12. Análisis clúster y agrupación de los pozos del acuífero Calera de acuerdo a los parámetros evaluados, ciclos 2016-2017.**

Nota: Cada pozo evaluado pertenece a un estrato el cual se especifica debajo del pozo.

En su totalidad los pozos que integraron el grupo uno en el ciclo 2017 se ubican al este de la región central del acuífero Calera, la mayoría del grupo 2 se localiza al oeste de la región central y la mayor proporción del grupo 3 se encuentra en la porción sur del acuífero. Cabe resaltar que los pozos que integraron los tres grupos son los mismos para ambos ciclos de evaluación los cuales durante el segundo periodo registraron la mayor calidad de agua del acuífero, el segundo grupo obtuvo una calidad aceptable y el tercero condicionada el cual en su mayoría se localiza en la región con mayor altitud (Figura 13). No obstante, todos los parámetros se mostraron adecuados para riego agrícola, algunos pueden ser usados bajo ciertas restricciones o situaciones pero sin impedimento alguno para que la producción de Chile se vea afectada.



**Figura 13. Agrupación de los pozos del acuífero Calera de acuerdo a los valores obtenidos en los parámetros evaluados y su ubicación en la región, ciclo 2017.**

#### 4.5 Conclusión

La excesiva cantidad de nutrientes que se aplican para la producción de chile no ha impactado la calidad del agua en la región mediante su infiltración por los movimientos de lixiviación y percolación, ya que los criterios de salinidad, sodicidad y toxicidad evaluados revelaron que la mayoría de sus parámetros se clasificaron como aceptables para uso agrícola, solamente durante el ciclo de 2016 se observaron elevadas concentraciones de fósforo en el 50% de las muestras, ubicándolas como de uso restringido para riego, no obstante, en el periodo de 2017, estas cantidades se redujeron considerablemente para ser usadas sin algún grado de restricción. Por lo tanto, la calidad del agua del

acuífero Calera presenta una fuerte interacción con sus procesos de recarga principalmente por la cantidad de precipitación fluvial en cada periodo, la geología de la región, la velocidad de las corrientes subterráneas y la infiltración por la acción de fallas y fracturas geológicas. Siendo así, el sistema de producción de chile en la región puede ser considerado como un cultivo sostenible ya que hasta el momento no ha incidido sobre uno de los recursos de los que mayormente depende, sin embargo se recomienda realizar un nuevo análisis en temporada de lluvias para contrastar los resultados generados en este análisis y poder diferenciar la cantidad de elementos presentes en el agua de riego para ambas temporadas.

#### 4.6 Literatura citada

- Ávila, J. R., Mojarro, F., Moriasi, D. N., Gowda, P. H., Bautista, C., Echavarría, F. G., Garbrecht, J. D., Steiner, J. L., Howell, T. A., Kanemasu, E. T., Verser, A. J., Wagner, K., & Hernandez, J., (2012) Calibration of SWAT2009 Using Crop Biomass, Evapotranspiration, and Deep Recharge: Calera Watershed in Zacatecas, Mexico Case Study. *Journal of Water Resource and Protection*, 4, 439-450. DOI: [10.4236/jwarp.2012.47051](https://doi.org/10.4236/jwarp.2012.47051).
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1987). *La calidad del agua y su uso en la agricultura* (Vol. 29, 81 p). Estudio FAO Riego y Drenaje, Roma.
- Balmasena, C. & García, Y. (2013) Calidad de las aguas de la cuenca del río Naranjo, Municipio Majibacoa, provincia Las Tuna para el riego. *Cultivos Tropicales*, 34(4), 68-73. Recuperado de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-59362013000400011](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362013000400011).
- Bedmar, F., Gianelli, V., Angelini, H., & Vigilianchino, L. (2015) Riesgo de contaminación del agua subterránea con plaguicidas en la cuenca del arroyo El Cardalito, Argentina. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 41(1), 70-82. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5052348>
- Bermejillo, A., Martí, L., Cónsoli, D., Salcedo, C., Llera, J., Valdés, A., Venier, M., & Troilos, S. (2012) Aptitud para riego del agua subterránea basada en la salinidad y sodicidad en las perforaciones realizadas entre 2004 y 2010 en los Oasis Norte y Centro de Mendoza. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 44(2), 221-240. Recuperado de [http://bdigital.uncu.edu.ar/objetos\\_digitales/4759/t44-2-16-bermejillo.pdf](http://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/4759/t44-2-16-bermejillo.pdf)
- Buccaro, K., Degorgue, M., Lucca, M., Picone, L., Zamuner, E. & Andreoli, Y. (2006) Calidad del agua para consumo humano y riego en muestras del cinturón hortícola de Mar del Plata. *RIA. Revista*

de *Investigaciones Agropecuarias*, 35(3), 95-110. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/864/86435307.pdf>

Can, A., Ramírez, C., Ortega, M., Trejo, C., & Cruz, J. (2008) Evaluación de la relación de adsorción de sodio en las aguas del río Tulancingo, estado de Hidalgo, México. *Terra Latinoamericana*, 26(3), 243-252. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v26n3/v26n3a6.pdf>

Can, A., Ortega, H. M., García, N. E., Reyes, A. L., González, V. A., & Flores, D. (2011) Origen y calidad del agua subterránea en la cuenca oriental de México. *Terra Latinoamericana*, 29(2), 189-200. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v29n2/2395-8030-tl-29-02-00189.pdf>

Can, A., Ortega, H. M., Sánchez, E. I., & Cruz, E. (2014) Calidad del agua para riego en la Sierra Norte de Puebla, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(5), 77-96. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v5n5/v5n5a5.pdf>

Castellanos, J. Z., Ortega, A., Grajeda, O. A., Vázquez, A., Villalobos, S., Muñoz, J. J., Zamudio, B., Martínez, J. G., Hurtado, B., Vargas, P., & Enríquez, S. A. (2002) Changes in the quality of groundwater for agricultural use in Guanajuato. *Terra Latinoamericana*, 20(2), 161-170. Recuperado de <https://www.chapingo.mx/terra/contenido/20/2/art161-170.pdf>

Castellón, J. J., Bernal, R., & Hernández, M. L. (2015) Calidad del agua para riego en la agricultura protegida en Tlaxcala. *Ingeniería*, 19(1), 39-50. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/467/46750924004.pdf>

CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2014) *Registro Público de Derechos de Agua (REPDA)*. Títulos y Permisos de Extracción de Aguas Nacionales y sus Bienes Públicos Inherentes: Comisión Nacional del Agua. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/Repda.aspx?n1=5&n2=37&n3=115>

CONAGUA, Comisión Nacional del Agua (2015) *Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero (3225) Calera, Estado de Zacatecas.*, Reporte interno: Comisión Nacional del Agua.

Contreras, T. C., Vargas, I., & Badilla, E. (2012) Propiedades Hidrogeoquímicas e isotópicas del agua subterránea en la parte media de la cuenca del río Tulián, Puerto Cortés, Honduras. *Revista Geológica de América Central*, 46, 179-188. Recuperado de <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/geologica/article/view/1839/1807>

- Criswell, J. (1998) Pesticides and Water, E-951, Water Quality Handbook for Nurseries, Division of Agricultural Sciences and Nature Resources, Oklahoma, State University.
- Cuellar, E., Ortega, M., Ramírez, C., & Sánchez, E. I. (2015) Evaluación de la relación de adsorción de sodio de las aguas de la red hidrográfica del Valle del Mezquital, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 6(5), 977-989. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v6n5/v6n5a6.pdf>
- Díaz, R. E., Bravo, L. C., Alatorre, L. C., & Sánchez, E. (2013) Presión antropogénica sobre el agua subterránea en México: una aproximación geográfica. *Investigaciones Geográficas*, 82, 93-103. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n82/n82a7.pdf>
- FAO (1976) *Water quality for agriculture*. Irrigation and drainage. American Food Organization. Paper No. 29. Rome.
- Freeze, R. & Cherry, J. (1979) *Groundwater*. (1<sup>ra</sup> ed) Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall.
- Geraldson, C. M. (1954) *The control of black heart of celery*. Proceedings, American Society of Horticulture Science. Recuperado de <https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.7680/page/n3>
- Hernández, J., Gowda, P., Howell, T., Steiner, J., Mojarro, F., Núñez, E., & Avila, J. (2012) Modeling Groundwater levels on the Calera aquifer region in central Mexico using ModFlow. *Journal of Agricultural Science and Technology B*, 2(1), 52-61. Recuperado de [https://scholarworks.boisestate.edu/civileng\\_facpubs/36/](https://scholarworks.boisestate.edu/civileng_facpubs/36/)
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2014) *Carta de Edafología, escala 1:250,000, serie V*, en formato SHP: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reconat/edafologia/default.aspx>
- INIFAP, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (2006) *Tecnología de Producción de Chile Seco*. (Libro técnico No. 05). Centro de Investigación Regional Norte Centro. Campo Experimental Zacatecas: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- INIFAP, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (2009) *Correlación entre indicadores de la calidad del agua para uso agrícola* (folleto técnico No. 66). Centro de Investigación Regional del Noroeste. Campo Experimental Valle del Yaqui Ciudad Obregón, Sonora, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias.

- INIFAP, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (2010) *Estadísticas Climatológicas Básicas Del Estado de Zacatecas. Periodo 1961-2003* (libro técnico No. 03). Centro de Investigación Regional Norte Centro. Campo Experimental Zacatecas: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Medina, E. K., Mancilla, O. R., Larios, M. M., Guevara, R. D., Olguín J. L. & Barreto, O. A. (2016) Calidad del agua para riego y suelos agrícolas en Tuxcacuesco, Jalisco. *IDESIA (Chile)*, 34(6), 51-59. Recuperado de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/idesia/v34n6/aop3516.pdf>
- Morán, J., Ramos, J. A., López, B., Carranco, S., Santacruz, G. (2013) Comportamiento hidrogeoquímico de flujos subterráneos en acuíferos cársticos fracturados, aplicando modelación inversa: Caso Huasteca Potosina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(1), 71-82. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/bsgm/v65n1/v65n1a7.pdf>
- Navarro, L. E., Nuñez, A., Cardona, J., Castro, E., Villalpando & Bueno, A. (septiembre, 2005) Análisis y distribución de elementos mayores en el agua subterránea del acuífero de Calera, Zacatecas. Instituto Nacional de Geoquímica, *XV Congreso Nacional de Geoquímica INAGEQ*. Simposio llevado a cabo en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.
- Nishanthiny, S.C., Thushyanthy, M., Barathithasan, T. & Saravanan, S. (2010) Irrigation water quality based on hydro chemical analysis, Jaffna, Sri Lanka. *Am Eurasian Journal of Agriculture Enviromental Science*. 7(1), 100-102. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/263118906\\_Irrigation\\_Water\\_Quality\\_Based\\_on\\_Hydro\\_Chemical\\_Analysis\\_Jaffna\\_Sri\\_Lanka](https://www.researchgate.net/publication/263118906_Irrigation_Water_Quality_Based_on_Hydro_Chemical_Analysis_Jaffna_Sri_Lanka)
- Nuñez, E., Oesterreich, D. M., Castro & Escalona, F. (octubre, 2004) Interpretación hidrodinámica del acuífero de Calera, Zacatecas, México, utilizando un Sistema de Información Geográfica, *Congreso XXXIII de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos*. Simposio llevado a cabo en la Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, México.
- Ortega, A., Castellanos, J., Aguilar R., Vázquez, A., Alanis, E., Vargas, C., & Urrutia, F. (2002) A Conceptual Model for Increases of Sodium, Sar, Alkalinity and ph at the Independence Aquifer in Guanajuato. *Terra*, 20, 199-207. Recuperado de <https://chapingo.mx/terra/contenido/20/2/art199-207.pdf>
- Ortiz, O. M. (1997) La calidad de las aguas de riego. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 53 p.

- Oyedotun, D. T. & Obatoyinbo, O. (2012) Hydro-geochemical evaluation of groundwater quality in Akoko North West local government area of Ondo State, Nigeria. *Ambiente & Água*, 7(1), 67-80. DOI: 10.4136/1980-993X.
- Padilla, T. A., & García, N. (2012) Hidroquímica del agua superficial de la subcuenca del río Quiscab, Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21, 17-20. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v21s1/rcta04esp12.pdf>
- Palacios, V. O. & Aceves, N. E. (1970) Instructivo para el muestreo, registro de datos e interpretación de la calidad del agua para riego agrícola. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Peña, Y., Santacruz, J., & Charcas, H. (2012) Calidad de agua en pozos de la red de monitoreo del Acuífero del valle de San Luis Potosí, Mexico. *Aqua-LAC*, 4(1), 49-59. Recuperado de <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/Art6-Pena-49-59.pdf>
- Pérez R.; y J. Pacheco (2004) Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán. *Ingeniería*, 8(1), 33-42. Recuperado de <http://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen8/vulnerabilidad.pdf>
- Pérez, E. (2016) Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. 29(3), 3-14. DOI: 10.18845/tm.v29i3.2884.
- Porras, J., López, P. N., Álvarez, C., Fernández, A. & Gimeno, M. V. (1985) La composición química de las aguas subterráneas naturales. Instituto Geológico y Minero de España. Recuperado de <http://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/lib43.htm>
- Richards, L. A. (1990) Diagnosis and improvement of saline and alkali soils (166 pp.). Hand book No. 60. United States Department of Agriculture. Salinity laboratory. Washington D.C. Recuperado de [https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/20360500/hb60\\_pdf/hb60complete.pdf](https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/20360500/hb60_pdf/hb60complete.pdf)
- Robarge, W., Edwards, A. & Johnson, B. (1983) Water and waste water analysis for nitrate via nitration of salicylic acid. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 14(12), 1207-1215. DOI: 10.1080/00103628309367444.
- Robles, C. (2002) Calidad del agua de riego, Distrito de riego no. 19 de Tehuantepec, Oaxaca. *TEMAS*, 39-45. Recuperado de [http://www.utm.mx/edi\\_anteriores/pdf/nfnotas318.pdf](http://www.utm.mx/edi_anteriores/pdf/nfnotas318.pdf)

- Rodier, J. (1990). *Análisis de las aguas* (pp. 186-191). Segunda reimpresión. Barcelona: Omega.
- Wilcox, L. V. (1948). *The Quality of Water for Irrigation* (40 pp.). Tech. Bulletin 962. Washington, DC: Department of Agriculture.
- SAGARPA, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2016) *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Recuperado de [http://nube.siap.gob.mx/cierre\\_agricola/](http://nube.siap.gob.mx/cierre_agricola/)
- Saleem, M., Hussain, A., and Mahmood, G. (2016) Analysis of groundwater quality using water quality index: A case study of greater Noida (Region), Uttar Pradesh (U.P), India. *Cogent Engineering*, 3, 1-11. DOI: 10.1080/23311916.2016.1237927.
- Salgado, J., Palacios, O., Galvis, A., Gavi, F. & Mejía, E. (2012) Efecto de la calidad de agua del acuífero Valle de Guadalupe en la salinidad de suelos agrícolas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(1), 79-95. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v3n1/v3n1a6.pdf>
- SALUD, Secretaría de Salud (1994) NOM-127-SSA1, *Salud Ambiental, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. Recuperado <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html>
- Sánchez, J. A., Álvarez, T., Pacheco, J. G., Carrillo, L., Amílcar, R. (2016) Calidad del agua subterránea: acuífero sur de Quintana Roo, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(4), 75-95. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v7n4/2007-2422-tca-7-04-00075.pdf>
- Sandeep, A., Vinit K., Minakshi P., & Anshu, D. (2011) Assessment of underground water quality: A case study of Jhansi city, Uttar Pardesh, India. *International Multidisciplinary Research Journal*, 1(7), 11-14. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/270448312\\_Assessment\\_of\\_underground\\_water\\_quality\\_A\\_case\\_study\\_of\\_Jhansi\\_city\\_Uttar\\_Pardesh\\_India](https://www.researchgate.net/publication/270448312_Assessment_of_underground_water_quality_A_case_study_of_Jhansi_city_Uttar_Pardesh_India)
- Silva, J. T., Moncayo, R., Ochoa, S., Estrada, F., Cruz G., Escalera, C. Villalpando, F. & Nava, J. (2013) Calidad química del agua subterránea y superficial en la cuenca del río Duero, Michoacán. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4(5), 127-146. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v4n5/v4n5a9.pdf>

- Silva, J.T., Ochoa, S., Cristóbal, D., & Estrada, F. (2006) Calidad química del agua subterránea de la Ciénega de Chapala como factor de degradación del suelo. *Terra Latinoamericana* 24, 503-513. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57324408>
- Suárez, D. L. (1981) Relation between pH and Sodium Adsorption Ratio (SAR) and an Alternative Method of Estimating SAR of Soil or Drainage Waters. *Soil Science Society America Journal*, 45, 464-475. Recuperado de [https://www.ars.usda.gov/ARSTUserFiles/20360500/pdf\\_pubs/P0693.pdf](https://www.ars.usda.gov/ARSTUserFiles/20360500/pdf_pubs/P0693.pdf)
- Sukhatme, P. & Sukhatme, B. (1970) Sampling theory of surveys with application. ISU Press, Ames, Iowa. 452 p. Recuperado de <http://krishikosh.egranth.ac.in/bitstream/1/20300/1/5632.pdf>
- Tartabull, T. & Betancourt, C. (2016) La calidad del agua para el riego. Principales indicadores de medida y procesos que la impactan. *Revista Científica Agroecosistemas*, 4(1), 47-61. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/321951119\\_La\\_calidad\\_del\\_agua\\_para\\_el\\_riego\\_Principales\\_indicadores\\_de\\_medida\\_y\\_procesos\\_que\\_la\\_impactan\\_Water\\_quality\\_for\\_irrigation\\_water\\_main\\_measurement\\_indicators\\_and\\_processes\\_that\\_affect\\_them](https://www.researchgate.net/publication/321951119_La_calidad_del_agua_para_el_riego_Principales_indicadores_de_medida_y_procesos_que_la_impactan_Water_quality_for_irrigation_water_main_measurement_indicators_and_processes_that_affect_them)
- Torres, M. C., Basulto, Y. Y., Cortés, J., García, K., Koh, A., Puerto F. & Pacheco, J. G (2014) Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación del agua subterránea en Yucatán. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 1(3), 189-203. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/era/v1n3/v1n3a1.pdf>
- Tunney, H., Csathó, P. & Ehlert, P. (2003). Approaches to calculating P balance at the field-scale in Europe. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 166, 438-446. DOI: 10.1002/jpln.200321153.
- Valle, F.H. (1992) El agua en la Naturaleza. Serie Apoyos Académicos No. 16. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México.
- Villafañe, R. (2011) Sosalriego: un procedimiento para diagnosticar los riesgos de sodificación y salinización del suelo con el agua de riego. *Bioagro*, 23(1), 57-64. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/237041473\\_Sosalriego\\_un\\_procedimiento\\_para\\_diagnosticar\\_los\\_riesgos\\_de\\_sodificacion\\_y\\_salinizacion\\_del\\_suelo\\_con\\_el\\_agua\\_de\\_riego](https://www.researchgate.net/publication/237041473_Sosalriego_un_procedimiento_para_diagnosticar_los_riesgos_de_sodificacion_y_salinizacion_del_suelo_con_el_agua_de_riego)

- Vivot, E., Rugnaa, C. M., Gioco, A. M., Sánchez, C. I., Ormaechea, M. V. & Sequina, C. J. (2010)  
Calidad del agua subterránea para usos agropecuarios en el departamento Villaguay, Entre Ríos.  
*AUGMDOMUS*, 2, 1-15, Recuperado de <https://revistas.unlp.edu.ar/domus/article/view/96/159>
- Wilcox, L. V. (1948). *The Quality of Water for Irrigation* (40 pp.). Tech. Bulletin 962. Washington, DC: Department of Agriculture.

## 5. ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL SUELO PARA LA PRODUCCIÓN INTENSIVA DE CHILE (*CAPSICUM SP.*) EN LA REGIÓN IRRIGADA POR EL ACUÍFERO, CALERA.

### 5.1 Resumen

En México la producción de chile (*Capsicum spp*) se ha ido intensificando para obtener amplios rendimientos y generar elevados ingresos pues, nuestro país se ha posicionado como el segundo mayor productor y el principal exportador de chile en el mundo generando anualmente alrededor de 2 billones de pesos, no obstante, la intensificación de estos proceso agrícolas son la principal fuente de la degradación del suelo causándole problemas de fertilidad y salinización por lo tanto el objetivo fue evaluar la calidad del suelo mediante sus atributos fisicoquímicos en un sistema de producción intensivo de chile (*Capsicum spp*). Durante dos ciclos consecutivos se realizó un muestreo según la norma NOM-021-RECNAT-2000 a las parcelas donde se cultivó chile durante dos ciclos consecutivos en la región más productiva de chile en el estado de Zacatecas, y se evaluaron aspectos sobre su fertilización y sus características fisicoquímicas, demás se estimó la relación de adsorción de sodio y porcentaje de sodio intercambiable para evaluar su posible sodificación. Así mismo, se realizó un análisis estadístico por bloques al azar, un análisis clúster y un análisis por componentes principales para identificar los parámetros que tienen una mayor incidencia en la calidad del suelo de la región. Se encontró que son suelos con un alto contenido de arena y pobres en nutrientes con problemas de compactación, principalmente por el sistema convencional mecanizado y la falta de estrategias de conservación de los suelos, por lo tanto la dinámica agrícola esta impactando la calidad de su suelo.

**Palabras clave:** Calidad de suelo, producción de chile, agricultura intensiva.

### 5.2 Introducción

En México, la creciente necesidad de producir alimentos para una población en constante aumento ha provocado la expansión de la agricultura hacia diversas regiones áridas y semiáridas del noroeste del país. En éstas, se requiere hacer uso de fertilizantes inorgánicos y sistemas de labranza convencional sin periodos de descanso si se desea obtener rendimientos económicamente atractivos (López *et al.*, 2003). Derivado de lo anterior, el cultivo de chile (*Capsicum spp.*) en México ocupa el noveno lugar a nivel nacional en superficie sembrada en riego fertilizada con químicos y el décimo en cuanto a superficie sembrada mecanizada en riego (SIAP, 2016).

De esta manera, la producción de este cultivo con el paso del tiempo se está intensificando no sólo para obtener amplios rendimientos; si no para generar elevados ingresos pues nuestro país se ha posicionado como el segundo mayor productor y el principal exportador de Chile en el mundo debido a que el año pasado se enviaron más de 370 mil toneladas al extranjero, lo que equivale al casi al 10% de la producción mundial generando ingresos de más de 2 billones de pesos durante el periodo. Además se considera como el segundo cultivo hortícola socioeconómicamente más importante debido a que participa con cerca del 20% de la producción hortícola del país, y su consumo per cápita es de 16 kg anuales, de esta forma genera el 39% de la población económicamente activa (SNIIM, 2017).

No obstante, la intensificación de los procesos agrícolas en la actualidad son la principal fuente de la degradación del suelo lo cual constituye uno de los principales problemas ambientales que afecta a la humanidad, impactando en la capacidad productiva y en la calidad de los recursos naturales (Duval *et al.*, 2016). Por su parte, Roveda *et al.*, (2012) señalan que la explotación de los suelos sin considerar una adecuada reposición de los nutrientes extraídos, lleva a procesos de degradación y agotamiento de los nutrientes presentes en los suelos. De acuerdo con López *et al.*, (2017) la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) registró un incremento en la pérdida de la fertilidad del suelo así como su salinización, principalmente por actividades agrícolas intensivas afectando casi 34.04 millones de hectáreas durante el año de 2017.

Ante esta situación Roveda *et al.*, (2012) señalan un manejo eficiente de los suelos a través de un análisis a nivel de zonas productoras que permita generar recomendaciones con la precisión que se requiere a nivel de finca y a nivel de regiones productivas, por lo que el objetivo de este trabajo es evaluar la calidad del suelo mediante sus atributos físicoquímicos en un sistema de producción intensivo de Chile (*Capsicum spp*).

## **5.3 Materiales y métodos**

### **5.3.1 Área de estudio**

El área de estudio se localiza en la región que comprende el acuífero Calera, sus límites están determinados por las coordenadas 22°38' a 23°15' de latitud norte y 102°35' a 103°00' de longitud oeste, cubre una superficie aproximada de 2,226 km<sup>2</sup> que equivale al 3% de la superficie del estado de Zacatecas. La mayor proporción del acuífero se circunscribe en los municipios de Fresnillo, Calera, Zacatecas, Gral. Enrique Estrada, Morelos y Panuco. El clima de la región es semiárido, su precipitación varía entre los 400 y 450 mm anuales y la evaporación asciende a 2,330.7 mm por año. Su

geología es muy variada pero predominan rocas ígneas, calizas, dolomitas y rocas metamórficas fracturadas de los períodos triásico y cretácico por movimientos tectónicos. Los suelos más representativos son Regosol calcárico, Regosol eútrico, Xerosol cálcico, Xerosol lúvico y el que tiene un mayor predominio es el Catañozen lúvico, éstos generalmente son para uso agrícola y presentan un porcentaje de arcilla entre 15 y 39, Conductividad eléctrica de 1.4 a 8.1 dS m<sup>-1</sup>, pH de 6.5 a 8.0, contenido de materia orgánica entre 0.4 y 1.6 % y una capacidad de intercambio catiónico de 7.6 a 24 Cmol(+) Kg<sup>-1</sup>, (CONAGUA, 2015; INIFAP, 2010; Ávila *et al.*, 2012; Hernández *et al.*, 2012; INEGI, 2014; FAO, 2007).

En esta zona la producción del cultivo de chile (*Capsicum ssp.*) se considera como la principal actividad económica y fuente de empleo en el estado de Zacatecas, debido a que contribuye con el 20% del PIB y el 24% de la población económicamente activa además, se concentra casi el 50% de la superficie sembrada en riego con este cultivo, por lo que su dinámica se ha intensificado en los últimos 20 años al hacer uso de tecnologías para incrementar sus rendimientos pues algunas variedades han superado la media nacional ya que solamente en esta región el cultivo consume alrededor del 30% de la concesión del acuífero, el 21% de la superficie mecanizada y el 22% del uso de fertilizantes químicos en el estado, esto con la finalidad de satisfacer los mercados nacionales e internacionales ya que el consumo per cápita de 16 kg anuales, así mismo anualmente se exportan alrededor de 86,000 toneladas (SNIIM, 2017; INEGI, 2017; SAGARPA, 2017; CONAGUA, 2015).

### 5.3.2 Fertilización

Se realizó un muestreo aleatorio simple bajo las consideraciones de Sukhatme & Sukhatme (1970). La población de estudio se determinó con base en el listado de beneficiarios por el Programa de Apoyos Directos al Campo (PROCAMPO). Se identificó, a los productores que frecuentemente cultivan chile bajo sistemas que incluyen el uso de diversos productos agroquímicos, maquinaria, semilla mejorada y sistemas de riego para generar mayores rendimientos y alcanzar una ganancia económica significativa (Vázquez & Vignolles, 2015). Para calcular el tamaño de la muestra se fijó una precisión del 10% y una confiabilidad del 95%, y se determinó a través de la siguiente fórmula (Sweeney & Williams, 2008):

$$n = \frac{NZ^2_{\alpha/2}S^2}{Nd^2 + Z^2_{\alpha/2}S^2}$$

Donde:

$n$  = Tamaño de la muestra

$d$  = Precisión

$N$  = Tamaño de población

$Z_{\alpha/2}$  = Confiabilidad

$S^2$  = Varianza

El resultado fue un tamaño de muestra de 30, posteriormente se elaboró un cuestionario estructurado y se utilizó la técnica de entrevista directa propuesta por Aguirre (1979) a los productores de Chile como herramienta para registrar información sobre los fertilizantes y agroquímicos más utilizados en la región, cantidades aplicadas en cada etapa fenológica del cultivo de Chile y los costos que generan, posteriormente la información obtenida se contrastó con la tecnología recomendada por INIFAP (2006) y para ello se estimaron las cantidades para cada material fertilizante atendiendo a las fórmulas establecidas para fertilización de base y fertirrigación a través de las siguientes expresiones (Bravo *et al.*, 2002):

$$Cf = \frac{100 dr}{c}$$

Donde:

$Cf$  = Cantidad de fertilizante necesario para cada elemento NPK en kg/ha

$dr$  = Dosis recomendada o fracción para cada elemento en kg/ha

$c$  = Concentración del elemento en el fertilizante

$$Fc = (mz)(ds)$$

Donde:

$Fc$  = Cantidad de fertilizante de calibración (en gramos por 10 metros)

$mz$  = Cantidad de mezcla por hectárea. Es la suma de cada uno de los fertilizantes utilizados para preparar dicha fórmula o fracción fertilizante

$ds$  = Distancia entre surcos en metros.

### 5.3.3 Muestreo de suelos y análisis químicos

El estudio se realizó, al final de los ciclos productivos de 2016 y 2017 donde se seleccionaron respectivamente 22 y 10 sitios en los cinco municipios que abarcan la mayor parte del acuífero Calera (Tabla 18.) donde se definieron áreas homogéneas con base en la clase de suelo, color, textura, superficie cultivada, intensificación y frecuencia de producción del cultivo de Chile ya que se tomaron

en cuenta parcelas donde se cultivó chile en dos ciclos consecutivos. De igual forma se consideraron dos blancos que corresponden a sitios sin actividad agrícola. Para la toma de muestras se tomó en cuenta la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreo y análisis, cada parcela evaluada se ubicó con un GPS y las coordenadas se ubicaron en un mapa temático.

**Tabla 18. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo.**

No. de muestra	Propietario	Localización		Altitud (m)
		N	W	
1	Álvaro Castañón González	22°53.117'	102°45.697'	2261
2	Álvaro Castañón González	22°53.117'	102°45.697'	2261
3	Sergio Vázquez Luján	22°50.430'	102°42.298'	2191
4	Gustavo Carrillo Acuña	22°51.741'	102°40.199'	2215
5	Gustavo Carrillo Acuña	22°51.741'	102°40.199'	2215
6	Octavio Menchaca Trejo	22°59.900'	102°42.215'	2136
7	Gerardo Campos	22°48.023'	102°41.684'	2211
8	Pascual Bañuelos Carrillo	22°58.792'	102°41.101'	2185
9	Manuel Campos	22°54.382'	102°38.833'	2215
10	José Manuel Martínez Valadez	23°00.564'	102°45.266'	2159
11	Juan Bautista Ruíz Hernández	22°56.197'	102°38.737'	2188
12	Mario Mauricio	22°59.199'	102°35.374'	2166
13	Enrique Reyes	23°02.616'	102°47.585'	2176
14	Enrique Reyes	23°02.616'	102°47.585'	2176
15	Hilario Loera Trejo	23°05.514'	102°40.877'	2086
16	Rafael Trejo Hernández	22°49.981'	102°41.261'	2209
17	Rafael Trejo Hernández	22°49.981'	102°41.261'	2209
18	José Trinidad Sandoval	22°59.850'	102°36.185'	2149
19	Javier Carrillo Acuña	22°51.695'	102°40.523'	2204
20	Javier Carrillo Acuña	22°51.695'	102°40.523'	2204
21	Raudel Menchaca Trejo	22°49.418'	102°39.011'	2272
22	Raudel Menchaca Trejo	22°49.418'	102°39.011'	2272
*23	Blanco 1	22°57.809'	102°36.568'	2179
*24	Blanco 2	22°51.833'	102°39.426'	2216

Nota: Los sitios duplicados corresponden a diferentes tipos de suelo localizados en la misma parcela.

Se tomó a una profundidad de 30 cm una muestra de 1 a 2 kg compuesta por cinco submuestras distribuidas en toda la parcela para abarcar la mayor superficie del terreno, posteriormente el suelo se secó a la sombra a temperatura ambiente y se tamizó a través de una malla de 2 mm para realizar los análisis físicos y químicos en el laboratorio de suelo y agua de la universidad Autónoma de Nayarit mediante los procedimientos descritos en la Norma Oficial Mexicana para el análisis de fertilidad de los suelos (SEMARNAT, 2002) (Tabla 19.).

**Tabla 19. Técnicas analíticas utilizadas para la determinación de los atributos usados como indicadores de calidad del suelo del acuífero Calera.**

Parámetros	Determinación	Método
Físicos	Textura	Bouyoucos (1962)
	Densidad Aparente	Terrón parafinado
	Potencial de Hidrógeno (pH)	Lectura de potenciómetro en solución acuosa relación 1:2
	Conductividad Eléctrica (CE)	Conductímetro
	Materia Orgánica (M.O.)	Walkey y Black (1934)
Químicos	Nitrógeno (N)	Micro-Kjeldahl, Bremner (1965)
	Fósforo (P)	Olsen et al. (1954)
	Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	Método de extracción con acetato de amonio, Lora (1972)
	Bases Intercambiables: Calcio (Ca <sup>+2</sup> ), magnesio (Mg <sup>+</sup> ), sodio (Na <sup>+</sup> ), potasio (K <sup>+</sup> )	Método de extracción con acetato de amonio, Lora (1972)
	Carbonato (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ), bicarbonato (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ), cloro (Cl <sup>-</sup> ), sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) y boro (B).	Método por succión de vacío de la pasta de saturación, Aragüés y Millán (1986)

Posteriormente, para evaluar una posible sodificación de los suelos, se estimó la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) y Porcentaje de Sodio Intercambiable mediante las siguientes expresiones:

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{+2} + Mg^+}{2}}}$$

Donde:

RAS = Relación de Adsorción de Sodio

Na<sup>+</sup> = Concentración del ion Na<sup>+</sup> en mmoles L<sup>-1</sup>

Ca<sup>+2</sup> = Concentración del ion Ca<sup>+2</sup> en mmoles L<sup>-1</sup>

$Mg^+$  = Concentración del ion  $Mg^+$  en  $mmoles L^{-1}$

$$PSI = \frac{Na_i}{CIC} \times 100$$

Donde:

$PSI$  = Porcentaje de Sodio Intercambiable

$Na_i$  = Sodio intercambiable en  $Cmol(+) Kg^{-1}$

$CIC$  = Capacidad de intercambio catiónico en  $Cmol(+) Kg^{-1}$

Los resultados de los análisis químicos y de los parámetros estimados se clasificaron como muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto (Tabla 20.), de acuerdo a los valores límite presentados por SEMARNAT (2002) y Álvarez *et al.* (2010). Así mismo, se realizó una clasificación de los suelos para los años de 2016 y 2017 con base en las concentraciones obtenidas para RAS y CE a través de un diagrama de Richards el cual se elaboró con el programa QualiGraf en su versión 1.17, de acceso gratuito en idioma portugués. Por su parte, se usó el programa XLSTAT, 2017 para elaborar un diagrama de tres fases y representar gráficamente la clase textural de los suelos en ambos ciclos. Con base en los resultados obtenidos en cuanto a fertilidad, salinidad y sodicidad del suelo se elaboró una propuesta de fertilización para el cultivo de chile cubriendo sus necesidades y evitando la aplicación de cantidades excesivas de nutrientes.

**Tabla 20. Clasificación de los parámetros químicos evaluados en el suelo.**

Parámetro	Unidad	Clase				
		Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
pH		<5.0	5.1-6.5	6.6-7.3	7.4-8.5	>8.5
CE	$\mu S cm^{-1}$	< 100	101-250	251-750	751-2250	>2250
MO	%	< 0.5	0.6-1.5	1.6-3.5	3.6-6.0	>6
N	%	<0.05	0.05-0.10	0.10-0.15	0.15-0.25	>0.25
P	$mg Kg^{-1}$	<4	5-9	10-15	16-20	>21
$K^+$	$Cmol (+) Kg^{-1}$	<0.2	0.2-0.3	0.3-0.6	>0.6	-
CIC	$Cmol (+) Kg^{-1}$	<5	5-15	15-25	25-40	>40
$Ca^{+2}$	$Cmol (+) Kg^{-1}$	<2	2-5	5-10	>10	-
$Mg^+$	$Cmol (+) Kg^{-1}$	<0.5	0.5-1.3	1.3-3.0	>3.0	-
B	ppm	<0.39	0.39-0.79	0.80-1.29	1.30-2.10	> 2.10
RAS	$mmol L^{-1}$	<1	1-10	11-18	19-24	>24
PSI	%	<7	7-15	15-20	20-30	>30

### **5.3.4 Análisis estadístico**

El análisis de los datos obtenidos fue para un diseño en bloques completos al azar comparando ambos ciclos de producción para identificar si se presentaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en las propiedades físicas y químicas que determinaron la calidad de suelo durante el periodo de evaluación, así mismo, se elaboró un análisis por componentes principales para identificar los principales parámetros que tienen una mayor incidencia en la calidad del suelo de la región que comprende el acuífero Calera. Finalmente se realizó un análisis clúster para identificar los grupos de parcelas con características similares y establecer si el grado de tecnificación está relacionado con la clasificación de los parámetros evaluados en cada muestra suelo. El análisis estadístico se realizó con el programa SAS (Statistical Analysis System) versión 9.0.

## **5.4 Resultados y discusión**

### **5.4.1 Fertilización**

Los fertilizantes más usados en la región como fuente de N son fosfonitrato, sulfato de amonio y urea. Como fuente de P, fosfato monoamónico, fosfato diamónico y ácido fosfórico. Como fuente de K nitrato de potasio y cloruro de potasio. También, se puede utilizar algún otro fertilizante que contenga alto contenido de N P K. De acuerdo con INIFAP (2006) los tratamientos en los que se aplican fungicidas consisten en la prevención de enfermedades ocasionadas por hongos que van con la semilla o aquéllos nativos del suelo, el tratamiento de nutrición le proporciona al cultivo elementos químicos esenciales para su desarrollo normal. El uso de herbicidas e insecticidas son para el control de excesivas poblaciones de arvenses y artrópodos y el uso de mejorados del suelo y correctores de pH tratan de corregir las propiedades de suelo para que los nutrientes puedan estar mayormente disponibles para el cultivo.

Según la directrices de INIFAP (2006) las fórmulas recomendadas para el cultivo de chile en la región corresponden a 220N-100P-150K para nutrición base en surcos la cual se puede alcanzar con 87 Kg ha<sup>-1</sup> de urea, 33 Kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato de calcio y 40 Kg ha<sup>-1</sup> de sulfato de potasio, para fertirrigación se indican 200N-75P-100K que se pueden obtener con 960 Kg ha<sup>-1</sup> de sulfato de amonio, 163 Kg ha<sup>-1</sup> de fosfato monoamónico y 200 Kg ha<sup>-1</sup> de sulfato de potasio. Aproximadamente con las fuentes del material fertilizante que se mencionan, en promedio se sugiere la aplicación de 1,483 Kg ha<sup>-1</sup> fraccionados en 1.12 Kg por cada 10 m lineales para que se alcance el nivel óptimo disponible para el cultivo. Además se sugiere el uso de 2.5 L ha<sup>-1</sup> de herbicida, 500 mL ha<sup>-1</sup> de correctores de pH, 1 L ha<sup>-1</sup>

de insecticidas, 600 g ha<sup>-1</sup> de fungicidas y 500 g ha<sup>-1</sup> de mejoradores de suelo, según sea necesario. Tomando en cuenta la aplicación de todos los insumos se genera un costo de \$16,903.6 ha<sup>-1</sup> y de acuerdo a INIFAP (2006) se alcanzan rendimientos entre 2.5 y 3.5 Ton ha<sup>-1</sup>.

No obstante, los productores del acuífero están aplicando 1,800 Kg ha<sup>-1</sup>, diferidos en 1.37 Kg por cada diez metros lineales lo que equivale a 317 kilos más de los que recomienda INIFAP (Tabla 21.), además se están utilizando insumos que elevan el costo ya que éste supera los \$ 50,000 ha<sup>-1</sup>, esto podría ser consecuencia de la poca asesoría técnica proporcionada por instituciones gubernamentales que apoyen la actividad agrícola, pues la mayor parte de la asesoría que se recibe proviene de las casas comerciales de agroquímicos. Con esta tecnología los productores están generando rendimientos entre 2.5 y 4.5 Ton ha<sup>-1</sup>. Si se empleara la tecnología que propone INIFAP se tendría un ahorro de \$33,648 y se reduciría la cantidad de material fertilizante en un 18% y se mantendrían los rendimientos.

**Tabla 21. Principales agroquímicos usados para la producción de chile en la región del acuífero, Calera.**

	Tratamiento	Agroquímicos	Cantidad Recomendada	Costo por unidad (\$)	Cantidad por unidad	Aplicación en el ciclo	TOTAL (\$)
ALMÁCIGOS	Desinfección de la cama de almácigo	Interguzán	990 g 20 m <sup>2</sup>	275	1 Kg	1	275
	Desinfección de la semilla	Ridomil	5 g 1 Kg semilla	760.42	1 Kg	1	3.8
		Fosfato Diamónico 18-46-00	2.8 Kg 20 m <sup>2</sup>	391	50 Kg	1	391
	Nutrición base	Sulfato de Amonio 21-00-00-22(s)	1.8 Kg 20 m <sup>2</sup>	144.5	50 Kg	1	144.5
			1 g 20 m <sup>2</sup>	560.15	1 Kg	2	560.2
	Segundo tratamiento de nutrición	Súper fosfato de calcio simple 00-20-00-12(S)-20(Ca)	3 Kg m <sup>2</sup>	161.5	50 Kg	1	161.5
CULTIVO	Aplicación de herbicida	Trifluralina	3 L ha <sup>-1</sup>	169.84	1 L	1	509.5
		Carbendazim	60 g ha <sup>-1</sup> en 100 L	288.32	1 Kg	1	17.3
	Tratamiento de la plantula	Previcur	60 ml ha <sup>-1</sup> en 100 L	757.35	1 L	1	45.4
		Ridomil	60 g ha <sup>-1</sup> en 100 L	760.42	1 Kg	1	45.6
	Aplicación de mejoradores de suelo	Ácidos Humicos	500 g ha <sup>-1</sup>	150	1 Kg	6	900
		Fosfato Diamónico 18-46-00	250 Kg ha <sup>-1</sup>	391	50 Kg	2	3,519
	Tratamiento de nutrición base	Sulfato de Amonio 21-00-00-22(s)	450 Kg ha <sup>-1</sup>	144.5	50 Kg	2	2,456.5
			Superfosfato de calcio simple 00-20-00-12(s)-20(Ca)	650 Kg ha <sup>-1</sup>	161.50	50 Kg	2

Aplicación preventiva contra enfermedades	Agrimycin 500	500 g ha <sup>-1</sup> en 100 L	100	1 Kg	2	100
Aplicación de foliares	Growgreen	2 Kg ha <sup>-1</sup>	80	1Kg	3	480
Correctores de pH	Surfacid	500 mL ha <sup>-1</sup>	100	1 L	7	350
Aplicación contra plagas	Monitor 600	500 mL ha <sup>-1</sup>	165.75	1 L	2	165.8
Refuerzo de nutrición	Fosfonitrato 32-02-00	150 Kg ha <sup>-1</sup>	297.5	50 Kg	1	892.5
	Fosfato Monoamónico 11-52-00	150 Kg ha <sup>-1</sup>	450.5	25 Kg	6	17,748
	Nitrato de Potasio 12-00-46	150 Kg ha <sup>-1</sup>	493	25 Kg	6	17,748
<b>TOTAL</b>						<b>50,551</b>

En cuanto al tratamiento de nutrición base y atendiendo a las recomendaciones de INIFAP (2006) para éste, se puede observar que los productores solo aplican el 86% de nitrógeno de lo que se indica, no obstante, como fuente de fósforo se observa un excedente en un 230% y no se considera la aplicación de ningún material como fuente de potasio. En cuanto a fertirrigación, y bajo las consideraciones de INIFAP (2006), se está aplicando solamente el 24% de nitrógeno de lo que se señala, además como fuente de fosforo se supera la dosis en un 625% al igual que para potasio ya que alcanza un 414% más de lo indicado. Por lo tanto para el caso de nitrógeno se está usando en menores proporciones de lo establecido en ambos tipos de nutrición, y para el caso de fosforo se puede observar que las cantidades son muy elevadas, esto podría ser consecuencia de la idea que se tiene sobre la deficiencia de P en la región al ser suelos de origen calcáreo. Así mismo, para el potasio hay un excedente en sus dosis en el refuerzo de nutrición, esto podría ser consecuencia de la falta de K en el tratamiento de nutrición base para compensar este micronutriente.

Esta información no coincide con la reportada por Reyes *et al.*, (2006) en su evaluación de rentabilidad de chile seco para el cultivo de chile en la misma región, ya que únicamente observaron el uso de 220 kg ha<sup>-1</sup> de N, el cual no se reporta con qué fuente de material fertilizante se satisfizo la demanda de nitrógeno, también se registró la aplicación de 100 kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato de calcio triple, 100 kg ha<sup>-1</sup> de sulfato de potasio y 4.5 L ha<sup>-1</sup> de otros agroquímicos. Con esta tecnología solo se alcanzaron rendimientos de 1.57 Ton ha<sup>-1</sup>, por lo que se considera que los insumos usado en la región propician mejores condiciones de disponibilidad de nutrientes para alcanzar mayores niveles de productividad.

## 5.4.2 Análisis químico de los suelos

### 5.4.2.1 Indicadores de calidad del suelo

#### 5.4.2.1.1 pH

De acuerdo con INEGI (2004) el pH reportado para los suelos de la región que comprende el acuífero Calera es de  $8\pm 0.4$  para Castañozem,  $7.6\pm 1$  en los Xerosoles,  $8\pm 0.7$  para Regosol calcárico y  $6.5\pm 1.1$  en Regosol eutríco. En el caso de los Regosoles eutrícos de acuerdo con Roveda *et al.*, (2012) la corrección del pH ácido se puede realizar con la aplicación de cal dolomítica, especialmente cuando se presentan deficiencias de Mg en los suelos o en caso de presentarse desbalances en las relaciones  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+}$  y  $\text{K}^{+}$ .

Los resultados obtenidos en la región, mostraron que en el pH no existieron diferencias significativas debido a que en ambos ciclos según la norma NOM-021-RECNAT-2000 en su totalidad las muestras se clasificaron como neutras y al ser de este tipo Orsag *et al.*, (2013) establece que se incrementa en gran medida la disponibilidad de nutrientes para el cultivo como Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Nitrógeno (N), Manganeso (Mn), Cobre (Cu) y Zinc (Zn). Así mismo, durante el periodo evaluado se pudo apreciar que el pH registró una ligera reducción (Tabla 22.), los resultados conseguidos en cuanto a pH son similares a los que reportan Prieto *et al.*, (2013) y Villareal *et al.*, (2012) en sus respectivos estudios sobre calidad de los suelos al sur del estado de Hidalgo, México y en las provincias panameñas de Herrera y Los Santos.

Pues, identificaron que la disminución paulatina del pH es una tendencia que se observa para los suelos de los sistemas de producción convencional, dicha condición puede deberse al uso intensivo de los suelos, la ausencia de empleo de las prácticas de conservación, la preparación inadecuada del suelo, ausencia de rotación de cultivos, además de la aplicación de fertilizantes en especial las fuentes nitrogenadas amoniacales, como el nitrato, sulfato de amonio y la urea que producen reacciones acidificantes con liberación de protones  $\text{H}^{+}$ . Todas estas características son propias del sistema de producción de Chile en la región del acuífero Calera y por lo tanto, la dinámica pudiera estar acidificando sus suelos, no obstante, de acuerdo con Astier *et al* (2002) para que se pueda percibir un cambio evidente en este parámetro se requiere una evaluación de cinco años consecutivos.

**Tabla 22. Parámetros químicos de las muestras de suelo del Acuífero, Calera; ciclos 2016-2017.**

Parámetro	Periodo de evaluación				
	2016	2017	Parámetro	2016	2017
<b>pH</b>	7.1±0.6a	6.9±0.8 a	<b>N</b> (mg Kg <sup>-1</sup> )	20±7 a	14±5 a
<b>CE</b> (µS cm <sup>-1</sup> )	142± 37.8 a	147± 56.5 a	<b>P</b> (mg Kg <sup>-1</sup> )	2.3±0.4 a	0.3±0.6 b
<b>Arcilla</b> (%)	23.7±3.1 a	17.8±3.7a	<b>K</b> (Cmol (+) Kg <sup>-1</sup> )	0.07±0 a	0.1±0 a
<b>Arena</b> (%)	58.1±1.8 a	60±7.1.5 a	<b>Ca</b> (Cmol(+) Kg <sup>-1</sup> )	0.4±0 a	0.3±0.4 a
<b>Limo</b> (%)	18.1±1.9 a	16.2±0.5 a	<b>Mg</b> (Cmol (+) Kg <sup>-1</sup> )	0.5±0.3 a	0.3±0.1 b
<b>Densidad A.</b> (g cm <sup>-3</sup> )	1.43±0.1 a	1.47±0 a	<b>Na</b> (Cmol (+) Kg <sup>-1</sup> )	0.2±0.1 a	1.3 ±0.1 b
<b>C. campo</b> (pss)	24.7±4.2 a	21.9±2.2 a	<b>Bases</b> (Cmol (+) Kg <sup>-1</sup> )	10.2±3.2 a	10.7±2.5 a
<b>P. Marchitez</b> (pss)	11.7±3.2 a	12.2±1.5 a	<b>CIC</b> (Cmol (+) Kg <sup>-1</sup> )	20.5±6.1 a	14.1±4.9 b
<b>Carbono orgánico</b> (%)	2.0±0.4 a	1.3±0.4 b	<b>RAS</b> (Cmol (+) Kg <sup>-1</sup> )	12±6.2 a	14±3.2 a
<b>M.O.</b> (%)	3.5±0.7 a	2.2±0.7 b	<b>PSI</b> (%)	16.6±10.5 a	14±3.4 a

#### 5.4.2.1.2 Conductividad eléctrica

De acuerdo con FAO(2007) e INEGI (2004) la Conductividad eléctrica para los suelos Castañozem de la región registran en promedio 220±180 µS cm<sup>-1</sup>, 150±130 µS cm<sup>-1</sup> en los Regosoles y 580±130 µS cm<sup>-1</sup> en los Xerosoles, no obstante, los valores de CE obtenidos en la región del acuífero Calera evidenciaron que en ambos ciclos las muestras no presentaron diferencias significativas y se situaron por debajo del promedio para cada tipo de suelo de esta zona presentando una clasificación (C1), como suelos muy ligeramente salinos de acuerdo con (SEMARNAT, 2002) equivalente a un bajo contenido de sales < 250 µS cm<sup>-1</sup>, por lo tanto en cuanto a este parámetro el suelo se considera apto para la producción de chile ya que Manzano *et al.*, (2014) indican que no le generará problemas de rendimiento al cultivo al ser una variable asociada estrechamente con éste. De acuerdo con Larson & Pierce (1991) la evaluación de los años agrícolas de 2016 y 2017 es tiempo suficiente para percibir alguna variabilidad que incida directamente sobre la calidad del suelo.

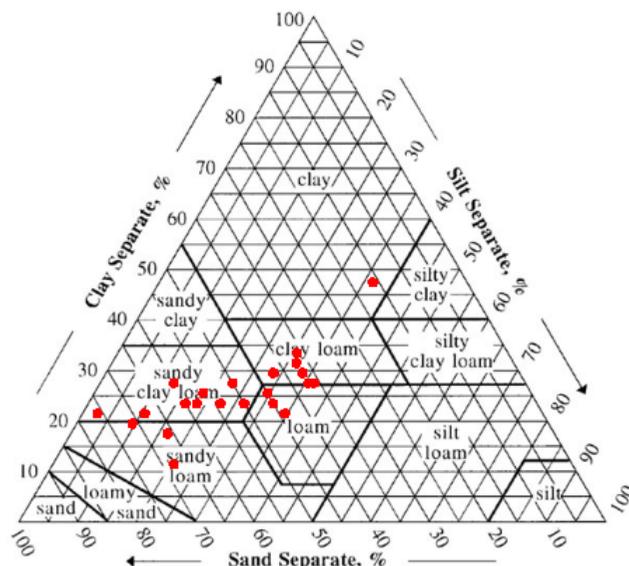
Los resultados obtenidos coinciden con Salgado *et al.*, (2012) en su investigación sobre salinidad en suelos agrícolas en la región del acuífero del Valle de Guadalupe, San Luis Potosí ya que registraron valores por debajo de los 175 250 µS cm<sup>-1</sup>. La baja conductividad eléctrica que se presenta la región que comprende el acuífero Calera según Sarabia *et al.*, (2012) y Orsag *et al.*, (2013) podría deberse a que son suelos de textura media con alta permeabilidad y buen drenaje interno o bien de

acuerdo con Manzano *et al.*, (2014) la frecuente aplicación de mejoradores de suelo como insumos para la producción de Chile en esta zona puede estar contrarrestando los efectos de salinidad por la excesiva aplicación de nutrientes. Sin embargo la realización de lavados periódicos sería una opción menos costosa para mantener la CE del suelo en niveles óptimos.

#### **5.4.2.1.3 Textura**

Durante los ciclos de 2016 y 2017 se observó que el 77% de las muestras correspondieron a suelos del tipo Castañozem lúvico debido a que éste tiene un mayor predominio en la región, el 9% de los sitios se ubicaron en suelo Regosol calcárico, el 9% en Xerosol lúvico y el 5% en Regosol eutrítico. Según las directrices de FAO (2007) e INEGI (2004) generalmente el porcentaje de arcilla contenido en los Castañozem es de  $39\pm 9$ , no obstante los resultados obtenidos evidenciaron que la cantidad de arcilla se encuentra ligeramente baja al concentrar  $25\pm 8$ , esto pudiera deberse a que las muestras presentaron altos contenidos de arena en las texturas finas, medianas y gruesas al clasificarse como suelos francos, francos arcillosos, franco arcillo arenosos, franco arenosos y arcillosos (Figura 14.). Esta información coincide con la generada por Roveda *et al.*, (2012) en su diagnóstico de fertilidad para los suelos colombianos ya que la mayoría de los suelos evaluados se clasificaron como franco arenosos y franco arcillosos ya que de igual forma presentaron altos contenidos de arena.

En relación a los Regosoles y Xerosoles, FAO (2007) e INEGI (2004) establecen que el porcentaje de arcilla se localiza entre el  $21\pm 10$  y  $30\pm 17$  respectivamente, lo cual coincide para el caso de los sitios donde se muestrearon Regosoles al registrar  $24\pm 2$ , sin embargo en los Xerosoles la cantidad de arcilla solo alcanzó un  $15\pm 4$ , esto podría ser efecto de la textura franco arcillo arenosa que se presentó para ambos tipos de suelo. En su mayoría las muestras se consideran como aptas para la producción de Chile ya que sólo en el 23% equivale a texturas gruesas y finas se recomienda realizar algunas estrategias para mejorar la textura como la aplicación de materia orgánica pues de acuerdo con Martínez *et al.*, (2008) esta práctica favorece la formación de agregados y espacio poroso del suelo que incrementan su capacidad de aireación e infiltración y retención del agua.



**Figura 14. Clase textural de las muestras de suelo en el Acuífero Calera durante el periodo de 2016-2017.**

Las clases texturales permiten ver que los suelos de la región tienen una capacidad amortiguadora baja, pues, entre más arcillosos sean los suelos, la capacidad amortiguadora es mayor de tal manera que el medio de cultivo hasta el momento no es vulnerable a las modificaciones que se realicen a través del manejo, haciendo que las plantas sean menos susceptibles al efecto de los insumos aplicados (Salgado *et al.*, 2012).

#### 5.4.2.1.4 Densidad Aparente

Arshad & Coen (1992) señalan que para percibir algún cambio en el parámetro de densidad aparente por lo menos se requiere un periodo de evaluación de 10 años ya que los cambios en la densidad aparente de igual forma reflejan variaciones en la estructura del suelo. Por esta razón no se encontraron diferencias significativas en el periodo de evaluación. Por su parte, las muestras presentaron un rango entre 1.42 y 1.47 g cm<sup>3</sup> características propias de los suelos de textura franco arenosa de acuerdo con Prieto *et al.*, (2013), por lo tanto se puede observar que los suelos agrícolas de la región del acuífero Calera hasta el momento presentan ligeros problemas de compactación ya que López *et al.*, (2017) y Orsag *et al.*, (2013) indican que al estar dentro de esta escala no muestran una buena capacidad de infiltración, retención del agua, aireación ni una mayor fijación de nutrientes provenientes de la fertilización para el cultivo de chile en la región. Esta información es similar a la que reportan Orsag *et al.*, (2013) en su evaluación de la fertilidad de los suelos para la producción sostenible de quinua al sur

de Bolivia, ya que encontró valores entre 1.40 y 1.49 g cm<sup>3</sup> para los suelos franco arenosos los cuales presentaban problemas de erosión.

No obstante, aunque estadísticamente la densidad aparente en la región del acuífero fue similar durante su periodo de estudio, se pudo observar un ligero aumento al término del segundo ciclo. Rodríguez *et al.*, (2006) señalan que esta situación es muy frecuente en los sistemas de producción convencional como el caso del cultivo de chile en el acuífero Calera, ya que en su estudio sobre calidad de suelo en Venezuela, compararon un suelo altamente mecanizado con un suelo no disturbado y encontraron que la calidad del suelo decrece con los incrementos en la densidad aparente y a su vez está asociada con la disminución en la macroporosidad y espacio poroso total, así como en los parámetros asociados al flujo de agua en el suelo además, y por lo tanto la dinámica agrícola intensiva provoca problemas de compactación de los suelos.

Ante este escenario en la zona de estudio para mantener la DA en un rango aceptable se recomienda la aplicación constante de materia orgánica o bien la implementación de prácticas de conservación en los suelos donde frecuentemente se cultiva chile, ya que Martínez *et al.*, (2008) en su estudio sobre carbono orgánico y propiedades del suelo encontraron que al agregar materia orgánica aumentaban los poros de mayor diámetro que retienen el agua con menor energía. Por su parte Cantú *et al.*, (2007) realizaron un estudio de calidad de suelos en zonas productoras de Argentina encontrando que la materia orgánica tiene gran influencia sobre la estabilidad de agregados, infiltración del agua y densidad aparente, así mismo, Torres *et al.*, (2006) en su investigación sobre calidad del suelo bajo diferentes prácticas de manejo conservacionista en Venezuela, identificó que al someter un agroecosistema a prácticas de labranza de conservación desarrolló una porosidad más favorable en los primeros 25 cm del suelo después de cuatro años.

#### **5.4.2.1.5 Materia orgánica**

López *et al.*, (2003) establece que la mayoría de los suelos de las zonas áridas y semiáridas contienen de 1 a 3% de materia orgánica, de acuerdo a esta condición las muestras analizadas en la región del acuífero Calera se encuentran dentro de esta escala debido a que concentraron un promedio del 3.5±0.7% durante el ciclo de 2016 y 2.2±0.7% para el de 2017, además se pudo apreciar una ligera reducción en el contenido de MO, no obstante en ambos periodos los resultados se mostraron como estadísticamente diferentes ya que ambos años se clasificaron con un contenido medio de materia orgánica de acuerdo con los criterios de SEMARNAT (2002). Esta información coincide con la que reporta Álvarez *et al.*, (2010), Roveda *et al.*, (2012) y Rendón *et al.*, (2011) en sus respectivas

investigaciones sobre calidad del suelo para la producción de agave en la zona de los Altos de Jalisco; uchuva en los municipios de Silvania y Granada, Colombia; mora y aguacate en el Centro de Investigación La Selva (CORPOICA), Colombia ya que registraron un contenido medio de materia orgánica en las muestras evaluadas, lo cual se le atribuyó a las propiedades de cada suelo.

Aun con la reducción de materia orgánica que se presentó durante el estudio, hasta el momento en ambos periodos el contenido de materia orgánica en los suelos donde se cultiva chile en la región se encuentra por encima de lo que establecen INEGI (2004) y FAO (2007) ya que indican que para los Castañozems en la región se tiene un registro del  $1.6\pm 1.1\%$ ,  $1.30\pm 1.1\%$  en Regosoles y  $0.5\pm 0.2\%$  para los Xerosoles. Esto pudiera ser consecuencia del frecuente uso de mejoradores de suelo para la producción de chile en la región ya que de acuerdo con Manzano *et al.*, (2014) éstos favorecen el suministro de oxígeno y humedad a las raíces del cultivo, condiciones óptimas para una mayor acumulación y permanencia de materia orgánica sobre el suelo.

A pesar de ello, la reducción del contenido de materia orgánica de un ciclo a otro puede ser consecuencia del sistema de producción convencional de la región ya que Martínez *et al.*, (2008) indica que desde la incorporación de nuevos suelos para actividades agrícolas hasta convertirse en sistemas intensivos de cultivo, las entradas de carbono orgánico son inferiores a la emisión de bióxido de carbono a la atmósfera por lo que se producen pérdidas de MO que oscilan entre el 30 y 50% del nivel inicial, además la reducción de material húmico de los suelos cultivados es superior a la tasa de formación de humus de suelos no perturbados. Ante este contexto es importante que dentro de las prácticas de manejo se incluya la adición de abonos orgánicos para la producción de chile en la región a fin de mejorar el nivel de materia orgánica en los suelos pues Álvarez *et al.*, (2010) establece que esto también contribuiría a corregir las deficiencias de algunos nutrientes. Así mismo, debe considerarse la práctica de encalado para acelerar la descomposición de la materia orgánica fresca del suelo.

De igual forma, se recomienda realizar la incorporación de residuos vegetales acompañados con prácticas de labranza mínima ya que de acuerdo con Torres *et al.*, (2006) en su investigación sobre indicadores e índices de calidad del suelo bajo diferentes prácticas de manejo en Guárico, Venezuela, éstas prácticas incrementaron el contenido de materia orgánica. Varios estudios concuerdan en que la MO del suelo es el indicador que ejerce una influencia más significativa sobre la calidad del suelo y su productividad ya que Rodríguez *et al.*, (2009) indica que se incrementa la actividad biológica y propiedades físicas del suelo, retención del agua y su fertilidad, de esta forma se evitaría el uso de mejoradores químicos en la producción de chile en el acuífero Calera para mantener la estructura del

suelo y se reduciría la aplicación excesiva de materiales fertilizantes debido a que la MO de acuerdo con Terrazas *et al.*, (2010) es una fuente de reserva de nutrientes sobre todo de nitrógeno, elemento esencial para el desarrollo de cualquier cultivo y de esta forma los productores de Chile de la región podrían observar la reducción de sus costos de producción.

#### **5.4.2.1.6 Micronutrientes (N, P, K)**

De acuerdo a SEMARNAT (2002) la cantidad de nitrógeno inorgánico que se registro en 2016 fue de  $20 \pm 7$  y en 2017 de  $14 \pm 5$  mg  $\text{Kg}^{-1}$  ambos estadísticamente similares, situándose en una clasificación baja ya que el muestreo se realizó al final del ciclo agrícola y por lo tanto el nitrógeno va disminuyendo paulatinamente debido a la mineralización y asimilación por parte del cultivo de Chile. Así mismo, esta situación también pudiera ser consecuencia de la presencia de elevadas concentraciones de arena sobre la mayoría de las muestras de suelo de la región del acuífero Calera ya que de acuerdo con Salgado *et al.*, (2012) este tipo de suelos presentan un medio suficientemente aireado y por medio del agua de riego el nitrógeno se mueve rápidamente o bien, de igual forma podría deberse al bajo contenido de materia orgánica, característica de los suelos de las zonas áridas y semiáridas ya que López *et al.*, (2003) señala que éste es el elemento que limita a los cultivos en este tipo de regiones.

Por su parte López *et al.*, (2017), Orsag *et al.*, (2013), Campitelli *et al.*, (2010) en sus respectivos estudios sobre calidad de suelo para la producción agrícola en Guanajuato, México; Oruro, Bolivia y Córdoba, Argentina, de igual forma registraron concentraciones bajas de nitrógeno al final de los ciclos productivos y la característica en común que presentaron estos suelos es que se localizan en regiones semiáridas. Por lo tanto se estima que no hay un exceso en la aplicación de fertilizantes nitrogenados para la producción de Chile en la región ya que al presentarse valores bajos en el suelo al final del ciclo se requiere la aplicación de constantes dosis para satisfacer su demanda en cada una de las etapas para el siguiente año productivo. Además Larson y Pierce (1991) indican que con un periodo de evaluación de dos años es suficiente para percibir un cambio importante en este parámetro.

Respecto al contenido de fósforo se identificó una ligera reducción de un ciclo a otro al registrar concentraciones de  $2.3 \pm 0.4$  y  $0.3 \pm 0.6$  mg  $\text{Kg}^{-1}$  y a pesar de ser estadísticamente diferentes en ambos años, las muestras se clasificaron con un bajo contenido en este micronutriente ya que Salgado *et al.*, (2012) señalan que generalmente el contenido total de fósforo en los suelos de América Latina es relativamente bajo, sobre todo en aquellos de origen calcáreo como es el caso de la región del acuífero Calera por ello, es muy frecuente que se detecten concentraciones inferiores a  $4$  mg  $\text{Kg}^{-1}$  en la solución del suelo. Esta información coincide con los resultados que reportan Orsag *et al.*, (2013) en sus

respectivos análisis sobre fertilidad de suelos para la producción de quinua en Bolivia y uchuva en Colombia pues, revelaron bajas concentraciones de fósforo en los suelos analizados debido a alta capacidad de fijación de fosfatos en los suelos de estas regiones.

La reducción en el contenido de P que presentaron los suelos, se explicaría por su baja reposición pues, de acuerdo con Sainz *et al.*, (2012) en los sistemas de producción intensivos su tasa de recuperación solo alcanza entre el 40 y 50% del exportado por cada ciclo, además, los suelos de esta región muestran un contenido medio de MO y un alto contenido de arena, propiedades que se asocian a un escaso poder de reposición de fósforo. No obstante, se ha registrado la aplicación de fosfato diamónico 18-46-00 y fosfato monoamónico 11-52-00, materiales fertilizantes que presentan un alto porcentaje como fuente de P por lo tanto las pérdidas de este elemento de acuerdo con INIFAP (2006) podría ser consecuencia de los procesos de evaporación, fijación o lixiviación, o bien, podría deberse a la alta presencia de material calcáreo en estos suelos y su incremento mediante la aplicación de superfosfato de calcio simple 00-20-00-12(s)-20(Ca), resultando una muy baja solubilidad de los fertilizantes mezclados, ante esta situación, con la finalidad de mejorar el aprovechamiento del fósforo se recomienda usar fertilizantes fosfatados con baja relación Ca/P, conjuntamente esto contribuirá a reducir los costos significativamente. Larson & Pierce (1991) establecen que solo se requieren dos años para notar algún cambio importante sobre este parámetro.

En lo que se refiere a potasio, se encontraron valores estadísticamente similares durante el periodo de análisis los cuales se clasificaron con un bajo contenido de acuerdo a SEMARNAT (2002) pues, se arrojaron concentraciones de  $0.07 \pm 0 \text{ Cmol (+) Kg}^{-1}$  en el 2016 y  $0.1 \pm 0 \text{ Cmol (+) Kg}^{-1}$  en el 2017, esto podría ser consecuencia del bajo contenido de arcilla que presentan los suelos de la región y a su baja capacidad de intercambio catiónico ya que FAO (2007) e INEGI (2004) indican que usualmente presentan una CIC de media a baja, además Aguado *et al.*, (2002) señalan que la baja disponibilidad de potasio se presenta frecuentemente en suelos erosionados. Además en su estudio sobre dinámica de Potasio en suelos de los estados de Veracruz, Chiapas, Tlaxcala, Puebla y México, identificó que los que presentaron menores cantidades de K fueron principalmente suelos sometidos a un uso intensivo.

Aunado a esto, INIFAP (2006) menciona que el consumo de fertilizante potásico en México ha aumentado en los últimos años, por lo que se infiere que dicho aumento es consecuencia del agotamiento de los reservorios de K en los suelos cultivados y porque los productores han observado que los cultivos responden a la adición de esos materiales sin embargo, Salgado *et al.*, (2012) expone

que cuando la demanda de potasio del cultivo queda satisfecha, una aplicación mayor no tendrá ningún beneficio para el cultivo en rendimiento y calidad, sino sólo ocasionará incrementar los costos de producción de manera infructuosa. Por lo tanto para incrementar la disponibilidad de K en los suelos de la región se recomienda la incorporación de los residuos de cosecha para mejorar el contenido de MO y estructura de los agregados e incrementar el contenido de arcillas.

#### **5.4.2.1.7 Bases intercambiables**

De acuerdo con Prieto *et al.*, (2013) suelos de la regiones áridas y semiáridas son ricos en calcio y por lo tanto, la saturación de bases es muy alta, por su parte, FAO (2007) e INEGI (2004) señalan que para los suelos de la región del acuífero Calera su porcentaje de saturación se encuentra en una escala del 83 al 100%, a pesar de ello, se registró una baja concentración de  $\text{Ca}^{+2}$  durante su análisis al obtener  $0.4 \pm 0$  y  $0.3 \pm 0.4$   $\text{Cmol (+) Kg}^{-1}$  en los ciclos de 2016 y 2017 así mismo, no se observaron diferencias estadísticas. Esto puede ser consecuencia de los bajos niveles de calcio exportados por el cultivo de chile, o bien podría deberse a la formación de carbonato de calcio, el cual limita la disponibilidad de calcio para el cultivo ya que este es un compuesto químico que generalmente se localiza en los suelos de las regiones áridas y semiáridas.

Sin embargo, los niveles de  $\text{Mg}^{+}$  de igual forma se clasificaron como bajos en ambos periodos ya que solamente alcanzaron  $0.5 \pm 0.3$   $\text{Cmol (+) Kg}^{-1}$  en el 2016 y  $0.3 \pm 0.1$   $\text{Cmol (+) Kg}^{-1}$  en el 2017, por lo tanto la mayoría de los elementos que integran la bases intercambiables en los suelos del acuífero son escasos, esto ha provocado que el porcentaje de saturación por bases sea solamente del 10% por lo que dista del 90% de su valor en la región. Esta condición podría ser consecuencia de una posible degradación de los suelos agrícolas en esta zona ya que en el ciclo de 2017 las concentraciones de  $\text{Na}^{+}$  superaron ampliamente a las de  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+}$ , por lo que podría inhibir la disponibilidad y capacidad de absorción de los cultivos para estos nutrientes.

Además, Torres *et al.*, (2006) y Estrada *et al.*, (2017) en sus respectivos estudios sobre calidad de suelo para evaluar su fertilidad en Guárico, Venezuela y Oaxaca México, encontraron que los que presentaron menor disponibilidad de nutrientes y bases intercambiables eran aquellos que presentaron algún tipo de erosión sobre todo aquellos en los que no se realizaban estrategias de conservación como la incorporación de materiales orgánicos a los suelos, por lo tanto se recomienda la implementación de un programa de labranza mínima y la aplicación de residuos orgánicos en los suelos donde se cultiva chile para prevenir algún tipo de degradación del suelo y evitar la poca disponibilidad de bases intercambiables.

#### 5.4.2.1.8 Capacidad de Intercambio catiónico

En relación a las directrices de FAO (2007) e INEGI (2004) se especifica que usualmente los suelos Castañozem de la región presentan una capacidad de intercambio catiónico de  $24 \text{ Cmol (+) Kg}^{-1}$  considerándose como alta contradictoriamente, durante el estudio se observó que los suelos revelaron una CIC media en 2016 y baja en 2017 debido a que se estimaron valores de  $20.5 \pm 6.1$  y  $14.1 \pm 4.9$  respectivamente, además se mostraron como estadísticamente diferentes. En cuanto al tiempo que se requiere para observar un cambio importante en este parámetro Arnold *et al.*, (1990) indica que puede ser un periodo de 0 a 10 años.

La baja capacidad de intercambio catiónico que se registró en la región se encuentra asociada al reducido contenido de arcilla que presentaron la mayoría de las muestras ya que según Astier *et al.*, (2002) ésta le brinda al suelo propiedades tales como estructura, porosidad y capacidad de retención de agua que permiten un crecimiento y desarrollo adecuado del cultivo. Además el contenido de materia orgánica en los suelos donde se cultiva chile se clasificó como medio y por lo tanto incidió directamente sobre la poca capacidad de intercambio catiónico pues, de acuerdo con Pérez (2013) la materia orgánica abarca un conjunto de sustancias de origen muy diverso, que desarrollan un papel importante en la fertilidad, conservación y presencia de vida del suelo ya que le proporciona coloides de alta capacidad de intercambio catiónico.

Estos coloides presentan cargas negativas, hecho que les permite absorber cationes  $\text{H}^+$  y cationes metálicos ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ) e intercambiarlos en todo momento, no obstante, al ser escasa la materia orgánica en los suelos de la región no puede proporcionarlos provocando que el porcentaje de bases intercambiables sea limitado, lo cual revela que éstos suelos se consideran pobres en nutrientes pues, Martínez *et al.*, (2008) señalan que la CIC es una propiedad química del suelo estrechamente vinculada a su fertilidad ya que indica la capacidad que éste tiene para suministrarle calcio, magnesio y potasio a los cultivos, lo cual no se cumple para el caso de los suelos donde se produce chile en la región del acuífero Calera, pues estos parámetros se clasificaron como bajos en sus concentraciones de acuerdo con SEMARNAT (2002), esto se debe a que los suelos tienen altas cantidades de arena y por lo tanto su estructura presenta una baja retención de nutrientes.

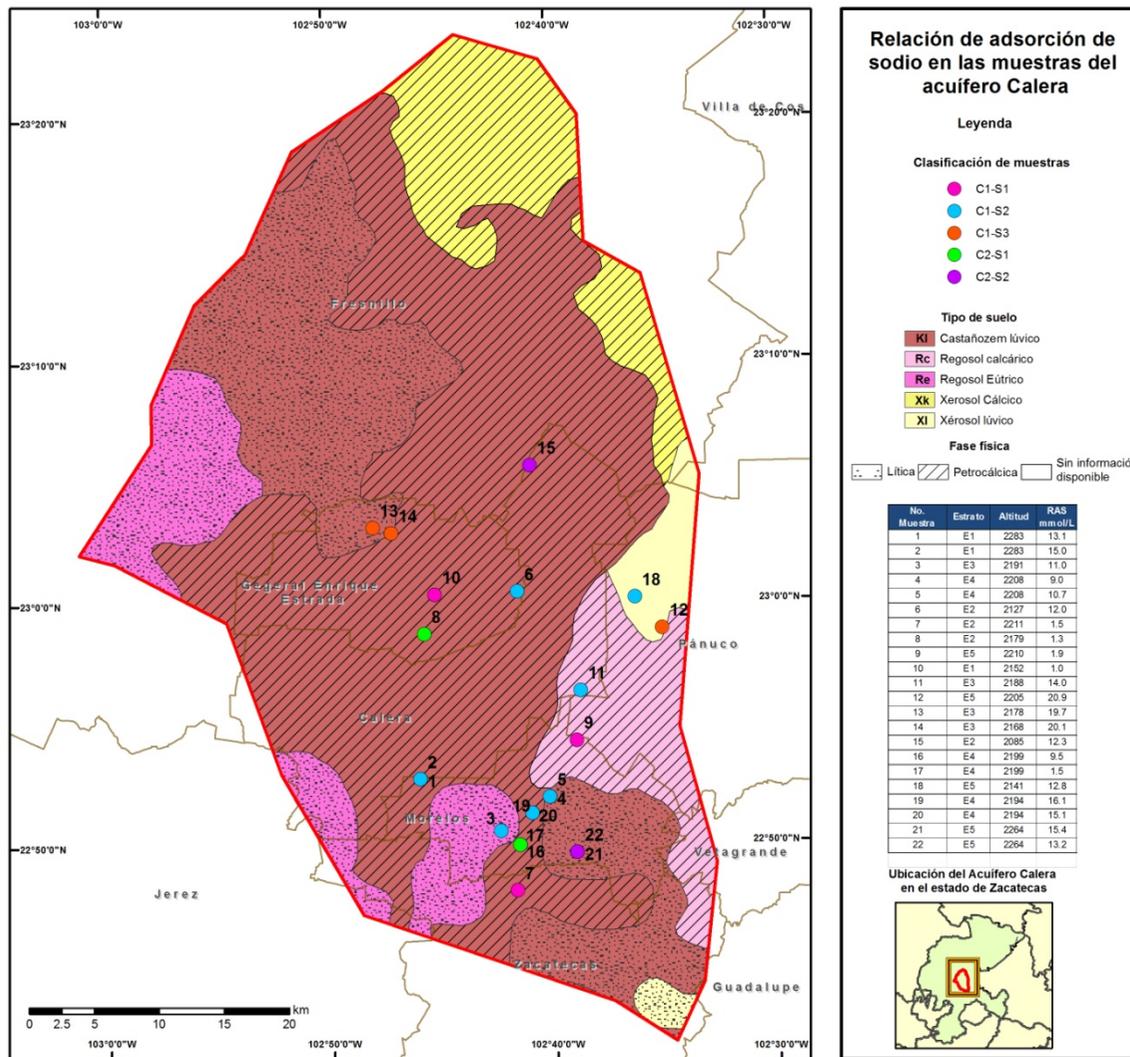
Ante este contexto se recomienda la aplicación de materia orgánica ya que de acuerdo con Orsag *et al.*, (2013) ésta mejora de las propiedades físicas del suelo, y aumenta la capacidad amortiguadora en los suelos. Por su parte por López *et al.*, (2003) en su estudio sobre calidad de suelo en regiones agrícolas áridas y semiáridas registraron una capacidad de intercambio catiónico baja no obstante, ésta

se incrementó conforme aumentó el contenido de arcilla, de igual forma Cardona *et al.*, (2005) en su análisis de fertilidad de los suelos para la producción de Café en Colombia observaron bajas concentraciones de CIC las cuales se incrementaron al agregar diferentes tratamientos de materia orgánica. Aguado *et al.*, (2002) en su análisis sobre calidad de suelo agrícola en Texcoco, México registraron reducidos valores de CIC sobre todo en aquellos que presentaron un sistema de agricultura intensiva, no obstante al realizar algunas estrategias de conservación de los suelos como la aplicación de residuos orgánicos se pudo apreciar un notable incremento en la capacidad de intercambio catiónico.

#### **5.4.2.1.9 Relación de adsorción de sodio y Porcentaje de sodio intercambiable**

La relación de adsorción de sodio en conjunto con la conductividad eléctrica clasificó a la mayoría de los suelos de la región como C1-S2, los cuales no se consideran como sódicos aunque la RAS es media, la CE es baja y al ser de este tipo Sarabia *et al.*, (2011) indican que no permite que se acumulen altas concentraciones de sales sódicas. Sin embargo, de igual forma se observaron algunas muestras del tipo C2-S2 y C1-S3 (Figura 15) las cuales exhiben un riesgo moderado para la sodificación de los suelos ya que éstos revelan un contenido entre medio y alto de sales sódicas, esto se debe principalmente por la alta concentración de  $\text{Na}^+$  que se registró en los suelos durante el segundo periodo de evaluación ya que se incrementó significativamente pero sin llegar a representar un problema grave, a pesar de ello, se debe evaluar frecuentemente este elemento ya que de acuerdo con González *et al.*, (2016) si se llegarán a presentar altas cantidades de sodio en el suelo puede inhibir la disponibilidad de  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^+$  y  $\text{K}^+$  para el cultivo, además la relación de adsorción de sodio podría elevarse hasta causar problemas de defloculación y pérdida de la estructura del suelo.

La información obtenida coincide con Sarabia *et al.*, (2011) pues registró moderadas concentraciones de RAS en los suelos agrícolas evaluados en el Valle de San Luis Potosí México debido a que las concentraciones de  $\text{Na}^+$  se mantuvieron elevadas. Respecto al parámetro de PSI en el ciclo de 2016 se clasificó como moderadamente sódico, pero en el ciclo de 2017 disminuyó su concentración y cambió a ligeramente sódico por lo tanto en cuanto a este parámetro no existe un riesgo potencial de sodificación en el complejo de cambio que pueda provocar dispersión y expansión de las partículas de los suelos agrícolas en la región y tampoco se observa la obstrucción de los espacios porosos y disminución de la conductividad hidráulica.



**Figura 15. Clasificación de las muestras de suelos en la región del acuífero Calera, de acuerdo a su conductividad eléctrica y relación de adsorción de sodio.**

El incremento de  $\text{Na}^+$  de un ciclo a otro podría ser consecuencia del uso frecuente de fertilizantes y agroquímicos para la producción del cultivo de chile ya que de acuerdo con Torres *et al.*, (2016) en su estudio sobre salinización y sodificación de los suelos por la aplicación de materiales fertilizantes en la depresión de Quíbor, Venezuela, esta actividad ha llevado al incremento de la acumulación de sales sódicas en la capa arable del suelo, las cuales causan efectos negativos en sus propiedades físicas, químicas y biológicas sobre todo este problema es más frecuente en las áreas ubicadas en las zonas áridas y semiáridas que se han abierto a la agricultura intensiva.

Por su parte Gasca *et al.*, (2011) indica que los suelos afectados por sales de  $\text{Na}^+$  son comunes en las regiones áridas y semiáridas donde la precipitación anual es insuficiente para satisfacer las necesidades de evotranspiración de las plantas, como resultado las sales del suelo no se disuelven y se acumulan en cantidades que son perjudiciales para el cultivo. Otro mecanismo de sodificación de los suelos de la región de acuerdo con Can *et al.*, (2011) podría ser por el intercambio catiónico entre  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$  proveniente de las aguas de riego, ya que al momento de precipitarse las sales de sodio quedan en la solución del suelo causando problemas en su estructura por su constante acumulación. Ante esta situación se recomienda realizar un análisis de las aguas de riego para evaluar su contenido de  $\text{Na}^+$ .

#### **5.4.3 Análisis estadístico de componentes principales**

El análisis por componentes principales reveló que el 88% de la calidad del suelo se concentra en los tres primeros componentes, de los cuales el componente 1 es el que tiene un mayor porcentaje de incidencia al concentrar el 36% (Tabla 23.) y se encuentra relacionado con los parámetros de textura de suelo como porcentaje de arcilla, porcentaje de arena y densidad aparente, por lo tanto si el suelo de la región del acuífero Calera, presenta una estructura porosa que le permita tener una mayor capacidad de infiltración y retención de agua y nutrientes habrá una mayor calidad de éste para la producción del cultivo de chile en la región.

En el segundo componente se agrupa el 32% de la calidad del suelo y se encuentra relacionado con las variables que tiene que ver con el aporte y disponibilidad de nutrientes como pH, carbono orgánico, materia orgánica y fósforo. Se identificó que el pH es neutro y por lo tanto presenta una mayor disponibilidad de nutrientes para que sean aprovechados por el cultivo, sin embargo el contenido de carbono orgánico, materia orgánica y fósforo se clasificó como bajo y por lo tanto los suelos no están recibiendo un buen aporte de nutrientes. Finalmente el componente tres se encuentra ligado a las variables de sodificación de los suelos como conductividad eléctrica, relación de adsorción de sodio y porcentaje de sodio intercambiable, las cuales explican el 19% de la calidad del suelo del acuífero. Para esta situación se ha observado que la cantidad de sodio se incrementó ampliamente en el segundo ciclo evaluado lo cual está provocando que la calidad del suelo disminuya.

La información que arrojó el análisis por componentes contrasta con la que obtuvo Roveda *et al.*, (2012) en su diagnóstico de la fertilidad química de los suelos para la producción de uchuva en Colombia, ya que en su análisis por componentes encontraron que el 33% de la calidad de sus suelos estaban relacionados con las variables del complejo de intercambio como CIC y bases intercambiables

(Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> y Na<sup>+</sup>) ya que en estos suelos se presentaron deficiencias en los contenidos de nutrientes, sobre todo de estos elementos.

**Tabla 23. Componentes principales que inciden en calidad de suelo para uso agrícola en el Acuífero, Calera. Ciclo 2017.**

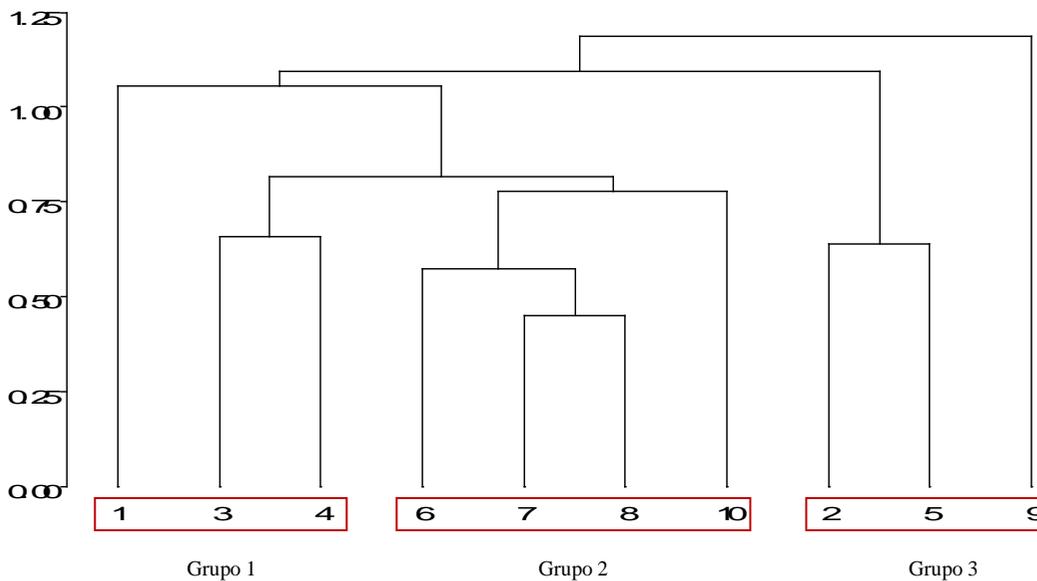
Parámetros	Componente		
	1	2	3
CE	0.21	0.03	0.39
pH	-0.21	0.34	-0.14
Arcilla	0.22	0.2	-0.37
Arena	0.24	-0.35	0.19
Limo	-0.29	0.2	0.12
Densidad	0.26	-0.19	-0.32
Carbono	-0.25	0.36	-0.11
MO	-0.26	0.24	0.34
P	0.2	0.24	0.34
Bases	-0.36	0.01	0.03
CIC	0.09	-0.22	-0.4
RAS	0.18	0.17	0.38
PSI	-0.31	-0.25	0.38
B	-0.31	-0.27	0.22

#### 5.4.4 Análisis estadístico clúster

El análisis clúster reveló tres grupos de parcelas (Figura 16.) en las cuales se cultivó chile durante dos ciclos continuos, en el grupo 1 se concentraron los parámetros que presentan una mayor calidad del suelo ya que se registró un menor porcentaje de arena en la textura de sus suelos, un mayor contenido de arcilla, la menor relación de adsorción de sodio y el mayor contenido de materia orgánica de todas las muestras evaluadas. La característica en común que presentan estas parcelas es que son las que tienen un menor grado de tecnificación pues solo utilizan sistemas de riego por goteo, aplicación de agroquímicos, el secado del cultivo es sobre la misma planta y usan semilla criolla.

Caso contrario se presentó en el grupo numero 3 ya que es donde se localizan los parámetros de menor calidad pues se encontró un mayor contenido de arena, la relación de adsorción de sodio mayor y el menor contenido de materia orgánica, esto coincide a que es el sistema el mayormente tecnificado pues emplea un sistema de riego por goteo, aplicación de agroquímicos, acolchado, semilla híbrida, producción de plantula en invernadero y el cultivo se somete a secadora. Esto pudiera ser consecuencia de las practicas intensivas de labranza y fertilización para la producción de chile en la región ya que de

acuerdo con Gasca *et al.*, (2011) en su evaluación sobre calidad de suelo en Colombia, observaron que la excesiva aplicación de fertilizantes y agroquímicos así como los sistemas de labranza convencional ocasionan varios problemas físicos y químicos en el suelo.



**Figura 16. Análisis clúster y agrupación de las parcelas evaluadas en la región del acuífero Calera de acuerdo a los parámetros evaluados, ciclos 2016-2017.**

### 5.5 Conclusiones y recomendaciones

Aunque se registró la aplicación de material fertilizante en cantidades superiores a las que recomienda INIFAP (2006) se pudo observar que no hay un excedente pues, los suelos no presentan altas concentraciones de ningún tipo de nutriente, más bien son suelos pobres, ya que la todos éstos se clasificaron con un contenido bajo, consecuencia del alto contenido de arena sobre la estructura del suelo y una alta densidad aparente por lo que se observa que están presentando problemas de compactación que impiden el desarrollo de las raíces del cultivo debido a su baja capacidad de retención de agua y nutrientes. Este tipo de degradación del suelo en la región del acuífero Calera, se debe principalmente al uso intensivo de energía mecánica en la preparación del suelo y al continuo paso de maquinaria durante más de 20 años. Por lo tanto se establece que la dinámica agrícola está afectando la calidad del suelo de la región y posteriormente puede llegar a disminuir los rendimientos del cultivo de chile.

Ante esta situación se recomiendan prácticas de labranza de conservación, por lo menos tres años para que los suelos desarrollen una porosidad más favorable en los primeros 25 cm. También se

recomienda y la aplicación de materia orgánica, por lo menos 1 ton ha<sup>-1</sup> de materiales orgánicos para modificar la estructura y la distribución del espacio poroso del suelo para que permita una mejor infiltración y retención de agua y nutrientes y por lo tanto se incrementaría la capacidad e intercambio catiónico.

Además se propone la aplicación de 300 kg ha<sup>-1</sup> de sulfato de potasio como fuente de material fertilizante en el tratamiento de nutrición base como fuente de potasio ya que no se considera este elemento durante el tratamiento. De igual forma, se sugiere evitar el uso de superfosfato de calcio simple 00-20-00-12(s)-20(Ca) ya que éste es fuente de Ca<sup>+2</sup> y la región se caracteriza por sus suelos de origen calcáreo por lo que se incrementa la disponibilidad de calcio para formar bicarbonatos de calcio y se disminuye la solubilidad de los fertilizantes nitrogenados, fosfatados y potásicos.

## 5.6 CONCLUSIONES GENERALES

- El sistema de producción de Chile en la región es rentable a medida que incrementa su tecnificación.
- El periodo de evaluación mostró hasta el momento que el consumo de agua para el cultivo de Chile en la región está muy por debajo de lo reportado por la Comisión Nacional del Agua por lo tanto se podría considerar que este cultivo no incide ampliamente en la sobre explotación del acuífero.
- Se observó un abatimiento de 2 metros anuales en promedio en los pozos evaluados, por lo que se infiere que la actividad industrial podría estar impactando sobre la disponibilidad del recurso agua ya que los productores agrícolas mostraron ser eficientes en cuanto a la demanda de agua en este acuífero para el riego del cultivo de Chile.
- La calidad del agua del acuífero Calera en cuanto a los criterios de salinidad, sodicidad y toxicidad se considera apta para uso agrícola en ambos ciclos de evaluación ya que sólo la mitad de las muestras en el primer periodo mostraron altas concentraciones de P, sin embargo para el segundo ciclo ya no se obtuvo registro de este elemento en el agua.
- El contenido de fósforo en las muestras de agua durante el primer ciclo pudiera deberse a la interacción de ciertos elementos geológicos y a su infiltración a través de las fallas o fracturas geológicas de la región.

- Si sigue el abatimiento del acuífero en un periodo corto la profundidad de los pozos incrementará hasta los niveles más hondos del acuífero lo que conllevará a una disminución en la calidad del agua ya que pudieran presentarse contaminantes de origen geológico provenientes de la mineralogía subterránea del acuífero, los cuales pudieran impactar sobre las propiedades del suelo al momento de precipitarse.
- La calidad del agua no depende de la profundidad de los pozos más bien podría estar relacionada a la geología del acuífero, la dirección de sus corrientes subterráneas y la interacción con su recarga.
- Los suelos presentaron alto contenido de arena y una densidad aparente ligeramente por encima de lo que se reporta para los suelos franco arcillo arenosos, francos, franco arenosos y franco arcillosos registrados en la región. También se observaron bajas concentraciones de los principales nutrientes evaluados de acuerdo con la norma NOM-21-SEMARNAT-2000, por lo que se considera que están mostrando problemas de degradación debido al sistema de labranza intensiva que predomina en la región que impide que estos suelos le proporcionen al cultivo las condiciones necesarias para que éste pueda tener de una forma más disponible el agua y nutrientes.
- A menor tecnificación del sistema se registró una mayor ponderación en los parámetros de calidad del suelo, por lo tanto el sistema de producción intensivo del cultivo de chile está causando una disminución en la calidad del suelo, por lo tanto este sistema de producción no se considera sostenible si no se realizan algunas estrategias de conservación de los suelos como aplicación de materia orgánica para mejorar la textura y disponibilidad de nutrientes, o bien reducir a un sistema de labranza mínima para mejorar la estructura de los agregados y proporcionarle al suelo una mayor capacidad de aireación, infiltración y retención de nutrientes.
- Se recomienda realizar un estudio para identificar la localización de los nutrientes aplicados pro medio de la fertilización excesiva en la región ya que ni el agua ni el suelo presentaron altas concentraciones de éstos.

## 5.7 Literatura citada

- Aguado Lara, Graciano; Etchevers Barra, Jorge D.; Hidalgo Moreno, Claudia; Galvis Spínola, Arturo; Aguirre Gómez, Arturo (2002) Dinámica del potasio en suelos agrícolas *Agrociencia*, vol. 36, núm. 1, enero-febrero, 2002, pp. 11-21
- Aguirre, J. R. (1979) Metodología para el registro de conocimiento empírico de los campesinos en relación con el uso de recursos naturales renovables. Documento de Trabajo núm 03. CREZAS-CP. Salinas de Hidalgo, S.L.P. 05 p.
- Álvarez- Sánchez, M. E.; Velázquez-Mendoza, J.; Maldonado-Torres, R.; Almaguer-Vargas, G.; Solano-Agama, A. L. (2010) diagnóstico de la fertilidad y requerimiento de cal de suelos cultivados con agave azul (*Agave tequilana* Weber). *Terra Latinoamericana*, vol. 28, núm. 3, julio-septiembre, 2010, pp. 287-293.
- Aragüés R.; Millán M. (1986). Métodos de medida de la salinidad del suelo. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Instituto de Investigaciones Agrarias. Madrid. 172 pp.
- Arnold, R. W., I. Szabolcs, and V. O. Targulian. (1990). *Global Soil Change. Report of an International Institute for Applied System Analysis*. International Society of Soil Science, UNEP. Laxenburg, Austria. 110 p.
- Arshad, M. A. and G. M. Coen. 1992. Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. *American Journal of Alternative Agriculture* 7: 25-31. Arnold, R. W., I. Szabolcs, and V. O. Targulian. 1990. *Global Soil Change. Report of an International Institute for Applied System Analysis*. International Society of Soil Science, UNEP. Laxenburg, Austria. 110 p.
- Astier Calderón, Marta; Maass Moreno, Manuel; Etchevers Barra, Jorge (2002) Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable *Agrociencia*, vol. 36, núm. 5, septiembre-octubre, 2002, pp. 605-620.
- Ávila, J. R., Mojarro, F., Moriasi, D. N., Gowda, P. H., Bautista, C., Echavarría, F. G., Garbrecht, J. D., Steiner, J. L., Howell, T. A., Kanemasu, E. T., Verser, A. J., Wagner, K., & Hernandez, J., (2012) Calibration of SWAT2009 Using Crop Biomass, Evapotranspiration, and Deep Recharge: Calera Watershed in Zacatecas, Mexico Case Study. *Journal of Water Resource and Protection*, 4, 439-450. DOI: 10.4236/jwarp.2012.47051.
- Bravo L., B. Cabañas; J. Mena; R. Velásquez; S. Rubio; F. Mojarro y G. Medina (2002) Guía para la producción de chile seco en el Altiplano de Zacatecas. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales,

Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Zacatecas. Calera de V. R., Zac., México. p. 2  
(Publicación Técnica Núm. 1.

- CAMPITELLI, Paola; antonio aoki1; olga gudelj2; andrea rubenacker1 & roberto sereno (2010) selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y prácticas agrícolas en un área piloto de la región central de córdoba. *ci. suelo (Argentina)* 28(2): 223-231, 2010.
- Can-Chulim, Álvaro; Ortega-Escobar, Héctor Manuel; García-Calderón, Norma Eugenia; Reyes-Ortigoza, Amada Laura; González-Hernández, Víctor Arturo; Flores-Román, David (2011) Origen y calidad del agua subterránea en la cuenca oriental de México. *Terra Latinoamericana*, vol. 29, núm. 2, abril-junio, 2011, pp. 189-200.
- Cantú, MP; Becker, A; Bedano, JC; Schiavo, HF. (2007). Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del Suelo (Argentina)* 25(2):173-178.
- Cardona C., Diego Alejandro; Sadeghian Kh, Siavosh (2005) Caracterización de la fertilidad del suelo en monocultivos de café (*Coffea Arabica*) y bajo sombrío de guamo (*Inga ssp*) Colombia *Forestal*, 9(18), 87-97.
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua (2015) Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero (3225) Calera, Estado de Zacatecas., Reporte interno: Comisión Nacional del Agua.
- Cruz-Ruiz, E.; Cruz-Ruiz, A; Aguilera-Gómez, L. I.; Norman-Mondragón, H. T.; Velázquez, R. A.; Nava-Bernal, G; Dendooven, L.; Reyes-Reyes, B. G. (2012) Efecto en las características edáficas de un bosque templado por el cambio de uso de suelo. *Terra Latinoamericana*, 30(2), 189-197.
- Duval, Matías Ezequiel ; Juan Alberto Galantini; Juan Manuel Martínez, y Julio Osvaldo Iglesias (2016) Comparación de índices de calidad de suelos agrícolas y naturales basados en el carbono orgánico. *Ciencia de suelo (Argentina)* 34(2), 197-209.
- Estrada-Herrera, I. Rayo, Claudia Hidalgo-Moreno\*, Remigio Guzmán-Plazola, J. José Almaraz Suárez, Hermilio Navarro-Garza, Jorge D. Etchevers-Barra (2017) Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia* 51: 813-831.
- FAO (2007) Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2007, 130 p.

- García, Y., Wendy Ramírez y Saray Sánchez (2012) Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, Vol. 35, No. 2, abril-junio, 125-138, 2012.
- González-Acevedo<sup>1</sup>, Zayre Ivonne , Diego A. Padilla-Reyes, and José Alfredo Ramos-Leal (2016) Quality assessment of irrigation water related to soil salinization in Tierra Nueva, San Luis Potosí, Mexico. *Revista mexicana de ciencias geológicas*. 33(3), 271-285.
- Hernández, J., Gowda, P., Howell, T., Steiner, J., Mojarro, F., Núñez, E., & Avila, J. (2012) Modeling Groundwater levels on the Calera aquifer region in central Mexico using ModFlow. *Journal of Agricultural Science and Technology B*, 2(1), 52-61. Recuperado de [https://scholarworks.boisestate.edu/civileng\\_facpubs/36/](https://scholarworks.boisestate.edu/civileng_facpubs/36/)
- Ibarra Castillo, Daniel; Ruiz Corral, José Ariel; Flores Garnica, José Germán; González Eguiarte, Diego R. (2007) Distribución espacial del contenido de materia orgánica de los suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco *Terra Latinoamericana*, vol. 25, núm. 2, abril-junio, 2007, pp. 187-194.
- Indeángelo N.1; Wilson, M.G. & Tasi, H.A.A. (2007) Indicadores de calidad para dos suelos con características vérticas de Entre Ríos (Argentina). *Cadernos do Laboratorio Xeológico de Laxe Coruña*. 32, 111 – 125.
- INEGI (2004) Guía para la Interpretación Cartográfica de Edafología. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México 2004, 30 p.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2014) Carta de Edafología, escala 1:250,000, serie V, en formato SHP: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/edafologia/default.aspx>
- INEGI (2017) Banco de Información Económica, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México 2017 [En línea] disponible en <http://www.inegi.org.mx/sistemas/bie/?idserPadre=102000260010#D102000260010>
- INIFAP (2006) Tecnología de Producción de Chile Seco. Libro Técnico No. 05. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 2006. 232 p. [En línea] disponible en: [http://www.zacatecas.inifap.gob.mx/publicaciones/Tecnologia\\_de\\_produccion\\_de\\_chile\\_seco.pdf](http://www.zacatecas.inifap.gob.mx/publicaciones/Tecnologia_de_produccion_de_chile_seco.pdf)
- INIFAP, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (2010) Estadísticas Climatológicas Básicas Del Estado de Zacatecas. Periodo 1961-2003 (libro técnico No. 03). Centro de Investigación Regional Norte Centro. Campo Experimental Zacatecas: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

- Larson, W. E., and F. J. Pierce. 1991. Conservation and enhancement of soil quality. In: Evaluation for sustainable land management in the developing world. Vol.2. IBSRAM Proc. 12(2). International Board for Soil Resources and Management. Bangkok, Thailand.
- López-A., Raúl; Villavicencio-Floriani, E.; Real-Rosas, M.A.; Ramírez-Barajas, J. L.; Murillo-Amador, B. (2003) Macronutrientes en suelos de desierto con potencial agrícola Terra Latinoamericana, vol. 21, núm. 3, julio-septiembre, 2003, pp. 333-340.
- López-Pérez, María Elena; Del Rincón-Castro, María Cristina; Muñoz-Torres, Carolina; Ruiz-Aguilar, Graciela M. L.; Solís-Valdez, Sara; Zanon, Gabriela A. (2017) Evaluación de la contaminación por elementos traza en suelos agrícolas del suroeste de Guanajuato, México. Acta Universitaria, vol. 27, núm. 6, noviembre-diciembre, 2017, pp. 10-21
- Manzano Banda, Juana Irma , Patricio Rivera Ortiz<sup>2†</sup>, Florencio Briones Encinia<sup>2</sup> y Carlos Zamora Tovar (2014) Rehabilitación de suelos salino-sódicos: estudio de caso en el distrito de riego 086, Jiménez, Tamaulipas, México. terra latinoamericana. 32 (3), 223-234.
- Martínez, Eduardo Martínez H., Juan Pablo Fuentes E., Edmundo Acevedo H. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. R.C.Suelo Nutr. Veg. 8 (1), 68-96.
- Orsag C., Vladimir; León P., Lucy; Pacosaca Y., Olga; Castro R., Edwin (2013) Evaluación de la fertilidad de los suelos para la producción sostenible de quinua T'inkazos. Revista Boliviana de Ciencias Sociales, núm. 33, 2013, pp. 89-112.
- Pérez, Lopez, Esteban (2013) Análisis de fertilidad de suelos en el laboratorio de Química del Recinto de Grecia, Sede de Occidente, Universidad de Costa Rica. InterSedes: Revista de las Sedes Regionales, vol. XIV, núm. 29, julio-diciembre, 2013, pp. 6-18.
- Prieto, Mendez Judith, Francisco Prieto-García, Otilio Arturo Acevedo-Sandoval, María Aurora Méndez-Marzo (2013) indicadores e índices de calidad de los suelos (ics) cebaderos del sur del estado de Hidalgo, México. Agronomía Mesoamericana 24(1), 83-91.
- Rendón Pareja, Santiago; Artunduaga Lemus, Fermín; Ramírez Pisco, Ramiro; Quiroz Gamboa, Jhon Alveiro; Leiva Rojas, Edna Ivonne (2011) Los Macroinvertebrados como Indicadores de la Calidad del Suelo en Cultivos de Mora, Pasto y Aguacate Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín, vol. 64, núm. 1, enero-junio, 2011, pp. 5793-5802.
- Reyes Rivas, Elivier, Ángel G. Bravo Lozano, Homero Salinas González, Luz E. Padilla Bernal (2006) Rentabilidad del chile seco en Zacatecas, México Revista Fitotecnia Mexicana, vol. 29, núm. 2, abril-junio, 2006, pp. 137-144,

- Rodríguez, N., A. Florentino<sup>2</sup>, D. Torres<sup>3</sup>, H. Yendis<sup>3</sup> y F. Zamora (2009) Selección de indicadores de calidad de suelo en tres tipos de uso de la tierra en la planicie de Coro estado Falcón. Rev. Fac. Agron. (LUZ). 2009, 26: 340-361.
- Roveda, Gabriel; Peñaranda, Andrea; Ramírez, Margarita; Baquero, Irma; Galindo P., Ricardo (2012) Diagnóstico de la fertilidad química de los suelos de los municipios de Granada y Silvania para la producción de uchuva en Cundinamarca Corpoica. Ciencia y Tecnología Agorpecuaria, 13(2), 179-188
- SAGARPA (2017) Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP); Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Recuperado el 31 de marzo de 2017 de [http://infosiap.siap.gob.mx/agricola\\_siap\\_gb/icultivo/index.jsp](http://infosiap.siap.gob.mx/agricola_siap_gb/icultivo/index.jsp)
- SAINZ ROZAS, H.; ECHEVERRIA, H.; ANGELINI, H. (2012) Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región Pampeana y ExtraPampeana argentina RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias, vol. 38, núm. 1, enero-abril, 2012, pp. 33-39.
- Salgado Tránsito, Jorge Arturo; Palacios Vélez, Oscar; Galvis Spínola, Arturo; Reyes, Francisco Gavi; Mejía Sáenz, Enrique Efecto de la calidad de agua del acuífero Valle de Guadalupe en la salinidad de suelos agrícolas Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, vol. 3, núm. 1, 2012, pp. 79-95.
- SARABIA MELÉNDEZ, Irma, Francisca, Rodolfo Cisneros Almazán, Jorge Aceves de Alba, Héctor Martín Durán García y Javier Castro Larragoitia (2011) calidad del agua de riego en suelos agrícolas y cultivos del valle de San Luis Potosí, México. Rev. Int. Contam. Ambie. 27 (2), 103-113.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial, martes 31 de diciembre 2002, primera sección 7-74. México, D. F.
- SNIIM (2017) Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados. Volúmenes de exportaciones mexicanas de frutas y hortalizas. Secretaría de Economía (SE) [En línea] disponible en: <http://www.economia-sniim.gob.mx/nuevo/>
- Serrano Altamirano, Víctor; Cano García, Miguel Ángel (2007) Leguminosas de cobertura para reducir la erosión y mejorar la fertilidad de suelo de ladera Terra Latinoamericana. 25(4), 427-435.

- SIAP (2016) Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera; Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) [En línea] disponible en: [http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com\\_wrapper&view=wrapper&Itemid=351](http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=351)
- SNIIM (2017) Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados. Volúmenes de exportaciones mexicanas de frutas y hortalizas. Secretaría de Economía (SE) [En línea] disponible en: <http://www.economia-sniim.gob.mx/nuevo/>
- Sukhatme, P. & Sukhatme, B. (1970) Sampling theory of surveys with application. ISU Press, Ames, Iowa. 452 p. Recuperado de <http://krishikosh.egranth.ac.in/bitstream/1/20300/1/5632.pdf>
- Sweeney, D., & T. Williams, (2008) Estadística para Administración y Economía (décima edición), M. Hano (trad). CENGAGE Learning. México, D. F., 2008, 1,091 p.
- Terrazas-Mendoza, Liliana; Nikolskii-Gavrilov, Iourii; Herrera-Gómez, Sergio Santiago; CastilloÁlvarez, Marcial; Antenor Exebio-García, Adolfo (2010) Alteración de la fertilidad del suelo, y vulnerabilidad de maíz y trigo bajo riego debido al cambio climático Tecnología y Ciencias del Agua, vol. I, núm. 1, enero-marzo, 2010, pp. 87-102
- Torres, Dulio, Adriana Florentino<sup>2</sup> y Marisol López (2006) Indicadores e índices de calidad del suelo en un ultisol bajo diferentes prácticas de manejo conservacionista en Guárico, Venezuela. Bioagro 18(2), 83-91
- Torres, Duilio; Mendoza, Betty; Meru Marco, Lue; Gómez, Carlos (2016) Riesgos de salinización y sodificación por el uso de abonos orgánicos en la depresión de Quíbor-Venezuela Multiciencias, vol. 16, núm. 2, 2016, pp. 133-142.
- Vázquez, P. & Vignolles, M. (2015) Establecimiento agroproductivo ecológico vs agricultura convencional, partido de Tandil, provincia de Buenos Aires. Sociedad & Naturaleza, 27 (2), 267-280.
- Villarreal-Núñez, José Ezequiel; Name-Tuñón, Benjamín; García-Espino, Rubiela Alicia (2012) Monitoreo de cambios en la fertilidad de suelos por medio de análisis de laboratorio. Agronomía Mesoamericana, 23(2), 301-309.
- Villarreal-Núñez, José; Pla-Sentis, Iidefonso; Agudo-Martínez, Lwonel; Villaláz-Perez, Jhon; Rosales, Franklin; Pocasangre, Luís (2013) índice de calidad del suelo en áreas cultivadas con banano en Panamá. Agronomía Mesoamericana, 24(2), 301-315.