

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA  
DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA



Distribución del Agave Mezcalero (*Agave ssp.*) y Áreas con Aptitud Potencial  
para su Desarrollo en San Felipe, Guanajuato

Por:

JULIO CESAR LEDESMA HORTA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Saltillo, Coahuila, México

Junio del 2014

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA  
DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA

Distribución del Agave Mezcalero (*Agave ssp.*) y Áreas con Aptitud Potencial para su Desarrollo en San Felipe, Guanajuato

Por:

**JULIO CESAR LEDESMA HORTA**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA**

Aprobada:



Dr. José Ángel Villarreal Quintanilla  
Asesor Principal



Dr. Alejandro Zárate Lupercio  
Coasesor



M.C. Roberto Paredes Melesio  
Coasesor



Dr. Leobardo Bañuelos Herrera  
Coordinador de División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México  
Junio del 2014

## DEDICATORIA

### A MIS PADRES

Por los que siento un profundo amor, admiración y respeto, gracias por su invaluable apoyo y sacrificio que me permitieron alcanzar esta meta de vida. Este logro es de ustedes.

A mi madre, Hortencia Horta Arteaga por el amor incondicional que siempre me ha brindado e inculcar en mí firmemente, el ser una persona de bien y útil para la sociedad. Estaré eternamente agradecido madre.

A mi padre, José Luis Ledesma Buenrostro que me ha enseñado el valor del esfuerzo y el trabajo. Gracias por tu apoyo moral y económico brindado sin reparos.

### A mis hermanos

Con los cuales he compartido momentos memorables y he aprendido un sinfín de lecciones de vida, me siento en deuda por desviar la atención y esfuerzo de mis padres. Gracias por su comprensión y cariño.

Jorge maestro, compañero y eterno ejemplo.

Fernando mejor amigo, fomento y escucha de sueños y ambiciones.

Perla joya de la familia y razón de protección.

A mis Tíos y primas por su apoyo que sin obligación alguna me brindaron, haciéndome sentir en CASA, gracias... Especialmente a mi tío Carlos Horta que fungió como un padre y amigo a la vez, otorgándome su consejo y accionar en los momentos de mayor incertidumbre.

Y a mi persona por el enorme costo que ha significado perseguir mis sueños, a través de este sinuoso y sorprendente camino, que me coloca un paso más cerca de esa aspiración de vida, junto a esos seres que aún no conozco pero son mi ilusión más grande, motivo de esfuerzo y dedicación... Principio biológico de todo ser vivo.

Comienza a manifestarse la madurez cuando sentimos que nuestra preocupación es mayor por los demás que por nosotros mismos (Albert Einstein).

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro que en su misión social de convertir jóvenes de todas las regiones del país, sin distingo alguno, en profesionistas altamente calificados en materia agronómica y comprometidos con el campo mexicano, me dio la oportunidad de superarme, enseñándome que no importa de dónde vienes o quien eres, lo único que importa es cuán alto fijes la mirada y emprendas el vuelo, Gracias... Alma Terra Mater.

Sin importar que tan urbana sea nuestra vida, nuestros cuerpos viven de la agricultura; nosotros venimos de la Tierra y retornaremos a ella, y es así que existimos en la agricultura tanto como existimos en nuestra propia carne (Wendell Berry).

Al INIFAP campo experimental Bajío, donde a cargo del M.C Roberto Paredes y el M.C. Andrés Mandujano, se me otorgó la oportunidad de iniciarme profesionalmente dentro del proyecto, "Inventario, potencial productivo y calidad industrial de las especies de Agave Mezcalero en Guanajuato", poniendo en práctica y enriqueciendo los conocimientos adquiridos durante mi preparación universitaria, más aún, motivando mi crecimiento personal.

Si la miseria del pobre es causada, no por las leyes de la naturaleza, sino por las instituciones, grande es nuestro pecado (Charles Darwin).

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y al Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica del Estado de Guanajuato por la beca otorgada para la realización del presente trabajo de tesis, dentro del proyecto GTO-2011C04-1668862 Inventario, potencial productivo y calidad industrial de las especies de Agave Mezcalero en Guanajuato, a cargo del Dr. Alfredo Josué Gámez Vázquez.

En algún sitio algo increíble espera ser descubierto (Carl Sagan).

## AGRADECIMIENTOS

Al M.C. Andrés Mandujano Bueno por su valiosa asesoría, colaboración, contribución y experiencia empeñada, en el desarrollo y culminación del presente trabajo, además de la amistad y apoyo moral brindados. Es grato coincidir con personas comprometidas con su trabajo.

Al Dr. José Ángel Villarreal Quintanilla, por ser una muestra de profesionalismo y rectitud, que durante el desarrollo de la carrera me brindo orientación y presto atención a mis inquietudes académicas y filosóficas. Su catedra acerca de la diversidad y fisionomía vegetal fueron claves en la realización de este trabajo.

Al Dr. Alejandro Zárate Lupercio que con profesionalismo e integridad fue motivo de ejemplo e inspiración. Debido a su interés y pasión por la catedra, despertó en mí la inquietud por el complejo mundo de los Sistemas de Información Geográfica y los Sensores Remotos.

Al M.C. Roberto Paredes Melesio por darme la valiosa oportunidad de iniciar mi etapa profesional, brindarme todas las facilidades y orientación posible, para culminar el presente trabajo de investigación.

Al Dr. Alfredo Josué Gámez Vázquez. Por el empeño, tiempo y dedicación puesto a las revisiones y sugerencias aportadas al presenta trabajo.

A mis profesores, a los excelentes, que despertaron en mi asombro y fascinación motivando mi curiosidad por desafiar mis limites; a los buenos que me transmitieron sus conocimientos y enseñanzas de vida; y sobre todo a los malos porque de ellos aprendí que cuando no haces lo que te apasiona, estas en el camino equivocado. Todos ellos fomentaron en mi persona conocimiento, profesionalismo, ética y un gran sentido de pertenencia social, Gracias...

Todo hombre que conozco es superior a mí en algún sentido. En ese sentido, aprendo de él  
(Emerson).

## AGRADECIMIENTOS

A Dios y a la Vida por darme la oportunidad de existir en este océano cósmico rodeado de mi familia, permitirme perseguir y disfrutar mis metas, y formar parte del milagro de ser materia consiente que se estudia a sí misma.

A toda mi familia, cada uno ha contribuido a formarme como persona gracias por su apoyo, consejos, cariño, ánimo y buenos deseos. Va para ustedes, es una muestra que podemos alcanzar cualquier meta que nos proponamos.

A toda la gente que me apoyo que sin ser mi familia (de sangre) me hizo sentir uno más de ellos, y en algún u otro sentido me apoyaron, aconsejaron, enriquecieron y motivaron. En especial a Mayra, Diana, Cristina y Martin.

A mis amigos que me acompañaron en mi crecimiento personal, compartiendo un sinfín de anécdotas, escritas con tinta indeleble en la memoria, y gratas experiencias descubiertas en el camino, sin lugar a dudas, una de las mejores épocas de mi vida.

A mi gran amigo Paul García, compañero de estudio a lo largo de la carrera, ejemplo moral en la vida cotidiana, colega en el ámbito profesional y la jerga, excelente persona de toda mi confianza y estima, el buen primo Paul.

Al equipo de futbol americano donde con el dorsal y pectoral número 11, envuelto en los colores oro y negro, defendí con orgullo y pasión el espíritu de competencia de mi Alma Mater. Al lado de mis compañeros confirme el valor de la amistad y del trabajo en equipo, confronte mis miedos y disfrute los resultados del esfuerzo. Borrego, Otho, Pastor, Froylan, Rorro, Jamones, Andrés (La tripa), Carnicero, Reynaldo, fue un orgullo compartir el emparrillado con ustedes, es una de las experiencias más grata que jamás olvidare, POR SIEMPRE BUITRES DE LA NARRO!!!

Amo el canto del ceniztle,  
pájaro de cuatrocientas voces.  
Amo el color del jade  
y el enervante perfume de las flores,  
pero más amo a mi hermano: el hombre (Nezahualcōyotl).

## INDICE

INDICE DE FIGURAS .....	VII
INDICE DE TABLAS .....	VIII
RESUMEN .....	IX
I INTRODUCCIÓN .....	1
II OBJETIVOS .....	3
Objetivo General.....	3
Objetivos Específicos .....	3
III HIPÓTESIS .....	3
IV REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
4.1. Agave.....	4
4.1.1. Características e importancia de los agaves .....	6
4.1.2. Grupos Americanae y Salmianae .....	7
4.1.2.1. Requerimientos agroecológicos .....	8
4.2. Usos del agave.....	10
4.2.1. El mezcal .....	12
4.2.2. Manejo agronómico y cultural del agave .....	13
4.3. El caso San Felipe .....	15
4.3.1. Entorno socioeconómico .....	16
4.3.2. El agave como opción de desarrollo socioeconómico.....	17
4.3.3. Aprovechamiento sostenible del agave .....	18
4.4. Sistemas de información geográfica (SIG).....	18
4.4.1. SIG de código abierto.....	19
4.5. Caracterización Ecogeográfica y Zonificación Agroecológica .....	20
4.6. Clasificación multiespectral.....	21
4.6.1. Percepción remota .....	21
4.6.2. Espectro electromagnético.....	22
4.6.3. Plataformas.....	23
4.6.3.1. Programa Spot.....	24
4.6.4. Imagen Multiespectral .....	25
4.6.5. Firma espectral .....	25
4.6.5.1. Firma espectral de la vegetación .....	26

4.6.6. Clasificación multiespectral de imágenes satelitales.....	26
4.6.7. Índice Kappa.....	28
4.7. Aptitud potencial.....	28
V METODOLOGÍA .....	30
5.1. Área de estudio .....	30
5.2. Caracterización Ecogeográfica .....	31
5.2.1. Datos del relieve (Pendiente y Orientación) .....	32
5.2.2. Principales variables climáticas .....	32
5.2.3. Cartografía digital INEGI, CONABIO .....	34
5.3. Determinación de los requerimientos agroecológicos de agave mezcalero ..	35
5.4. Estimación de la superficie y distribución de agave, mediante la clasificación multiespectral .....	36
5.5. Áreas de Aptitud potencial para el establecimiento de agave mezcalero (Agave spp.).....	41
5.5.1. Aptitud potencial .....	41
5.5.1.1. Algebra booleana.....	42
5.5.1.2. Metodología modificada de Díaz et al., 2012 y Mandujano, 2013.....	43
5.5.1.2.1. Aptitud potencial de agave como conservador de suelos.....	44
5.5.2. Zonas con aptitud potencial .....	44
VI RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
6.1. Caracterización Ecogeográfica del municipio de San Felipe, Gto.....	45
6.1.1. Fisiografía y Relieve .....	45
6.1.2. Variables Climáticas. ....	48
6.1.3. Edafología.....	57
6.1.4. Uso de suelo y Vegetación.....	59
6.2. Especies de Agave ssp. con distribución en San Felipe.....	61
6.3. Requerimientos Agroecológicos de agave Mezcalero (Agave spp.) .....	64
6.3.1. Requerimientos topográficos .....	64
6.3.2. Requerimientos climáticos .....	66
6.3.3. Requerimientos edáficos.....	68
6.3.4. Asociación vegetal.....	70
6.4. Distribución de agave mezcalero.....	78
6.5. Áreas con Aptitud potencial .....	85



VII CONCLUSIONES .....	90
VIII RECOMENDACIONES .....	91
IX LITERATURA CITADA.....	92
ANEXOS .....	102
Anexo 1. Puntos de muestreo: presencia de <i>Agave ssp.</i> .....	102
Anexo 2. Resultado análisis físico-químico de las muestras de suelo.....	103

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Escala del espectro electromagnético. ....	23
Figura 2. Ubicación Geográfica del Municipio de San Felipe, Gto. ....	30
Figura 3. Puntos de muestreo <i>Agave spp.</i> .....	36
Figura 4. Imagen multiespectral del municipio de San Felipe, Gto.....	37
Figura 5. Distribución de los valores digitales de tres coberturas diferentes (De izquierda a derecha: Agua, matorral y suelo desnudo) en la banda 4 (infrarrojo medio) de la imagen Spot 5. ....	38
Figura 6. Operador local lógico (Si $X > 320$ : $X=1$ si no $X=0$ ). ....	42
Figura 7. Esquema de obtención de áreas de aptitud potencial.....	43
Figura 8. Provincias fisiográficas. ....	46
Figura 9. MDE de San Felipe, Gto.....	46
Figura 10. Modelo digital de pendientes.....	47
Figura 11. Modelo digital de exposición. ....	48
Figura 12. Tipo de clima.....	50
Figura 13. Temperatura media anual. ....	51
Figura 14. Comportamiento de la Temperatura media anual. ....	52
Figura 15. Temperatura máxima y mínima.....	53
Figura 16. Comportamiento de temperatura máxima y mínima.....	53
Figura 17. Temperatura nocturna. ....	54
Figura 18. Comportamiento de temperatura nocturna y temperatura media. ....	55
Figura 19. Distribución espacial de la precipitación. ....	56
Figura 20. Comportamiento de la precipitación media anual.....	57
Figura 21. Tipo de suelo. ....	58
Figura 22. Uso de suelo y vegetación. ....	60
Figura 23. Especies del grupo <i>Salmianae</i> ; A) <i>A. salmiana ssp. crassispina</i> ; B) <i>A. salmiana ssp. salmiana</i> ; C) <i>A. salmiana var. ferox</i> ; D) <i>A. mapisaga</i> . ....	63
Figura 24. <i>A. americana</i> , <i>A. atrovirens</i> y <i>A. asperrima</i> . ....	63
Figura 25. <i>A. inaequidens</i> , <i>A. applanata</i> , <i>A. lechuguilla</i> .....	64
Figura 26. Vista de un pastizal perturbado con presencia de <i>Agave ssp.</i> .....	71
Figura 27. Vista de un pastizal en planicie, con presencia de <i>Agave ssp.</i> .....	71
Figura 28. Pastizal en bajada media con elementos del matorral Xerofito. ....	72
Figura 29. Pastizal con presencia de <i>Acacia</i> , <i>Agave</i> , <i>Mimosa</i> y <i>Prosopis</i> . ....	72
Figura 30. Matorral abierto, a pie de monte. ....	74

Figura 31. Matorral crasicaule conformado por Agave ssp. y Opuntia ssp. ....	74
Figura 32. Matorral en planicie con dominancia de Agave ssp. ....	75
Figura 33. Transición de Matorral en bajada, con bosque de pino.....	76
Figura 34. Matorral cerrado con presencia de Juniperus ssp. y Quercus ssp. ....	76
Figura 35. Plantaciones de Agave ssp. en San Felipe, Gto.....	77
Figura 36. Firmas digitales de las distintas coberturas. ....	79
Figura 37. Distribución de las distintas coberturas clasificadas.....	84
Figura 38. Zonas con aptitud potencial para el establecimiento de agave mezcalero en San Felipe. ....	86
Figura 39. Grado de aptitud potencial para el establecimiento de agave mezcalero en San Felipe. ....	88
Figura 40. Potencial Agroecológico del agave mezcalero. ....	89

## INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Géneros de la familia Agavaceae.....	5
Cuadro 2. Principales usos de los agaves. ....	11
Cuadro 3. Características de los principales sensores (modificado de Khorram et al., 2012). ....	23
Cuadro 4. Aplicaciones de las bandas del satélite Spot5. ....	25
Cuadro 5. Estaciones meteorológicas del área de estudio.....	31
Cuadro 6. Categorización de variables.....	42
Cuadro 7. Categorización de variables.....	43
Cuadro 8. Especies de Agave ssp. en el municipio de San Felipe.....	61
Cuadro 9. Requerimientos Agroecológicos de agave Mezcalero (Agave spp). ....	78
Cuadro 10. Evaluación de separabilidad de las firmas digitales.....	80
Cuadro 11. Matriz de contingencia. ....	80
Cuadro 12. Reporte de exactitud de la clasificación. ....	81
Cuadro 13. Evaluación de la exactitud imagen corregida.....	82
Cuadro 14. Superficie ocupada por las distintas coberturas.....	83

## RESUMEN

Dado que el municipio de San Felipe, Gto. cuenta con la protección “Denominación de origen mezcal” la cual no ha sido aprovechada en su totalidad, se realizó un estudio para conocer el área de distribución actual del agave mezcalero y delimitar las áreas que presentan aptitud potencial para su cultivo. Para esto se realizó una caracterización ecogeográfica del área de estudio, dentro de un ambiente SIG, utilizando información de 20 estaciones agroclimáticas, modelos digitales del terreno (Aster Gdem) y cartografía digital de CONABIO, INEGI e INIFAP. Así mismo se realizaron recorridos de campo obteniendo 80 puntos de muestreo donde se localizó agave. En la estimación de la distribución del agave se clasificaron de manera digital 5 imágenes Spot5, empleando el algoritmo de máxima verosimilitud y utilizando firmas espectrales creadas a partir de los puntos de muestreo. Las áreas de aptitud potencial se obtuvieron al comparar, en un ambiente SIG, los requerimientos agroclimáticos del agave con la oferta agroecológica del municipio, mediante el álgebra de mapas. El agave se encontró en un rango de elevación que va de 1 800 a 2 400 msnm, en terrenos planos o de pendiente pronunciada con suelos de tipo Xerosol, textura media, origen ígneo, excelente drenaje y sin problemas de sales, en climas de tipo seco o semiseco con temperaturas medias de 13 a 22°C y precipitación anual de 318 a 525 mm. La imagen clasificada tuvo un índice de exactitud (Kappa) de .89, la cual muestra que el agave se distribuye particularmente en el matorral xerofito en una extensión de casi 50 000 hectáreas, así mismo existen 12 000 hectáreas de plantaciones de agave, mientras que las zonas con aptitud potencial cubren un total de más de 144 000 ha. El hábitat del agave se encuentra muy fragmentado, pese a esto el municipio cuenta con un gran potencial para establecer plantaciones de agave y sostener una producción de mezcal a escala industrial.

Palabras Clave: Agave, Aptitud Potencial, Clasificación multiespectral, Kappa, Mezcal, SIG, San Felipe, Teledetección, Zonificación Ecogeográfica.

## I INTRODUCCIÓN

La familia agavácea pertenece al orden de los Asparagales, los cuales se originaron en Norteamérica hace 11.8 millones de años. Cuenta con nueve géneros y cerca de 330 especies, siendo el género *Agave* (Sensu stricta) el más diverso con 200 especies (Scheinvar, 2008). Los agaves se distribuyen desde el sur de los Estados Unidos hasta el norte de Venezuela y Colombia incluyendo las islas del Caribe. México es considerado el centro de origen y diversificación del género *Agave*, ya que cuenta con el 75 % de las especies conocidas del maguey, como también se les conoce a las especies en México (García, 2007).

El maguey es una planta ancestral y mitológica para los pueblos mesoamericanos, quienes atribuyeron su origen, a partir de los restos enterrados de la diosa Mayáhuel (Salazar, 2007). Desde la antigüedad ha representado una importante fuente de recursos para los habitantes de Mesoamérica, además de tener gran importancia agroecológica, socioeconómica y cultural.

Los agaves son plantas xerófitas, adaptadas a ambientes hostiles, áridos y semiáridos del país (Gentry, 1982). Las regiones áridas del país son áreas sometidas a una intensa presión ambiental y demográfica. Los agaves son una especie clave en estos ecosistemas, debido a que producen elevadas cantidades de recursos. El agave presenta diversos usos, quizá el más significativo sea como materia prima para la producción de mezcal (García et al., 2010).

En el municipio de San Felipe, Guanajuato existe una gran tradición en la elaboración del mezcal, el cual es extraído y producido desde el siglo XVIII, en la Hacienda de Jaral de Berrios, lo que permitió que la producción de mezcal en dicho municipio fuera clasificada con denominación de origen Mezcal, desde 2001. Sin embargo y aunque Herrera, (2001) y Mandujano, (2013) señalan que el municipio cuenta con características propicias para el cultivo

del agave (*A. salmiana*), hasta el momento se cuenta con escasa información acerca de la abundancia, aptitud potencial y distribución de las especies de *Agave ssp.* en el municipio.

Con la finalidad de conservar y aprovechar los recursos naturales a través de una adecuada planeación y ejecución de programas productivos sustentables y de desarrollo social, se debe realizar un inventario de los recursos disponibles (Buendía et al., 2002). Un aprovechamiento racional de la especie supone elaborar un plan integral de manejo, que considere el inventario y distribución espacial del agave, así como la delimitación geográfica de áreas donde se tenga la mayor probabilidad de éxito en su producción, con poco o nulo deterioro al ambiente y un mínimo de riesgos. Esto se puede realizar a través del uso de herramientas digitales tales como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que requieren la captura, almacenamiento y análisis de información (biótica, abiótica y social) georeferenciada.

Aun cuando el municipio de San Felipe cuenta con la denominación de origen mezcal, la producción de esta bebida se mantiene sólo en unas cuantas fábricas comunales, de corte artesanal y una embotelladora de mediana escala. La ausencia de un proceso industrial formal y la incertidumbre acerca de la superficie con aptitud para el cultivo de agave dentro del municipio, han limitado el aprovechamiento del galardón: denominación de origen.

Con la finalidad de dar una perspectiva clara sobre las diferentes especies de agave presentes en municipio y como soporte para posteriores trabajos de investigación, producción y desarrollo social que mejoren la rentabilidad, sustentabilidad del cultivo, el bienestar social de los productores involucrados y la ecología local, en este trabajo se pretende cuantificar su abundancia y distribución además de definir las zonas con mayor aptitud potencial para el establecimiento de plantaciones de agave.

## II OBJETIVOS

### Objetivo General

Delimitar las zonas con Aptitud Potencial para el cultivo de agave mezcalero (Agave spp.) y estimar su área de distribución en el municipio de San Felipe, Guanajuato.

### Objetivos Específicos

1. Caracterizar Eco-geográficamente el municipio de San Felipe, Gto.
2. Conocer los requerimientos Agroecológicos del agave.
3. Estimar la superficie y distribución actual de agave mezcalero (Agave spp.) en el municipio de San Felipe, Gto., mediante clasificación multiespectral.
4. Evaluar la eficiencia y exactitud del mapa resultante de la clasificación multiespectral, utilizando el índice Kappa.
5. Elaborar el mapa de aptitud potencial de agave mezcalero (Agave spp.) en el Municipio de San Felipe, Gto.

## III HIPÓTESIS

Gran parte del territorio de San Felipe cuenta con las condiciones Agroecológicas y sociales óptimas, para establecer plantaciones de Agave spp, que sostengan una producción de mezcal a escala industrial, preservando la diversidad del agave y de manera sustentable.

## IV REVISIÓN DE LITERATURA

El maguey (*Agave spp.*) es una planta ancestral, de suma importancia para los pueblos de Mesoamérica. Según la mitología Mesoamericana el maguey se originó a partir de los restos enterrados de la diosa Mayáhuel que representa la fecundidad de la tierra, y convertida en maguey brinda a los hombres los dones necesarios para sobrevivir (Salazar, 2007). De esta planta los nativos obtenían dos tipos de bebidas; el aguamiel derivado de la planta viva y consumida en fresco y el pulque que se elabora a partir de aguamiel fermentado. Esta bebida era considerada el elixir de los dioses y como es una bebida que da vida pero que se obtuvo del sacrificio del maguey, se le relacionaba con otros líquidos sagrados como la sangre, el semen, la leche materna y el agua (Ledesma y Loera, 2013). Con la llegada de los españoles a Mesoamérica, se introdujo la destilación, lo que dio origen al mezcal, producido a partir de la sabia de maguey.

### 4.1. Agave

Numerosos pueblos prehispánicos y mestizos han aprovechado los agaves, durante milenios, como fuente de alimento, bebidas, fibras, medicina, entre otros usos, esta domesticación del agave, junto con el maíz, influyó en el desarrollo de uno de los principales centros agrícolas de Mesoamérica (Gentry, 1982; Nobel, 1988).

Los agaves son especies xerofitas de gran importancia ecológica en ambientes con escasa productividad, particularmente en las zonas áridas y semiáridas de nuestro país. Se distribuyen en diversos hábitats, desde valles y planicies hasta cerros y laderas pedregosas, incluyendo lugares montañosos de gran altitud. Prosperan en los bosques de pino, los encinares, las selvas y los pastizales de las regiones templadas, aunque el mayor porcentaje se concentra en los diversos tipos de matorral xerófito (Rzedowski, 1978; García-Mendoza, 2007).

Taxonómicamente se ubican en el orden de los Asparagales, dentro de la subfamilia Agavoideae (Agavaceae) que cuenta con nueve géneros y cerca de 330 especies (Sistema de clasificación APG III, 2009). El género *Agave* L. es el más diverso con el 60.6 % de las especies (Cuadro 1; Scheinvar, 2008).

Cuadro 1. Géneros de la familia Agavaceae.

Géneros	No. de especies	No. en México
<i>Yucca</i>	46	30
<i>Hesperoyucca</i>	1	1
<i>Hesperaloe</i>	5	5
<i>Beschorneria</i>	7	7
<i>Furcraea</i>	25	13
<i>Agave</i>	200	150
<i>Manfreda</i>	29	28
<i>Polianthes</i>	15	15
<i>Prochnyanthes</i>	2	2
<b>Total</b>	<b>330</b>	<b>251</b>

Fuente: Scheinvar, 2008.

La gran diversidad dentro del género probablemente se debe a que su origen, datado en 10.2 millones de años, coincide con el inicio del proceso de aridificación de Norteamérica, por lo tanto, la adaptación a los nuevos hábitats áridos que surgieron en esas fechas, fue el motor inicial de la radiación adaptativa en los agaves, proceso que se vio acentuado por la gran diversidad topográfica y climática de México (Eguiarte y Souza, 2007).

La distribución de los agaves abarca desde el sur de los Estados Unidos (con dos especies disyuntas en Florida) hasta el norte de Colombia y Venezuela, incluyendo las islas del Caribe (García-Mendoza, 2002). Aproximadamente 150 de las 200 especies de *Agave* se encuentran en México, más 36 que pertenecen a categorías infraespecíficas, constituyendo un total de 186 taxones (García-Mendoza, 2007), colocando a México como el centro de origen y diversificación de los agaves.



Gentry, (1982) cita tres regiones donde los agaves confluyen, el Centro de México (30 spp.), el desierto de Chihuahua (10 spp.) y la meseta de Jalisco (21 spp.). García-Mendoza, (2002) dividió la república Mexicana en cuadros de 1°x1°, encontrando que el área con mayor riqueza de especies es el Valle de Tehuacán-Cuicatlán, seguido de la Sierra Madre Occidental y la tercer área más importante corresponde al desierto Chihuahuense, específicamente en la región del Altiplano potosino.

#### 4.1.1. Características e importancia de los agaves

Los agaves son plantas perennes, con hojas de colores diversos (verdes, glaucas, amarillas y rojizas) dispuestas en espiral y arregladas en rosetas en torno a un tallo. Durante su crecimiento almacenan grandes cantidades de recursos en sus tejidos los cuales al llegar a la madurez (entre 10 a 25 años) son empleados en el desarrollo de una inflorescencia que surge del meristemo apical, llamada comúnmente escapo floral, las flores tienen diferentes grados de succulencia, son bisexuales, tubulares, con ovario ínfero, poseen seis tépalos y seis estambres, el fruto es una cápsula seca, con semillas aladas, aplanadas y de color negro (García-Mendoza, 2007).

Presentan reproducción sexual con polinización cruzada, son semelparas lo que implica su muerte al término del ciclo reproductivo. El escapo floral sobresale encima del dosel, otorgándole ventaja competitiva, en la base del tubo se disponen nectarios que producen abundante néctar y fragancias que se perciben a gran distancia por diversos polinizadores como los murciélagos, polillas, abejas y colibríes. En su mayoría, presentan reproducción asexual por medio de estolones o bulbos que se desarrollan tanto en la base de la planta como a lo largo del escapo floral. Este ingenioso mecanismo representa un escape a la semelparidad ya que al producir nuevas rosetas de manera vegetativa, un genotipo no muere al reproducirse, quedando copias más jóvenes pero genéticamente idénticas (Gentry, 1982; Eguiarte y Souza, 2007).

Los agaves tienen una serie de características fisiológicas y morfológicas, que les permite una notable adaptación a los ambientes más hostiles; presentan espinas en los bordes y el ápice de las hojas, que les brindan protección contra depredadores y disminuyen el área de transpiración en las regiones más expuestas a la radiación solar; sus raíces poco profundas permiten aprovechar de manera eficiente la escasa precipitación; aunque algunos son  $C_3$  facultativos la mayoría cuenta con fotosíntesis tipo CAM (Metabolismo ácido de las Crasuláceas) reduciendo la pérdida de agua por evapotranspiración; la forma de sus hojas disminuye el área expuesta a la radiación y dirige el agua hacia el centro de la planta; tienen cutícula gruesa y cerosa, que aunado a la succulencia de sus tejidos les permite almacenar grandes cantidades de agua por largos periodos de tiempo (Scheinvar, 2008).

Estas adaptaciones les permiten prosperar con éxito en ambientes poco favorables para el desarrollo vegetal, convirtiéndose en especies clave, debido a las elevadas cantidades de recursos, que producen, especialmente en la reproducción ya sea como flores, polen o néctar.

Además los agaves otorgan una serie de beneficios ecológicos dentro de su habitat, debido en gran medida a su amplia tolerancia a diversos factores edafológicos. Algunos de estos beneficios, señalados por estudios recientes, son: mejoramiento de pH, retención de los microelementos, aumento de fósforo, potasio y materia orgánica disponibles, la reducción de azolves en las partes bajas de las cuencas hidrográficas, también proporciona condiciones aptas para el desarrollo de otras especies vegetales (García et al., 2010).

#### 4.1.2. Grupos Americanae y Salmianae

Gentry, (1982) organizó las especies del subgénero *Agave* (con inflorescencia paniculada) en 12 grupos entre ellos Americanae y Salmianae. Los agaves de mayor distribución e importancia en el Altiplano Central (región en la que se ubica San Felipe, Gto.), pertenecen a estos grupos, destacando, *A. americana*, *A. asperrima*, *A. mapisaga*, *A. salmiana* (en sus tres variedades) y *A. weberi*

(Gentry, 1982; Aguirre, 2001; Herrera, 2001; Martínez et al., 2005; Mandujano, 2013).

Los Salmianae se distinguen por las rosetas que forman, las cuales son grandes, verdes, gruesas y suculentas. El grupo está conformado por cuatro especies, una subespecie y cuatro variedades, incluyendo el maguey mezcalero o maguey de pulque (*A. salmiana*). Son nativos del Altiplano Central Mexicano, donde existen números formas silvestres y cultivadas. Su grado de especialización dentro del género *Agave* es muy alto y filogenéticamente puede ser considerado como uno de los más avanzados evolutivamente. La alta variabilidad que presentan ha sido intensificada por el hombre durante cientos, si no es que durante miles de años, debido principalmente al cultivo de sus especies para la obtención de pulque (Gentry, 1982).

El grupo Americanae cuenta con 16 taxas que incluyen 6 especies. Son plantas de medianas a grandes, generalmente reconocibles por sus hojas lanceoladas, largas y de color grisáceo a verde pálido, flores amarillas y espinas apicales muy fuertes. La especie que tipifica la sección es *A. americana* y junto con *A. scabra* (*A. asperrima*) forman las dos ramas principales de las Americanae. Parece ser que este grupo tuvo su origen en climas áridos y semiáridos subtropicales del noreste de México. Se extienden en una área que abarca desde Jalisco hasta Oaxaca, probablemente promovido por los nativos, debido al alto contenido de fibra y su mayor palatabilidad (Gentry, 1982).

#### 4.1.2.1. Requerimientos agroecológicos

Aunque es difícil caracterizar por completo los requerimientos físicos y bióticos de una especie; en general lo que se realiza es señalar patrones de distribución y discernir luego el o los factores que más se relacionan con ella y definir así la amplitud de tolerancia y el óptimo de la especie para dichos factores. Luego, conociendo las características del medio, es posible señalar en qué lugares se pueden encontrar ciertas especies (Aguirre et al., 2001).

Gentry, (1982) menciona que los Americanae y Salmianae generalmente se encuentran en elevaciones de entre 1230 a 2460 m; en climas con un periodo seco bien definido en primavera, donde se presentan heladas durante los meses de invierno que pueden ser severas, rangos de precipitación anual de 250 a 1000 mm de la cual un 70 al 80 % ocurre entre mayo y octubre; Toleran la sequía prolongada y están adaptados a diferentes tipos de suelo.

*A. salmiana* prospera con éxito desde los 1000 hasta 2450 msnm, puede crecer en colinas, laderas, piedemontes y valles con pendientes ligeras, excepto en lugares propensos a inundación. Ocupa lugares con climas del tipo seco (BS0) a semiseco (BS1), donde, la precipitación pluvial oscila entre 320 a 720 mm anuales, de la cual el 90% incide en verano y el resto en invierno. El régimen térmico puede ser de templado a semicálido extremo y la temperatura promedio anual entre los 16 a 22 °C. Soporta temperaturas mínimas en el invierno de -12° C (las cuales pueden dañar las puntas de las hojas) y temperaturas máximas en el verano de hasta 42°C. En cuanto al factor edáfico, se desarrolla principalmente en suelos de origen ígneo o sedimentarios, someros, de textura media, bien drenados y pobres en nutrientes. Los Xerosoles representan el óptimo biológico para la producción y desarrollo del agave, aunque también está presente en los litosoles y feozems. Es poco tolerante a suelos con problemas de sales, sobre todo en estado juvenil, pero son poco afectados por altas concentraciones de calcio o metales pesados. Toleran un PH entre 5 y 8 lo que podría explicar su amplio rango de adaptabilidad a diversos tipos de suelo (Aguirre, 2001; IMPI, 2001; Martínez et al., 2005; García-Moya et al., 2010; Mandujano, 2013).

Aguirre et al., (2001), mencionan la existencia de dos ambientes, óptimo y subóptimo, para el desarrollo de *A. salmiana*. El factor determinante en el ambiente óptimo es el sustrato geológico, y el más apto es el ígneo con suelos de textura media, arcillosos, de tipo Xerosol. Mientras que el ambiente subóptimo estaría limitado por factores biológicos, principalmente, la competencia con las plantas dominantes. Al respecto Mandujano, (2013)

reporta que los suelos de origen ígneo en las laderas, sustentan plantaciones de agave, con mayor calidad industrial (contenido de azúcares), aunque la densidad de plantas por hectárea (ha) es menor.

Los agaves del Altiplano, forman parte de diversas asociaciones vegetales destacando su presencia en el pastizal natural y los distintos tipos de matorral xerofito, compartiendo hábitad principalmente con especies de los géneros: *Acacia*, *Condalia*, *Coryphanta*, *Cylindropuntia*, *Dalea*, *Dasyllirion*, *Dodonaea*, *Eupatorium*, *Eysenhardtia*, *Hecthia*, *Jatropha*, *Larrea*, *Mammillaria*, *Mimosa*, *Myrtillocactus*, *Opuntia*, *Prosopis*, *Stenocereus*, *Yucca* y *Zaluzania*. En estas comunidades llega a ser dominante o codominante, incluso dando nombre al tipo de vegetación como en el matorral roseto-filo, aunque por lo regular se distribuye en pequeños manchones. También es común encontrarlos en bosques de encino, Pino, chaparrales, mezquiales, encinares arbustivos y bosques de enebro, principalmente en zonas de transición entre estas comunidades y los matorrales y pastizales (IMPI, 2001; INEGI, 2003; Martínez et al., 2005; Rzedowski, 2006; CONABIO, 2012; Mandujano, 2013).

Martínez, et al., (2005), reporta áreas con más de 3, 000 plantas por hectárea y en contraste áreas que exhiben menos de 600 plantas por hectárea, y refiere, que las comunidades que forma el agave son muy diversas en cuanto a fisionomía, estructura y densidad, las cuales están distribuidas heterogéneamente variando de región en región. Aguirre et al., (2001) coincide en este punto, y reporta densidades de 4400 plantas por hectárea en el medio óptimo y alrededor de 140 plantas por hectárea en el medio subóptimo. La densidad de estas comunidades se ve influenciada por factores antropogénicos, ambientales y de competencia biológica.

#### 4.2. Usos del agave

Quizá como sugiere la leyenda azteca los animales fueron quienes mostraron las bondades del agave al hombre mesoamericano, quien lo convirtió en una importante fuente de recursos. Evidencia arqueológica indica, la elaboración

de artefactos, herramientas y sandalias a partir de las fibras y hojas del agave, así como su presencia en la dieta de los pueblos prehispánicos hace 9, 000 años (Gentry, 1982; Nobel, 1988).

En la actualidad los agaves son de gran importancia agroecológica, socioeconómica y cultural, junto con el chile, maíz y nopal han sido considerados iconos de lo mexicano en el mundo. Su aprovechamiento es muy diverso, empleando prácticamente toda la planta (Cuadro 2; García et al., 2010); se utiliza como alimento al cocer su tallo y flores, además son fuente de insectos comestibles; de ellos se extrae inulina y saponinas; se da al ganado como forraje; sirve como material para construcción; en sistemas agroecológicos es intercalado con otros cultivos; es utilizado en obras de uso y conservación de suelo como cercas vivas, cortinas rompe vientos, curvas de nivel y tinas de agua (García et al., 2010). Sin embargo su uso con mayor potencial y tradición, es quizá, como materia prima para la elaboración de bebidas fermentadas y destiladas como pulque, tequila y mezcal.

Cuadro 2. Principales usos de los agaves.

Usos	Producto
Alimentación	Azúcar, dulce, guisos, insectos comestibles, mixiotes, pan de pulque, tortillas.
Bebidas	Aguamiel, miel, atole, pulque, mezcal, tequila, sotol, bacanora, jarabe.
Agrícola	Cerca viva, abono orgánico, mejoradora de suelos, asociación de cultivos.
Forraje	Bovinos, caprinos, porcinos.
Construcción	Cercas, casas, corrales, tejas, colectores de agua de lluvia, resinas.
Fibras	Cordelería, jarciería, cestería, escobetillas, cepillos, estropajos, vestimenta.
Ornamental	Aretes, collares, arcos florales, jardines y camellones.

Usos	Producto
Domestico	Detergente, jabón, y champú.
Otros usos	Industria química y farmacéutica, producción de etanol, celulosa y glucósidos.

Fuente: García et al., 2010.

#### 4.2.1. El mezcal

El mezcal que significa maguey cocido, fue la primer bebida fruto del mestizaje, que surgió de la unión entre el proceso de destilación español y la bebida extraída del maguey llamada Mexcalli. El origen de esta bebida típica de México se remonta al siglo XVI, desde entonces es y deberá seguir siendo, sinónimo de diversidad por la gran variedad de especies de las que se elabora (incluyendo las complejas relaciones ecológicas en las que intervienen), así como la gran diversidad cultural, procedimientos y regiones involucrados en su elaboración y consumo (Valenzuela, 2007; Scheinvar, 2008).

Como medida proteccionista contra la demanda de maguey por parte de la industria tequilera, en 1949 se estableció la Norma Oficial del mezcal con el fin de proteger la materia prima y el proceso de elaboración del mezcal, sin embargo esta norma no cumplió las expectativas. Así en 1994 se otorgó la protección prevista por los artículos 157 y 167 de la Ley de la Propiedad Industrial, a la denominación de origen "MEZCAL", para ser aplicada a la bebida alcohólica del mismo nombre a que se refiere la Norma Mexicana correspondiente, en los estados de Guerrero, Durango, San Luis Potosí, Zacatecas y en el estado de Oaxaca la zona denominada "Región del mezcal", posteriormente el 19 de noviembre de 2001 se incluyó a San Felipe Gto., dentro del listado de municipios que comprenden la denominación de origen mezcal (IMPI, 2001).

La NOM-070-SCFI-1994 (DOF, 1994), define al mezcal como una bebida alcohólica obtenida por la destilación y rectificación de los mostos preparados con los azúcares extraídos del tallo y base de las hojas de los agaves

mezcaleros (especificados en dicha Norma), sometidos previamente a fermentación alcohólica con levaduras, permitiéndose adicionar hasta un 40% de otros azúcares en la preparación de dichos mostos, siempre y cuando no se eliminen los componentes que le dan las características a este producto.

El mezcal es un líquido de olor y sabor original, incoloro o ligeramente amarillento, existen dos tipos de mezcal el 100% de agave y el mezcal al que se le pueden añadir hasta 40% de otros azúcares. Por el tiempo de almacenamiento se clasifican en tres categorías: joven, reposado y añejo (SCFI, 1994).

Las especies señaladas como mezcaleras por la NOM-070-SCFI-1994 son: *A. angustifolia* Haw, *A. asperrima* Jacobi, *A. Weberi* Cela, *A. patatorum* Zucc, *A. salmiana* Otto Ex *Salm ssp Crassispina* (Trel) Gentry, y otras especies de agave siempre y cuando no sean utilizadas para la elaboración de otra bebida con denominación de origen dentro del mismo Estado.

Sin embargo esta clasificación es inexacta y debería de ser modificada para representar la realidad de una manera más precisa, ya que según datos del Consejo mexicano regulador de la calidad del mezcal (COMERCAM), en la actualidad se utilizan alrededor de 30 especies de *Agave* spp. para la elaboración de esta bebida. Además es necesario especificar que especies son las más utilizadas en cada una de las regiones que gozan de la protección denominación de origen mezcal, ya que en gran medida, la especie influye en la características organolépticas del aguardiente (Aguirre et al., 2001).

#### 4.2.2. Manejo agronómico y cultural del agave

El manejo de la plantación de maguey mezcalero es empírico e insuficiente para catalogarlo como una producción agrícola, más bien se trata de una repoblación o un enriquecimiento de su propia comunidad vegetal, sin embargo existen prácticas culturales para hacer un adecuado manejo de las



magueyeras, con la finalidad de aprovecharlo en la producción de mezcal (Aguirre et al., 2001).

La plantación o repoblación de magueyeras se recomienda hacer con hijuelos vigorosos, de dos años de edad y una altura entre 40 y 60 cm, extraídos de plantas madres sanas que no hayan iniciado su fase reproductiva. La plantación con semilla, es factible bajo condiciones de invernadero y posterior trasplante. Una vez que son removidos los hijuelos, seorean durante dos semanas y se remueven sus hojas basales y raíces muertas. La plantación se realiza justo antes del inicio del periodo de lluvias a una profundidad de 5 cm en hileras perpendiculares a la pendiente dominante y con una densidad de 1000 a 1250 plantas madre por hectárea. Debido a que el agave es una planta adaptada a situaciones ambientales hostiles, durante los años posteriores a la siembra no necesita de gran trabajo, más allá del fundamental cuidado y vigilancia de la plantación.

Una vez que el maguey comienza su proceso de reproducción se realiza la castración del maguey, la cual consiste en extraer la yema florífera del cogollo, con el fin de acumular azúcares en el tallo lo que mejora la calidad como materia prima en la elaboración del mezcal. La sazón es el periodo que transcurre desde la castración a la colecta la cual dura entre uno y dos años.

La recolección se realiza en dos etapas; 1) desvire que es la remoción de las hojas del maguey quedando la cabeza de la piña en pie; y 2) tumba, que consiste en desprender la cabeza cortando el tallo a nivel del suelo con una barra tumbadora. Finalmente las cabezas recolectadas son transportadas por animales de carga o camiones a las fabricas mezcaleras para su cocción, molienda, fermentación y destilación (Aguirre et al., 2001).

Las enfermedades y plagas que se presentan en el maguey causan daños mecánicos y químicos principalmente en la piña, hojas, cogollo y raíces. Los insectos plaga del agave son: gallina ciega, escarabajo rinoceronte, picudo del agave, piojo harinoso, chinche del agave y escama armada (Rubio, 2007).

Mientras que las principales enfermedades son: anillo rojo, mancha gris o tizón foliar, mancha anular, pudrición del cogollo, pudrición de hojas y planta, mancha foliar, *Phytophthora ssp.* y *Alternaria ssp.* Estos daños pueden ser controlados mediante métodos de control biológico, químico, físico y cultural.

#### 4.3. El caso San Felipe

Los registros hacen constar que por lo menos desde 1780 en el municipio de San Felipe, Gto., existe una gran tradición en la elaboración de mezcal. La hacienda de Jaral de Berrios en operación desde el siglo XVIII, da fe de esto ya que probablemente fue la destiladora de mezcal más importante en el país en la primera mitad del siglo XX (IMPI, 2001). Esta tradición mezcalera fue en gran parte responsable del otorgamiento de la protección denominación de origen mezcal.

Actualmente en la zona se observan vestigios de las plantaciones que abastecieron esta industria en épocas pasadas. De la misma forma se encuentra gran cantidad de *Agave ssp.* tanto silvestre como en plantaciones, impulsadas por instancias federales y estatales como: Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), Secretaría de Agricultura Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) y Secretaría de Desarrollo Agropecuario del estado de Guanajuato (SDA), (Mandujano, 2013). Herrera, (2001), menciona que la localización geográfica, las características del suelo y las condiciones climatológicas del Municipio, son propicias para el cultivo de varias especies de agave, tal vez con la excepción del agave Azul que no tolera las bajas temperaturas que se presentan durante el invierno en esta zona.

En esta región los comuneros aprovechan el agave como alimento para ganado y en la fabricación de artesanías, aunque comúnmente extraen pulque y elaboran mezcal a partir de esta planta. La COMERCAM reconoce solo una embotelladora de mezcal en el municipio, sin embargo existen diversas fábricas de corte artesanal organizadas a nivel familiar o ejidal, que elaboran, embotellan y comercializan esta bebida.

#### 4.3.1. Entorno socioeconómico

San Felipe es el municipio de mayor extensión del Estado de Guanajuato con un área de 3, 008.46 km<sup>2</sup>. Ubicado dentro del Altiplano mexicano, presenta un clima que varía de seco a semiseco, con precipitaciones anuales inferiores a los 700 mm. Alberga una población rural de 71, 452 habitantes distribuidos en 489 comunidades, por lo cual es considerado un municipio de carácter rural, donde las principales actividades económicas son la agricultura y la ganadería (INEGI, 2010).

Cuenta con grandes extensiones de tierras dedicadas a la producción agrícola, principalmente de maíz, frijol, chile, trigo y avena, la mayoría de las cuales, son de temporal y una pequeña porción de regadío. En cuanto a la producción ganadera, es uno de los principales productores en la entidad principalmente en bovinos, caprinos y ovinos (Municipio, 2013).

El aprovechamiento forestal se reduce a unas cuantas actividades (alimento para ganado, uso medicinal, material de construcción, extracción de leña y carbón de mezquite, recolección de nopal y tuna), a pesar de la presencia de bosques de encino, pino y de encino pino, y una gran extensión de pastizales y matorrales (CONABIO, 2012). Notable excepción representa el uso del maguey.

Los índices de marginalidad y migración que prevalecen en San Felipe son considerados como altos (CONAPO, 2005), además registra uno de los índices de desertificación más altos del centro del país, estimado en el rango de 50 a 200 toneladas/hectárea/año (Serrano, 2010), aunado a esto, en el municipio como en el resto del norte del estado, se presentan altos índices de deforestación, según la Secretaría de Desarrollo Agropecuario (Mandujano, 2013).

#### 4.3.2. El agave como opción de desarrollo socioeconómico

En este contexto, donde las características ambientales y sociales son adversas, y tomando en cuenta la vocación ambiental, cultural e histórica del municipio, el aprovechamiento sostenible del Agave ssp., como materia prima para la elaboración de mezcal, es una opción viable para el desarrollo socioeconómico del municipio.

Es importante señalar que la producción de mezcal certificado en México ha ido en aumento en los últimos años al presentar un incremento de más de 300% entre el año 2005 y 2009. En el mismo sentido, las exportaciones aumentaron 120% en seis años, para alcanzar un valor anual superior a 9 millones de dólares que junto a las ventas nacionales sumaron un total de más de 200 millones de pesos (SAGARPA, 2012). De acuerdo con cifras de la COMERCAM, México cuenta con cerca de 330, 000 hectáreas de Agave ssp. en explotación propiedad de 15, 000 productores, que generan 29, 000 empleos directos e indirectos. (Financiera Rural, 2011).

Mandujano, (2013) menciona que San Felipe produce 20 mil toneladas de agave y cuenta con una capacidad para producir 400, 000 litros de mezcal por año, lo cual representaría ingresos por venta (tomando en cuenta el precio por litro a 45° y embotellado, según la COMERCAM) por más de 55 millones de pesos.

Pese a estos indicadores que sugieren un sector productivo en crecimiento, y la vocación del municipio para la producción y aprovechamiento del agave, la incertidumbre acerca de la distribución y abundancia de la especie así como la superficie con aptitud para establecer el cultivo, impide el establecimiento de una industria formal que sostenga una producción de mezcal a nivel industrial y por ende limita el aprovechamiento de la denominación de origen, en detrimento de los pobladores locales.

#### 4.3.3. Aprovechamiento sostenible del agave

En los ambientes áridos del país, las condiciones climáticas son poco favorables para el desarrollo de la agricultura y la ganadería intensiva, notables excepciones son las áreas de regadío donde, prospera una agricultura altamente tecnificada y la vegetación natural ha sido totalmente erradicada (Rzedowski, 2006). Este tipo de agricultura se basa en la maximización de las ganancias, implicando una gran inversión de energía y deterioro del ambiente, además de fomentar un sistema que desplaza a los agricultores y trabajadores del campo de la producción de alimentos, comprometiendo así la productividad futura (Gliessman, 2002).

La agroecología concibe al cultivo como un ecosistema (Agroecosistema) en el cual ocurren una serie de procesos ecológicos y su propósito es entender la dinámica y funcionamiento de estos procesos, con el fin de perpetuar en el tiempo la productividad del agroecosistema sin comprometer su estructura y funcionalidad, sin degradar el ambiente y sin perder su viabilidad económica y equidad social (Agricultura sustentable) (Altieri, 1995).

En este sentido la plantación de agave, debe realizarse desde una perspectiva agroecológica, que tome en cuenta el aprovechamiento, de la gran variedad de productos derivados de esta planta, los servicios ecológicos que brinda, así como su cultivo en asociación con otras especies. A su vez, se tiene la necesidad de aumentar las poblaciones silvestres y cultivadas de maguey con nuevas plantas reproducidas por semilla, ya que es primordial mantener la estructura y dinámica de las poblaciones y así asegurar la variabilidad genética (Vázquez et al 2011).

#### 4.4. Sistemas de información geográfica (SIG)

Para realizar un plan integral de manejo de los recursos forestales (en este caso del agave), es necesario conocer su arreglo o disposición en el espacio, la dinámica de su desarrollo y aprovechamiento, así como las áreas donde es factible de realizar con mayor probabilidad de éxito su aprovechamiento.

Supone también que se contemple tanto el uso como la conservación de la diversidad biológica, paisajística y cultural presentes en la comunidad (Bocco et al., 2001). Estos objetivos se pueden alcanzar en el marco de los sistemas de información geográfica (SIG), ayudado de técnicas de percepción remota, agricultura de precisión y trabajo de campo.

Los SIG son un poderoso grupo de herramientas capaces de coleccionar, almacenar, recuperar, transformar y desplegar datos espaciales del mundo real para un grupo particular de propósitos (Burrough, 1986). Los SIG están integrados por cuatro elementos: módulo de entrada de datos (selección y captura), módulo de manejo de datos (almacenamiento, recuperación, base de datos geográficos), módulo de análisis de datos (modelamiento, reglas o normas de análisis, monitoreo) y módulo de salida de la información (productos generados, intermedios y finales).

El objetivo central de un SIG es generar información válida para la toma de decisiones. En este sentido, los tomadores de decisiones y los generadores de información deben ser una parte integrante del SIG; de lo contrario, el sistema no cumple su cometido principal (Rossete y Bocco, 2003).

#### 4.4.1. SIG de código abierto

Los SIG de código abierto son Software bajo licencia pública general, que pueden ser utilizados para cualquier propósito, pueden ser sujetos a, estudio, adaptación, distribución y mejoramiento, teniendo la libertad de difundir estas modificaciones, de modo que toda la comunidad se beneficia (Stallman, 1985). Los SIG de código abierto desempeñan un papel importante en la adaptación de la tecnología SIG, ya que estimulan nuevos enfoques experimentales y facilitan el acceso de esta tecnología, a los usuarios que no pueden adquirir o no quieren utilizar productos comerciales, debido a su elevado costo.

QGIS es un SIG que permite de manera sencilla y práctica la creación, manipulación, edición, y visualización de capas en formato raster y vectorial.

Su interfaz lo convierte en un SIG muy amigable con el usuario principiante y práctico para el usuario experimentado. Su diseñador de impresión permite la creación de mapas de forma sencilla con gran calidad profesional.

Una de las grandes versatilidades de QGIS es su facilidad de interconexión con muchas bases de datos geospaciales como PostGIS, SpatiaLite, ORACLE Spatial entre otras, tiene una conexión directa con bases de datos SpatiaLite y existen varios complementos que facilitan el manejo de esta base de datos. Además Una de sus mayores ventajas es la posibilidad de usar QGIS como interfaz de GRASS GIS, utilizando toda la potencia de análisis de este último en un entorno de trabajo más amigable. Actualmente ha sido liberada la versión 2.0 QGIS Dufour.

El Sistema de Soporte y Análisis Geográfico de Recursos, comúnmente referido como GRASS (por sus siglas en inglés) es un sistema de información geográfica, originalmente desarrollado por el ejército de estados unidos como una herramienta para el ordenamiento territorial y planeación ambiental (Neteler y Mitasova, 2008).

GRASS GIS es un SIG que manipula datos en formato raster y vectorial, con procesamiento de imágenes multiespectrales integrado y subsistemas de visualización de datos. Incluye más de 350 módulos para tratamiento, procesamiento, análisis y visualización de datos georreferenciados, se puede comunicar con hardware tanto de entrada como de salida, para desarrollar y registrar nuevas bases de datos. Es un software de código abierto lanzado bajo licencia pública general, por la Open Source Geospatial Foundation.

#### 4.5. Caracterización Ecogeográfica y Zonificación Agroecológica

La caracterización ecogeográfica es la delimitación de unidades paisajísticas con cierto grado de homogeneidad biofísica necesarias para: 1) manejar el conocimiento acerca de la distribución de los recursos naturales, 2) evaluar la aptitud productiva del territorio y 3) evaluar los conflictos potenciales entre

aptitud y uso actual (Rosete y Bocco, 2003). En otras palabras la caracterización Ecogeográfica es la descripción de las características, climáticas, edáficas, fisiográficas y biológicas de un lugar determinado con el fin de diversificar las actividades productivas de acuerdo a la oferta ambiental, en un marco de aprovechamiento sostenible y conservacionista.

Se debe mencionar que el concepto de caracterización ecogeográfica o regiones ecogeográficas no está claramente definido y es usado con diferentes contextos por diversas disciplinas, sin embargo lo esencial del concepto, de delimitar la distribución de los seres vivos, en relación a los factores ambientales, se mantiene. Un concepto relacionado es, la zonificación agroecológica, que describe las características ambientales de una región, en relación con su vocación para sostener uno o diversos cultivos en específico (FAO, 1997; Bocco et al., 2001; Parra, 2010).

Una zona Agroecológica es una unidad cartográfica de recursos de tierras, definida en términos de clima, fisiografía y suelos, y que tiene un rango específico de limitaciones y potencialidades para el uso de tierras (FAO, 1997). La zonificación agroecológica se centra en la caracterización de los factores físicos (clima, suelo, topografía), biológicos (vegetación y fauna) y socioeconómicos (presencia del hombre y sus actividades) bajo los cuales se desarrollan los cultivos

#### 4.6. Clasificación multiespectral

##### 4.6.1. Percepción remota

La percepción remota es la ciencia y arte de obtener información acerca de un objeto, área, o fenómeno, a través del análisis de datos, adquiridos mediante un dispositivo que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno bajo investigación (Kumar, 2005). La energía reflejada o emitida por la superficie de la tierra es medida usando un sensor montado sobre una aeronave o una plataforma espacial, existen fuentes de energía artificial, generadas por la



propia plataforma como es el caso del láser y el radar. Sin embargo existe una limitación fundamental, la atmosfera de la tierra al interactuar con la energía electromagnética no permite el paso de todas las longitudes de onda, actuando como un filtro.

La obtención de una imagen implica la dispersión o emisión de la energía de la superficie, seguido de la transmisión a través de la atmosfera hacia el sensor montado en la plataforma que registra esa energía. La energía es transmitida a tierra como una señal digital después de lo cual es procesada y corregida dentro de una imagen lista para interpretación (Richards, 2013). El elemento final de la percepción remota es alcanzado cuando se aplica la información extraída de la imagen en el entendimiento, descubrimiento de un fenómeno o resolución de un problema en particular.

#### 4.6.2. Espectro electromagnético

La radiación electromagnética es definida como toda la energía que se mueve con la velocidad de la luz en un patrón de onda continuo (Khorram et al., 2012), la energía electromagnética es generada por varios mecanismos a nivel atómico. La actividad nuclear del sol produce un amplio espectro de radiación electromagnética, la cual es transmitida a través del espacio sin experimentar cambios mayores (Campbell y Wynne 2011).

La radiación electromagnética está formada por un campo eléctrico y uno magnético, que se mueven con distintos ángulos en relación a su desplazamiento, esta energía puede caracterizarse mediante las propiedades de: longitud de onda, frecuencia, amplitud y fase. La luz visible es solo una categoría del espectro electromagnético, otros tipos de radiación electromagnética son las ondas de radio, el infrarrojo cercano e infrarrojo visible, los rayos x, gamma y beta, juntos comprenden el espectro electromagnético (Figura. 1).

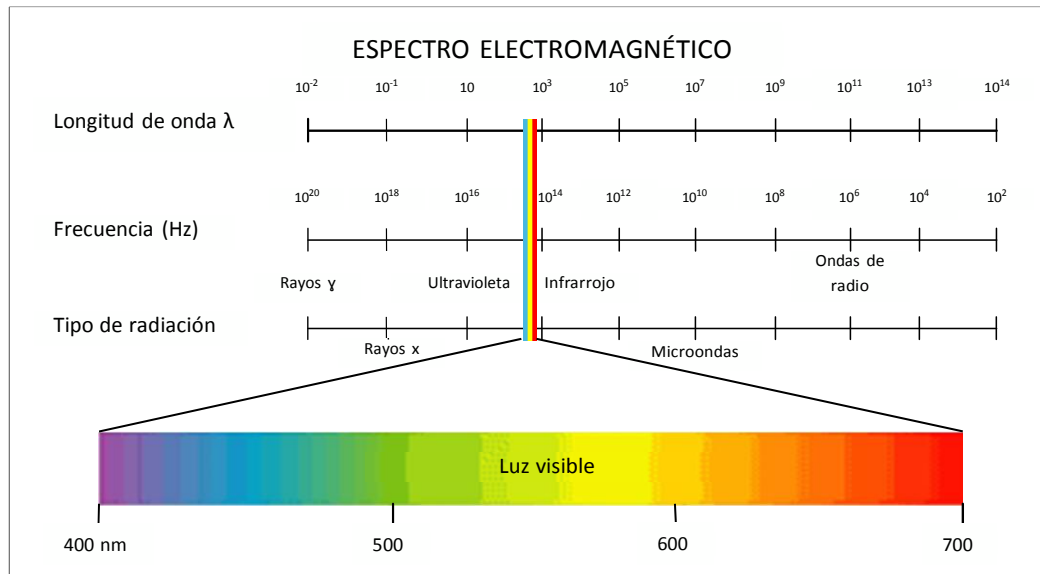


Figura 1. Escala del espectro electromagnético.

#### 4.6.3. Plataformas

El sistema de adquisición de datos consiste principalmente en el sensor y la plataforma en la cual reside el sensor. La plataforma puede estar en la superficie, en el aire o en el espacio. Las plataformas espaciales son en su mayoría satélites, que pueden presentar una órbita geoestacionaria o polar. Existen diversas plataformas (Cuadro 3), que fueron diseñadas con especificaciones y propósitos diferentes, con gran variedad de tipos de sensor (Liang et al., 2012). Las especificaciones de la plataforma y el sensor, determinan la resolución de los datos adquiridos por percepción remota. Existen cuatro tipos de resolución de los datos: espacial, espectral, temporal y radiométrica.

Cuadro 3. Características de los principales sensores (modificado de Khorram et al., 2012).

Sensor	Cobertura	Resolución Espacial (m)	Resolución Temporal	Resolución radiométrica	Resolución Espectral ( $\mu\text{m}$ )	No. De Bandas
ETM+ Landsat 7	185 km	15 (Pan), 30(M), 60 (IT)	16 días	8 bits	.52-.9 (Pan), .45- 2.35. 10.4-12.6	7+P

Sensor	Cobertura	Resolución Espacial (m)	Resolución Temporal	Resolución radiométrica	Resolución Espectral (um)	No. De Bandas
ASTER EOS Terra	60 km	15 (IVC), 30 (IOC), 90 (IT)	4-16 días	8 bits, 12 bits	.52-.86, 1.60-2.43, 8.125-11.65	14
AVHRR NOAA 6-196	2 700 km	1100	12 horas	10 bits	.58-12.5	6
HRVIR SPOT 4,5 Vegetación	60 km	10 (Pan), 20 (M)	26 días	8 bits	.61-.68 (Pan), .50-1.75	4+ P
SPOT 4,5	2 250 km	1 150	26 días	10 bits	.43-1.75	4
HGR SPOT 5	60 km	2.5-5 (Pan), 10 (IVC), 20 (IOC)	26 días	8 bits	.48-0.71(Pan), .50-1.75	4+P
Quickbird	18 km	.65 (Pan), 2.62 (M)	2.5-5.6 días	11 bits	.405-1.53 (Pan), .43-.918	4+P
GeoEye-1	15.2 km	.41 (Pan), 1.65 M	<3 días	11 bits	.45-.80 (Pan), .45-.92	4+P

IT: Infrarrojo termal, IVC: Infrarrojo visible y cercano, M: Multiespectral, P: Pancromático, IOC: Infrarrojo de onda corta, m: metros, um: nanómetros.

#### 4.6.3.1. Programa Spot

El programa Spot (Sistema para la observación de la tierra) es una plataforma espacial diseñada en Francia por el CNES (Centro nacional de estudios espaciales), y desarrollada en colaboración con Bélgica y Suecia. La constelación Spot se conforma por una serie de satélites civiles de observación de la tierra que entraron en operación desde 1986. A la fecha se han lanzado 7 satélites Spot, proporcionando imágenes de media y alta resolución de la superficie de la Tierra. Una de las ventajas del sistema, es su capacidad de recepción de imágenes en tierra, pues cuenta con un total de 43 estaciones distribuidas entre los 5 continentes. El Spot 5 fue lanzado en mayo del 2002 y actualmente se encuentra en operación. Transporta un instrumento de alta resolución geométrica (HRG), tiene múltiple resolución espacial de 2.5 m y 5 m en el modo pancromático y de 10 m en el modo multiespectral (Cuadro 4). Cada instrumento cubre una franja de 60 kilómetros lo que permite obtener imágenes de grandes áreas en una sola toma. Además cuenta con un instrumento de alta resolución estereoscópica (HRS), diseñado especialmente

para adquirir modelos digitales de elevación de extensas áreas, a lo largo de la trayectoria del satélite (Van Oosterom et al., 2005).

Cuadro 4. Aplicaciones de las bandas del satélite Spot5.

Dominio espectral	Banda	Longitud de onda(um)	Aplicación
Verde	1	0.50 – 0.59	Barimetría en aguas turbias, estimación de sedimentos, vigor de la vegetación.
Rojo	2	0.61 – 0.68	Clasificación de cultivos, color de los suelos y del follaje de las plantas.
Infrarrojo Cercano	3	0.78 – 0.89	Estudio de biomasa, tipos de bosques, delimitación agua-suelos.
Infrarrojo medio	4	1.58 – 1.75	Humedad en vegetación, diferenciación nubes-nieve
Pancromática	1	0.48 – .071	Catastro, cartografía básica, planificación urbana.

#### 4.6.4. Imagen Multiespectral

La imagen es capturada por la plataforma mediante una serie de detectores fotoeléctricos que transforman los niveles de radiancia, procedentes de la superficie terrestre, en valores numéricos que se denominan niveles digitales. El valor del nivel digital correspondiente a un pixel será, de este modo proporcional a la intensidad de radiancia procedente de la superficie. Para ello se utilizan dispositivos de conversión analógico-digital. El procedimiento de formación de la imagen digital se repite para cada una de las bandas generándose como resultado final una matriz tridimensional en la que el valor digital de cada pixel está ubicado en una fila, una columna y una banda. De este modo se acuña el concepto de imagen multiespectral (Pérez y Muñoz, 2006).

#### 4.6.5. Firma espectral

Para cualquier objeto dado, la cantidad de radiación solar que refleja, absorbe o transmite varía de acuerdo a la longitud de onda que incide sobre él. Esta importante propiedad de la materia, hace posible identificar diferentes

materiales o clases, y separarlas mediante su firma espectral. En principio, se pueden reconocer varias clases de coberturas y distinguirlas unas de otras por estas diferencias en la cantidad de energía que reflejan. La reflectancia es definida como la proporción del flujo incidente sobre la superficie, que es reflejado por la superficie. La reflectancia con respecto a la longitud de onda es llamada firma espectral, la cual se asume que es única para todos y cada uno de los objetos. Una cobertura puede ser identificada por su firma espectral, si el sensor cuenta con la suficiente resolución espectral para distinguir el espectro de esta cobertura, del de otras. Este principio provee las bases para la clasificación multiespectral (Kumar, 2005).

#### 4.6.5.1. Firma espectral de la vegetación

En las plantas la reflectancia es baja, en la región del azul y rojo del espectro electromagnético, debido a la absorción de la energía por la clorofila para la fotosíntesis. Presenta un pico de refracción en la región del verde, en la región del infrarrojo cercano, la reflectancia es mucho más alta que en la región visible debido a la estructura celular de las hojas (Kumar, 2005). Por lo tanto la vegetación puede ser identificada por un alto valor en el infrarrojo cercano y un valor bajo de reflectancia en la región visible. Sin embargo para el mismo tipo de vegetación, la firma espectral también depende de otros factores, como el contenido de humedad y forma de la hoja, la salud de las plantas, reflectancia del sustrato, geometría de la plantación y asociación con otras especies (Chuvieco, 2008).

#### 4.6.6. Clasificación multiespectral de imágenes satelitales.

La clasificación multiespectral es una técnica de extracción de información que analiza la respuesta espectral de cada pixel en todas las bandas y lo asigna a categorías establecidas en base a idénticas respuestas espectrales (Meliá, 1991). La clasificación multiespectral consiste en agrupar los pixeles en un número finito de clases individuales con base en sus niveles digitales. Si un pixel satisface un conjunto dado de criterios, entonces el pixel se asigna a la

clase correspondiente a ese criterio (Smith y Brown, 1995). Este proceso también se conoce como segmentación de la imagen. Existen dos maneras de clasificación: supervisada y no supervisada.

#### Clasificación supervisada

La clasificación supervisada es controlada estrechamente por el analista. En este proceso, el usuario selecciona píxeles que representan patrones o rasgos de la cobertura terrestre que él reconoce, o que puede identificar con ayuda de otras fuentes, como fotografías aéreas, datos de verdad de terreno o mapas (Smith y Brown, 1995). Antes de la clasificación se requiere conocer los datos y las clases deseadas. Mediante la identificación de patrones, se puede “entrenar” el sistema computacional para identificar píxeles con características similares. Si la clasificación es exacta, las clases resultantes representan las categorías de datos que se identificaron originalmente.

La clasificación supervisada requiere de conocimiento previo de la zona de estudio y sus diferentes coberturas. Con base en este conocimiento se definen y delimitan sobre la imagen las áreas de entrenamiento o pilotos (Posada, 2012). El resultado del entrenamiento es un conjunto de firmas que define una muestra de entrenamiento o conglomerado. Cada firma corresponde a una clase y se usa con una regla de decisión para asignar los píxeles del archivo de la imagen a una clase (Smith y Brown, 1995).

#### Clasificación no supervisada

En este método no se requiere conocimiento de los tipos de cobertura a priori. El proceso se basa en la elección de las bandas espectrales de la imagen a clasificar, definición del número de clases espectrales, selección de los criterios de similitud y algoritmos de agrupación de los niveles digitales. Existen diversos procesos de clasificación no supervisada entre ellos, la técnica ISODATA.

ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) es un método de aglomeración que usa las distancias espectrales. Interactivamente clasifica los píxeles, redefine el criterio para cada clase y clasifica nuevamente, hasta que los patrones de distancia espectral de los datos emergen gradualmente (Smith y Brown, 1995).

El resultado de la clasificación no supervisada es una categorización de la imagen en clases espectrales y el usuario debe asignar el significado temático a estas, donde reside su mayor limitación. Así que, en general, este método no es recomendable para producir mapas temáticos, sino como paso previo en la clasificación supervisada, la cual involucra conocimiento previo del área de estudio (Posada et al., 2012).

#### 4.6.7. Índice Kappa

Kappa es un índice del desempeño global de la clasificación resultante. Está definido como la precisión de la predicción en relación a la predicción al azar. Un valor alto de Kappa indica que la predicción tiene errores bajos tanto de omisión como de comisión (Fielding y Bell 1997). Se calcula mediante la siguiente fórmula.

$$Kappa = \frac{(n_{11} - n_{12})(n_{21} - n_{22})}{(n_{11} + n_{12})(n_{21} + n_{22})}$$

Este índice varía entre 0 y 1; cuanto más cerca de 1 esté el valor, significa un mejor desempeño de la clasificación (Naoki, 2006).

#### 4.7. Aptitud potencial

Para realizar un estudio de aptitud potencial del territorio para la producción de una especie, es necesario tener conocimiento detallado de al menos tres aspectos; 1) los requerimientos edafoclimáticos y fisiográficos de la especie; 2) las características edafoclimáticas y fisiográficas de los sitios donde se pretende llevar a cabo su aprovechamiento; y 3) un método que permita unificar los dos aspectos anteriores (Olivas et al., 2007).

Producir un cultivo donde sus requerimientos agroecológicos son plenamente cubiertos, sin duda asegura un mayor rendimiento, con mejores ganancias y menor deterioro ambiental. En otras palabras, el potencial productivo es la delimitación geográfica espacial de las áreas o zonas donde es factible realizar con mayor probabilidad de éxito, la producción de diferentes especies agrícolas, pecuarias o forestales, con poco o ningún deterioro al medio ambiente (Díaz et al., 2012).

Los estudios de aptitud potencial se centran principalmente en cultivos básicos y comerciales, no obstante existen algunos trabajos sobre aptitud potencial en el género *Agave*, destacando el trabajo de Ruiz et al., (2002; 2007) en *A. tequilana*, donde aborda los efectos de las variables ambientales, sobre la fisiología, distribución y productividad de *A. tequilana*. Otro trabajo que muestra resultados interesantes es el realizado por Olivas et al., (2007), que evaluaron el potencial de *A. durangensis* mediante el análisis multicriterio, ponderando las distintas variables ambientales de acuerdo al grado de importancia que tienen, sobre la distribución de *A. durangensis*. En el caso de San Felipe, Gto., Mandujano, (2013) realizó un estudio de aptitud potencial para el establecimiento de *A. salmiana* para prevenir la erosión de la microcuenca Laguna de Guadalupe.



## V METODOLOGÍA

### 5.1. Área de estudio

El Área de estudio comprendió el municipio de San Felipe, que se localiza en la región norte del estado de Guanajuato dentro de la Altiplanicie Mexicana, Sus coordenadas extremas son: 21° 50' 21.0 N, 21 08 16.50 S, 101 40 44.8 E, y 100 50 02.2 O, con una altitud promedio de 2 080 msnm. Sus colindancias son al norte con el estado de San Luis Potosí, al sur con los municipios de León y Guanajuato, al este con los municipios de Dolores Hidalgo y San Diego de la Unión y al oeste con el municipio de Ocampo y una porción con el estado de Jalisco. Es el municipio de mayor extensión del Estado, con una superficie de 3 Mil 846 kilómetros cuadrados, equivalente al 9.8% de la superficie total del Estado (Fig. 2). Presenta climas de tipo estepario semiseco (BS) y templado (C) en la clasificación de Köppen modificada por García (1973). La precipitación anual oscila entre 318 y 780 mm y la temperatura media anual va de 16 a 18°C (Herrera, 2001). Los principales tipos de vegetación son: pastizal natural, matorral xerofito, bosques de encino y bosques de pino.

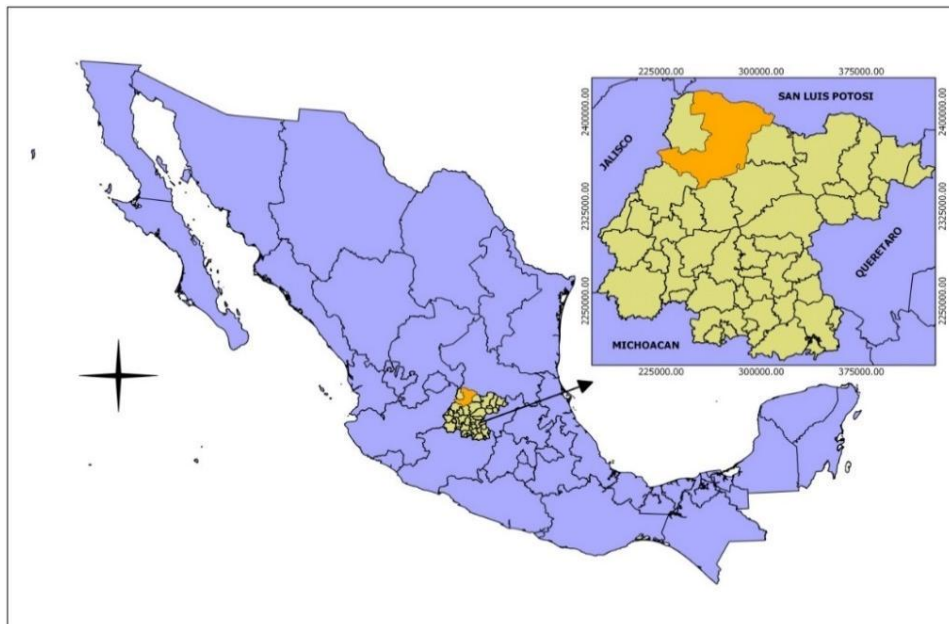


Figura 2. Ubicación Geográfica del Municipio de San Felipe, Gto.

## 5.2. Caracterización Ecogeográfica

En la caracterización Ecogeográfica se empleó información proveniente de diversas fuentes: 1) Modelo Digital de Elevación de la plataforma ASTER GDEM; 2) Normales climatológicas del periodo 1981-2010 calculadas con datos de 20 estaciones climáticas del Sistema Meteorológico Nacional (SMN), que en conjunto cubren la zona de estudio y sus alrededores (Cuadro 5); 3) Cartografía digital en formato shape a escala 1:250 000 de los temas: subprovincias fisiográficas, edafología y uso de suelo y vegetación, provenientes de la Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO) y del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI); 4) Cartografía digital de la superficie agrícola generada por el INIFAP, a partir de ortofotos escala 1: 10 000 (Paredes et al., 2011).

Cuadro 5. Estaciones meteorológicas del área de estudio.

Estación	Municipio	Longitud	Latitud	MSNM
Jaral de Berrios	San Felipe, Gto.	21° 41´	101° 01´	1 855
San Felipe (DGE)	San Felipe, Gto.	21° 28´	101° 12´	2 080
La quemada	San Felipe, Gto.	21° 81´	101° 07´	2 041
El carbón	San Felipe, Gto.	21° 16´	101° 08´	2 100
Lobos	San Felipe, Gto.	21° 21´	101° 37´	1 834
Tres encinos	San Felipe, Gto.	21° 23´	101° 25´	2 380
San Pedro Almoloya	San Felipe, Gto.	21° 36´	101° 14´	2 130
Santiago	Villa de Arriaga, Slp.	21° 52´	101° 16´	2 221
Bledos	Villa de reyes, Slp.	21° 50´	101° 06´	1 954
Villa de reyes	Villa de reyes, Slp.	21° 48´	100° 56´	1 820
Ojuelos (DGE)	Ojuelos, Jal.	21° 51´	101° 35´	2 220
Paso del cuarenta II	Lagos de Moreno, Jal.	21° 29´	101° 45´	1 998
Sta. Ma. Del rio (DGE)	Sta. Ma. Del rio, Slp.	21° 47´	100° 44´	1 722
Dolores Hidalgo	Dolores Hidalgo, Gto.	21° 09´	100° 55´	1 937
Ciénega de negros	Guanajuato, Gto.	21° 10´	101° 14´	2 660
Nuevo Valle Moreno	León, Gto.	21° 12´	101° 25´	2 258
Media luna	León, Gto.	21° 14´	101° 38´	2 100
Los trojes	Ocampo, Gto.	21° 33´	101° 24´	2 190
Ocampo	Ocampo, Gto.	21° 38´	101° 28´	2 250
Arperos	Guanajuato, Gto.	21° 06´	101° 23´	1 970

MSNM: Metros sobre el nivel del mar. °, ´: Grados y minutos.

### 5.2.1. Datos del relieve (Pendiente y Orientación)

La información del modelo digital de elevación (MDE) se obtuvo a partir de dos imágenes con numero; ASTGTM2\_N21W102 y ASTGTM2\_N21W101 provenientes de la plataforma ASTER GDEM, la cual, es un proyecto de colaboración entre la NASA y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón, que tiene la finalidad de proporcionar información actualizada, de alta resolución y fácil acceso para el estudio de la superficie terrestre. Dichas imágenes son de tipo estereoscópico y son capturadas por las bandas b1 y b2n del satélite Terra, las imágenes disponibles cubren un grado cuadrado de superficie, con una resolución de pixel de 30 m. Según Hirt et al., (2008), el MDE obtenido por la plataforma ASTER tiene resultados más detallados del terreno en comparación con otros.

Para obtener el MDE de San Felipe En GRASS GIS se emplearon dos imágenes ASTER, con las que se generó un mosaico que fue recortado utilizando como mascara el límite municipal.

Las coberturas de pendiente y orientación (resolución de pixel de 30 m), se generaron en GRASS GIS mediante el modulo r.slope.aspect, utilizando como base el MDE. El raster de orientación generado, se recodifico (modulo r.recode) asignando valores de 0° a 135° y de 315° a 360° para la exposición Norte-Este y los valores restantes para la exposición Sur-Oeste. Las coberturas resultantes se prepararon en Qgis para visualización e impresión en escala 1: 500 000.

### 5.2.2. Principales variables climáticas

Con las coordenadas geográficas de las estaciones meteorológicas se creó una cobertura de puntos en formato shape, a la cual se le indexaron los datos promedio anuales y mensuales de cada una de las distintas variables climáticas.

## Tipo de clima

A partir de la herramienta polígonos de Voronoi, se generó una capa shape, con el área de influencia de las 8 estaciones que se encuentran más próximas o dentro del municipio, para dichas estaciones, se descifro el tipo de clima de acuerdo a la clasificación de Köppen, modificada por García, (1973).

Para generar las coberturas raster (resolución de pixel 30m) de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación, se interpolaron los datos climáticos normales de cada variable en el módulo v.surf.idw de GRASS GIS, que utiliza el método de ponderación inversa a la distancia (IDW por sus siglas en Ingles), el cual según Luna et al., (2003). Proporciona resultados más razonables, incluso con datos tan irregulares como la precipitación.

## Temperatura Media anual (Tma)

Debido a que la variable temperatura está muy ligada a la topografía y a la situación geográfica, se utilizó la técnica de regresión múltiple con corrección de residuos propuesta por De Pando, (2009). Considerando lo anterior se calculó una ecuación de regresión múltiple que calcula la temperatura media anual en base al conjunto de variables predictoras, resultando:

$$TMED\_ANU=48.43+0*LATITUD+0*LONGITUD-0.01*ELEV$$

Esta ecuación se ejecutó en la calculadora raster de GRASS GIS, obteniendo un mapa resultado de la regresión lineal, posteriormente se calcularon los residuales para los valores de temperatura media anual, estos valores se interpolaron mediante el método IDW utilizando el módulo v.surf.idw de GRASS GIS con una resolución de pixel de 30 m. Una vez obtenidos ambos mapas, se sumaron para obtener el mapa raster final, de temperatura media anual.

### Temperatura Nocturna (Tna)

Debido a que la temperatura nocturna es una de las variables climáticas fundamentales para el desarrollo de las plantas con metabolismo CAM y a que no es una variable que se registre de manera común en las estaciones, se calculó la Tna mediante las siguientes expresiones algebraicas propuestas por Ruiz et al., (2003).

$$= \frac{[(T_{xm} - T_{tim})](11 - T_o)}{4(12 - T_o) \frac{11 - T_o}{11 + T_o}}$$

Dónde:

Tn= Temperatura nocturna media mensual °C

Txm= Temperatura máxima media mensual, °C

Tim= Temperatura mínima media mensual, °C

To = 12 - 0.5N, donde N = duración del fotoperiodo

Para calcular la temperatura nocturna media anual se usó la siguiente ecuación:

$$= \frac{\sum}{12}$$

Estas ecuaciones se realizaron en una hoja de cálculo, una vez obtenidos los valores de Tna para cada estación, se generó la cobertura raster (con resolución de pixel 30 m.) mediante interpolación utilizando el modulo v.surf.idw.

Cada una de las coberturas climáticas se prepararon en Qgis para visualización e impresión en escala 1: 500 000.

### 5.2.3. Cartografía digital INEGI, CONABIO

La cartografía digital proveniente de INEGI Y CONABIO (subprovincias fisiográficas, edafología y uso de suelo y vegetación), fue editada y

homogenizada al formato vectorial en el sistema de proyección universal transversa de Mercator (UTM), con datum wgs84 y zona 14, mediante el Software de acceso libre QGIS. Posteriormente se recalcularon las áreas para las distintas categorías, incluidas en cada cobertura, generando sus respectivas tablas de información. Las capas resultantes se prepararon en el diseñador de impresión de Qgis, en escala 1:500 000.

### 5.3. Determinación de los requerimientos agroecológicos de agave mezcalero

El proceso para determinar los requerimientos agroecológicos del *Agave ssp.*, se realizó en dos etapas retroalimentadas entre sí; Revisión literaria y trabajo de campo. En la primera se realizó una minuciosa consulta bibliográfica (Artículos científicos, libros, publicaciones, internet etc.) acerca de los factores que intervienen en el óptimo desarrollo y distribución de la especie con el fin de identificar las necesidades de temperatura, precipitación, altitud, pendiente, tipo de suelo y asociación vegetal. Esta información se complementó con el trabajo de campo, el cual se detalla a continuación.

Los recorridos de campo se realizaron en un lapso de dos meses entre abril y mayo, basados en las zonas reportadas por Herrera, (2001) y Mandujano, (2012), además del conocimiento de pobladores locales (La fig.3). Los sitios con presencia de *Agave spp.*, se georreferenciaron utilizando un GPS Garmin eTrex®20 previamente calibrado. Estos puntos se utilizaron como referencia en la elaboración del mapa de aptitud potencial, la clasificación multiespectral y la evaluación del índice Kappa, además de complementar los requerimientos agroecológicos del agave mediante la superposición de capas.

Las especies de *Agave spp.* Registradas en campo fueron identificadas en base a la clasificación de Gentry, (1982). En cuanto al factor edáfico se tomaron muestras de suelo de 30 cm de profundidad que fueron enviadas al laboratorio de suelos del Campo Experimental Bajío del INIFAP, para su análisis físico-químico así como muestras a 10 cm para densidad aparente. A la par, se implementó la técnica de muestreo de vegetación de la cuerda

pendiente, en la cual en una superficie de 1000 m<sup>2</sup> se registró el número de plantas de agave. Además se registraron las principales especies vegetales asociadas a la planta de maguey.

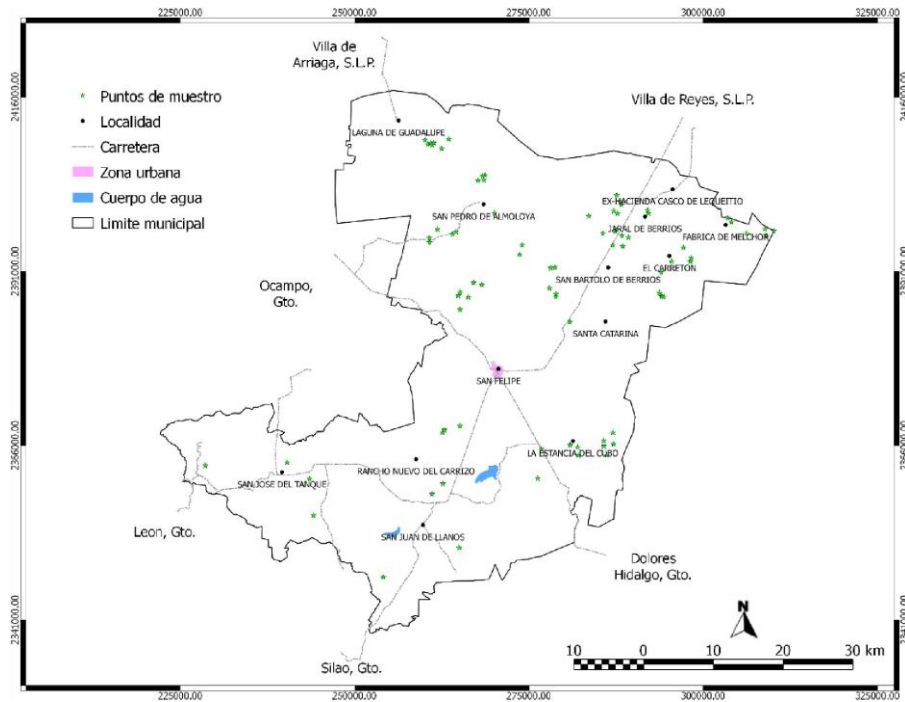


Figura 3. Puntos de muestreo Agave spp.

#### 5.4. Estimación de la superficie y distribución de agave, mediante la clasificación multiespectral

Para estimar la superficie ocupada por el agave y su distribución, se efectuó la clasificación digital, Supervisada y no supervisada, de 5 imágenes multiespectrales procedentes de la plataforma Spot5 y adquiridas mediante convenio ERMEXS- INIFAP, con nivel de procesamiento 2A y modo J (10 m. de pixel y Multiespectrales). Dichas imágenes fueron capturadas a medio día, el 1 de noviembre de 2010, por el instrumento HGR 2 (High Geometrical Resolution), a bordo del Spot5.

El proceso de clasificación multiespectral, así como el tratamiento y manipulación de las imágenes Spot5 se realizó en el software Erdas image

9.1, aprovechando sus diversos módulos y herramientas, los cuales se mencionan a continuación.

El primer paso consistió en desplegar las imágenes multiespectrales en un Viewer para analizar la calidad, correspondencia geoespacial e información contenida (metadatos, histograma y niveles digitales) en las imágenes.

Empleando el módulo Mosaic Pro, se unieron las 5 imágenes, corrigiendo las diferencias de contraste, entre las distintas imágenes, a través de la coincidencia de histogramas, y definiendo como área de salida un archivo Shape del municipio de San Felipe, lo que acotó la imagen resultante a la zona de estudio (Fig. 4).

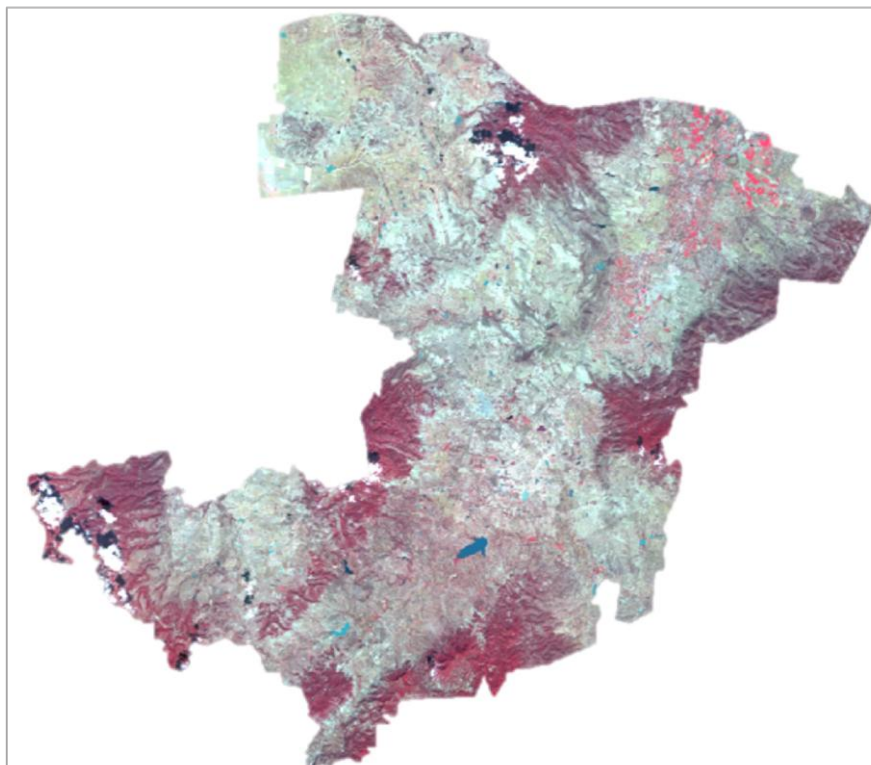


Figura 4. Imagen multiespectral del municipio de San Felipe, Gto.

La imagen obtenida en el proceso anterior se visualizó utilizando diversas combinaciones de bandas, al realizar un análisis visual se identificó que la combinación de las bandas 1,2 y 3 era las más adecuada para distinguir las



distintas coberturas presentes en la imagen. Enseguida se elaboró el perfil espectral de la imagen, empleando Profile Tools, para analizar el comportamiento espectral de las diversas coberturas presentes, en relación con las bandas del sensor, haciendo énfasis en las clases de interés (Fig. 5). Al realizar este proceso, se hace una primera valoración sobre la posibilidad de separación espectral de las clases temáticas y la utilidad de cada banda espectral de la imagen en el proceso de clasificación supervisada (Posada et al., 2012).

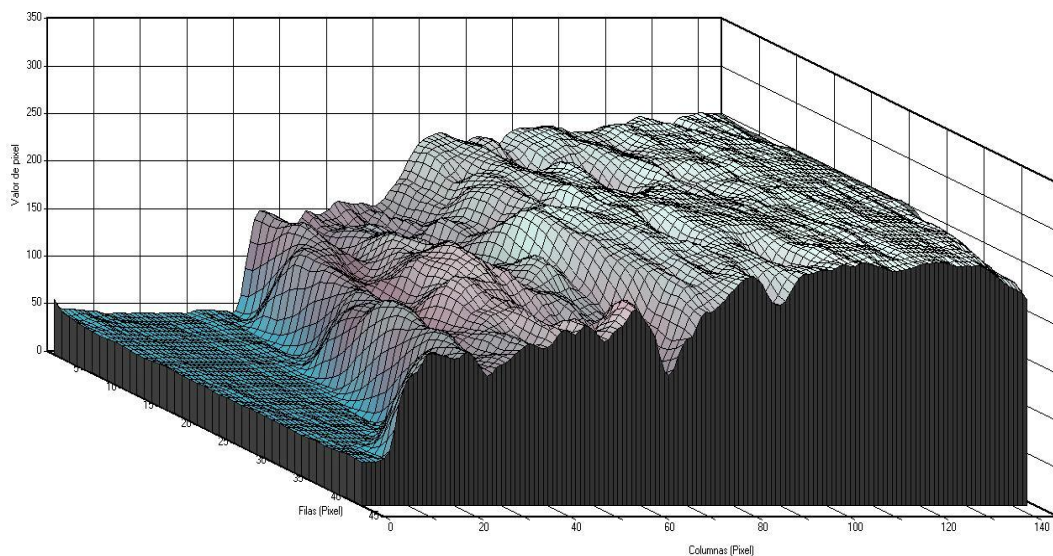


Figura 5. Distribución de los valores digitales de tres coberturas diferentes (De izquierda a derecha: Agua, matorral y suelo desnudo) en la banda 4 (infrarrojo medio) de la imagen Spot 5.

#### Clasificación no supervisada

En primer lugar se ejecutó la clasificación del tipo no supervisada, en el módulo Unsupervised Classification que emplea el método ISODATA, se definieron 15 clases distintas, un máximo de 24 interacciones y un umbral de convergencia de 0.95.

Posteriormente, se procedió a evaluar la imagen clasificada, identificando las distintas clases resultantes y asignando sus respectivos nombres y colores,

para lo cual se comparó la imagen obtenida, con ortofotos de la zona de estudio en escala 1:10 000 y resolución espacial de 1 m.

#### Clasificación supervisada

La información obtenida, en el análisis visual-espectral de la imagen y la clasificación no supervisada, arrojó una idea acerca del número aproximado de clases a discriminar, tomando en cuenta esta información se procedió a delimitar las áreas de entrenamiento.

Como primer paso se desplegó la imagen multiespectral utilizando las bandas 1,2 y 3, enseguida se realizó la creación de las firmas espectrales de las distintas coberturas utilizando Signature Editor, a partir de 30 datos de verdad georreferenciados para identificar las clases de interés (plantaciones de agave, matorral y pastizal) y 20 datos obtenidos de ortofotos con resolución espacial de 1 m, para las demás coberturas (área agrícola, área forestal, cuerpos de agua, nubes, vías de comunicación y zona urbana).

Las áreas de entrenamiento se recolectaron teniendo en cuenta la variabilidad espectral de las diferentes clases, se tomaron diversas muestras distribuidas en la imagen que sumaban alrededor de 300 píxeles por clase.

Posteriormente se evaluaron las áreas de entrenamiento y las firmas espectrales creadas, mediante las opciones de análisis de histogramas, curvas espectrales, matriz de contingencia, reporte y separabilidad espectral.

Después de evaluar las firmas espectrales se realizaron los ajustes correspondientes borrando, fusionando, modificando y renombrando las áreas de entrenamiento. Obteniendo 9 clases distintas a clasificar, las cuales mostraron la mejor separabilidad en las bandas 1,2 y 4 de Spot5. Estas modificaciones fueron guardadas en un archivo .sig, y empleadas como parámetro en el proceso de agrupación digital.

La clasificación de la imagen se ejecutó desde Signature Editor, en el módulo Supervised Classification, utilizando las bandas que mostraron la mayor separabilidad y aplicando el algoritmo de agrupación de Máxima verosimilitud.

Una primera evaluación del índice kappa fue realizada sobre la imagen clasificada, en ERDAS 9.1 con accuracy assessment utilizando 199 puntos de control (Completamente al alzar y registrados en campo). Para verificar la exactitud se utilizaron datos de verdad, ortofotos escala 1:10 000, capas temáticas e imágenes satelitales provenientes de Google Earth.

Una vez que se conoció el nivel de exactitud de la clasificación, la imagen clasificada se sometió a una serie de procesos para mejorar su calidad y representatividad.

El primero de estos procesos fue la unión de clases similares en una sola (Forestal 1 + Forestal 2 = Forestal) mediante el modulo Recode. Posteriormente a la imagen recodificada se le aplicó un filtro de 5x5 y uno más de 3x3 utilizando el módulo Neighborhood, este proceso se realiza con el fin de eliminar los pixeles aislados. El paso siguiente consistió en agrupar los pixeles vecinos con igual nivel digital en una entidad, ejecutando el módulo Clump. Enseguida, mediante la función Eliminate, se eliminaron los polígonos pequeños uniéndolos a los polígonos más grandes definiendo 100 pixeles como unidad mínima lo que representa 1 ha en la realidad.

Por último la imagen obtenida se convirtió a formato vectorial, la cual se recodifico de manera local asignando la categoría correcta a los polígonos erróneamente clasificados (Utilizando ortofotos) y sobreponiendo la capa vectorial de uso agrícola generada por el INIFAP (2009), además se creó una nueva categoría llamada vegetación no identificada, que espectralmente formaba parte de las categorías bosque1 y bosque 2 pero que geográficamente correspondían a otros tipos de vegetación como vegetación riparia, cercas vivas, cortinas rompe vientos, entre otras.

Realizados estos cambios se procedió a evaluar la exactitud de la imagen (clasificada) modificada y corregida, utilizando 143 puntos de control utilizando el módulo accuracy assessment.

Una vez obtenida la exactitud de la imagen, se calcularon áreas para cada una de las clases y se relacionaron con los datos de las diversas coberturas y asociaciones en las que se registra el *Agave ssp.*, obteniendo una estimación de la distribución y superficie ocupada por el agave mezcalero en San Felipe, Gto.

#### 5.5. Áreas de Aptitud potencial para el establecimiento de agave mezcalero (*Agave spp.*)

Como se mencionó en la parte de revisión de literatura la aptitud de un área en concreto está determinada por los factores ambientales que oferta el medio y por la demanda de los mismos por parte del cultivo (requerimientos agroecológicos). Una vez obtenida esta información se procedió, a definir las áreas con aptitud potencial para el establecimiento del *Agave spp.*

##### 5.5.1. Aptitud potencial

El agave es una planta polifacética, que brinda una gran variedad de servicios ambientales y es utilizada con diversos propósitos. Con el fin de generar información útil, para la formulación de planes de “manejo agroecológico del agave” que consideren la diversidad genética, ecológica y de usos, se generaron 3 mapas de aptitud potencial de agave, que consideran distintos factores y objetivos.

Para la elaboración de los mapas de aptitud potencial, se emplearon dos metodologías; 1) algebra booleana y 2) Modificada de Díaz et al., 2012, y Mandujano, 2013.

### 5.5.1.1. Algebra booleana

En GRASS GIS (r.recode) se recodificaron las variables ambientales asignando ponderación de 1 a los valores que cumplían los requerimientos agroclimáticos del agave (Cuadro 6) y 0 para aquellos valores que no cumplían los requerimientos, como lo ejemplifica la fig. 6.

Obtenidos los mapas recodificados, se multiplicaron entre sí, para excluir aquellas zonas que no cumplían con los requerimientos ambientales, obteniendo un mapa con dos clases: apto y no apto. Este mapa considera, si todas las condiciones ambientales necesarias para el desarrollo del agave están presentes, o no, sin estimar el grado de aptitud. Por lo tanto muestra aquellas zonas ecológicamente aptas, para el desarrollo del agave.

Cuadro 6. Categorización de variables.

Aptitud	Elevación msnm	Pendiente %	Tipo de suelo	Precipitación mm	Temperatura Media °C	Temperatura Nocturna °C
Apto	1000 - 2400	1 – 60	Xh, Hh, HI	320 -1000	13 - 23	-1 – 28
No apto	<1000, >2450	<1, >60	Be, I, Lc, Wm.	<320,>1000	<13, >23	<-1, >28

Msnm: Metros sobre el nivel del mar, mm: milímetros, °C: grados centígrados, Xh: Xerosol haplico, Hh: Feozem haplico, HI: Feozem luvico, Be: Cambisol eutrico, I: Litosol, Lc: Luvisol cromico, Wm: Planosol molico.

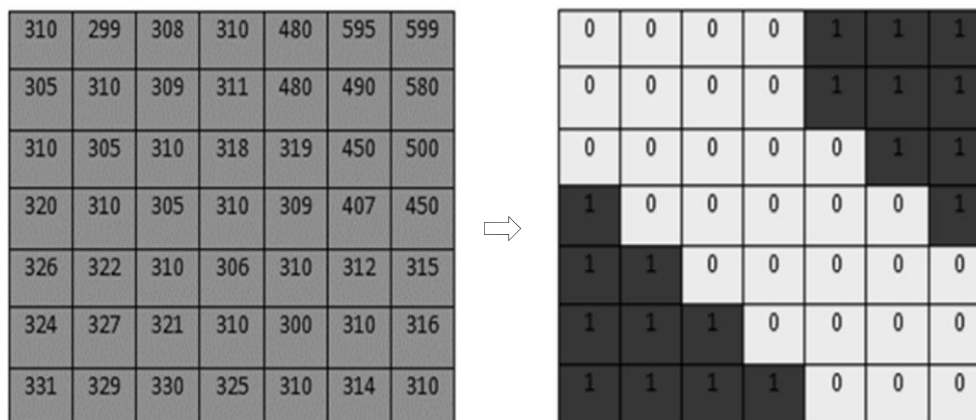


Figura 6. Operador local lógico (Si X > 320: X=1 si no X=0).

### 5.5.1.2. Metodología modificada de Díaz et al., 2012 y Mandujano, 2013

En GRASS GIS mediante el modulo r. recode se reclasificaron las coberturas de clima (Precipitación, T. Media y temperatura nocturna), suelo (Carta edafológica INEGI 1:250 000) y topografía (Altitud y pendiente), con una escala de 0 a 5, asignando la categoría más alta (5) a los valores que cubren en mayor grado los requerimientos agroclimáticos del Agave ssp. (Cuadro 7).

Cuadro 7. Categorización de variables.

Aptitud	Elevación msnm	Pendiente %	Tipo de suelo	Precipitación mm	Temperatura Media °C	Temperatura Nocturna °C
Alto	1600/ 2400	1 - 6	Xh, Hh, HI	680 - 760	17-19	11 - 14
Medio	1600-1000, 2400-2450	6 - 15	Be, I, Lc, Wm.	500 - 680	14 - 16, 20 - 22	-1 - 12, 15 - 28
No apto	<1000, >2450	<1, >15	Sódicos	<320,>1000	<13, >23	<-1, >28

Msnm: Metros sobre el nivel del mar, mm: milímetros, °C: grados centígrados, Xh: Xerosol haplico, Hh: Feozem haplico, HI: Feozem luvico, Be: Cambisol eutrico, I: Litosol, Lc: Luvisol crómico, Wm: Planosol molico.

Obtenida la reclasificación de las variables se procedió a generar los mapas con aptitud agroclimática mediante algebra de mapas. En la calculadora raster de GRASS GIS se sumaron los mapas de las variables, en pares (Fig.7), para discriminar las áreas que no cumplen con los requerimientos agroclimáticos del Agave spp.

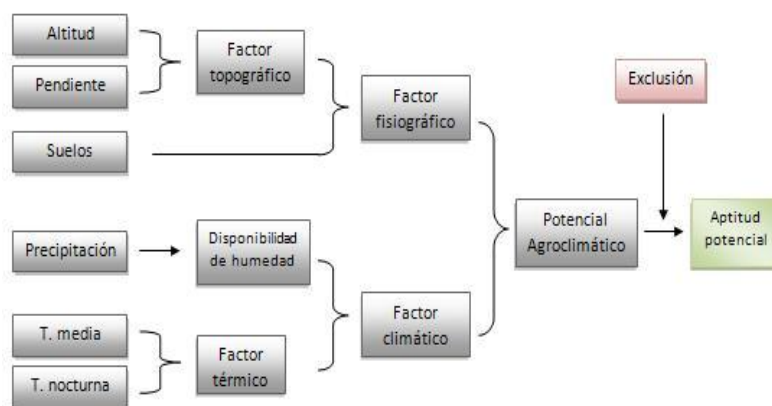


Figura 7. Esquema de obtención de áreas de aptitud potencial.

Al utilizar esta metodología, se obtiene el grado de aptitud (no apto, apto y muy apto) de un área para establecer un cultivo en específico. El mapa resultante mediante este método, define las áreas con aptitud agroclimática, para el establecimiento de plantaciones comerciales de *Agave ssp.*

#### 5.5.1.2.1. Aptitud potencial de agave como conservador de suelos

Para evaluar la aptitud potencial desde un punto de vista que considere las funciones Agroecológicas del agave, de mejora de suelos y retención de la humedad, se elaboró un mapa que considera el rango de pendiente en el que se puede desarrollar con éxito el *Agave ssp.* (15-60%), excluyendo la pendiente de las plantaciones con fin industrial.

Para lograr esto se sumaron por pares las demás variables y la capa de pendiente se reclasificó asignando, 1 a los valores de 15 a 60 % de pendiente, y 0 para los demás valores. Una vez reclasificada la capa de pendiente se multiplicó con la capa resultante de la suma por pares, obteniendo el mapa de aptitud potencial del agave como mejorador de suelos.

#### 5.5.2. Zonas con aptitud potencial

Las zonas con aptitud potencial se clasificaron en tres niveles: apto, Muy apto y no apto. Los mapas con aptitud agroclimática, se interceptaron para excluir zonas ocupadas por áreas agrícolas, cuerpos de agua, zonas urbanas y áreas forestales. Los mapas se homogenizaron y convirtieron a formato vectorial, para posteriormente calcular el área ocupada por cada nivel de aptitud. Finalmente se prepararon los mapas de aptitud potencial, para impresión en el diseñador de Qgis, en escala 1: 500 000.

## VI RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. Caracterización Ecogeográfica del municipio de San Felipe, Gto.

#### 6.1.1. Fisiografía y Relieve

San Felipe se encuentra dentro de la provincia fisiográfica Mesa del Centro, que está representada en el municipio por dos subprovincias (Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes y Sierras y llanuras del norte de Guanajuato) y dos discontinuidades (Sierra Cuatralba y Sierra de Guanajuato) (Fig. 8). La subprovincia llanuras de ojuelos, es una amplia llanura, ubicada en la parte noroeste del municipio y ocupa una extensión de poco más de 22 200 ha. Las llanuras del norte de Guanajuato, es una zona de llanuras y mesetas de erosión, rodeadas casi totalmente por sierras, sierritas, mesetas lávicas y lomeríos, en su mayoría de origen volcánico (CONABIO, 2012). Con una extensión de 253 600 ha representa el 84.3 % de la superficie de San Felipe. La sierra de cuatralba se extiende en la parte suroeste del municipio, con una superficie de 23 390 ha. Finalmente la sierra de Guanajuato ocupa una pequeña porción del municipio con solo 1 625 ha.

#### Altitud

El municipio presenta un gradiente de elevación que va de los 1 796 msnm en la zona del valle de Jaral hasta los 2 976 msnm en el punto más elevado del cerro “El Grande” (Fig. 9). La elevación media del municipio varía entre los 1 850 y 2150 msnm en las planicies y llanuras del municipio, las cuales están rodeadas por las principales elevaciones: Sierra del cubo (2 890), Sierra de Guanajuato (2 755 msnm), Sierra de lobos (2 850 msnm), Sierra de Santa Bárbara (2 855 msnm), Sierra del Zapote (2 770 msnm) y el cerro del pájaro (2 740 msnm). Esta variación de la elevación, es característica de la región Mesa del Centro, donde extensas llanuras se ven interrumpidas por diversos accidentes geográficos (CONABIO, 2012).



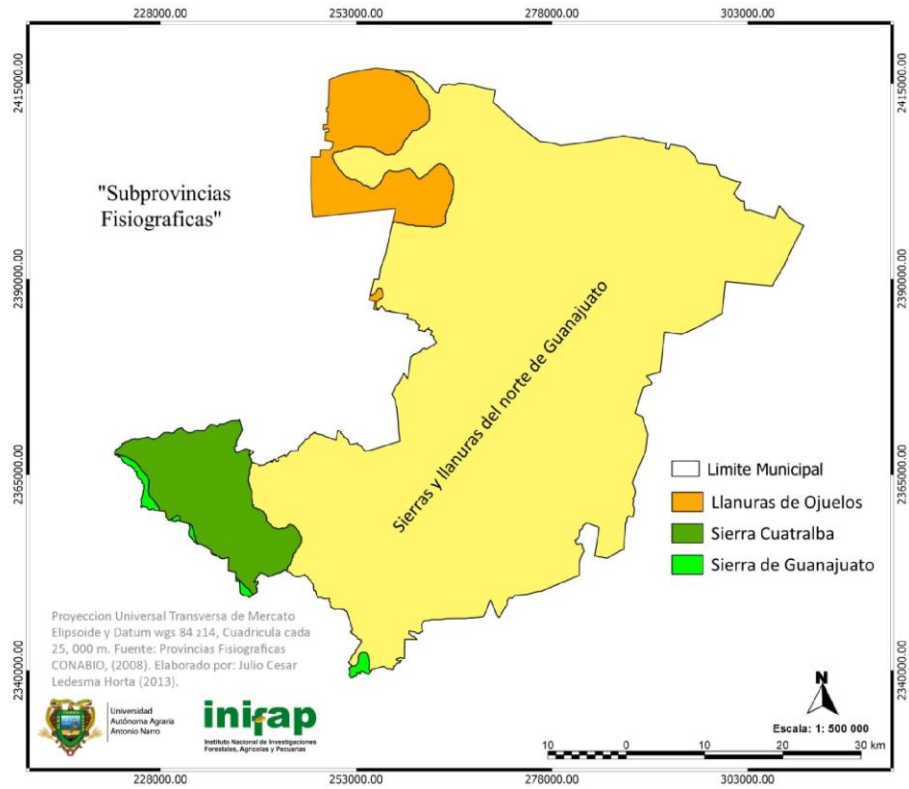


Figura 8. Provincias fisiográficas.

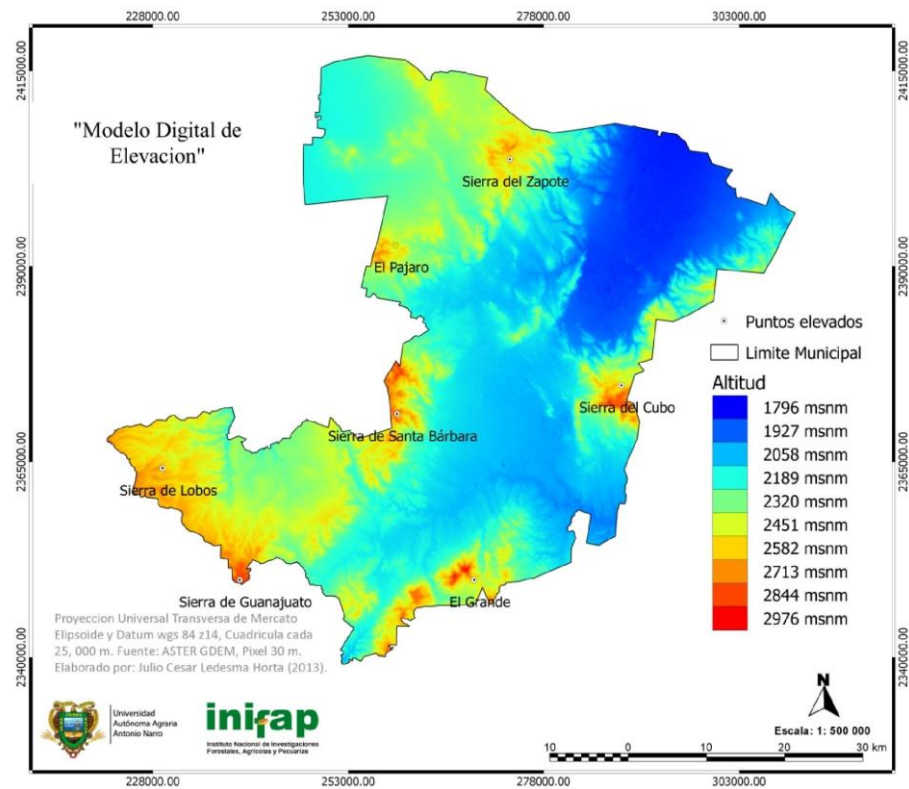


Figura 9. MDE de San Felipe, Gto.

## Pendiente

La pendiente en promedio presenta valores entre 0 y 8 %, que en general son aptas para la agricultura, existe una zona de transición de lomeríos, entre las llanuras y los puntos más elevados con pendientes de 8 a 15 %, en las serranías predominan valores de 15 a 45 %, donde los puntos más escarpados llegan a presentar pendientes de hasta 92% (Fig. 10).

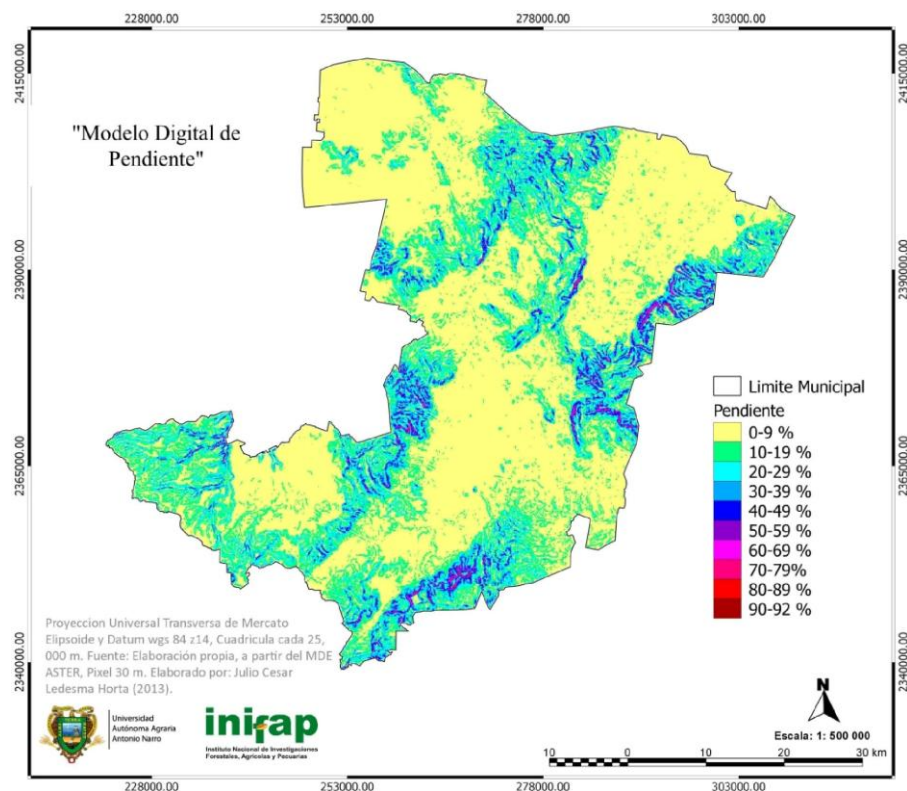


Figura 10. Modelo digital de pendientes.

## Orientación

Las áreas con orientación Norte-Este son predominantes en el municipio (Fig. 11), la orientación del relieve produce el efecto de sombra pluvial u orográfica, sobre todo en las cordilleras, donde se alternan una vertiente húmeda a barlovento (Este) y otra seca a sotavento (oeste). Las laderas orientadas al Sur (Solana) reciben mayor insolación, por lo tanto la temperatura y la

evaporación son mayores, caso contrario a la Umbría (Norte), donde las condiciones son relativamente más favorables para la vegetación. La aridez de gran parte de la altiplanicie mexicana se debe a la sierra madre oriental, que intercepta el aire húmedo proveniente del Golfo de México.

Estas características, modifican el comportamiento de la temperatura y la humedad, favoreciendo o limitando el desarrollo de la vegetación, efecto que se acentúa en las zonas áridas y semiáridas (Parker, 1991; González et al., 1996; Wondzell et al., 1996; Zúñiga y Crespo 2012).

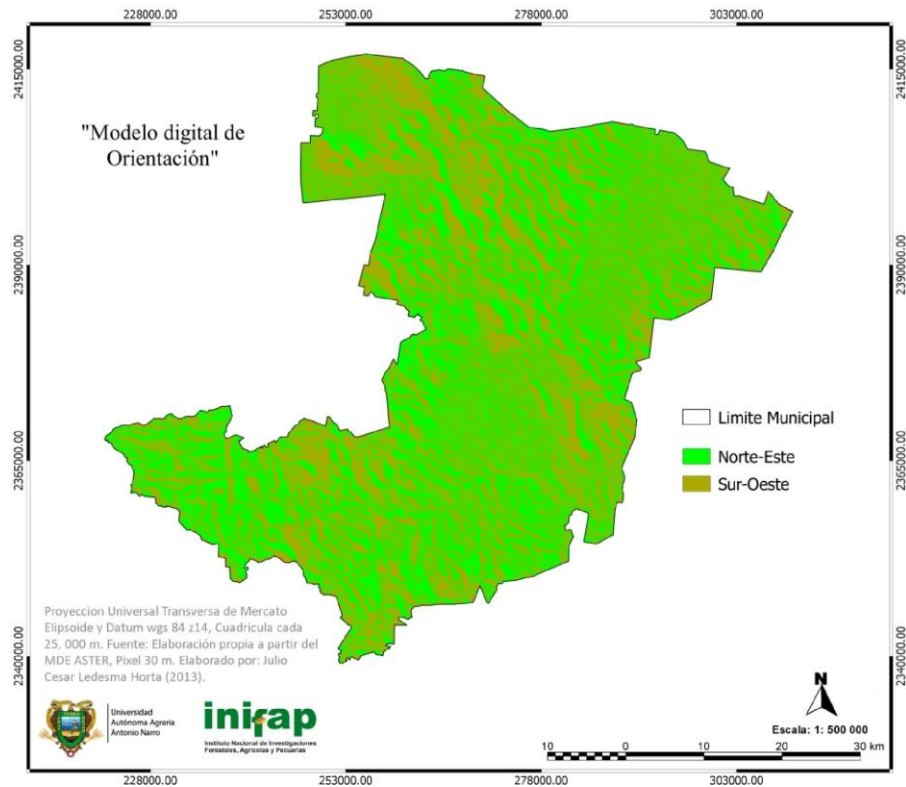


Figura 11. Modelo digital de exposición.

### 6.1.2. Variables Climáticas.

El clima de una región es la descripción estadística del estado atmosférico durante un largo periodo de tiempo, los factores que intervienen en la determinación del clima son latitud, proximidad a grandes masas de agua o

continentalidad, Corrientes oceánicas, vientos predominantes, posiciones permanentes de sistemas de altas/bajas presiones, topografía, y la altitud.

Al realizar la clasificación del clima a partir del área de influencia de las estaciones meteorológicas y en base a la clasificación de Köppen modificada por García (1973), se obtuvo una capa a mayor detalle, que describe de forma más precisa el clima de San Felipe, donde se presentan dos tipos de clima: estepario (BS) y Templado (C) (Fig. 12). El clima BS cubre el 75% del municipio, aquí la evaporación excede la precipitación, es un clima semiárido con oscilación térmica sensible y alcanza un régimen térmico templado. Este clima es característico del altiplano y se extiende desde los límites de la meseta de Anáhuac hasta el noroeste de Chihuahua (Valdez et al., 1981). En el Noreste del municipio se presenta un clima BS<sub>0</sub>kw(x'), estepario seco de temperaturas templadas y verano fresco, con régimen de lluvias de verano y 10.5 % de lluvias invernales. Hacia el Noroeste, el clima se diferencia en que es un clima estepario semiseco (x'), con una precipitación promedio de 441 mm, la zona centro-sureste tiene un clima BS<sub>1</sub>kw estepario semiseco con lluvias en verano y menos del 10.2 % de lluvias invernales. El clima C (w<sub>0</sub>) (x') es de tipo templado con temperatura media anual entre 13 y 15°C, de carácter húmedo con lluvias en verano y más del 10.2% de lluvias invernales, cubre en su totalidad la zona suroeste donde se encuentra la sierra de lobos, lo cual es lógico, ya que estos tipos de climas se han reportado en las montañas de la parte central y sur de México (Sánchez y Garduño, 2008). Tomando en consideración este aspecto, una descripción más detallada, requeriría la modificación del tipo del clima para las zonas montañosas que se registran a lo largo del municipio, el cual seguramente sea del tipo C (w<sub>0</sub>).

#### Temperatura media anual

La temperatura media anual (T<sub>ma</sub>) es el promedio aritmético de las temperaturas medias mensuales, a lo largo de un período determinado de años, depende del balance de energía calorífica y otros factores como la

dirección y fuerza de los vientos predominantes, de la altura sobre el nivel del mar y de la proximidad a masas de agua (Zúñiga y Crespo, 2012). El mapa resultante de T<sub>ma</sub>, toma en cuenta estos factores, representando de forma más acertada la realidad (Fig. 13).

La T<sub>ma</sub> predominante en el municipio, es de 17°C, con un valor máximo en la zona del Valle de Jaral de 19°C, y un valor mínimo de 8°C, en la cima del Cerro "Grande". Las temperaturas más cálidas ocurren en las planicies que se localizan en la zona norte y centro del municipio, en una franja que se extiende de norte a sur con T<sub>ma</sub> de 17 a 18°C, hacia los extremos este y oeste de esta franja se presentan temperaturas entre 16 y 10°C, que disminuyen conforme aumenta la altitud, debido al gradiente de temperatura (Valdez et al., 1981; Casas et al., 1999; Maderey et al., 2001).

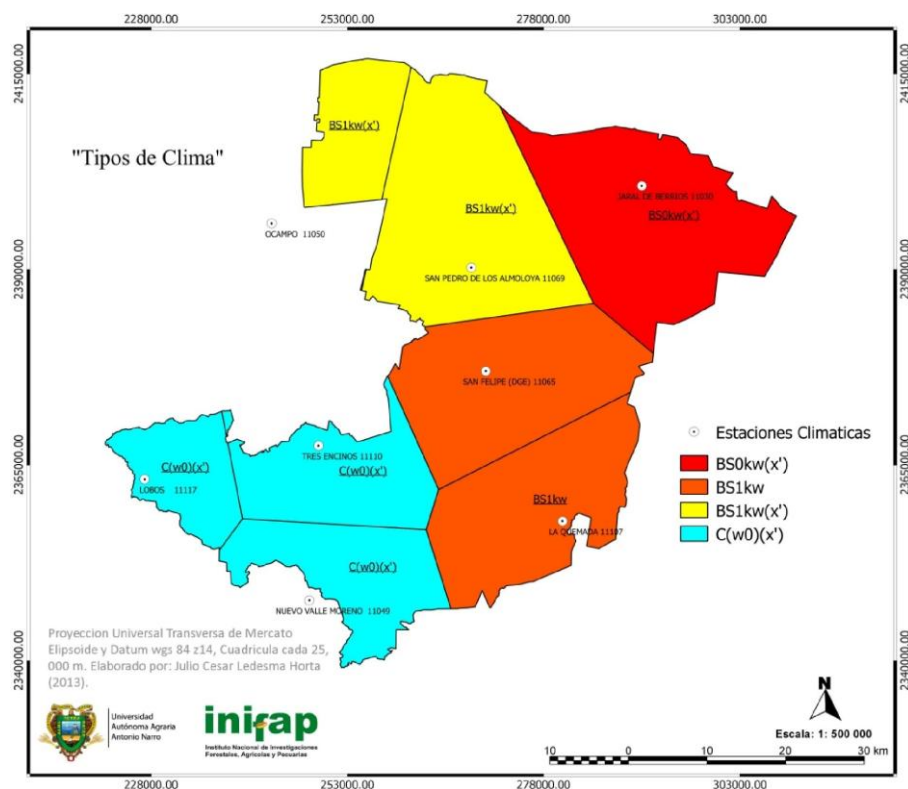


Figura 12. Tipo de clima.

Los meses de mayo y junio son los más calurosos con temperaturas promedio de 19°C, que corresponden a veranos cálidos. La estación “La quemada” localizada a 2 041 msnm registra la Tma más cálida, que es de 20.9°C en el mes de junio. El mes más frío es enero con un promedio de 12°C característico de un invierno fresco (INEGI, 2000), la Tma más baja es de 10°C en la estación de Tres encinos que se encuentra a 2 380 msnm. La amplitud térmica del municipio es de 7°C en promedio, observado entre las estaciones “La quemada” y “Lobos” (Fig. 14).

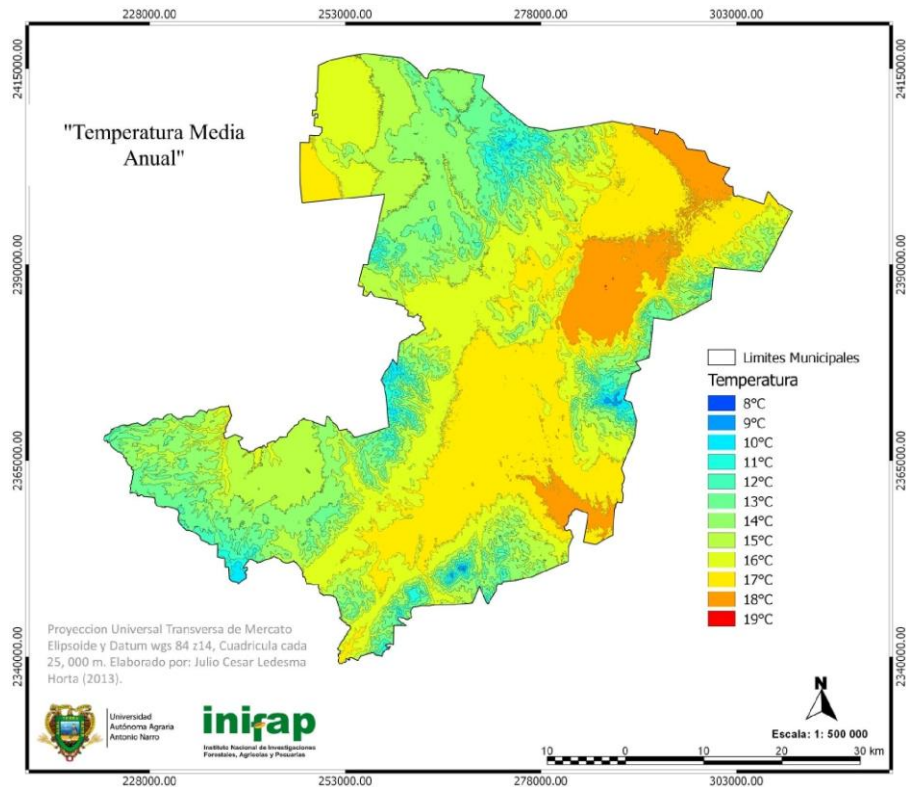


Figura 13. Temperatura media anual.

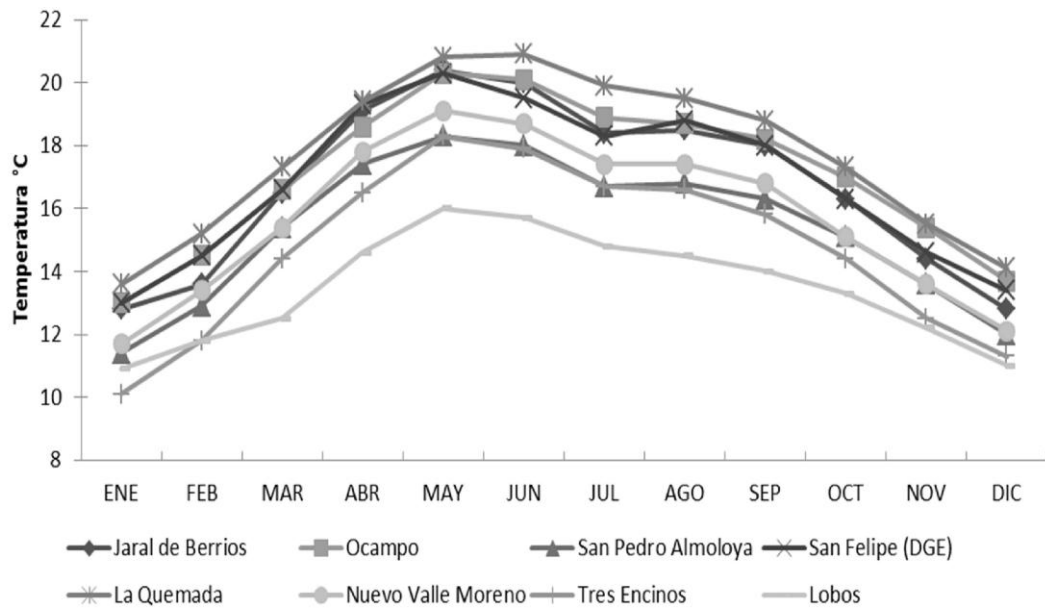


Figura 14. Comportamiento de la Temperatura media anual.

#### Temperatura máxima y mínima

La fig. 15 muestra que la temperatura máxima normal, oscila entre 20 y 27°C, mientras que la temperatura mínima normal va de 7 a 9°C. Al comparar los dos mapas es evidente, que, la porción norte-centro es más cálida que la porción sur. Así mismo, en la parte sur del municipio, las temperaturas son relativamente más frías sin embargo en esta zona la oscilación térmica es menor.

Primavera es la estación más calurosa con temperaturas máximas de 27 a 28°C y un histórico de 42°C, mientras que enero y diciembre son los meses más fríos, con temperaturas mínimas de 3.5°C y un histórico de -10°C. La amplitud térmica es menor en verano con solo 13.5°C de oscilación (Fig. 16) favoreciendo el desarrollo vegetal. Este periodo favorable es clave, ya que, la amplitud térmica se acentúa notablemente en las altiplanicies (Terrones, et al., 2000).



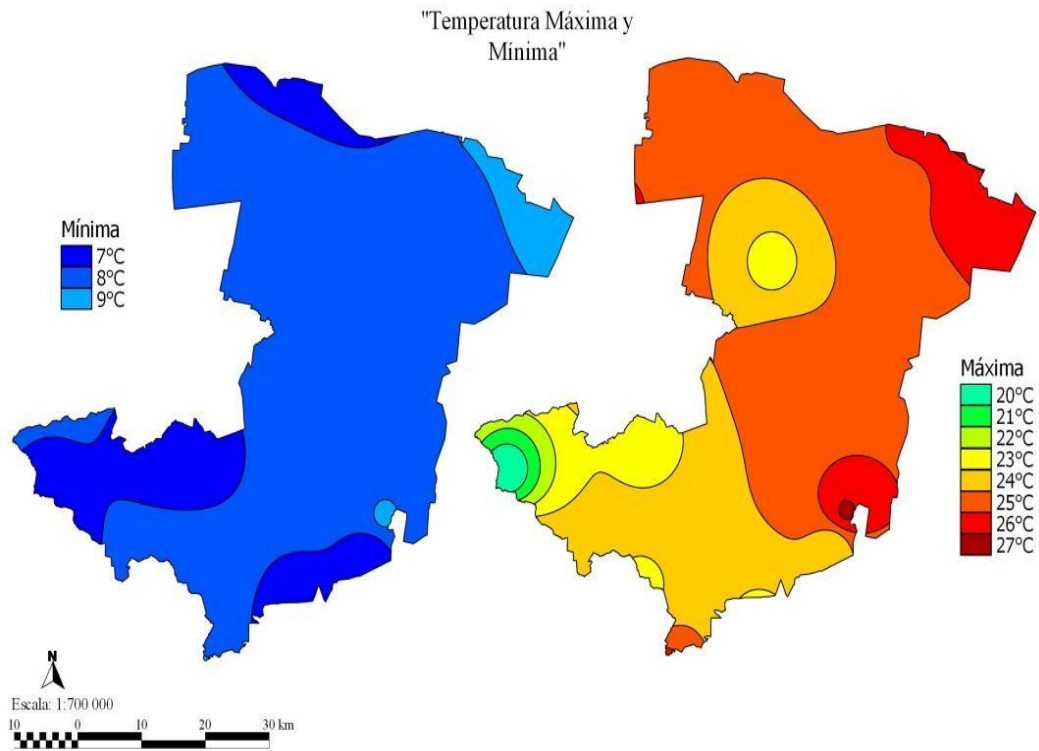


Figura 15. Temperatura máxima y mínima.

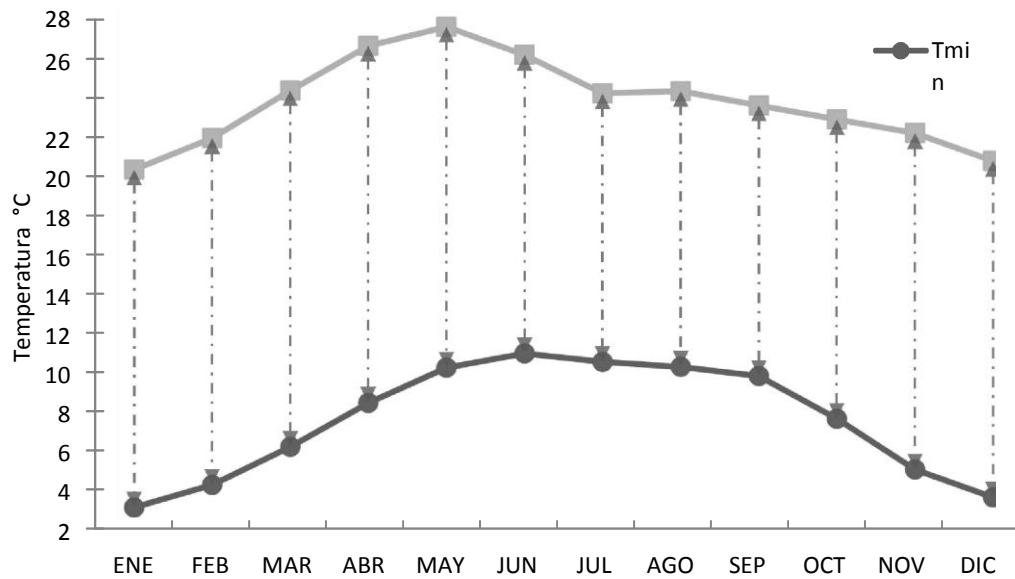


Figura 16. Comportamiento de temperatura máxima y mínima.



## Temperatura nocturna

La temperatura nocturna es aquella que se presenta en las noches en ausencia del fotoperiodo, por lo tanto la temperatura diurna es mayor debido a la radiación solar recibida durante el día. La temperatura nocturna se relaciona con las etapas críticas de desarrollo en varias especies vegetales y particularmente la asimilación de CO<sub>2</sub> en las plantas CAM (Nobel, 1988; Andrade et al., 2007). La fig. 17 muestra la distribución de la temperatura nocturna anual, que presenta poca variación a lo largo del municipio, con temperaturas entre 10 y 13° C.

La oscilación de la temperatura nocturna a lo largo del año es normal manteniendo temperaturas promedio de 14.5°C en verano y 7.5°C en invierno, siguiendo una tendencia análoga a la Tma (Fig. 18).

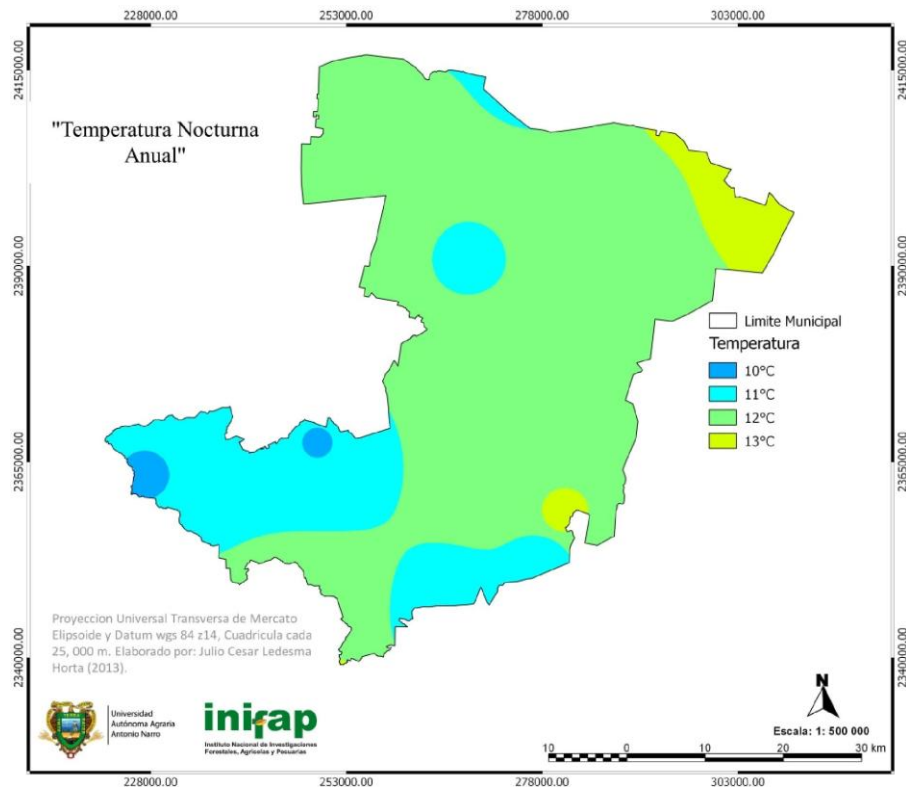


Figura 17. Temperatura nocturna.

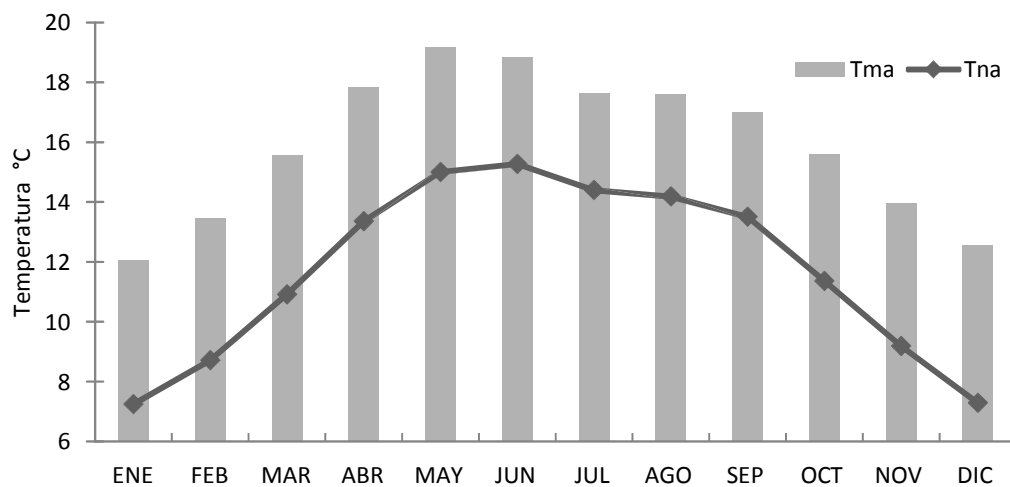


Figura 18. Comportamiento de temperatura nocturna y temperatura media.

### Precipitación

La precipitación es cualquier forma de hidrometeoro que cae del cielo y llega a la superficie terrestre, incluye lluvia, llovizna, granizo y nieve. La precipitación media anual se expresa en milímetros y es la precipitación promedio anual ocurrida en un lugar determinado.

De la cantidad y la frecuencia con que ocurre la precipitación depende en gran medida la productividad de los cultivos agrícolas y el desarrollo de las especies forestales (Alcocer et al., 2011).

La fig. 19 muestra la distribución de la precipitación a lo largo del municipio, la cual presenta un valor promedio de 500 mm anuales, se observa que la porción sur es notablemente más húmeda que la zona norte. La mayor cantidad de precipitación ocurre en un área aislada alrededor del cerro "Grande" con 760 mm anuales, por el contrario el Valle de Jaral es la zona más árida, con tan solo 313 mm al año. Posiblemente la escasa precipitación en esta área se deba al efecto de sotavento, consecuencia de la condición orográfica del valle.

La distribución temporal de la precipitación, se observa en la fig. 20, apreciándose claramente que julio es el mes con mayor incidencia de

precipitación, seguido por los meses de agosto y junio. La precipitación promedio en los meses invernales es de 15 mm mensuales, así mismo marzo es el mes más seco con un promedio de 6 mm de precipitación. Esto indica que el régimen de lluvias es de verano con el 86% de la precipitación anual y menos del 10.5% de lluvias invernales. Esquivel, (2012) menciona que la mayor parte del Estado de Guanajuato presenta un clima con lluvias de verano, a causa de la gran cantidad de humedad que penetra el Centro de México en la temporada de huracanes y ondas tropicales que se presentan año con año.

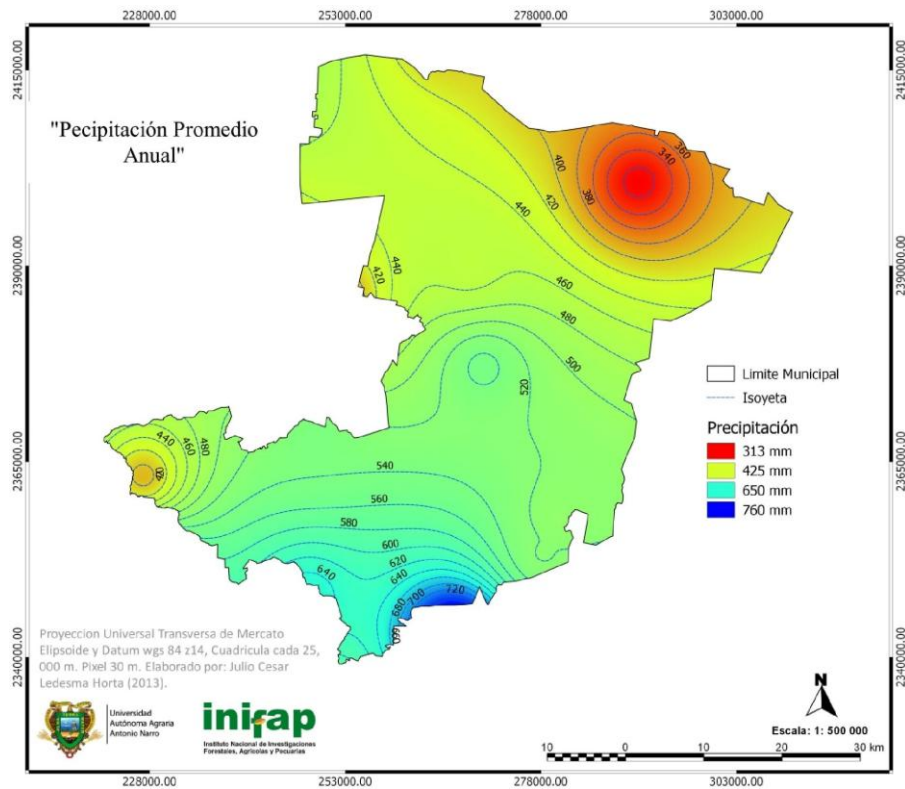


Figura 19. Distribución espacial de la precipitación.

Al relacionar los valores promedio anuales de precipitación y evaporación (Fig. 20), se observa que la evaporación excede claramente a la precipitación, limitando la disponibilidad de humedad y por ende condicionando el tipo de vegetación característico de las zonas áridas.

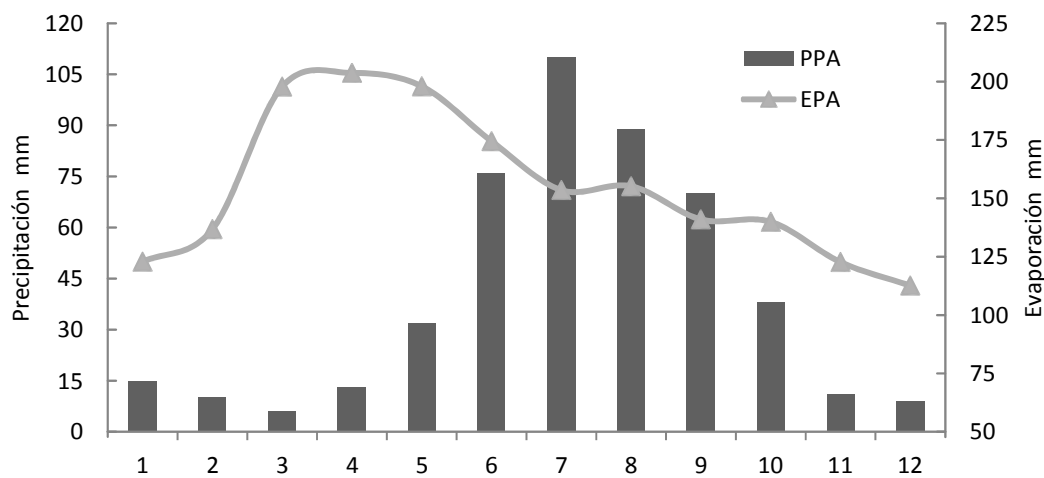


Figura 20. Comportamiento de la precipitación media anual.

### 6.1.3. Edafología

El suelo es la capa superficial de material mineral y orgánico no consolidado, que sirve de medio natural para el crecimiento de las plantas, que ha sido sujeto y presenta los efectos de los factores que le dieron origen (clima, topografía, biota, material parental y tiempo) y debido a la interacción de éstos, difiere en sus propiedades físicas, químicas, biológicas y morfológicas del sustrato rocoso del que se originó (Sumner, 2000).

El tipo de suelo dominante en San Felipe es el feozem con una extensión de 215 000 ha que representan el 71% de la superficie, los feozems son suelos con una capa superficial oscura y suave, ricos en materia orgánica y minerales, esto les confiere un alto potencial agrícola, son utilizados intensamente en la producción de granos, hortalizas y como zonas de agostadero, la variante Feozem luvico presenta un subsuelo más rico en arcilla que la capa superficial (INEGI, 1998). Con 36 000 ha los Xerosoles ocupan el 12% de la superficie, son suelos secos localizados en las zonas áridas y semiáridas sobre los cuales se desarrollan preferentemente los matorrales y pastizales, presentan una capa superficial de color claro por el bajo contenido de materia orgánica aunque esta depende del tipo de textura que tengan. Su

rendimiento está en función de la disponibilidad de agua y un adecuado drenaje que evite la potencial salinización (INEGI, 2004).

Los tipos de suelo Litosol (21 400 ha), Luvisol (8 700 ha), Planasol (14 800 ha) y Cambisol (4 550 ha) son los de menor extensión cubriendo en conjunto apenas el 17% de la superficie (Fig. 21). Los litosoles son suelos muy delgados (< 10 cm) limitados por la presencia de roca o caliche endurecido, son comunes en zonas montañosas y regiones altamente erosionadas. Los cambisoles son suelos jóvenes poco desarrollados. En cambio los planasoles son suelos desarrollados con profundidad entre 50 y 100 cm, se localizan principalmente en planicies y se utilizan en ganadería con rendimientos moderados. Los luvisoles se encuentran dentro de los suelos más fértiles con alto contenido de arcilla, por lo que su uso agrícola es muy elevado, sin embargo son susceptibles a la erosión (Semarnat, 2012).

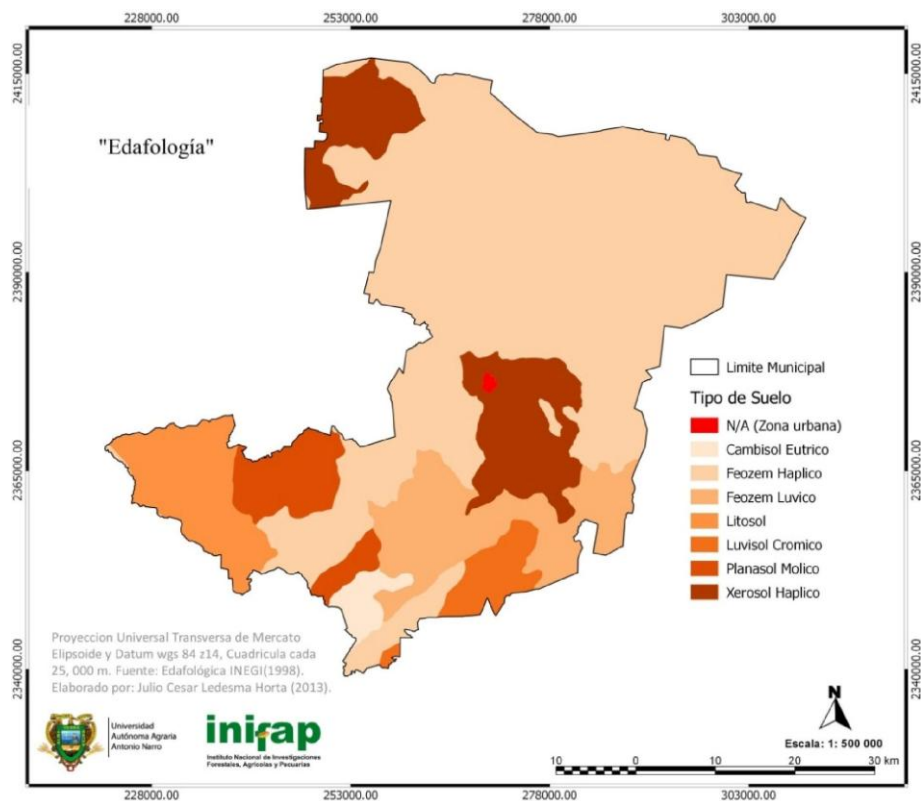


Figura 21. Tipo de suelo.

#### 6.1.4. Uso de suelo y Vegetación

El tipo de vegetación de una región en concreto está determinada por los factores, climáticos, fisiográficos, edáficos y antropogénicos, propios de dicha región. La vegetación de San Felipe, se conforma por bosques de encino y pino, chaparrales, matorrales, mezquiales, y pastizales (Fig. 22).

Los pastizales son la comunidad vegetal de mayor extensión con 127 300 ha, es una comunidad dominada por especies de gramíneas en ocasiones acompañadas por hierbas y arbustos de diferentes familias como las compuestas y las leguminosas (INEGI, 2009). Se encuentran en las planicies en zonas de transición con los bosques y matorrales.

Los bosques de encino se localizan en las serranías del sur del municipio con una extensión de 31 800 ha, en esta comunidad vegetal dominan las especies del género *Quercus*. Los boques de pino cubren una superficie de 29 000 ha, principalmente en la sierra del cubo y la sierra de Santa Bárbara, en esta serranía, se presenta un área de 1 700 ha de bosque de encino pino, así mismo los bosques de pino encino ocupan un área de transición de alrededor de 2 300 ha, localizadas en la sierra del cubo.

En la zona norte se encuentran pequeñas comunidades de chaparral integradas principalmente por encinos, que en conjunto suman 3 900 ha, debido a condiciones climáticas especiales, al sobrepastoreo y a la ocurrencia periódica de incendios, estas comunidades adoptan formas arbustivas constituyendo matorrales densos, principalmente sobre suelos delgados (CONABIO, 2012).

Existe una zona de 4 800 ha cubierta por mezquiales, con presencia de *P. glandulosa* y *P. levigata*, se desarrollan en suelos profundos y su presencia está ligada a la existencia de un manto friático, sin embargo estas características los colocan como una de las comunidades vegetales más afectadas debido a su erradicación para el aprovechamiento agrícola.

El matorral crasicaule sobre el cual se abundara más adelante, cubre una extensión de 13 800 ha, equivalentes al 3.6% del territorio de San Felipe.

Según la carta de “uso de suelo y vegetación,” de INEGI, (1998) la superficie agrícola es de 83 360 ha, ocupando el 27.7% del municipio de las cuales el 12% (10 415 ha) son bajo riego y el 88% (73 215 ha.) de temporal. Esta superficie es mayor que la reportada por Paredes et al., 2011, quienes actualizaron el mapa de uso de suelo agrícola en el estado de Guanajuato, a partir de ortofotos escala 1:10 000. En dicho trabajo para el municipio de San Felipe contabilizaron un total de 78 855 ha de uso agrícola, de las cuales 14 590 ha son bajo riego y 63 365 ha de temporal.

Finalmente el Área urbana de San Felipe, comprende una superficie de 546 ha, distribuidas en, una cabecera municipal y 4 comunidades de más de 1 500 habitantes.

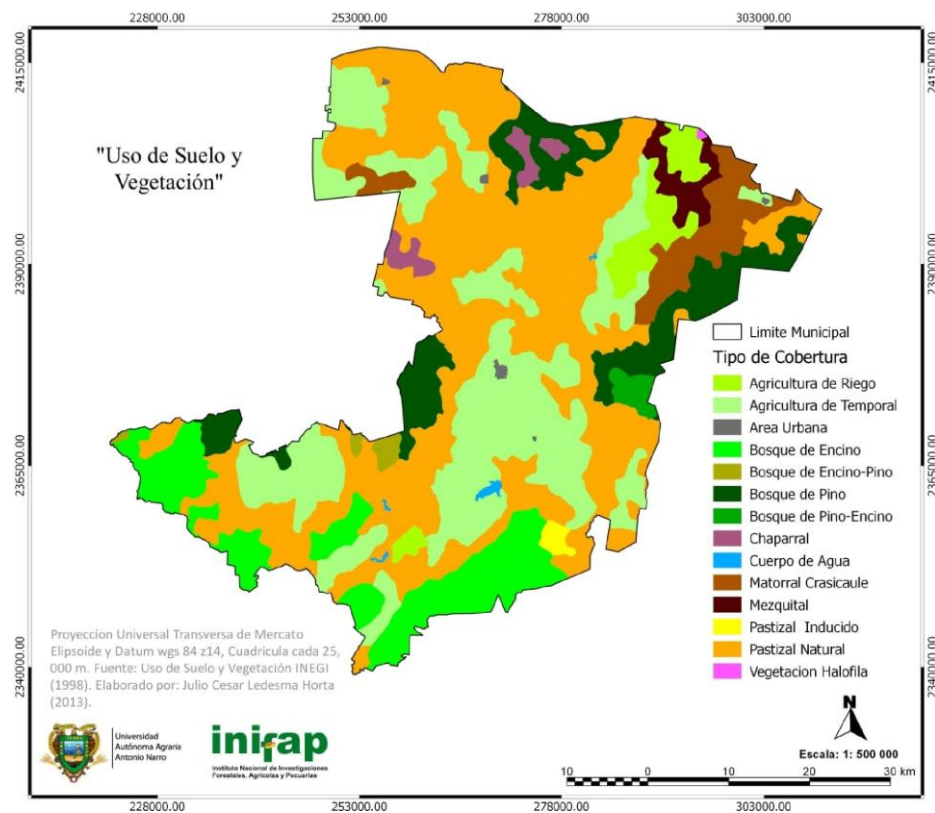


Figura 22. Uso de suelo y vegetación.

## 6.2. Especies de *Agave* ssp. con distribución en San Felipe

Se obtuvieron un total de 80 puntos de muestreo (Anexo 1), donde se registró la presencia de diez variedades diferentes del género *Agave*, incluyendo ocho especies (Cuadro 8) que se distribuyen en plantaciones comerciales y de reforestación, así como en obras de conservación de suelos y áreas de distribución natural.

Cuadro 8. Especies de *Agave* ssp. en el municipio de San Felipe.

Especie	Variedad	Autor	Nombre común
<i>A. salmiana</i>	ssp. <i>salmiana</i>	Otto ex Salm-Dyck	maguey chino
<i>A. salmiana</i>	ssp. <i>crassispina</i>	(Trelease) Gentry	maguey cimarron
<i>A. salmiana</i>	var. <i>ferox</i>	(Koch) Gentry	maguey manso
<i>A. mapisaga</i>	ssp. <i>mapisaga</i>	Trelease	N/A
<i>A. americana</i>	ssp. <i>americana</i>	Lineo	maguey pulquero
<i>A. asperrima</i>	ssp. <i>asperrima</i>	Jacobi	maguey verde
<i>A. weberi</i>	N/A	Cels ex Poisson	N/A
<i>A. inaequidens</i>	spp. <i>inaequidens</i>	Koch	maguey bruto
<i>A. applanata</i>	N/A	Koch ex Jacobi	maguey mesote
<i>A. lechuguilla</i>	N/A	Torrey	maguey Ixtle
<i>A. atrovirens</i>	spp. <i>Mirabilis</i>	(Trelease) Gentry	N/A

A: *Agave*, N/A: No aplica, ssp.: Subespecie, Var.: Variedad.

Las especies que se encontraron con mayor frecuencia y abundancia fueron las del grupo *salmianae* (Fig. 23), que se distribuyen de manera silvestre y cultivada, a excepción de *A. mapisaga* que solo se encontró en plantaciones. Estas especies han sido utilizadas tradicionalmente, en la elaboración de mezcal, en el altiplano potosino y zacatecano, así como en San Felipe, Gto. (Aguirre et al., 2001; IMPI, 2001; Martínez et al., 2005; Mandujano, 2013).

El grupo *Americanae* presento 3 especies (*A. americana*, *A. asperrima* y *A. weberi*) distribuidas en plantaciones de reforestación, obras de conservación de suelos y como cercas vivas (Fig. 24). Dichas especies tienen gran potencial como materia prima, en la producción de mezcal, debido a su gran tamaño y



por consiguiente, una elevada producción de azúcares, incluso *A. weberi*, es mencionado dentro de la NOM-070-SCFI-1994 como agave mezcalero.

En cuanto a las otras especies (Fig. 25); *A. inaequidens* fue ubicado, en plantaciones de reforestación que han sido impulsadas por la CONAFOR, SAGARPA y SDAyR (Mandujano, 2013), esta especie ha sido utilizada en el estado de Jalisco en la elaboración de un mezcal llamado raicilla (Aureoles et al., 2008); *A. applanata* se encuentra de manera cultivada y distribuida de manera silvestre, la cual según refiere Gentry, (1982), es utilizada para la extracción de ixtle, en la Altiplanicie mexicana; Finalmente, *A. lechuguilla*, que carece de potencial para elaborar mezcal, debido a que su piña es de talla muy reducida, se localizó en lomeríos y bajadas de cerro remotamente aislados.

Cabe resaltar que la clasificación anterior, no es de carácter exhaustivo ni exclusivo, debido a la inexistencia de una clasificación taxonómica universalmente aceptada para el género *Agave*, además de la complejidad en el número de especies que integran este taxa. El complejo *salmiana* que según Gentry, (1982), debe su gran diversidad de especies, a causas antropogénicas, evidencia la problemática de limitar taxonómicamente, el género *Agave*.

El objetivo de la clasificación anterior, fue conocer los requerimientos agroecológicos de estas especies en particular y no delimitarlas taxonómicamente. Al respecto, a la par de este trabajo (Dentro del mismo proyecto de investigación), se realizó un estudio taxonómico a nivel molecular, donde se abunda con gran detalle en la taxonomía del *Agave* spp., y su variabilidad genética, específicamente en el municipio de San Felipe, Gto. (García, Inédito).

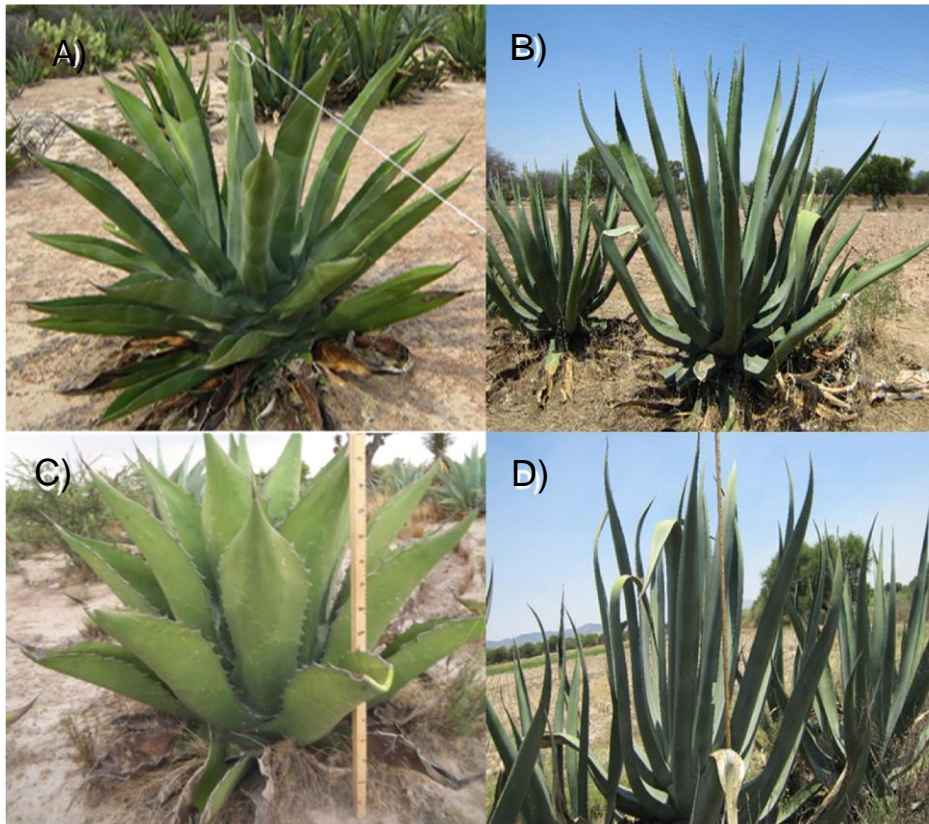


Figura 23. Especies del grupo Salmianae; A) *A. salmiana* ssp. *crassispina*; B) *A. salmiana* ssp. *salmiana*; C) *A. salmiana* var. *ferox*; D) *A. mapisaga*.



Figura 24. *A. americana*, *A. atrovirens* y *A. asperrima*.



Figura 25. *A. inaequidens*, *A. applanata*, *A. lechuguilla*.

### 6.3. Requerimientos Agroecológicos de agave Mezcalero (*Agave* spp.)

Tomando en consideración, las especies que se distribuyen dentro del municipio, la determinación de los requerimientos Agroecológicos del agave, se basaron en los grupos Americanae y Salmianae.

Sin embargo, se debe tener en cuenta, que en general las especies del género *Agave* y en particular las especies mezcaleras, prosperan bajo condiciones ambientales similares.

De acuerdo a la revisión literaria, los datos tomados en campo y la consulta de los valores puntuales de las capas vectoriales, se determinó que el maguey mezcalero en la zona de estudio, prospera bajo los siguientes requerimientos agroecológicos.

#### 6.3.1. Requerimientos topográficos

##### Altitud

Al analizar los datos obtenidos se observa que el agave mezcalero se localizó en una altitud mínima de 1 848 msnm y en elevaciones de hasta 2 394 msnm, este rango de elevación, aunque es más reducido, coincide con los reportados por Gentry, (1982); 1230/2460 msnm y Aguirre, (2001); 1000/2250 msnm. El agave se distribuye en un promedio altitudinal de 2 090 m, sin embargo, las

plantaciones observadas, no mostraron diferencia evidente en su desarrollo con respecto a la altitud, debido quizá, a que uno de los factores que genera la gran diversidad dentro del género *Agave*, es precisamente la complejidad topográfica del país, originando un amplio rango de adaptación altitudinal, en los agaves (García, 2007).

El efecto de la Altitud sobre el desarrollo vegetal se relaciona con la variación de la temperatura llamado Gradiente vertical de temperatura, que indica una disminución promedio de la temperatura de  $0.65^{\circ}\text{C}$  por cada 100 m de ascenso (Reynoso et al., 2012). Habría que añadir que la altitud no es una variable que influya por si sola sobre la distribución de la vegetación, sino que, es un factor complejo que incluye variaciones en temperatura, viento, lluvia, humedad, etc.

#### Pendiente

La pendiente de los sitios donde se establece el agave, mostro valores medios de 6 %, encontrándose con mayor frecuencia en pendientes del 3 al 4%, no obstante prospera con éxito en terrenos con pendientes pronunciadas de 20, 30 y hasta de 60% con suelos poco profundos y pedregosos, aunque se observó que a mayor pendiente la abundancia de agave disminuye gradualmente y es sustituido por especies del género *Yucca*.

Ruiz, (2007) menciona que *A. tequilana* se cultiva de manera comercial en pendientes inferiores a 8% y superiores a 2% ya que prefiere suelos bien drenados, además puede presentar problemas de encharcamiento, sin embargo en la región de estudio se registraron plantaciones de agave con pendientes inferiores al 2%, lo que indica que los terrenos planos no son un factor limitante en zonas donde la disponibilidad de humedad es escasa.

Los resultados sugieren, que se puede establecer agave con dos propósitos distintos (comercial y Agroecológico) con respecto a la inclinación del terreno donde se desarrolla. Además, se debe considerar que la pendiente influye

sobre la disponibilidad, distribución y retención de la humedad, así como en la fertilidad y erosión del suelo (Arzate, 2009; Serrada, 2008).

#### Orientación

El 50% de los sitios con agave mostraron orientación Norte-Este, mientras que el 50% restante mostraron orientación Sur-Oeste, al analizar estos datos con mayor detenimiento y tomar en cuenta solo los puntos en las laderas (excluyendo los puntos con escasa pendiente), se mantuvo la misma proporción, aunque con una ligera tendencia hacia las orientaciones Sur-Oeste. Estos resultados son semejantes a los obtenidos por Arzate, (2009), que estudió la distribución de 5 especies diferentes de *Agave ssp.*, y encontró que las 5 especies, se distribuían prácticamente en todas las exposiciones, predominando ligeramente las exposiciones sur, en la mayoría de las especies. A la vez Ruiz, (2007), recomienda no establecer plantaciones de *A. tequilana* en laderas con orientación norte, debido a la exposición a temperaturas bajas, ya que la especie es sensible a las heladas.

Aparentemente estos datos parecen contradecir el efecto de umbría que favorece el desarrollo de la vegetación (Serrada, 2008; Zúñiga y Crespo 2012), sin embargo en las zonas de solana donde el índice de aridez (precipitación/temperatura) es mayor, el agave quizá obtenga ventaja competitiva sobre otras especies menormente adaptadas, lo que explicaría la ligera preferencia hacia las orientaciones Sur, además de aprovechar una mayor radiación incidente en solana (Hidalgo et al., 1996; Wondzel et al., 1996; Aguirre, 2001; Andrade et al., 2007).

#### 6.3.2. Requerimientos climáticos

##### Tipo de clima

Los agaves, se presentan en diversos tipos de clima, no obstante exhiben adaptaciones que les permiten distribuirse con mayor éxito, en ambientes áridos y semiáridos, esta tendencia de distribución se manifestó en el presente

trabajo, ya que se registró agave con mayor frecuencia en sitios de clima seco (BS0) y semiseco (BS1).

### Temperatura

La temperatura media anual en los sitios con presencia de agave, oscila entre 13.5 y 17.7°C, con valor promedio de 15.5°C, estos valores son muy similares a los reportados por Aguirre et al., (2001), que refiere una temperatura promedio anual entre 16 y 22°C, para el desarrollo del maguey potosino y un óptimo de 17°C, además, menciona daños en las puntas de las hojas a temperaturas mínimas de -12°C (de lo cual se puede recuperar la planta) y resistencia a temperaturas extremas diarias de 35°C.

La temperatura influye directamente sobre la fotosíntesis y la asimilación de CO<sub>2</sub>, ambas aumentan de manera exponencial hasta alcanzar un máximo alrededor de los 30°C en la mayoría de los vegetales, consecuentemente, existe un intervalo térmico o un punto en que la fotosíntesis neta es máxima y por tanto el crecimiento vegetal, con lo que queda definida la temperatura óptima de crecimiento (Serrada, 2008). Sin embargo en el caso de los agaves mezcaleros es necesario realizar un estudio sobre respuesta fisiológica, ya que los trabajos que abordan la productividad de estas especies son escasos.

### Temperatura nocturna

La temperatura nocturna es un factor de suma importancia en las plantas tipo CAM, debido a la asimilación de CO<sub>2</sub> por la noche. Nobel, (1988), menciona que la asimilación de CO<sub>2</sub> incrementa con temperaturas diurnas/nocturnas de bajas a moderadas y disminuye drásticamente en ambientes donde, las temperaturas nocturnas son elevadas. En la zona de estudio la temperatura nocturna anual presenta un rango muy estrecho entre 11 y 13°C, con valores promedio de 12°C, los cuales son idóneos para el apto desarrollo de *A. salmiana*, ya que la asimilación de CO<sub>2</sub> en *A. salmiana* aumenta cuando la temperatura nocturna se mantiene entre 1 y 17°C (Nobel, 1988). A la vez Ruiz

et al., (2007) concluyen que una asimilación neta positiva en *A. tequilana*, tiene lugar cuando la temperatura nocturna se encuentra entre -1 y 28°C.

### Precipitación

La disponibilidad del Agua en el suelo es imprescindible para el desarrollo vegetal, ya que las plantas están constituidas hasta en un 80% de agua, además es el vehículo de transporte y absorción de los nutrientes. En la mayoría de los ambientes terrestres esta demanda, se ve satisfecha por medio de la precipitación.

Los agaves en San Felipe se distribuyen bajo un régimen de lluvia anual de 318 a 525 mm, este rango se encuentra dentro de los reportados por; Gentry, (1982) 250-1000 mm; Aguirre, (2001) 320-720 mm e IMPI, (2001) 400-800 mm. El régimen de precipitación, en el cual se desarrollan es amplio, resaltando su resistencia a condiciones de aridez, debido a las adaptaciones morfológicas y fisiológicas, conferidas en su evolución en ambientes xerófilos.

Nobel, (1988) refiere que las plantas CAM con mayor succulencia, pueden mantener por más tiempo la tasa de asimilación neta de CO<sub>2</sub>, aun después de 30 días de sequía. *A. deserti*, responde fisiológicamente a la lluvia cerca de 12 horas después de ocurrido el meteoro y su apertura estomática total ocurre en 48 horas (Nobel 1976), propiciando una rápida absorción y asimilación del agua precipitada. Estos mecanismos le otorgan a los agaves, una importante ventaja competitiva sobre otros cultivos, en aquellos ambientes donde la humedad disponible es limitada.

### 6.3.3. Requerimientos edáficos

El agave se encontró en suelos someros, altamente pedregosos, algunas veces con una capa delgada de caliche, localizados en lugares con pendiente pronunciada sobre laderas y lomeríos; así como en planicies y valles con suelos medianamente profundos, poco compactados. Los suelos del tipo Feozem (haplico y luvico) fueron claramente más frecuentes que los



Xerosoles, debido quizá, a la mayor cobertura de esta entidad edafológica que abarca el 71% de la superficie de San Felipe. En este sentido Aguirre et al., (2001) y Mandujano (2013), señalan que los suelos que otorgan mejor sustento a las poblaciones de agave son los suelos de origen ígneo, someros o moderadamente profundos de textura arenosa a migajón, y del tipo xerosol.

Los resultados del análisis físico-químico de las muestras de suelo (Anexo 2), indican que el agave se desarrolla en suelos franco arenosos, con un contenido promedio de 60% arena, 23% limo y 17% arcilla, son de textura media a gruesa y densidad aparente promedio de 1.37, presentan alta proporción de macro poros, permitiendo una rápida infiltración del agua, no obstante, en estos suelos con bajo contenido de arcilla, la retención de agua es limitada, con valores de humedad disponible de solo 11%. El agave por medio de sus raíces superficiales, logra absorber de manera eficaz la poca humedad, que es infiltrada y retenida en el suelo.

El pH del suelo presentó valores entre 5.6 y 7.3, predominando los suelos ligeramente ácidos (6.5), sin requerimientos de cal ni yeso, al respecto Martínez, (1985), reporta que *A. salmiana* se desarrolla adecuadamente en suelos con pH neutro a ligeramente ácido. El contenido de materia orgánica es bajo, en promedio de 1.4%, debido en gran parte a la escasa cobertura vegetal que presentan las zonas semiáridas. La capacidad de intercambio catiónico es de solo (6.1), relacionado con el pobre contenido de materia orgánica.

En cuanto a la fertilidad, son suelos ricos en N-inorgánico, potasio, fierro y manganeso, con un aporte moderadamente bajo de fósforo, magnesio, cobre y calcio, finalmente resalta, que son suelos pobres en sodio y zinc. Los resultados obtenidos son moderadamente bajos, al compararlos con los valores de referencia DDI para *A. tequilana* (Uvalle et al., 2007) lo que indica que los agaves mezcaleros en San Felipe requieren de un menor aporte de nutrientes para su óptimo desarrollo, que los utilizados por *A. tequilana*.



El contenido de sales en el suelo es bajo (conductividad eléctrica baja .60 dS/m), ideal para que el agave prospere con éxito, así mismo, el sodio intercambiable es solo del 2%. Al analizar estos datos se puede afirmar que el principal factor edáfico que limita su distribución, son los suelos con alto contenido de sales, que elevan la presión osmótica en la solución del suelo, dificultando la toma de agua y nutrimentos por parte del agave, situación que se acentúa, en suelos con escasa humedad disponible.

#### 6.3.4. Asociación vegetal

Al realizar una consulta de los puntos de presencia de agave con la carta “Uso de Suelo y Vegetación” de INEGI, (1998), estos corresponden en su gran mayoría a las categorías pastizal y matorral, no obstante sería muy simple referir, someramente, que el agave se distribuye en este tipo de vegetación, debido a la complejidad y variedad de comunidades vegetales en que se localizó. A continuación se realiza un análisis con mayor detenimiento de los tipos de asociación vegetal en los que se ubicó Agave ssp.

El Agave ssp. se encontró en el pastizal formando colonias reducidas (con 10 a 15 individuos) y muy aisladas entre sí, observándose que su presencia en el pastizal puede estar acompañada o no, de ciertos elementos de la vegetación. En esta comunidad vegetal dominan las gramíneas, destacando los géneros Andropogon, Aristida, Buchloe y Cathestecum (Grether, 1974), mientras en el estrato arbustivo se pueden encontrar los géneros Acacia, Cyllindropuntia, Forestiera, Jatropha, Mimosa, Opuntia y Prosopis. Por lo regular estas comunidades no constituyen un estado clímax y a menudo representan zonas de transición entre otros tipos de vegetación.

La fig. 26 muestra un pastizal en una ladera de pendiente media, el cual presenta alto grado de perturbación con un porcentaje notable de suelo descubierto, el Agave ssp. aparece de forma esporádica igual que Mimosa ssp., Jatropha ssp., Opuntia ssp. y Prosopis ssp. Quizá este sitio formaba parte del matorral con anterioridad y haya sido perturbado por el excesivo pastoreo.



Figura 26. Vista de un pastizal perturbado con presencia de *Agave ssp.*

En el sitio que muestra la fig. 27, los pastos presentan un porcentaje alto de cobertura, acompañados por *Agave ssp.*, *Cylindropuntia ssp.*, *Jatropha ssp.*, *Opuntia ssp.*, *Prosopis ssp.* y *Yucca ssp.*, que se distribuyen de manera aislada. La densidad de *Agave ssp.* en esta parcela, ubicada en planicie, fue de 450 plantas por hectárea, agrupadas en colonias de 15 a 20 individuos.



Figura 27. Vista de un pastizal en planicie, con presencia de *Agave ssp.*



En algunos sitios como el de la fig. 28, el *Agave* ssp se encontró en pastizales de bajada media, mezclados con elementos propios del matorral xerofito incluyendo: *Acacia* ssp., *Cylindropuntia* ssp., *Jatropha* ssp., *Mimosa* ssp., *Opuntia* ssp. y *Prosopis* ssp.



Figura 28. Pastizal en bajada media con elementos del matorral Xerofito.



Figura 29. Pastizal con presencia de *Acacia*, *Agave*, *Mimosa* y *Prosopis*.

La fig. 29 muestra un sitio en el cual se ubicaron colonias de *Agave* spp. algo dispersas, acompañadas de *Euphorbia* spp., *Mimosa* spp., *Opuntia* spp. y *Prosopis* spp que forma un estrato abierto, las herbáceas presentan la mayor cobertura. Esta comunidad vegetal tiene cierta semejanza con el “mezquite-grassland” de Leopold (1950), y el bosque espinoso de Rzedowski (1978).

*Agave* spp. se encontró con mayor frecuencia y abundancia en el matorral xerofito, particularmente en el crasicale, donde se presentan elementos propios del matorral microfilo, submontano y rosetofilo. En estas comunidades *Agave* spp. puede llegar a ser dominante o codominante. Se desarrolla junto a los géneros *Acacia*, *Bouteloua*, *Cylindropuntia*, *Dalea*, *Euphorbia*, *Hecthia*, *Jatropha*, *Larrea*, *Mimosa*, *Myrtillocactus*, *Opuntia*, *Prosopis*, *Yucca*, entre otros.

Los matorrales forman estratos abiertos con una fisionomía difícil de definir, son ecosistemas fragmentados y muy perturbados que se presentan en pequeños manchones, formando zonas de transición y/o mezclados con otros tipos de vegetación. A menudo han sido sustituidos para abrir paso a la Agricultura o a la ganadería extensiva.

La fig. 30 muestra un matorral abierto, a pie de monte, con presencia de *Agave* spp., *Jatropha* spp., *Mimosa* spp., *Myrtillocactus* spp., *Opuntia* spp. y *Prosopis* spp. Esta parcela registró una densidad de 400 plantas de agave por hectárea.

En la fig. 31, se observa un matorral crasicale, en el que *Agave* spp. comparte dominancia con *Opuntia* spp., conformando una típica nopalera. Esta comunidad a diferencia de los otros sitios, muestra un estado clímax que forma un estrato cerrado, el cual es complementado por la ocurrencia de *Mimosa* spp. La densidad de *Agave* spp. en este sitio fue de 3 200 plantas por hectárea.





Figura 30. Matorral abierto, a pie de monte.



Figura 31. Matorral crasicaule conformado por *Agave* ssp. y *Opuntia* ssp.

El *Agave* ssp. se registró en sitios donde presenta dominancia, acompañada de los géneros *Acacia*, *Bouteloua*, *Cylindropuntia*, *Jatropha*, *Myrtillocactus*, *Opuntia*, *Prosopis* y *Yucca*, La comunidad vegetal de la fig. 32, se localiza en piso de valle, con una densidad de 1 420 plantas de *Agave* ssp. Por hectárea. Esta comunidad presento variaciones en algunos otros sitios, donde *Yucca* ssp. y/o *Myrtillocactus* ssp forman un estrato de eminencias bien definido.



Figura 32. Matorral en planicie con dominancia de *Agave ssp.*

Un caso particular es la presencia de maguey mezcalero en un matorral crasiacuale, en bajada con pendiente muy pronunciada, suelo somero y pedregoso (Fig. 33). En esta comunidad vegetal se presentan abundantes colonias de *Agave lechuguilla* y *Hecthia glomerata* que son elementos propios del matorral rosetofilo. La densidad de *Agave ssp.* (Excluyendo *A. lechuguilla*) fue de 560 plantas por hectárea.

Otros de los géneros encontrados son *Acacia*, *Bouteloua*, *Jatropha*, *Larrea*, *Mammillaria*, *Mimosa*, *Myrtillocactus*, *Opuntia* y *Prosopis*, que conforme va aumentando la pendiente son sustituidos por *Dasyilirion*, *Stenocereus* y *Yucca*, hasta llegar a una zona de transición con el bosque de pino a 2, 300 msnm, donde el agave mezcalero, se mezcla esporádicamente con *Pinus cembroides*.





Figura 33. Transición de Matorral en bajada, con bosque de pino.

Otra asociación bajo la cual se distribuye el *Agave ssp.* está conformada por los géneros *Dalea*, *Larrea*, *Opuntia* y *Prosopis*, destacando la presencia de *Juniperus ssp.* y *Quercus ssp.* en forma arbustiva (Fig. 34). Estas poblaciones ubicadas entre el pastizal y los bosques de encino se mantienen aisladas y podrían ser idóneas para promover el recambio genético del *Agave ssp.*



Figura 34. Matorral cerrado con presencia de *Juniperus ssp.* y *Quercus ssp.*

Las plantaciones de agave en San Felipe (Fig. 35) se han promovido por la CONAFOR SAGARPA y SDAyR, las cuales fueron establecidas en pastizales y suelos degradados como obras de conservación de suelos y con fines de reforestación. La mayoría de las magueyeras muestran buen estado, registrando una densidad promedio de 1400 plantas por hectárea, sin embargo la ausencia de manejo y labores culturales por parte de los propietarios es notable, quizá, porque además de forraje para ganado y el autoconsumo de aguamiel, no idealizan otro uso redituable, al menos, no en el corto plazo.



Figura 35. Plantaciones de *Agave* ssp. en San Felipe, Gto.



En base a los resultados anteriores, el cuadro 9, muestra un resumen de los requerimientos agroecológicos del Agave ssp., delimitando los rangos bajo los cuales se distribuye. Estos rangos fueron base, en la identificación de áreas con aptitud potencial.

Cuadro 9. Requerimientos Agroecológicos de agave Mezcalero (Agave spp).

Variable	Rango	Unidad de medida
Altitud	1000 a 2460	Msnm
Clima	Semiseco (BS1) a Seco (BS0)	C. Koopen
MO	> 0.7	%
Orientación	0 a 360	°
Origen del suelo	Ígneo, Sedimentario	S/U
Pendiente del suelo	1 a 60	%
PH	5.6 a 7.3	S/U
Profundidad de suelo	> 15	Cm
Precipitación anual	320 a 800	mm anuales
Rangos de humedad	Áridos, Semiáridos	S/U
Salinidad/Sodicidad del suelo	Poco tolerante	S/U
Suelo	Franco arenosos	S/U
Temp. Media anual	13.5 a 22	°C
Temp. Nocturna	-1, A 28	°C
Temp. Mínima extrema	-12	°C
Temp. Máxima extrema	35	°C
Textura del suelo	media a gruesa	S/U
Tipo de suelo	Feozem, Xerosol	S/U
Tipo de Vegetación	Pastizal, Matorral crasicaule, Mezquital, bosque de pino y Bosque de encino	S/U

MO: materia orgánica, Temp: temperatura, Msnm: Metros sobre el nivel del mar, C: clasificación, %: porcentaje, °: grados, S/U: Sin unidades, Cm: Centímetros, mm: milímetros, °C: Grados Celsius.

#### 6.4. Distribución de agave mezcalero

A partir de las áreas de entrenamiento, se obtuvieron un total de 9 firmas digitales distintas; Bosque 1 que engloba la vegetación de coníferas, uniforme y en estado clímax; Bosque 2 vegetación de coníferas mezclada con otros elementos y en zonas de transición; Área agrícola, zonas dedicadas a la

agricultura; Cuerpo de agua, tanto perenes como permanentes; Zona urbana, centros de población mayores a 2500 habitantes; Plantaciones de agave, magueyerías que han sido promovidas y mantenidas por el hombre, y muestran un arreglo simétrico; Matorral en esta categoría se englobaron los distintos tipos de matorral en los que se localizó el agave; Pastizal áreas donde el agave se localizó de forma dispersa, y los pastos (Gramíneas) cubren la mayor parte del suelo; Nubes que se presentan en la imagen y ocasionan ruido visual.

La fig. 36 muestra los valores digitales, de las distintas clases en cada una de las bandas Spot5. Se observa que las curvas de cada clase tienen comportamientos diferentes (con facilidad se puede distinguir entre el matorral y el pastizal).

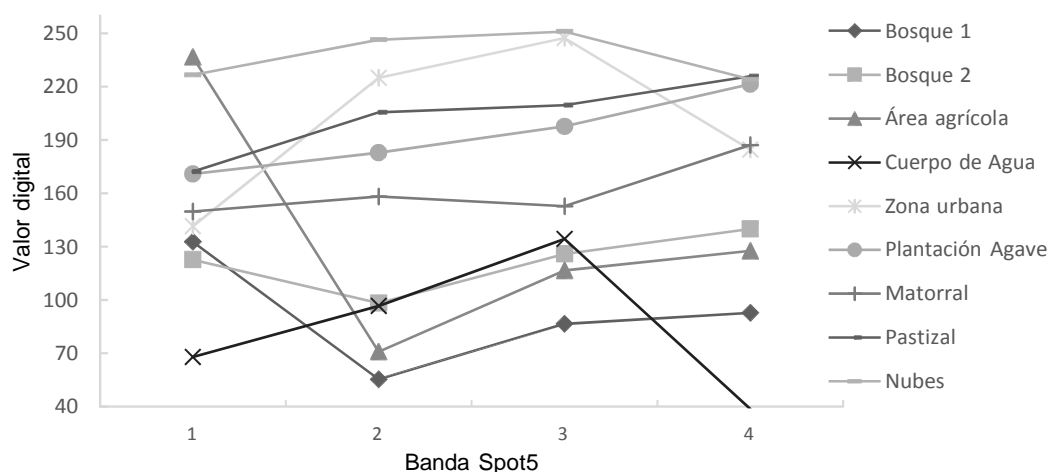


Figura 36. Firmas digitales de las distintas coberturas.

La evaluación de la separabilidad entre firmas (Cuadro 10), arrojó que la mejor combinación para realizar la clasificación era utilizar 3 bandas a la vez: 1,2 y 4. Esta combinación obtuvo una separabilidad promedio entre clases de 2000 y una mínima de 1998, valores que según Posada (2012), indican una excelente separabilidad entre clases.

Cuadro 10. Evaluación de separabilidad de las firmas digitales.

Clase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Bosque 1	1	0	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Bosque 2	2	2000	0	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Área agrícola	3	2000	2000	0	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Cuerpo de Agua	4	2000	2000	2000	0	2000	2000	2000	1998	2000
Zona urbana	5	2000	2000	2000	2000	0	2000	2000	2000	2000
Plantación Agave	6	2000	2000	2000	2000	2000	0	2000	2000	2000
Matorral	7	2000	2000	2000	2000	2000	2000	0	1998	2000
Pastizal	8	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	0	2000
Nubes	9	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	0

Distancia de medida: Divergencia transformada. Separabilidad mínima/promedio= 1998/2000, utilizando 3 bandas a la vez (1,2 y 4).

La matriz de contingencia calcula el porcentaje de píxeles que se asignan al área de entrenamiento. El cuadro 11 muestra que la mayoría de las clases obtuvieron un valor de 100% y todas estuvieron por arriba del 90%.

Los resultados de estos métodos de evaluación indican que la creación y delimitación de las áreas de entrenamiento se realizó correctamente y dan un alto grado de certeza y confiabilidad a la clasificación (supervisada) realizada.

Cuadro 11. Matriz de contingencia.

	Bosque1	Bosque2	Agrícola	Agua	Urbana	Plantación	Matorral	Pastizal	Nubes	Total
Bosque 1	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	627
Bosque 2	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	623
Agrícola	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	250
Agua	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	496
Urbana	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	21
Plantación	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	97.13%	0.22%	0.00%	0.00%	340
Matorral	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	91.46%	0.00%	0.00%	814
Pastizal	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	2.87%	8.31%	100.00%	0.00%	634
Nubes	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	34
Píxeles	627	623	250	496	21	348	890	550	34	3839

El cuadro 12, muestra el reporte de exactitud implementado a la imagen clasificada sin recibir ningún tratamiento o modificación. La exactitud general de la clasificación mostro un valor del 84% y el índice kappa fue de .8079, estos valores aunque son aceptables contienen un grado considerable de error, debido en gran parte al error de omisión del área agrícola que fue de 85.71%, este error fue ocasionado por las tierras en descanso o con etapas fenológicas iniciales, afectando el comportamiento espectral de la cobertura. Las plantaciones de agave mostraron un índice kappa de .9074, mientras que el matorral y pastizal obtuvieron valores positivos de comisión de 85 y 76% respectivamente.

Cuadro 12. Reporte de exactitud de la clasificación.

Clase	Referencias	Clasificados	Correctos	Omisión	Comisión	Kappa
Bosque 1	12	11	11	8.33%	100.00%	1
Bosque 2	26	29	26	0.0%	89.66%	0.881
Agrícola	21	3	3	85.71%	100.00%	1
Agua	1	1	1	0.0%	100.00%	1
Urbana	1	0	0	---	---	0
Plantación	27	25	23	14.81%	92.00%	0.9074
Matorral	52	54	46	11.54%	85.19%	0.7994
Pastizal	56	73	56	0.0%	76.71%	0.6759
Nubes	3	3	3	0.0%	100.00%	1
Total	199	199	169	8.33%	<u>84.92%</u>	<u>0.8079</u>

La evaluación de la exactitud de la imagen (Clasificada) corregida, se presenta en el cuadro 13. La exactitud global de la imagen mejoro en un 6%, mostrando un valor de 90.91%, al igual que el índice Kappa que alcanzó un valor de .8906 el cual es muy confiable (Naoki, 2006). El error de omisión del área agrícola se redujo a 14.29%. En el caso de las plantaciones de agave tuvo un porcentaje de comisión (acierto) de 95%, mientras que el pastizal y el matorral presentaron valores del 87 y 85 % respectivamente. Las demás clases obtuvieron un índice kappa superior a .90 y en algunos casos de 1, otorgando alto grado de confiabilidad a la imagen obtenida a partir de la clasificación de las imágenes Spot5. Parte del error persistente se debe al nivel de detalle o a las coberturas no clasificadas como en el caso de las carreteras, aun así, para

las categorías de interés (matorral, plantaciones y pastizal) el mapa obtenido representa de manera confiable la realidad.

Cuadro 13. Evaluación de la exactitud imagen corregida.

Clase	Referencias	clasificados	correctos	omisión	Comisión	Kappa
Bosque 1	10	10	10	0.00%	100.00%	1
Bosque 2	13	14	13	0.00%	92.86%	0.9214
Agrícola	14	12	12	14.29%	100.00%	1
Agua	3	3	3	0.00%	100.00%	1
Urbana	1	1	1	0.00%	100.00%	1
Plantación	21	22	21	0.00%	95.45%	0.9467
Matorral	30	30	26	13.33%	86.67%	0.8313
Pastizal	38	39	33	13.16%	84.62%	0.7905
No identificad	13	12	11	15.38%	91.67%	0.9083
Total	143	143	130		<u>90.91%</u>	<u>0.8906</u>

La superficie ocupada por las distintas coberturas se muestra en el cuadro 14. El matorral cubre un área total de casi 50, 000 ha equivalentes al 16.6 % de la superficie de San Felipe, se distribuye en pequeños manchones rodeados de pastizales y zonas agrícolas, se ubican principalmente en planicies y laderas, al Este y Noroeste del municipio. Estos manchones se encuentran dispersos entre sí, el más extenso cubre un área de 3 000 ha. Es evidente la fragmentación y perturbación de esta cobertura vegetal a causa de la actividad agrícola y pecuaria. Si se toma un promedio de los datos de densidad obtenidos en este trabajo y los reportados por Aguirre et al., (2001) y Martínez et al., (2005) se obtiene un promedio de 1 600 plantas por hectárea que multiplicadas por la superficie que ocupa el matorral resulta un estimado de 80 millones de plantas de agave distribuidas en el matorral xerofito.

El pastizal es la cobertura natural de mayor extensión en San Felipe con 63 000 ha, ocupa grandes extensiones en las planicies y valles del municipio, con ocurrencia frecuente en el norte, se ve interrumpido por las zonas agrícolas o reducidos manchones del matorral. Ya que el agave se presenta de manera ocasional en esta comunidad vegetal, al tomar un promedio de los valores más bajos de densidad reportados en la literatura (Aguirre et al., 2001; Martínez et

al., 2005) se estimó una población de agave de 17.4 millones de plantas distribuidas en el pastizal.

Las plantaciones de maguey ocupan el 4% de la superficie del municipio, con más de 12 mil hectáreas, estas se distribuyen en todo el municipio aunque son más frecuentes en la zona Norte y Este de San Felipe. Esta superficie parece ser muy elevada sin embargo se debe considerar que en años anteriores se impulsó en gran medida el establecimiento de plantaciones de este tipo por parte de instancias Federales y Estatales, sobre todo en áreas de uso comunal que por lo general cubren extensas zonas.

Aunque el agave se registró en otras coberturas como el bosque de pino y encino, no representan zonas viables de extracción de agave, no obstante estas poblaciones son de gran importancia, ya que representan una excelente opción para enriquecer el intercambio genético del agave mezcalero.

Cuadro 14. Superficie ocupada por las distintas coberturas.

Clase	Área (ha)
Bosque 1	26 029.36
Bosque 2	53 734.64
Área agrícola	82 110.56
Cuerpos de agua	1 718.21
Zona urbana	331.92
Plantaciones de agave	12 243.26
Matorral	49 958.36
Pastizal	63 110.83
Vegetación no identificada	10 865.28
Total	300 102

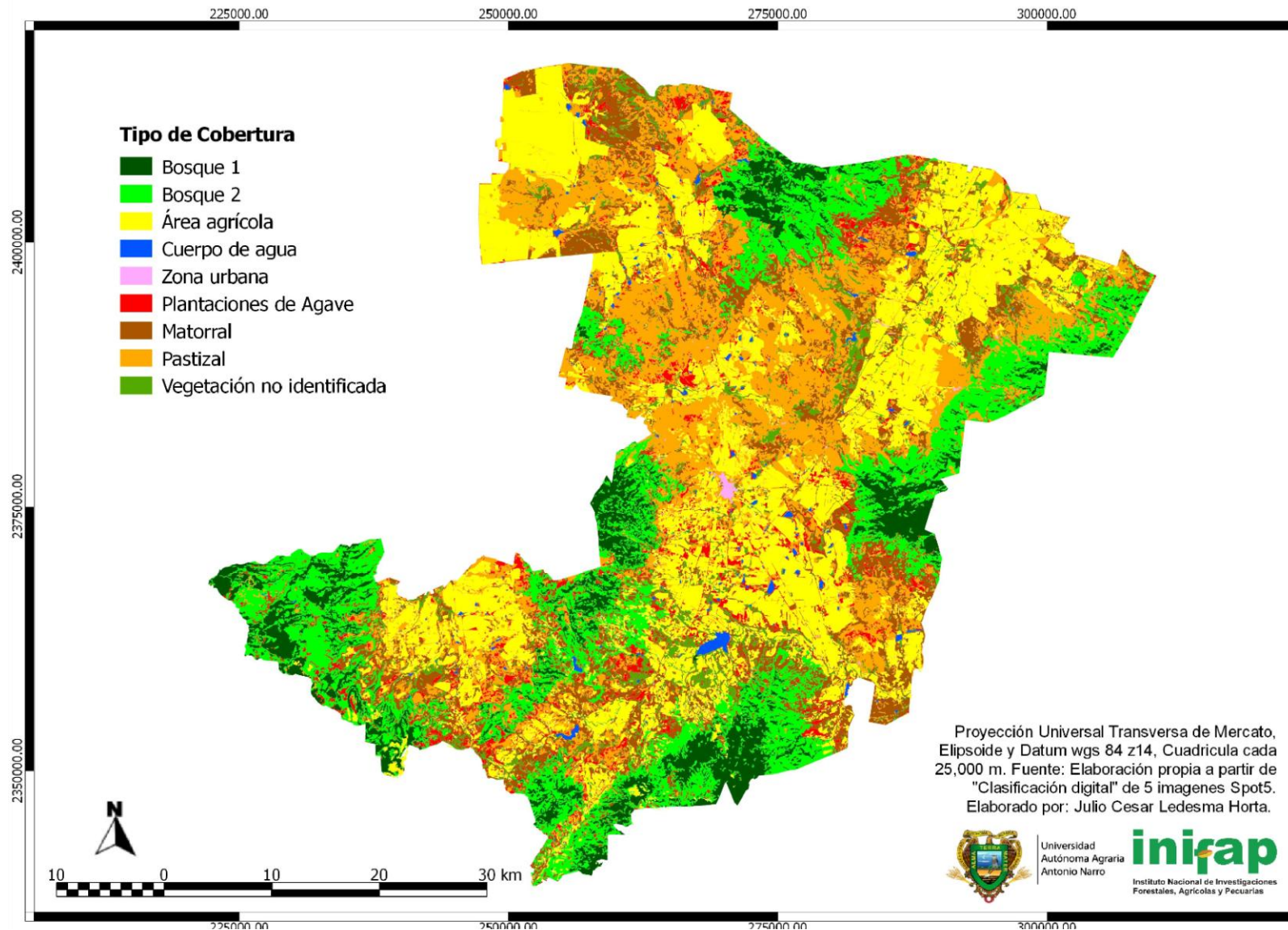


Figura 37. Distribución de las distintas coberturas clasificadas.

## 6.5. Áreas con Aptitud potencial

Los resultados del estudio de aptitud potencial (Fig. 38a) indican que la superficie agroclimáticamente apta para el establecimiento del agave mezcalero es de 228 242 hectáreas, abarcando tres cuartas partes (76%) del territorio de San Felipe. Las zonas aptas para el desarrollo del agave, cubren en su mayoría la zona norte, centro y sureste del municipio, a excepción de terrenos de pronunciada altitud y áreas de escasa precipitación. La superficie no apta suma 72 603 ha, ubicadas mayormente en la zona suroeste, en la cual se presentan diversas serranías ocupadas por bosques de pino y de encino.

Al excluir el área agrícola, bosques, zonas urbanas y cuerpos de agua, por considerarse áreas sin aptitud, el área apta para el establecimiento del agave, se redujo en un 44%, representado por 129 481 ha, mientras que la superficie no apta aumento a 171 364 ha (Fig. 38b).

Este mapa obtenido mediante algebra booleana, considera si las condiciones ambientales, bajo las cuales prospera el *Agave ssp.*, están presentes o no, por lo tanto, muestra, aquellas zonas que cumplen con todos y cada uno de los requerimientos agroecológicos del agave, de esta forma se puede afirmar que, en la mayor parte del territorio existen las condiciones medioambientales para sostener poblaciones de *Agave spp.* Si bien este método, no toma en cuenta el grado de aptitud y excluye aquellas zonas que no cumplen en su totalidad con alguno de los requerimientos agroclimáticos (aunque los demás estén presentes), deja en evidencia la vocación medioambiental de la zona de estudio para albergar poblaciones de agave con una alta probabilidad de éxito.

### Suma por pares

La fig. 39a muestra la distribución espacial de las áreas identificadas con diferente grado de aptitud para establecer *Agave ssp.* en la zona de estudio; la superficie no apta representa el 11.3% del municipio (34 117 ha), la cual se localiza principalmente en áreas ocupadas por serranías, donde la altitud y la



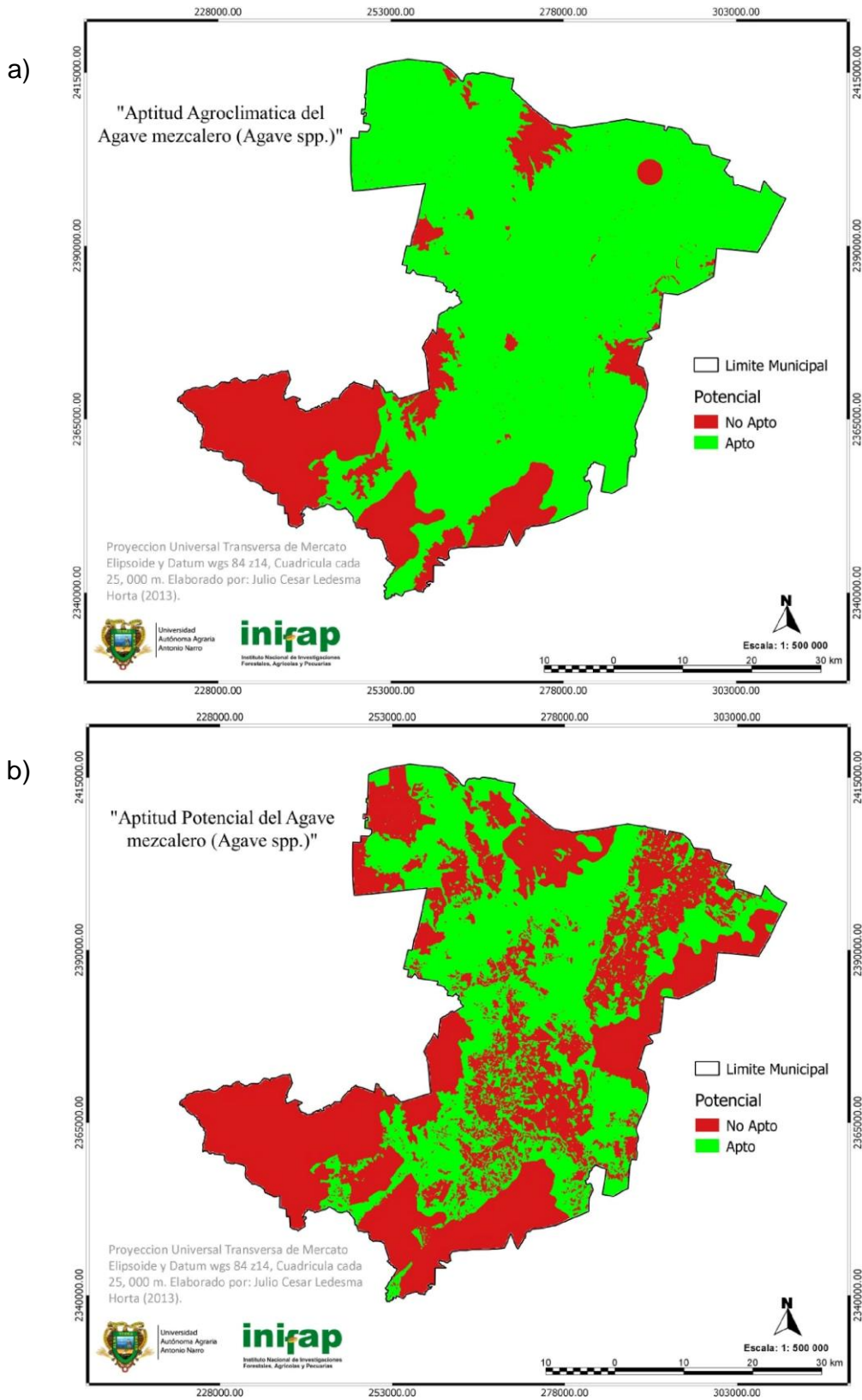


Figura 38. Zonas con aptitud potencial para el establecimiento de agave mezcalero en San Felipe.

pendiente son restricciones principales para el establecimiento de agave en estas áreas; Las zonas aptas cubren un total de 107 155 ha, distribuidas a lo largo del municipio, ubicadas en su mayoría en la zona noroeste, representan áreas intermedias entre las serranías y las planicies, bordeando las áreas con aptitud no apta; La superficie con potencial muy apto cubre la mayor parte del territorio de San Felipe (53 %), con una extensión de 159 573 ha. Los terrenos con potencial muy apto, se concentran en la parte norte destacando dos grandes superficies, Laguna de Guadalupe en el noroeste y Valle del Jaral en el noreste , así mismo la zona centro y sureste del municipio conforman una gran extensión con aptitud muy apta que representan el 50% de la superficie ocupada por esta categoría. Estas áreas se caracterizan por ser planicies extensas, con suelos de tipo Xerosol y Feozem, temperatura media anual de 16 a 18°C y precipitación promedio de 320 a 600mm anuales. Los resultados indican que una gran porción del municipio es adecuada para sostener el cultivo del agave, con fines de aprovechamiento industrial.

A diferencia del mapa resultado de algebra booleana, el obtenido por suma de pares, pondera el grado en que los requerimientos agroecológicos del agave son cubiertos en una zona en específico, por lo tanto, este mapa muestra el grado de aptitud agroclimática de las tierras, para el establecimiento de agave.

La fig. 39b, muestra las zonas idóneas para establecer plantaciones comerciales de agave, después de exceptuar las áreas utilizadas con fines agrícolas, zonas urbanas, cuerpos de agua y vegetación de tipo boscosa (la cual es de prioridad ecológica). La superficie no apta, aumento en un 450%, para un total de 156 567 ha, el área apta se redujo a 61 761 ha, mientras que la superficie con potencial muy alto es de 82 517 ha.

Al comparar el mapa de aptitud potencial, con la imagen resultado de la clasificación multispectral, se aprecia claramente la correspondencia entre las zonas aptas para el cultivo del agave y las áreas de distribución de la especie.

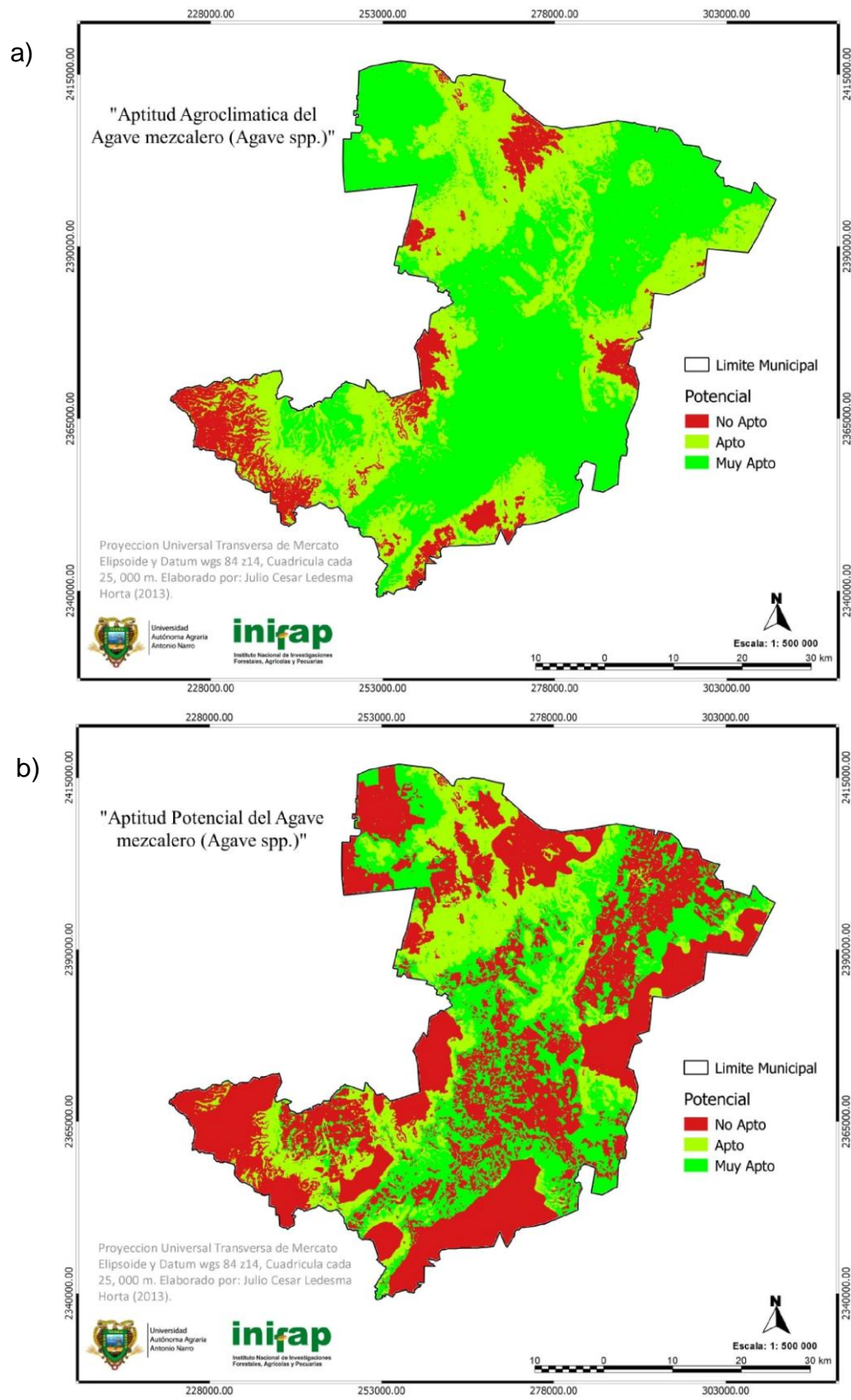


Figura 39. Grado de aptitud potencial para el establecimiento de agave mezcalero en San Felipe.

La fig. 40 muestra la potencialidad del territorio para establecer el cultivo de agave desde un punto de vista agroecológico, que considere su uso como mejorador y conservador de suelos; Existen 43 938 ha con potencial apto, que presentan las condiciones ambientales para el óptimo desarrollo del agave, y a la vez una pendiente entre 16 y 60%. Pocas especies vegetales pueden prosperar con éxito bajo estas condiciones, resaltando la importancia ecológica potencial, que poseen los agaves.

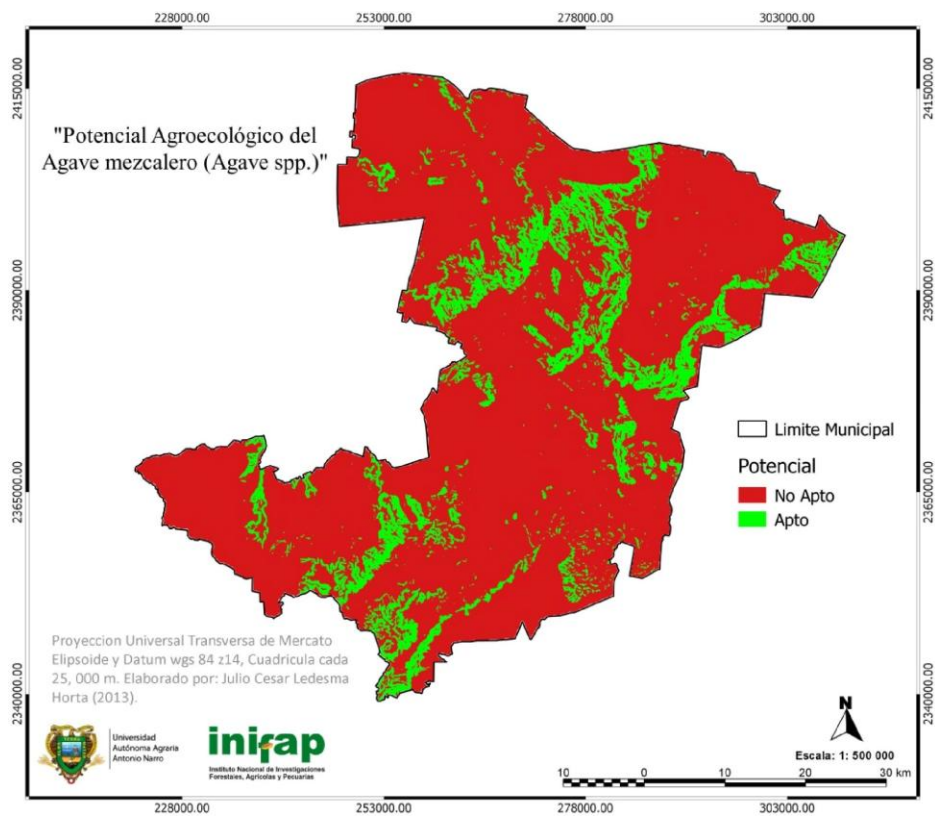


Figura 40. Potencial Agroecológico del agave mezcalero.

## VII CONCLUSIONES

Las condiciones climáticas, ecológicas, edafológicas y fisiográficas de San Felipe son representativas del Altiplano Central Mexicano. Aun cuando presenta diversos ecosistemas (entre ellos los bosques de pino y de encino), en dos terceras partes del municipio predominan las condiciones de aridez, donde las especies del tipo xerofito ocupan grandes extensiones, siendo los agaves plantas representativas del paisaje.

Las especies del género *Agave* que se distribuyen en San Felipe, pertenecen en su mayoría a los grupos *Americanae* y *Salmianae*. Estas especies crecen bajo amplios rangos agroecológicos, resaltando su tolerancia a la sequía, y donde el elemento edáfico es el principal factor limitante para su desarrollo. La competencia con otras plantas es determinante para su distribución y abundancia, de esta forma el agave prospera principalmente en los diferentes tipos de matorral xerofito y en el pastizal natural.

El *Agave ssp.* se distribuye en amplias zonas de San Felipe, llegando a ocupar cerca de un tercio del territorio, sin embargo las poblaciones de estas especies se encuentran dispersas entre si y muy fragmentadas; en gran parte debido a causas antropogénicas.

La clasificación multiespectral resulto ser una herramienta útil para predecir y estimar la superficie ocupada por el agave en la zona de estudio, ya que la imagen generada a partir de esta técnica, obtuvo un índice Kappa muy bueno, lo que indica que representa la realidad con un alto grado de acierto.

Alrededor de tres cuartos de la superficie de San Felipe presenta las condiciones Agroecológicas propicias para el desarrollo del agave y en casi la mitad del municipio se pueden establecer plantaciones de maguey, lo que daría gran certeza a la inversión pública y privada para fomentar un sistema producto agave-mezcal, basado en la sustentabilidad de dicho recurso y en el desarrollo económico y social de la región.

## VIII RECOMENDACIONES

Aunque el presente trabajo genera una idea acerca de la distribución y abundancia del agave mezcalero, es necesario realizar un estudio riguroso de ecología de poblaciones, que abarque la sucesión y tasa de crecimiento poblacional de la especie. A la vez sería idóneo que se estudiara la fisiología y productividad de los agaves mezcaleros en la región, para obtener datos concretos de viabilidad y generar planes de manejo adecuados desde un punto de vista sustentable.

Aunado a esto es imperativo que los planes de manejo contemplen el recambio genético entre poblaciones y la diversidad de procesos de producción, para mantener la invaluable diversidad de los agaves mezcaleros y la diversidad cultural que rodea la elaboración de mezcal.

Un punto clave para generar un plan de manejo verdaderamente sustentable, es contemplar el valor (monetario) que se da a las actividades alrededor de la producción del agave y el mezcal, ya que en la actualidad el precio que pretenden pagar las acaparadoras por Kg. de piña es de solo .70 centavos, lo cual evidentemente no toma en cuenta el enorme trabajo y esfuerzo realizado por los productores (propietarios) por mantener la planta durante al menos 8 años. El tomar en cuenta esta recomendación asegurara en mayor grado el éxito de un aprovechamiento sustentable de esta especie, al generar en los campesinos, ejidatarios propietarios y productores un interés mayor por el cuidado y producción del Agave ssp.

## IX LITERATURA CITADA

- Aguirre, J., H. Charcas, y J. Flores. 2001. El maguey mezcalero potosino. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México. 87pp.
- Alcocer, C., R. Paredes y A. Mandujano. 2011. Red de estaciones agroclimáticas: Potencial productivo y otras aplicaciones. Patronato para el desarrollo agropecuario de Guanajuato, A.C. Irapuato, México. 35pp.
- Altieri, M. 1995. The Science of Sustainable Agriculture. Westview Press. Boulder, USA. 433 pp.
- Andrade, J., E. De La Barrera, C. Reyes, M. Ricalde, G. Vargas y J. Cervera. 2007. El metabolismo ácido de las crasuláceas: diversidad, fisiología ambiental y productividad. Bol. Soc. Bot. Méx. 81: 37-50.
- Arzate, K. 2009. Distribución de cinco especies de Agave y su relación con algunos parámetros ambientales en Metztitlán, Hidalgo. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de maestría en Ciencias Biológicas. 103 pp.
- Aureoles, F., J. Rodríguez, J. Legarúa, J. Sahagún y M. Peña. 2008. Propagación in vitro del "maguey bruto" (Agave Inaequidens Koch), una especie amenazada de interés económico. Rev. Chapingo. Ser. Horticultura 14(3): 263-269.
- Bocco, G., M. Mendoza, y A. Velázquez. 2001. Remote sensing and GIS-based regional geomorphological mapping a tool for land use planning in developing countries. Geomorphology. 39: 211-219.
- Buendía E., E. Vargas, À. Leyva y S. Terrazas. 2002. Aplicación de redes neuronales artificiales y técnicas SIG para la predicción de coberturas

Forestales. Revista Chapingo. Series Ciencias Forestales y del ambiente. 1 (8): 31-37.

Burrough, P. 1986. Principles of geographic information systems for land resource assessment. Claredon Press, Oxford. UK.

Campbell, J. y R. Wynne. 2011. Introduction to remote sensing. Fifth edition. The Guilford press. New York, USA. 667 pp.

Casas, C. Y M. Alarcón. 1999. Meteorología y clima. UPC. Barcelona, España. 159pp.

Chuvienco, E. 2008. Teledetección ambiental. 3er Edición. Editorial Ariel, S. A. Barcelona, España. 594pp.

Conabio. 2012. La Biodiversidad en Guanajuato. Estudio de Estado. Vol I. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 446 pp.

Conabio. 2012. La Biodiversidad en Guanajuato. Estudio de Estado. Vol II. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 524 pp.

De Pando, B. 2009. Modelos de distribución de especies aplicados a estudios de flora amenazada (Guión de prácticas). Universidad de Granada. 97pp.

Díaz, G., R. Guajardo, G. Medina, I. Sánchez, M. Vázquez, J. Quijano, F. Legorreta y J Ruíz. 2012. Potencial productivo de especies agrícolas de importancia socioeconómica en México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Veracruz, México. 139 pp.



- Eguiarte, L., V. Souza y S. Montellano. 2000. Evolución de la Familia Agavaceae: Filogenia, Biología Reproductiva y Genética de poblaciones. Bol. Soc. Bot. México 66:131-150.
- Eguiarte, L. y V. Souza. 2007. Historia natural del Agave y sus parientes: Evolución y Ecología. D.F. México. 21 pp.
- Esquivel, M. 2012. Cambio climático en Guanajuato identificado a partir de los registros de la red agroclimática de fundación Guanajuato produce, A. C. Patronato para el desarrollo agropecuario de Guanajuato, A.C. Irapuato, México. 39 pp.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations).1997. Zonificación agro-ecológica. Guía general. Boletín de suelos de la FAO 73. FAO. Roma, Italia. 82 pp.
- Fielding, A. Y J. Bell. 1997. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/ absence models. Environmental Conservation. 24 (1):38-49.
- Financiera Rural. 2011. Monografía del Mezcal. Marzo 2011.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación de Köppen. 2da edición. Inst. de Geografía. UNAM. México. 146pp.
- García, A. 2002. Distribution of Agave (Agavaceae) in México. Cact. Suc. J. 74:177-188.
- García, A. 2007. Los Agaves de México. Ciencias. 87:14-23.
- García, J., J. Méndez y D. Talavera. 2010. El género agave spp. En México: principales usos de importancia socioeconómica y agroecológica. RESPYN. 5:109-129.

- García, P: 2014. Diversidad genética de los agaves mezcaleros del municipio de San Felipe, Guanajuato. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Tesis de Ingeniería en Agrobiología. 105 pp.
- Gentry, S. 1982. Agaves of Continental North America. The University of Arizona Press. Tucson. E.U.A. 670 pp.
- González, J., A. Bonet y M. Echeverría. 1996. Efecto de la orientación de la ladera sobre algunas comunidades arbustivas del semiárido central de la depresión del Ebro. Mediterránea. Serie de estudios biológicos: 21-31.
- Gliessman, S. 2002. Agroecología "Procesos Ecológicos en Agricultura Sostenible. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 359 pp.
- Grether, R. 1974. Estudio ecológico de Mimosa biuncifera Benth. y Mimosa monancistra Benth. en la cuenca alta del río de La Laja, Guanajuato, tesis de licenciatura. México. Facultad de Ciencias, UNAM.
- Herrera, L. 2001. Informe técnico. Resolución por la que se modifica la declaración general de protección de la denominación de origen Mezcal. Diario Oficial de la Federación. 29 de Noviembre de 2001. 76- 80.
- Hidalgo, J., A. Bonet y M. Echeverría. 1996. Efecto de la orientación de la ladera sobre algunas comunidades arbustivas del semiárido central de la depresión del Ebro. Mediterránea. Ser. De estudios Biológicos. 21-31.
- Hirt, C., M. Filmer y W. Featherstone. 2010. Comparison and validation of the recent freely available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4.1 and GEODATA DEM-9S ver3 digital elevation models over Australia. Australian Journal of Earth Sciences. 57 (3): 337-347.

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1998. Diccionario de datos edafológicos 1: 250 000 (vectorial). INEGI. Ags, México. 24 pp.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2000. Diccionario de datos climáticos 1: 250 000 y 1: 1 000 000 (vectorial). INEGI. Ags, México. 65 pp.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2004. Guía para la interpretación de cartografía edafología. INEGI. Ags., México. 28 pp.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2009. Guía para la interpretación de cartografía uso del suelo y vegetación 1:250 000. INEGI. Ags., México. 77 pp.
- IMPI (Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial).1994. Resolución mediante la cual se otorga la protección prevista a la denominación de origen Mezcal, para ser aplicada a la bebida alcohólica del mismo nombre. Diario Oficial de la Federación. 28 de noviembre de 1994. 28-32.
- IMPI (Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial). 2001. Resolución por la que se modifica la declaración general de protección de la denominación de origen Mezcal. Diario Oficial de la Federación. 29 de Noviembre de 2001. 72-86.
- Kumar, S. 2005. Basics of remote sensing and GIS. Laxmi publications. New Delhi, India. 137 pp.
- Khorrarn, S., F. Koch, C. Van der Wiele y S. Nelson. 2012. Remote sensing. Springer. New York, USA. 133 pp.

- Ledesma, P. Y C. Loera. 2013. Luna pulque y conejos: Culto ancestral Mesoamericano. Página electrónica del Museo Nacional de Antropología. <http://www.mna.inah.gob.mx/index.php/ediciones-mna/articulo/193-luna-pulque-y-conejos-culto-ancestral-mesoamericano.html>
- Liang, S., X. Li y J. Vang. 2012. Advanced remote sensing: Terrestrial information extraction and applications. Academic Press. Oxford, UK. 799pp.
- Luna, M. Y., Moirata, A., Avello, E. y Peraza, B., (2003), Estructuras espaciales coherentes de precipitación en la España peninsular: Régimen Atlántico, en <http://fcf.unse.edu.ar/pdf/lpr/p13.pdf>, fecha de consulta 01 de mayo de 2013.
- Neteler, M. Y H. Mitasova. 2008. Open source GIS. A GRASS GIS approach. Third Edition. Springer, New York, USA. 406 pp.
- Maderey, Laura., F. Cruz, Y L. Godínez. 2001. Relación entre los fenómenos acuosos y los elementos térmicos del clima en México. *Agrociencia*. 35: 23-40.
- Mandujano, A. 2013. Viabilidad del Agave como alternativa para controlar la desertificación de la microcuenca Laguna de Guadalupe, Gto. Universidad Autónoma de Querétaro. Tesis de maestría en Gestión Integrada de Cuencas. 137 pp.
- Martinez, R. y S. Meyer. 1985. A demographic study of maguey verde (*Agave salmianu* spp. *Crassispinu*) under conditions of intense utilization. *Desert plants* 7: 61-64.
- Meliá, J. 1991. La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables: agricultura. Universitat de València. Valencia, España. 410pp.

- Naoki, K., M. Gómez, R. López, R. Meneses y J. Vargas. 2006. Comparación de modelos de distribución de especies para predecir la distribución potencial de vida silvestre en Bolivia. *Ecología en Bolivia*. 41 (1): 65-78.
- Nobel, P. 1976. Water relations and photosynthesis of a desert CAM plant, *Agave deserti*. *Plant physiol.* 58: 576-582.
- Nobel, P. 1988. *Environmental Biology of Agaves and Cacti*. Cambridge University Press. Cambridge. U.K. 243 pp.
- Olivas, U., J. Valdez, A. Aldrete, M. González y G. Vera. 2007. Áreas con aptitud para establecer plantaciones de maguey cenizo: definición mediante análisis multicriterio y SIG. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 30 (4): 411-419.
- Paredes, R., A. Mandujano, A. Gámez y H. García. 2011. Actualización del mapa de uso del suelo agrícola en el Estado de Guanajuato. *REMEXCA*. 1(2): 85-96.
- Parker, K. (1991). Topography, substrate, and vegetation patterns in the northern Sonoran Desert. *Journal of Biogeography*. 18: 151-163.
- Pérez, C. Y A. Muñoz. 2006. *Teledetección nociones y aplicaciones*. Universidad de Salamanca. Salamanca, España. 359 pp.
- Posada, E., H. Ramírez y N. Espejo. 2012. *Manual de prácticas de percepción remota con el programa ERDAS IMAGINE 2011*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, Colombia. 154pp.
- Richards, J. 2013. *An introduction. Remote sensing digital image analysis*. Fifth edition. Springer. New York, USA. 487pp.
- Rosete F. y G. Bocco. 2003. *Los sistemas de información Geográfica y la Percepción Remota. Herramientas integradas para los planes de*

manejo en comunidades forestales. Gaceta Ecológica. Instituto Nacional de Ecología. 68: 43-54.

Rubio, R. 2007. Enfermedades del cultivo de agave. pp. 169-195 In Rulfo V., F. O. et al. (ed.). Conocimiento y prácticas agronómicas para la producción de Agave tequilana Weber en la zona de denominación de origen del tequila. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro.

Ruiz C., J. Medina, J. González, C. Ortiz, H. Flores, R. Martínez, y K. Byerly. 1999. Requerimientos agroecológicos de cultivos. INIFAP. CIRPAC. México. 324pp.

Ruiz, J., A. González, R. Regalado, C. Anguiano, V. Vizcaíno y E. González. 2003. Recursos edafo-climáticos para la planeación del sector productivo en el Estado de Jalisco. Libro Técnico Núm. 2. INIFAP-CIRPAC. Ed. Conexión Gráfica. Guadalajara, Jalisco. 172 pp.

Ruiz Corral, J. A. 2007. Requerimientos agroecológicos y potencial productivo del agave Agave tequilana Weber en México. pp. 11-36 In Rulfo V., F. O. et al. (ed.). Conocimiento y prácticas agronómicas para la producción de Agave tequilana Weber en la zona de denominación de origen del tequila. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro.

Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Limusa. México.

Rzedowski, J. 2006. Vegetación de México. 1ra Edición digital. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 504pp.

- Salazar, S. 2007. La industria del bacanora: historia y tradición de resistencia en la sierra sonorense. *Región y sociedad*. 19 (39): 105-133.
- Sánchez, N. Y R. Garduño. 2008. Algunas consideraciones acerca de los sistemas de clasificación climática. *Contactos*. 68: 5-10.
- Scheinvar, E. 2008. Genética de poblaciones silvestres y cultivadas de dos especies mezcaleras: *Agave cupreata* y *Agave potatorum*. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de maestría en Ciencias Biológicas. 122pp.
- Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. 1994. Norma oficial mexicana-070-SCFI-1994: Bebidas alcohólicas-mezcal-especificaciones. *Diario Oficial de la Federación*. 4 de junio de 1997.
- Serrada, R. 2008. *Apuntes de Selvicultura*. Servicio de Publicaciones. EUIT Forestal. Madrid, España. 50 pp.
- Smith, C. Y N. Brown. 1995. *ERDAS field guide*. 3er edition. ERDAS. Atlanta, USA. 628pp.
- Stallman, R. 1985. *The GNU manifesto*. Free software foundation, Inc. 12pp.
- Sumner, M. 2000. *Handbook of soil science*. CRC Press. Miami, USA. 1758 pp.
- Terrones, T., C. Mejía y H. García. 2000. *Índices agroclimáticos Guanajuato*. INIFAP, CEBAJ. Celaya, México. 111pp.
- Uvalle, J., C. Vélez y A. Ramírez. 2007. Muestreo y análisis de suelo en plantaciones de agave p. 37-55 In Rulfo V., F. O. et al. (ed.). *Conocimiento y prácticas agronómicas para la producción de Agave tequilana Weber en la zona de denominación de origen del tequila*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro.

- Valenzuela, A. 2007. Las denominaciones de origen Tequila y Mezcal y la biodiversidad en el género *Agave* sp. Conferencia dictada en el Seminario "Biodiversidade e Denominações de Origem: Uma problemática global". Escola Superior Agrária de Coimbra (ESAC). 18 de Abril de 2007. Coimbra, Portugal.
- Valdez, R., J. Mendoza Y L. Lasso. 1981. UAAAN. Saltillo, México. 111pp.
- Van Oosterom, P., S. Zlatanova y E. Fendel. 2005. Geo-Information for Disaster Management. Springer. Netherlands. 1427pp.
- Vázquez, E., R. García, C. Peña, T. Ramírez y V. Morales. 2011. Tamaño de la semilla, emergencia y desarrollo de la plántula de maguey (*Agave salmiana* otto ex Salm-Dyck). *Fitotecnia Mexicana*. Vol. 34 (3): 167-173.
- Wondzell, S., G. Cunningham & D. Bachelet. 1996. Relationships between landforms, geomorphic processes, and plant communities on a watershed in the northern Chihuahuan Desert. *Landscape Ecology*. Vol. 11 (6): 351-362.
- Zúñiga, I. Y E. Crespo. 2010. Meteorología y climatología. Universidad Nacional de Educación a distancia. Madrid, España. 247pp.



## ANEXOS

### Anexo 1. Puntos de muestreo: presencia de Agave ssp.

Punto	X	Y	Altitud	Pendiente %	Orientación	Tmax °C	Tmin °C	Tnoc °C	Tmed °C	Precipitación (mm)	Clima	Edafología	USyV
1	278905.65	2387754.31	2011	3.19	NE	24.5	8.0	11.9	17.0	461.4	BS1kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
2	278884.51	2387336.55	2032	6.65	NE	24.5	8.0	11.9	16.8	463.4	BS1kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
3	278744.18	2391559.37	2113	8.10	NE	24.5	7.9	11.8	15.8	445.5	BS1kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
4	273667.84	2393397.88	2101	9.18	NE	23.9	7.8	11.6	15.9	451.6	BS1kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
5	265136.13	2387999.53	2136	5.17	NE	23.6	7.8	11.5	15.7	458.4	BS1kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Agricultura de Temporal
6	265123.67	2385484.89	2116	6.95	NE	24.0	7.9	11.6	16.1	468.1	BS1kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
7	310128.92	2396777.09	2172	4.00	NE	26.2	9.1	13.1	15.2	410.7	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
8	292029.28	2399734.33	1848	6.77	NE	25.4	8.1	12.2	16.8	318.8	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Mezquital
9	287592.45	2401901.43	1899	1.98	NE	25.4	8.1	12.2	16.5	330.7	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
10	287592.56	2401901.28	1899	1.98	NE	25.4	8.1	12.2	16.5	330.7	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
11	288270.02	2400561.77	1892	1.13	NE	25.4	8.1	12.2	16.5	322.5	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Agricultura de Temporal
12	287188.3	2399644.87	1899	6.57	NE	25.4	8.1	12.2	16.6	334.1	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Agricultura de Temporal
13	285617.82	2396427.26	1908	3.20	NE	25.3	8.1	12.1	17.0	369.6	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Agricultura de Temporal
14	287036.08	2394733.26	1888	4.70	NE	25.3	8.1	12.1	17.2	374.0	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Agricultura de Temporal
15	288456.05	2394578.51	1875	0.53	NE	25.3	8.1	12.2	17.3	367.4	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Agricultura de Temporal
16	288341.09	2396097.72	1873	3.96	NE	25.4	8.1	12.2	17.1	351.4	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Agricultura de Temporal
17	280866.56	2383724.55	1956	5.14	NE	24.8	8.1	12.0	17.8	476.0	BS1kw	FEOZEM HAPLICO	Agricultura de Temporal
18	285745.07	2366682.15	2131	4.76	NE	25.4	8.1	12.2	16.3	512.0	BS1kw	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
19	287075.52	2367877.1	2186	7.68	NE	25.3	8.1	12.2	15.8	508.8	BS1kw	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
20	276261.64	2361289.74	2059	9.96	NE	25.5	8.1	12.2	17.1	521.9	BS1kw	FEOZEM LUVICO	Pastizal Natural
21	265115.53	2368844.86	2143	3.88	NE	24.6	7.9	11.9	16.5	524.1	BS1kw	FEOZEM HAPLICO	Agricultura de Temporal
22	262596.97	2367880.32	2231	7.92	NE	24.4	7.8	11.7	15.7	525.3	BS1kw	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
23	262902.93	2368256.1	2242	11.96	NE	24.5	7.8	11.7	15.6	524.3	BS1kw	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
24	260937.95	2409380.51	2299	4.16	NE	25.0	7.6	11.6	14.7	435.2	BS1kw(x')	XEROSOL HAPLICO	Pastizal Natural
25	260495.68	2409211.75	2293	3.40	NE	25.0	7.6	11.7	14.8	436.6	BS1kw(x')	XEROSOL HAPLICO	Pastizal Natural
26	261132.18	2409106.83	2312	5.64	NE	25.0	7.6	11.6	14.6	435.4	BS1kw(x')	XEROSOL HAPLICO	Pastizal Natural
27	261369.53	2409410.98	2304	3.93	NE	25.0	7.6	11.6	14.7	434.1	BS1kw(x')	XEROSOL HAPLICO	Pastizal Natural
28	262489.75	2408591.18	2368	7.38	NE	24.9	7.6	11.6	14.0	433.8	BS1kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
29	286188.88	2364645.34	2082	5.45	NE	25.5	8.1	12.2	16.8	513.9	BS1kw	FEOZEM HAPLICO	Agricultura de Temporal
30	295460.69	2392399.78	1894	3.42	NE	25.5	8.3	12.3	17.5	389.6	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Matorral Crasicaule
31	288191.67	2400926.05	1888	3.40	NE	25.4	8.1	12.2	16.5	323.1	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Agricultura de Temporal
32	283589.65	2398919.87	1994	1.88	NE	25.2	8.0	12.1	16.2	376.1	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
33	278153.98	2391491.58	2105	5.14	NE	24.4	7.9	11.8	15.9	447.8	BS1kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
34	277950.65	2388577.19	2017	7.02	NE	24.4	7.9	11.8	16.9	459.5	BS1kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
35	264056.49	2396310.48	2369	5.59	NE	24.1	7.8	11.6	13.6	451.1	BS1kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
36	261887.64	2397015.36	2339	4.03	NE	24.4	7.8	11.7	14.1	449.6	BS1kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
37	260721.89	2395768.27	2365	3.76	NE	24.4	7.8	11.7	14.0	448.9	BS1kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Agricultura de Temporal
38	267713.03	2404016.66	2328	3.58	NE	24.7	7.7	11.7	14.0	435.6	BS1kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
39	270070.81	2399359.67	2365	3.88	SO	24.3	7.8	11.6	13.5	443.4	BS1kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
40	276807.62	2365477.85	2039	3.02	SO	25.3	8.1	12.1	17.3	521.3	BS1kw	XEROSOL HAPLICO	Agricultura de Temporal
41	280894.55	2366114.03	2048	6.04	SO	25.4	8.1	12.2	17.2	516.8	BS1kw	XEROSOL HAPLICO	Agricultura de Temporal
42	287384.67	2396709.9	1886	7.86	SO	25.4	8.1	12.2	16.9	351.9	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Agricultura de Temporal
43	274036.13	2394772.44	2164	7.86	SO	24.1	7.8	11.6	15.3	448.1	BS1kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
44	266310.31	2387306.53	2144	3.23	SO	23.5	7.8	11.5	15.5	459.4	BS1kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Agricultura de Temporal
45	266310.3	2387306.43	2144	3.23	SO	23.5	7.8	11.5	15.5	459.4	BS1kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Agricultura de Temporal
46	264876.93	2387518.23	2152	1.59	SO	23.7	7.8	11.5	15.6	459.8	BS1kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Agricultura de Temporal
47	267073.18	2389365.31	2185	2.66	SO	23.2	7.7	11.3	14.9	453.6	BS1kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
48	267073.07	2389365.37	2185	2.66	SO	23.2	7.7	11.3	14.9	453.6	BS1kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
49	268248.64	2389071.1	2147	4.81	SO	23.1	7.7	11.3	15.2	452.8	BS1kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
50	308864.38	2397072.55	2046	6.81	SO	26.2	9.1	13.1	16.4	408.8	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
51	309101.26	2396084.56	2111	7.12	SO	26.1	9.0	13.0	15.8	411.1	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
52	304046.06	2398048.78	1960	0.73	SO	26.1	8.9	12.9	17.2	397.9	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Matorral Crasicaule
53	287602.43	2396993.51	1892	4.57	SO	25.4	8.1	12.2	16.8	347.5	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Agricultura de Temporal
54	289278.9	2395873.88	1861	4.30	SO	25.4	8.1	12.2	17.2	349.7	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Agricultura de Riego
55	298162.92	2392383.65	1935	2.46	SO	25.6	8.4	12.4	17.2	397.6	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Matorral Crasicaule
56	298162.56	2392383.41	1935	2.46	SO	25.6	8.4	12.4	17.2	397.6	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Matorral Crasicaule
57	293709.13	2387877.39	1925	11.93	SO	25.3	8.2	12.2	17.5	421.4	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Matorral Crasicaule
58	293971.77	2387452.08	2071	21.00	SO	25.3	8.2	12.2	16.1	424.1	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Bosque de Pino
59	294102.09	2387403.02	2083	30.02	SO	25.3	8.2	12.2	16.0	424.5	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Bosque de Pino
60	294376.13	2387337.34	2208	59.95	SO	25.3	8.2	12.3	14.7	424.8	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Bosque de Pino
61	293975.29	2390833.07	1890	3.99	SO	25.4	8.3	12.3	17.6	399.5	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Matorral Crasicaule
62	264569.8	2396664.92	2352	9.34	SO	24.1	7.8	11.6	13.8	450.9	BS1kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
63	280941.59	2366018.12	2057	1.25	SO	25.4	8.1	12.2	17.1	516.8	BS1kw	XEROSOL HAPLICO	Agricultura de Temporal
64	281991.78	2365748.49	2102	8.29	SO	25.4	8.1	12.2	16.7	516.1	BS1kw	XEROSOL HAPLICO	Pastizal Natural
65	285755.27	2365925.34	2103	8.46	SO	25.4	8.1	12.2	16.6	512.9	BS1kw	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
66	287152.5	2366222.16	2139	5.51	SO	25.4	8.1	12.2	16.2	511.2	BS1kw	FEOZEM HAPLICO	Agricultura de Temporal
67	263542.38	2409994.04	2365	7.84	SO	25.0	7.5	11.6	14.0	427.8	BS1kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
68	268716.12	2404809.64	2371	6.10	SO	24.8	7.6	11.6	13.5	431.9	BS1kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
69	282095.18	2364618.23	2069	9.84	SO	25.6	8.2	12.3	17.0	516.5	BS1kw	FEOZEM LUVICO	Pastizal Natural
70	303498.97	2398648.77	1946	3.00	SO	26.2	8.9	12.9	17.3	395.4	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Agricultura de Temporal
71	306203.25	2396418.92	2023	4.71	SO	26.1	8.9	12.9	16.6	405.9	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
72	298253.08	2392887.77	1926	2.30	SO	25.6	8.4	12.4	17.3	395.1	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Matorral Crasicaule
73	297168.66	2394378.85	1880	5.06	SO	25.6	8.4	12.4	17.5	382.4	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Matorral Crasicaule
74	292163.37	2399340.09	1849	3.34	SO	25.4	8.1	12.2	16.9	320.9	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Mezquital
75	287717.23	2399312.98	1882	1.63	SO	25.4	8.1	12.2	16.7	330.2	BS0kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Agricultura de Temporal
76	260749	2395144.73	2394	9.06	SO	24.4	7.8	11.7	13.7	449.0	BS1kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
77	268556.84	2404091.21	2354	4.98	SO	24.7	7.6	11.7	13.7	434.0	BS1kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural
78	260098.35	2409811.54	2276	3.72	SO	25.0	7.6	11.6	15.0	436.4	BS1kw(x')	XEROSOL HAPLICO	Pastizal Natural
79	268377.23	2404674.09	2341	11.60	SO	24.8	7.6	11.6	13.8	432.9	BS1kw(x')	FEOZEM HAPLICO	Pastizal Natural

Anexo 2. Resultado análisis físico-químico de las muestras de suelo.

Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	Tipo de Suelo	Textura	D.A.	pH (1:2 agua)	CIC	Cee (dS/m)
44.04	22.32	33.64	Franco	Medio	1.34	7.17	6.1	0.482
60.04	16.32	23.64	Franco Arenoso	Gruesa	1.48	6.78	4.5	0.474
60.04	18.32	21.64	Franco Arenoso	Gruesa	1.44	6.59	8.1	0.63
66.04	16.32	17.64	Franco Arenoso	Gruesa	1.56	6.67	4.6	0.565
56.04	16.32	27.64	Franco Arenoso	Gruesa	1.41	6.48	7.4	1.328
56.04	14.32	29.64	Franco Arenoso	Gruesa	1.26	6.95	17.4	0.921
52.04	22.32	25.64	Franco Arcillo Arenoso	Medio	1.33	6.88	11.1	0.514
56.04	22.32	21.64	Franco Arcillo Arenoso	Medio	1.05	7.08	22.9	0.534
66.04	16.32	17.64	Franco Arenoso	Gruesa	1.23	7.33	17.3	0.47
36.04	18.32	45.64	Franco	Medio	1.20	7.29	10.6	1.055
42.04	20.32	37.64	Franco	Medio	1.24	7.05	18.3	0.602
58.04	16.32	25.64	Franco Arenoso	Gruesa	1.49	7.03	9.1	0.727
46.04	16.32	37.64	Franco	Medio	1.36	6.84	10.1	0.408
52.04	14.32	33.64	Franco	Medio	1.23	7.13	13.3	0.418
66.04	16.32	17.64	Franco Arenoso	Gruesa	1.65	6.09	5.1	0.51
54.96	14.68	30.36	Franco Arenoso	Gruesa	1.24	6.6	22.2	0.734
56.96	14.68	28.36	Franco Arenoso	Gruesa	1.47	6.7	11.8	0.762
68.96	14.68	16.36	Franco Arenoso	Gruesa	1.49	6.57	11.5	0.591
68.96	14.68	16.36	Franco Arenoso	Gruesa	1.37	6.57	7.4	0.348
66.96	16.68	16.36	Franco Arenoso	Gruesa	1.12	6.57	13.0	0.493
64.96	14.68	20.36	Franco Arenoso	Gruesa	1.38	6.6	8.3	0.546
70.96	12.68	16.36	Franco Arenoso	Gruesa	1.40	6.33	10.2	0.414
44.96	18.68	36.36	Franco	Medio	1.51	6.44	11.4	0.79
72.96	12.68	14.36	Franco Arenoso	Gruesa	1.64	5.72	4.5	0.323
64.96	16.68	18.36	Franco Arenoso	Gruesa	1.56	6.34	8.9	2.391
72.96	20.68	6.36	Franco Arcillo Arenoso	Medio	1.37	6.05	6.9	0.308
48.96	24.68	26.36	Franco Arcillo Arenoso	Medio	1.21	5.88	10.5	0.366
68.96	16.68	14.36	Franco Arenoso	Gruesa	1.47	6.05	7.6	0.498
56.96	20.68	22.36	Franco Arcillo Arenoso	Medio	1.31	5.7	8.8	0.297
64.96	20.68	14.36	Franco Arcillo Arenoso	Medio	1.35	5.59	10.4	0.333
58.96	24.68	16.36	Franco Arcillo Arenoso	Medio	1.33	5.96	25.4	0.345
68.96	14.68	16.36	Franco Arenoso	Gruesa	1.58	5.96	11.2	0.365
54.96	20.68	24.36	Franco Arcillo Arenoso	Medio	1.34	6.05	42.7	0.513
70.96	14.68	14.36	Franco Arenoso	Gruesa	1.50	6.11	11.9	0.563

FERTILIDAD										
MO (%)	N-Inorgánico	P-Bray (ppm)	K (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Na (ppm)	Fe (ppm)	Zn (ppm)	Mn (ppm)	Cu (ppm)
1.7	19.7	4.2	454	923	27.9	19.4	19.5	0.38	62.4	0.21
1.67	18.3	6.54	289	704	23.6	20.3	50.7	0.34	73.2	0.38
1.29	20.4	7.22	415	1266	69	24.4	37.3	0.2	46.9	0.17
1.2	23.2	5.27	287	586	78.8	72	41.6	0.09	34.5	0.26
1.12	21.8	6.34	607	910	83.3	150	7.86	0.12	16.3	0.19
1.11	14.1	7.91	819	2570	116	340	4.28	0.23	8.49	0.18
2.74	21.1	7.52	754	1690	72.9	32.8	29.2	0.24	59.2	0.39
3.13	16.9	1.85	454	3953	237	2.05	3.76	0.25	9.44	0.21
1.81	18.3	13.08	806	2345	413	33.1	13.3	0.25	20.6	0.2
1.7	26.1	7.22	806	1222	184	212	27.6	0.15	44.5	0.13
2.27	21.1	16.98	1995	2424	122	27.8	7.95	0.63	23.2	0.29
1.1	15.5	4.49	570	904	351	48.8	20.5	0.09	40.5	0.12
0.92	23.9	6.73	1140	910	310	20.2	14.6	0.15	28.7	0.21
1.16	21.8	8.1	1168	1797	41.8	216	5.67	0.01	14.7	0.15
1.19	23.2	7.71	192	800	71.9	1.94	35.6	0.1	45.1	0.43
1.87	22.5	12.23	509	3778	237	14.6	6.75	0.16	8.26	0.23
0.8	23.2	2.71	481	1502	352	49.4	6.38	0.04	29.7	0.13
0.7	17.6	7.3	274	1686	280	20.7	11.1	0.15	13.7	0.22
0.72	18.3	8.8	410	933	201	8.22	8.35	0.25	5.48	0.14
2.23	19.7	7.49	563	1554	449	20	37	0.36	19.8	0.17
0.8	17.6	5.33	467	940	264	54.3	8.08	0.05	10.2	0.14
1.2	19	5.99	510	1169	365	6.8	16.4	0.35	21.1	0.13
1.64	13.4	6.18	629	1193	413	97	20.4	0.16	38.7	0.29
1.22	16.2	29.79	208	544	144	4.27	37.9	0.28	25.4	0.24
0.71	15.5	21.64	536	838	265	273	14.4	0.11	20.5	0.31
1.21	12.7	6.08	460	924	124	21.6	23.4	0.34	25.5	0.33
1.42	13.4	1.41	516	1309	303	27.9	18.4	0.07	25.6	0.26
0.85	14.8	6.55	433	790	282	54.2	9.77	0.27	15.1	0.22
1.96	16.9	9.84	334	1062	320	6.52	28.4	0.47	25.8	0.31
2.31	19.7	8.05	356	1362	322	9.14	38.1	0.53	58.9	0.3
1.12	16.2	4.21	493	4038	483	4.68	4.13	0.05	4.41	0.37
0.7	14.1	3.46	206	1692	254	33	30.2	0.07	39.5	0.22
1.71	16.2	5.9	137	7123	819	10.1	8.39	0.12	21.4	0.16
0.92	17.6	4.4	264	1565	407	15.1	10.5	0.02	17.5	0.1