



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

Morelia, Michoacán, México



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CUERPO ACADÉMICO "GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA"

IMPACTO AMBIENTAL DE LA ZONA AGUACATERA EN LOS ACUÍFEROS DE APATZINGÁN Y COTIJA, REGIÓN TANCÍTARO

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

ALEJANDRO PARDO GONZÁLEZ

ASESOR DE TESIS:

DRA. SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE

Dra. Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

TESIS APOYADA POR:



SEPTIEMBRE DEL 2015

AGRADECIMIENTOS

A dios por dotarme de inquietudes y preguntas que me hacen buscar respuestas y comprender mejor este mundo y por darme la fortaleza y la paciencia para lograr mis objetivos.

A mis padres por ser mis guías en la vida, por la seguridad que me brindan al apoyarme, respaldarme y respetarme en mis decisiones, por inculcarme valores, aconsejarme y ser un ejemplo de superación.

Agradezco a mis hermanos por el buen ejemplo, el apoyo, la amistad y la comprensión que han tenido conmigo.

Agradecer a la Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe por ser guía en este trabajo de tesis y por ser la profesora con más vocación que conozco, agradezco la constancia, la paciencia y el interés por esta investigación.

A mi novia Amirais Flores Ponce por ser parte de este proyecto, por la motivación y la inspiración que aporta a mi vida.

También agradezco al Cuerpo Académico “Gestión Integral del Agua” y al departamento de hidráulica por el apoyo y la participación que tuvieron con esta investigación.

Agradecer al Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología del Estado de Michoacán por el apoyo otorgado.

Por último agradecer a la Comisión Nacional del Agua, sede Apatzingán y Morelia por la atención personalizada y la información proporcionada.

DEDICATORIAS

Dedico el esfuerzo, el entusiasmo, la dedicación y todo lo que me tomó este trabajo de tesis a mis padres, Enrique Pardo Acuña y Esperanza González García, por el sacrificio que ha representado mi formación, por su apoyo incondicional y desinteresado que han tenido conmigo, por el respaldo que me hace fuerte para conseguir mis metas y por todas las atenciones y el amor que me demuestran.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	4
3. ANTECEDENTES.....	5
3.1. Evaluación del impacto ecológico del cultivo de aguacate a nivel regional y de parcela en el Estado de Michoacán.....	6
3.2. Impactos ambientales y socioeconómicos del cambio de uso del suelo forestal a huertos de aguacate en el Estado de Michoacán	7
4. ACUÍFEROS.....	9
4.1. Acuíferos en México	9
4.2. Acuífero (1620) Apatzingán	9
4.2.1. Localización.....	9
4.2.2. Situación administrativa del acuífero	10
4.2.3. Fisiografía.....	11
4.2.4. Clima	12
4.2.5. Hidrografía	13
4.2.6. Geomorfología.....	13
4.2.7. Geología.....	14
4.2.8. Estratigrafía	15
4.2.9. Hidrogeología	16
4.2.10. Censo de aprovechamientos subterráneos.	18
4.3. Acuífero (1622) Cotija	20
4.3.1. Localización.....	20
4.3.2. Situación administrativa del acuífero	21
4.3.3. Fisiografía.....	22
4.3.4. Clima	22

4.3.5.	Hidrografía.....	23
4.3.6.	Geomorfología.....	24
4.3.7.	Geología.....	24
4.3.8.	Hidrogeología	27
4.3.9.	Parámetros Hidráulicos.	28
4.3.10.	Censo de aprovechamientos subterráneos	29
5.	FRANJA AGUACATERA	32
5.1.	Antecedentes	32
5.2.	Producción del aguacate en el Estado de Michoacán	34
5.3.	Ubicación y características geográficas	35
5.4.	Franja aguacatera en el acuífero Cotija	38
5.5.	Franja aguacatera en el acuífero Apatzingán	39
5.6.	Distribución espacial y riego de la franja aguacatera	39
6.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	46
6.1.	Materiales	46
6.1.1.	Información Meteorológica.....	46
6.1.2.	Información Vectorial	49
6.2.	Metodología.....	51
6.2.1.	Elaboración de las Coberturas Vegetales en los Acuíferos	52
6.2.2.	Futura Franja Aguacatera	67
6.2.3.	Análisis Estadístico de Datos Climatológicos.....	72
6.2.4.	Determinación del parámetro K.....	79
6.2.5.	Determinación de la Precipitación media anual y mensual	82
6.2.6.	Coeficiente de escurrimiento Anual	88
6.2.7.	Determinación del Ecurrimiento Superficial.....	92
6.2.8.	Determinación de la infiltración	95
6.2.9.	Determinación de la Evapotranspiración o Uso Consuntivo.....	96
6.2.10.	Determinación de la Recarga.....	109
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	113
7.1.	Comparación entre las condiciones actual y futura	113

7.1.1.	Escurrecimiento	113
7.1.2.	Infiltración.....	115
7.1.3.	Evapotranspiración o Uso Consuntivo	117
7.1.4.	Recarga	120
7.2.	Balance del acuífero Cotija	123
7.2.1.	Entradas.....	124
7.2.2.	Salidas	126
7.2.3.	Cambio de almacenamiento.....	130
7.2.4.	Balance	130
7.3.	Balance del acuífero Apatzingán.....	131
7.3.1.	Entradas.....	132
7.3.2.	Salidas	134
7.3.3.	Cambio de almacenamiento.....	139
7.3.4.	Balance	139
7.4.	Aprovechamiento de aguas en el acuífero Cotija para la agricultura	140
7.5.	Escenarios de aprovechamiento del agua superficial y subterránea en el crecimiento de la franja aguacatera en el acuífero Cotija	143
7.6.	Aprovechamiento de aguas en el acuífero Apatzingán para la agricultura.....	145
7.7.	Escenarios de aprovechamiento del agua superficial y subterránea en el crecimiento de la franja aguacatera en el acuífero Apatzingán.....	148

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Participación Municipal en el Acuífero Apatzingán	10
Tabla 4.2 Pruebas de bombeo en el acuífero Apatzingán.....	17
Tabla 4.3 Distribución del agua concesionada he inscrita en el REPDA para el acuífero	18
Tabla 4.4 Porcentaje de Participación Territorial de los Municipios en el Acuífero Cotija ..	21
Tabla 4.5 Principales centros de población que se encuentran dentro del acuífero Cotija	21
Tabla 4.6 Distribución del agua concesionada e inscrita en el REPDA, acuífero Cotija	30
Tabla 5.1 Producción de aguacate por entidad federativa	34
Tabla 5.2 Disponibilidad media de agua subterránea en los acuíferos con aguacatera	37
Tabla 5.3 Área total de aguacatera por municipio en el Estado de Michoacán	41
Tabla 5.4 Área de riego en aguacateras por municipio en el Estado de Michoacán	44
Tabla 5.5 Porcentaje de área de riego municipal	45
Tabla 6.1 Estaciones Climatológicas	48
Tabla 6.2 Clave de cartas de Modelos Digitales de Elevación	49
Tabla 6.3 Distribución vegetal en el Acuífero Apatzingán.....	54
Tabla 6.4 Distribución vegetal en el Acuífero Cotija	54
Tabla 6.5 Temperaturas medias, mínimas y máximas mensuales para el acuífero Cotija ..	58
Tabla 6.6 Temperaturas medias mensuales por estación utilizada en el acuífero Apatzingán	59
Tabla 6.7 Temperaturas mínimas mensuales por estación utilizada en el acuífero Apatzingán	60
Tabla 6.8 Temperaturas máximas mensuales por estación utilizada en el acuífero Apatzingán	60
Tabla 6.9 Temperaturas medias anuales por estación.....	61
Tabla 6.10 Área ocupada por la franja aguacatera en los acuíferos y crecimiento de la franja aguacatera	67
Tabla 6.11 Relaciones entre aguacatera 2007 y Municipios con presencia total o parcial en los acuíferos Apatzingán y Cotija.....	68
Tabla 6.12 uso de suelo que forma la posible futura franja aguacatera.....	71
Tabla 6.13 Usos de suelo actuales por municipio donde en un futuro podría ser zona aguacatera	72
Tabla 6.14 Codificación de parámetros para selección de estaciones principales	73
Tabla 6.15 Codificación y selección de estaciones	75
Tabla 6.16 Características de acuerdo al tipo de suelo	79
Tabla 6.17 Valores del parámetro K dependiendo el uso y tipo de suelo	80
Tabla 6.18 Precipitación media mensual y anual por estación climatológica.....	85
Tabla 6.19 Distribución de la precipitación según temporada de lluvias o estiaje	86

Tabla 6.20 Valor del coeficiente de escurrimiento por área de influencia de cada estación	90
Tabla 6.21 Valores del escurrimiento medio por mes y anual obtenidos con sistemas de información geográfica.....	94
Tabla 6.22 Valores de infiltración media por mes y anual obtenidos con sistemas de información geográfica.....	96
Tabla 6.23 Coeficientes de desarrollo parcial para los cultivos comprendidos en el bloque agrícola en los Acuíferos en estudio.....	98
Tabla 6.24 Coeficientes de desarrollo parcial para los distintos bloques presentes en los acuíferos Apatzingán y Cotija	99
Tabla 6.25 Temperaturas medias mensuales por estación climatológica	101
Tabla 6.26 Factores de Temperatura mensuales para cada estación climatológica	102
Tabla 6.27 Porcentaje de horas de sol mensual	104
Tabla 6.28 Porcentaje de horas de sol mensual para el área en estudio	106
Tabla 6.29 Usos consuntivos medios mensuales en los Acuíferos Apatzingán y Cotija.....	109
Tabla 6.30 Láminas de recarga mensuales para los acuíferos Apatzingán y Cotija	110
Tabla 7.1 Escurrimiento mensual para condiciones actuales y futuras en el Acuífero Cotija	114
Tabla 7.2 Escurrimiento mensual para condiciones actuales y futuras en el Acuífero Apatzingán	114
Tabla 7.3 Infiltración actual y futura en el acuífero Cotija	116
Tabla 7.4 Infiltración actual y futura en el acuífero Apatzingán	116
Tabla 7.5 Usos Consuntivos Mensuales en Láminas y en Volumen para condiciones actuales y futuras en el Acuífero Cotija	117
Tabla 7.6 Usos Consuntivos Mensuales en Láminas y en Volumen para condiciones actuales y futuras en el Acuífero Apatzingán	119
Tabla 7.7 Recargas Mensuales en Láminas y en Volumen para condiciones actuales y futuras en el Acuífero Cotija	121
Tabla 7.8 Recargas Mensuales en Láminas y en Volumen para condiciones actuales y futuras en el Acuífero Apatzingán.....	122
Tabla 7.9 Gastos de algunos manantiales en el acuífero Cotija.....	126
Tabla 7.10 Profundidades al nivel estático de algunos aprovechamientos subterráneos del acuífero Cotija de los cuales se cuenta con registro	128
Tabla 7.11 Volumen de evapotranspiración por niveles estáticos someros menores a 10 metros de profundidad para el Acuífero Cotija.....	129
Tabla 7.12 Profundidades al nivel estático de algunos aprovechamientos subterráneos del acuífero Apatzingán de los cuales se cuenta con registro	137

Tabla 7.13 Volumen de evapotranspiración por niveles estáticos someros menores a 10 metros de profundidad para el Acuífero Apatzingán	138
Tabla 7.14 Balance Hídrico del Acuífero Cotija	140
Tabla 7.15 Infiltración contra uso consuntivo en la actual franja aguacatera en el Acuífero Cotija	141
Tabla 7.16 Datos para formular escenarios de crecimiento de la franja aguacatera, acuífero Cotija	143
Tabla 7.17 Escenarios de crecimiento de la franja aguacatera en función del agua superficial y subterránea disponible en la zona de estudio.....	144
Tabla 7.18 Balance Hídrico del Acuífero Apatzingán	146
Tabla 7.19 Infiltración contra uso consuntivo en la actual franja aguacatera en el Acuífero Apatzingán	147
Tabla 7.20 Datos para formular escenarios de crecimiento de la franja aguacatera, acuífero Apatzingán	148
Tabla 7.21 Escenarios de crecimiento de la franja aguacatera en función del agua superficial y subterránea disponible en la zona de estudio.....	148

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Carta de la Vegetación Potencial Primaria	2
Figura 4.1. Altitud de la superficie del terreno en el acuífero Apatzingán	12
Figura 4.2. Precipitación media anual en el acuífero Apatzingán	13
Figura 4.3 Condiciones geológicas del acuífero Apatzingán	14
Figura 4.4 Tipo de Roca en el acuífero Apatzingán	15
Figura 4.5 Número de concesiones a través del tiempo para el acuífero Apatzingán.....	19
Figura 4.6 Volumen Concesionado a través del tiempo para el acuífero Apatzingán	19
Figura 4.7 Uso del agua subterránea concesionada en el acuífero Apatzingán	20
Figura 4.8 Localización del Acuífero Cotija	20
Figura 4.9 Precipitación media anual en el acuífero Cotija	23
Figura 4.10 Condiciones geológicas del acuífero Cotija	25
Figura 4.11 Tipo de Roca en el acuífero Cotija	26
Figura 4.12 Número de concesiones a través del tiempo para el acuífero Cotija	30
Figura 4.13 Volumen Concesionado a través del tiempo para el acuífero Cotija	31
Figura 4.14 Uso del agua subterránea concesionada en el acuífero Cotija	31
Figura 5.1 Aguacate Hass principal raza hortícola sembrada en el Estado de Michoacán ..	32
Figura 5.2 Ubicación de la franja aguacatera en el Estado de Michoacán.....	35
Figura 5.3 Acuíferos con Aguacatera en el Estado de Michoacán	36
Figura 5.4 Franja aguacatera sobre el Acuífero Cotija	38
Figura 5.5 Franja aguacatera sobre el Acuífero Apatzingán.....	39
Figura 5.6 Porcentaje de participación municipal en superficie cultivada de aguacatera en el Estado de Michoacán	42
Figura 6.1 Estaciones Climatológicas ubicadas dentro o cerca de los Acuíferos Apatzingán y Cotija.....	47
Figura 6.2 Mapa de Altitud en los Acuíferos Apatzingán y Cotija	50
Figura 6.3 Metodología para el cálculo de la recarga natural.....	52
Figura 6.4 Mapa de uso de suelo actual en los Acuíferos Apatzingán y Cotija	53
Figura 6.5 Mapa de altitud en los Acuíferos Apatzingán y Cotija.....	56
Figura 6.6 Relación entre altitud y temperatura.....	62
Figura 6.7 Temperatura media anual en los acuíferos Apatzingán y Cotija.....	63
Figura 6.8 Tipo de suelo en los acuíferos Apatzingán y Cotija	64
Figura 6.9 Suelo Andosol y Luvisol en los acuíferos Apatzingán y Cotija	65
Figura 6.10 Distribución espacial de la precipitación media anual en los Acuíferos Apatzingán y Cotija	66
Figura 6.11 Aguacatera actual contra aguacatera futura espacialmente ubicada en los acuíferos Apatzingán y Cotija	69

Figura 6.12 Uso de suelo con futura aguacatera en los Acuíferos Apatzingán y Cotija	69
Figura 6.13 Composición del uso de suelo actual de la probable futura franja aguacatera	70
Figura 6.14 usos de suelo actuales que se tienen en la posible zona de crecimiento de la aguacatera	71
Figura 6.15 Polígonos de Thiessen para determinar el área de influencia de cada estación climatológica.....	76
Figura 6.16 Influencia de las estaciones climatológicas por el método de las isoyetas	76
Figura 6.17 Tipo de suelo clasificado en A, B y C para obtener el parámetro K	80
Figura 6.18 Uso de suelo para obtener parámetro K	81
Figura 6.19 Mapa del parámetro K de los acuíferos Apatzingán y Cotija	82
Figura 6.20 Precipitación media anual en los acuíferos Apatzingán y Cotija	83
Figura 6.21 Precipitación Media Anual por Municipio en los Acuíferos Apatzingán y Cotija	84
Figura 6.22 Porcentaje de precipitación para cada estación del área de estudio en las temporadas de estiaje y lluvias	87
Figura 6.23 Relación de la precipitación con la altitud para estaciones en estudio	88
Figura 6.24 Coeficiente de escurrimiento medio anual de los Acuíferos Apatzingán y Cotija	91
Figura 6.25 Coeficiente de escurrimiento medio para el mes de Junio	92
Figura 6.26 Escurrimiento en los acuíferos Apatzingán y Cotija para el mes de junio	94
Figura 6.27 Lamina de infiltración para ambos acuíferos expresada en milímetros	95
Figura 6.28 Coeficiente de cultivo para el mes de junio	99
Figura 6.29 Factor de temperatura para el mes de junio.....	102
Figura 6.30 Porcentaje de Horas de Sol en el mes de junio	107
Figura 6.31 Factor de temperatura y luminosidad para el mes de junio	108
Figura 6.32 Uso Consuntivo para el mes de junio en los acuíferos Apatzingán y Cotija....	108
Figura 6.33 Recarga en el mes de junio en los acuíferos Apatzingán y Cotija	110
Figura 6.34 Zona de recarga para el mes de Junio	111
Figura 6.35 Ciudades comprendidas en los acuíferos Apatzingán y Cotija	112
Figura 6.36 Volumen de recarga para el mes de junio.....	112
Figura 7.1 Localización de Franja aguacatera actual y Franja aguacatera futura en los acuíferos Apatzingán y Cotija	114
Figura 7.2 Escurrimiento en el acuífero Cotija para condiciones actuales y futuras	115
Figura 7.3 Escurrimiento en el acuífero Apatzingán para condiciones actuales y futuras	115
Figura 7.4 Infiltración mensual actual y futura en el Acuífero Cotija.....	116
Figura 7.5 Infiltración mensual actual y futura en el Acuífero Apatzingán	117
Figura 7.6 Usos consuntivos Mensuales en Laminas para condiciones Actuales y Futuras	118

Figura 7.7 Usos consuntivos Mensuales en Volumen para condiciones Actuales y Futuras	118
Figura 7.8 Usos consuntivos Mensuales en Laminas para condiciones Actuales y Futuras	119
Figura 7.9 Usos consuntivos Mensuales en Volumen para condiciones Actuales y Futuras	120
Figura 7.10 Láminas de Recarga Mensuales para condiciones Actuales y Futuras en el Acuífero Cotija	121
Figura 7.11 Volúmenes de Recarga Mensuales para condiciones Actuales y Futuras en el acuífero Cotija.....	121
Figura 7.12 Láminas de Recarga Mensuales para condiciones Actuales y Futuras en el Acuífero Apatzingán	122
Figura 7.13 Volúmenes de Recarga Mensuales para condiciones Actuales y Futuras en el acuífero Apatzingán.....	123
Figura 7.14 Mapa de Recarga vertical anual en el Acuífero Cotija.....	125
Figura 7.15 Variación lineal de la evapotranspiración Vs Profundidad del nivel freático .	127
Figura 7.16 Zonas en el Acuífero Cotija donde el nivel estático se encuentra a menos de 10 metros de profundidad	129
Figura 7.17 Mapa de Recarga Vertical Anual en el Acuífero Apatzingán	132
Figura 7.18 Distribución espacial de los pozos artesianos en el Acuífero Apatzingán.....	135
Figura 7.19 Zonas en el Acuífero Apatzingán donde el nivel estático se encuentra a menos de 10 metros de profundidad.....	137
Figura 7.20 Balance del Acuífero Cotija.....	142
Figura 7.21 Balance del Acuífero Apatzingán	146
Figura 7.22 Imagen satelital de ollas de agua en la parte norte del acuífero Apatzingán, en el municipio de Tancítaro	151

RESUMEN

El Cultivo del aguacate es de gran importancia en México, con el 34% de producción mundial (FAOSTAT, 2015) se convierte en el líder global, seguido por Republica Dominicana con el 8% y Colombia con 6%, en México, casi todas las entidades federativas lo producen excepto Chihuahua, Coahuila, Quintana Roo, Tamaulipas y Tlaxcala.

Michoacán produce el 80% del aguacate nacional, representando este el 26% de producción a nivel mundial, lo cual contribuye de manera importante al crecimiento económico del sector agrícola en el estado, con una derrama económica promedio anual de 17,452.76 millones de pesos. Tancítaro produce el 17%, Tacámbaro, Salvador Escalante, y Uruapan empatan con el 11%, Ario de Rosales y Peribán empatan con el 10% y Nuevo Parangaricutiro el 5% estatal; por lo tanto estos municipios tienen el 75% de la producción en el estado y el 25% restante está distribuido entre 41 municipios más, por lo que podemos decir que Michoacán es un estado altamente aguacatero.

La zona aguacatera es una franja que se mueve de este a oeste atravesando el estado por la mitad, la cual posee características edafológicas, topográficas, climáticas y agroecológicas adecuadas para este cultivo, esta zona consta de 127,084 has (SIAP, 2015) la cual representa el 2.12% del territorio estatal. Por otra parte la franja aguacatera se encuentra sobre 10 acuíferos siendo esta la fuente principal de suministro del recurso hídrico; los acuíferos de Cotija (26.47%), Apatzingán (25.11%) y Nueva Italia (19.62%) son los que tienen mayor superficie dentro de la zona.

El cultivo del aguacate necesita de una gran cantidad de agua debido a su uso consuntivo, la cual es tomada tanto del agua superficial como subterránea, en el presente trabajo se analizan los dos acuíferos más importantes del Estado de Michoacán en cuanto a la producción de aguacate y el abasto de agua en esta zona, con una cobertura del 52 % del total de la franja aguacatera del estado y un área acumulada de casi 8,000 km², se convierte en la zona donde se concentra la mayor actividad agrícola aguacatera del estado, además sobre estos acuíferos está el municipio de Tancítaro que es conocido por ser la auténtica capital mundial del aguacate. La forma de evaluar si es sustentable dicho cultivo en esta zona del estado es por medio de balances hidrológicos en ambos acuíferos (Apatzingán y Cotija), este se realiza por superposición de mapas (mapas de INEGI) con ayuda de sistemas de información geográfica, (ArcView3.2, ArcGis 10.1) obteniendo así mapas a intervalos de tiempo mensual y anual de precipitación media, escurrimiento, evapotranspiración y finalmente de recarga a los acuíferos, el balance se realiza para dos escenarios; uno con condiciones actuales de uso de suelo que nos permite conocer el estado actual del balance de los acuíferos y otro con condiciones de máximo crecimiento de la zona aguacatera, este para conocer el impacto que se podría generar a los acuíferos si incrementa el área de plantación aguacatera, el presente trabajo se hace con estricto apego a la NOM-011-CNA-2000. Con este análisis se espera principalmente conocer el estado actual de los acuíferos, formular escenarios de crecimiento, afectación y comportamiento futuro.

Palabras Clave: Impacto Ambiental, Zona Aguacatera, Acuíferos

ABSTRACT

Avocado cultivation is of great importance in Mexico, with 33% of world production (FAOSTAT, 2015) it becomes the global leader, followed by the Dominican Republic with 8% and Colombia with 6%. In México most of the states are avocado producers except for the states of Chihuahua, Coahuila, Quintana Roo, Tamaulipas and Tlaxcala.

Michoacán produces 80% of the national avocado, which represents 26% of the global production, which contributes significantly to the economic growth of the agricultural sector in the state, with an annual average economic benefit of \$ 17,452.76 million pesos. Tancítaro produces 17%, Tacámbaro, Salvador Escalante, and Uruapan are tied with 11%, Ario de Rosales and Peribán are tied with 10% and 5% New Parangaricutiro; therefore these municipalities have 75% of production in the state and the remaining 25% is distributed among 41 municipalities more, so we can say that Michoacán is the greatest avocado producer in México.

The avocado is a fringe area that runs from the east to west across the state in half, which has the most suitable soil to grow this crop, as well as topographical, climatic and agro-ecological characteristics. This area consists of 127.084 ha (SIAP, 2015) which represents 2.12% of the state. Moreover the avocado strip is over 10 aquifers, being the main source of water supply resources; Cotija aquifers (26.47%), Apatzingán (25.11%) and Nueva Italia (19.62%) are those places with the greatest surface in the area.

The avocado cultivation requires a lot of water due its consumptive use, which is taken from both surface water and groundwater, in this paper the two most important aquifers of Michoacán are analyzed for the avocado production and the water supply in this area, with a coverage of 52% of the avocado strip of the state and a cumulative area of almost 8,000 km², it becomes the area where most of the state avocado agriculture concentrates also the municipality of Tancítaro is located on these aquifers, due this the city is well known as the world capital of avocado. The way to assess if the crop is sustainable in this area of the state is through water balances in both aquifers (Apatzingán and Cotija), this is done by overlaying maps (INEGI) using geographic information systems (ArcView3.2, ArcGIS 10.1) obtaining monthly and annual maps at time intervals monthly of rainfall, runoff, evapotranspiration and finally aquifer recharge. The balance is done for two scenarios; a current one and using conditions which allows us to know the current state of the aquifers balance and other under maximum growth conditions of the avocado area, this is done in order to understand the impact that could be generated if the aquifer increased the planting avocado area. This work is done in strict compliance with NOM-011-CNA-2000. This analysis is mainly expected to know the current state of the aquifers, formulating growth, involvement and future behavior scenarios.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad los estudios sobre los procesos dinámicos en los cambios de la cobertura y uso del suelo son importantes y necesarios; por que proporcionan la base para conocer las tendencias de los procesos de degradación, desertificación y pérdida de biodiversidad de una región determinada. Durante las últimas décadas el hombre se ha convertido en el principal desencadenador de la transformación de los ecosistemas. Su impacto global ha sido evaluado desde diversas perspectivas entre las que destacan la pérdida de biodiversidad y cambio climático; entre muchas otras consecuencias ambientales de mayor relevancia regional tales como la alteración de los ciclos hidrológicos entre otros.

Cambio de uso del suelo en el mundo

Desde el siglo XVIII, pero más intensamente en los últimos 50 años, los seres humanos han transformado los ecosistemas del mundo más rápida y extensamente que en ningún otro periodo en la historia. En la actualidad los sistemas de cultivo y ganaderos ocupan alrededor de la cuarta parte de la superficie terrestre, transformación que ha sido impulsada en gran parte para resolver el enorme aumento de la demanda de alimentos, agua y combustibles (Reid et al., 2004).

De acuerdo con la evaluación más reciente de los recursos forestales del mundo (FAO, 2005), los bosques cubren unas 4 mil millones de hectáreas, alrededor del 30% de la superficie terrestre. Según esa evaluación, la deforestación sobre todo para convertir los bosques en zonas agrícolas ha proseguido a un ritmo de millones de hectáreas por año.

La pérdida de superficies boscosas es uno de los factores más importantes en el cambio climático global, toda vez que alteran los ciclos biogeoquímicos como el del agua y el carbono. Es también una de las causas de pérdida de biodiversidad; el impacto es tal que se estima que tasa de extinción de especies silvestres es mil veces superior a las típicas de la historia del planeta (Reid et al., 2004).

Cambio de uso del suelo en México

En México se han elaborado inventarios de la superficie bajo los diferentes usos del suelo desde hace aproximadamente 40 años. Esto permitiría en principio hacer comparaciones entre fechas y conocer las tasas y patrones en la modificación del uso del suelo. Sin embargo estos estudios se han hecho utilizando diferentes fuentes de información y herramientas tecnológicas disponibles en el momento y la clasificación de los usos no ha sido consistente en todos ellos. Estas diferencias hacen que los resultados de los inventarios no sean entera

y directamente comparables y temas como la deforestación siguen siendo materia de discusión y controversia. No obstante, que las estimaciones cuantitativas no son del todo precisas, la información disponible sí permite identificar varias tendencias.

El Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI) recientemente presentó la **carta de vegetación primaria potencial** (figura 1.1), que describe la vegetación que probablemente cubría el territorio nacional antes de que fuera transformado por las diferentes actividades humanas.

Hasta el año 2007, en México se había transformado alrededor del 29% de su cubierta de vegetación natural original hacia otros usos de suelo. Para ese año los ecosistemas que había perdido un mayor porcentaje de su superficie original fueron las selvas (42%), seguidas por los bosques mesófilos de montaña (40%), los bosques templados (27%) y los matorrales (10%).

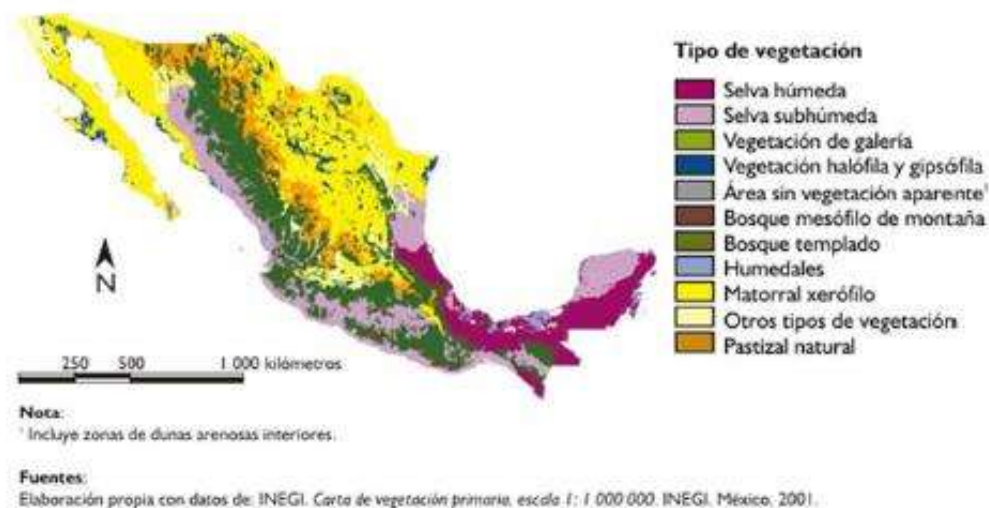


Figura 1.1. Carta de la Vegetación Potencial Primaria

El cultivo de aguacate es de gran importancia en México y particularmente en el estado de Michoacán. Entre 2000 y 2008 la superficie cultivada de aguacate en el país aumentó de aproximadamente en un 20% y la producción pasó de 907,439 a 1'162,429 toneladas. Con el 34% de la producción mundial el sistema del producto del aguacate contribuye de manera importante al crecimiento económico del sector agrícola en el país.

Michoacán presenta las condiciones agroclimáticas ideales para la producción de aguacate, lo cual ha ocasionado un cambio de uso de suelo forestal a zonas agrícolas, al grado de provocar un gran deterioro de los ecosistemas forestales en el estado, que se manifiesta en un proceso de deforestación de 500 ha por año. Esto tiene implicaciones importantes pues

los bosques juegan un papel fundamental en el balance hídrico a nivel cuenca, en el suministro de agua para diversos usos, en la conservación del suelo y la provisión de servicios ambientales a la sociedad. Por ello, urge promover el manejo sustentable de los recursos, en beneficio de las generaciones futuras, incluyendo la conservación y restauración de áreas boscosas.

En el presente trabajo se analizará el impacto ambiental producido de manera local por la franja aguacatera en los procesos hidrológicos de los acuíferos Apatzingán y Cotija, debido al gran crecimiento que ha tenido esta en los últimos años.

2. OBJETIVOS

- ***Evaluar el impacto ambiental que produce la zona aguacatera en los acuíferos Apatzingán y Cotija.***
- Obtener el volumen de recarga natural hacia los acuíferos y determinar las zonas donde ésta se presenta en función de la cobertura vegetal.
- Calcular la disponibilidad hídrica de la zona aguacatera y a partir de ella establecer un crecimiento óptimo de las áreas de cultivo dentro de los acuíferos.
- Analizar las variaciones generadas por el impacto ambiental en el ciclo hidrológico “Evapotranspiración, Ecurrimiento y Recarga” dentro de los acuíferos Apatzingán y Cotija.
- Determinar las zonas donde es factible el cultivo del aguacate en base a sus características edafológicas, agroclimáticas, topográficas e hídricas.
- Evaluar el impacto ambiental que produciría la zona aguacatera en los acuíferos Apatzingán y Cotija en condiciones de máximo crecimiento.
- Determinar los parámetros que limitan el crecimiento de la franja aguacatera.
- Determinar las condiciones actuales y futuras de la franja aguacatera por municipio.

3. ANTECEDENTES

Se define como **impacto ambiental**, a la modificación del medio ambiente ocasionada por la naturaleza o el hombre (Cortes, 2014). Además señala que el desequilibrio ecológico es la alteración de las relaciones de interdependencia entre los elementos naturales que conforman el ambiente, que afecta negativamente la existencia, transformación y desarrollo del hombre y demás seres vivos.

La evaluación del impacto ambiental está dirigida a efectuar análisis detallados de diversos proyectos de desarrollo y del sitio donde se pretende realizar, con el propósito de identificar y cuantificar los impactos ambientales que puede ocasionar su ejecución. De esta manera es posible establecer la factibilidad ambiental del proyecto y en su caso, determinar las condiciones para su ejecución y las medidas de prevención y mitigación de los impactos ambientales que será necesario tomar para evitar o reducir los efectos negativos sobre el ambiente.

Tipos de Impacto Ambiental.

Existen diversos tipos de impactos ambientales, pero fundamentalmente se pueden clasificar de acuerdo a su origen, en los provocados por:

- El aprovechamiento de recursos naturales ya sean renovables, tales como el aprovechamiento forestal o la pesca; o no renovables, tales como la extracción de petróleo o del carbón.
- Contaminación. Todos los proyectos que producen algún residuo (peligroso o no), emiten gases a la atmosfera o vierten líquidos al ambiente.
- Ocupación del territorio. Los proyectos que al ocupar un territorio modifican las condiciones naturales por acciones tales como el desmonte, compactación y cambio del uso de suelo entre otras.

El impacto ambiental se puede describir como una cadena de “acciones-efectos-impactos”. Para el caso de la franja aguacatera la acción queda definida como la producción del fruto, los efectos son determinados como las actividades realizadas en el proceso y por último los impactos se reflejan como los cambios en el sistema como resultado de las actividades. En base a esto, el impacto generado por el cambio de cobertura y uso de suelo, principalmente en la transformación de ecosistemas forestales a zonas de cultivo de aguacate, modifica los procesos hidrológicos generando como consecuencia un menor volumen en la recarga natural hacia un área hidrogeológica. La alteración se refleja en un incremento del volumen

de escurrimiento superficial a consecuencia de la degradación del suelo, esto implica que el suelo pierda su capacidad de retener agua, dado que los bosques ayudan a la conservación del suelo y sirven como captadores naturales del recurso hacia los acuíferos. A su vez se aumentan las pérdidas por el proceso de evapotranspiración debido a los tratamientos y requerimientos de agua necesarios por el cultivo dando como resultado final un cambio en el volumen de recarga natural al acuífero.

De acuerdo al daño ecológico causado por las diferentes fuentes descritas, se han hecho estudios para cuantificar el daño provocado por el cambio de uso de suelo en la franja aguacatera en el estado de Michoacán, desarrollado por instituciones públicas como el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP, SAGARPA, 2015) y el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA, 2011).

3.1. EVALUACIÓN DEL IMPACTO ECOLÓGICO DEL CULTIVO DE AGUACATE A NIVEL REGIONAL Y DE PARCELA EN EL ESTADO DE MICHOACÁN

Este trabajo fue desarrollado por el CIGA, con el objetivo de evaluar el impacto ecológico del cultivo de aguacate en Michoacán a escala regional y de parcela. Como parte de este proyecto, se planteó definir una tipología de productores de aguacate en Michoacán con base en su impacto ecológico potencial.

Como resultados, se generaron cinco índices específicos, y un Índice General que permiten valorar el Impacto ecológico potencial de los modos de manejo de los productores de aguacate michoacanos. El cálculo de los índices fue aplicado a la muestra de 340 productores encuestados, lo que permitió construir la Tipología de Productores basada en la segmentación que resultó de su aplicación. Los índices generados fueron los siguientes:

I. El índice de Consumo Potencial de Agua (CPA), que estima el impacto sobre las fuentes de agua debido al uso de agua en el riego del huerto. El índice incluye la estimación de los requerimientos de agua del cultivo dados por las condiciones climáticas, así como la eficiencia con la que se aplica el riego.

II. El índice de Pérdida Potencial de Suelo (PPS), el cual se basó en la ecuación universal de pérdida de suelo y agrupa aspectos físicos (suelo, lluvias y pendiente) así como de prácticas de manejo del huerto.

III. El índice de Consumo Potencial de Energía (CPE) se basó en el análisis de inversión energética en sistemas agrícolas, y tomó en cuenta el consumo directo de energía

(combustibles fósiles y electricidad) y el consumo indirecto de energía (aquella implicada en la fabricación de pesticidas, fertilizantes, transporte de abono).

IV. El Índice de Contaminación Potencial por Uso de Agroquímicos consideró la contaminación que se puede generar por el uso de pesticidas, fertilizantes y herbicidas.

V. El índice de Pérdida Potencial de la Biodiversidad estuvo constituido por dos variables, la presencia de especies forestales nativas en el huerto y el uso de pesticidas sintéticos.

Finalmente, se generó el Índice General de Impacto Ecológico Potencial, el cual integra los cinco Índices específicos, y permite un manejo sintético de la información.

La Tipología de Productores quedó integrada por 10 Tipos (Grupos), segmentados por el Impacto Potencial de su Modo de Manejo, donde los Tipos I a III constituyen modos de producción de impacto bajo y medio-bajo, los tipos IV a VII con un impacto medio-alto a alto, y los tipos VIII a X, de impacto alto a muy alto.

3.2. IMPACTOS AMBIENTALES Y SOCIOECONÓMICOS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO FORESTAL A HUERTOS DE AGUACATE EN EL ESTADO DE MICHOACÁN

El INIFAP en el 2009 desarrollo un estudio para evaluar el efecto del cambio de uso de suelo con vegetación forestal a cultivo de aguacate en el estado de Michoacán, a través de indicadores de impacto socioeconómico y ambiental.

Este estudio apunta a la urgencia de establecer un orden territorial del cultivo de aguacate y de promover el uso sustentable de los recursos naturales. Con el objetivo, de desarrollar políticas públicas, esquemas de toma de decisiones informadas y la participación de todos los actores del sistema producto aguacate y de la sociedad en general, serán fundamentales para lograr un crecimiento económico de la cadena, manteniendo la integridad ambiental.

En el desarrollo del trabajo se establecieron 11 indicadores para apoyar la discusión sobre cómo medir el impacto de la conversión de los ecosistemas forestales a huertos de aguacate. Este ejercicio también mostró la calidad y vigencia de la información con que se cuenta para la comprensión de este proceso de cambio de uso del suelo. A continuación se enumeran los indicadores establecidos:

1. Servicios Ambientales
2. Biodiversidad
3. Consumo de agua
4. Producción de agua
5. Altitud, temperatura y tipo de vegetación
6. Cambio del uso de suelo y erosión
7. Contaminación por agroquímicos
8. Captura de carbono
9. Cambio climático
10. Tiempo de cosecha
11. Empleo, costos y valor de producción

Se resume que la producción de aguacate representa una aportación importante a la economía regional, constituye una de las principales fuentes de divisas para Michoacán. Su importancia para la sociedad está bien determinada, pero su modelo de producción no es amigable con la naturaleza. El cambio de uso del suelo forestal para establecer huertos de aguacate, disminuye el agua infiltrada y aumenta la evapotranspiración, con ello se reducen los caudales en manantiales; adicionalmente se dejan de absorber más de 0.5 ton/ha/año de carbono, además de otros beneficios ambientales como la regulación del clima y el enorme valor de la biodiversidad que albergan los bosques.

Se reconoce entonces la necesidad de crear un marco de valoración multifuncional del bosque a partir de una concienciación creciente de la sociedad y la aplicación de políticas públicas por parte de las instituciones orientadas a su conservación frente a otros usos, más allá de la visión forestal convencional que resalta los valores de uso directo. El reto es desarrollar una estrategia que incluya la producción de aguacate de manera ordenada y con un mayor uso de tecnologías amigables con el ambiente, que conserve y recupere el bosque, para lograr el equilibrio ecológico y transitar hacia un desarrollo sostenible.

4. ACUÍFEROS

En la hidrología subterránea, se denomina acuífero a aquel estrato o formación geológica que permite la circulación del agua por sus poros o grietas, el hombre aprovecha esta agua en cantidades necesarias para satisfacer sus necesidades.

4.1. ACUÍFEROS EN MÉXICO

Los recursos provenientes de acuíferos son una fuente importante de agua en México, sobre todo en aquellas regiones en donde los escurrimientos superficiales son mínimos. La importancia del agua subterránea se manifiesta en la magnitud del volumen utilizado. Alrededor del 37% (30,100 millones de metros cúbicos por año al 2010) del volumen total concesionado para usos consuntivos, pertenece a este origen. Para fines de administración del agua subterránea, el país se divide en 653 acuíferos, cuyos nombres oficiales fueron publicados en el Diario Oficial de la Federación el 5 de diciembre del 2001.

A partir de la década de los 70's, ha aumentado sustancialmente el número de acuíferos sobreexplotados. En el año 1975 eran 32 acuíferos, 80 en 1985 y 100 acuíferos sobreexplotados para el 31 de diciembre del 2009. De los acuíferos sobreexplotados se extrae el 53.6% del agua subterránea para todos los usos. De acuerdo con los resultados en estudios recientes se define si los acuíferos se convierten en sobreexplotados o dejan de serlo en función de la relación extracción / recarga.

4.2. ACUÍFERO (1620) APATZINGÁN

4.2.1. Localización

La zona de estudio se localiza entre la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico Transmexicano y la Sierra Madre del Sur, en la parte suroeste del estado de Michoacán.

El área de este acuífero está conformada por territorio perteneciente a 14 municipios, en la tabla 4.1 se muestran estos, así como el porcentaje de participación de cada municipio en el acuífero Apatzingán, Tepalcatepec está totalmente sobre el acuífero, mientras La Huacana, Peribán, Uruapan, Gabriel Zamora y Tumbiscatío solo ocupan un mínimo porcentaje que no supera el 3%.

Municipio	Área en Acuífero (m2)	Área municipio (m2)	Participación (%)
Tepalcatepec	773,124,520	773,124,520	100
Buenavista	897,455,225	902,842,834	99.4
Apatzingán	1,488,643,489	1,630,688,489	91.29
Parácuaro	441,986,335	504,415,891	87.62
Tancítaro	649,795,290	769,753,323	84.42
Aguililla	896,221,307	1,433,695,878	62.51
Nuevo Parangaricutiro	111,104,434	214,542,164	51.79
Múgica	129,656,074	378,206,694	34.28
Coalcomán de Vázquez Pallares	236,910,965	2,796,967,892	8.47
La Huacana	42,546,647	1,940,096,152	2.19
Peribán	3,290,409	325,065,889	1.01
Uruapan	7,541,742	950,201,583	0.79
Gabriel Zamora	1,829,410	437,641,346	0.42
Tumbiscatío	8,620,309	2,071,837,721	0.42

Tabla 4.1. Participación Municipal en el Acuífero Apatzingán

Los principales centros de población localizados en la zona son: Apatzingán, Tepalcatepec, Parácuaro, Tancítaro y Buenavista

Apatzingán de la Constitución cuenta con 123,649 habitantes. Tepalcatepec cuenta con una Población de 22,987 habitantes. Parácuaro cuenta con una población de 3,932 habitantes. Tancítaro cuenta con una población de 29,414 habitantes (INEGI, 2015).

4.2.2. Situación administrativa del acuífero

El 27 de junio de 1975 se publicó en el Diario Oficial, el decreto que establece veda por tiempo indefinido para la extracción, alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en la zona denominada Bajo Balsas, además, el 20 de octubre de 1987 por decreto se declara de interés público, la conservación de los mantos acuíferos y el aprovechamiento de las aguas del subsuelo para todos los municipios del estado de Michoacán que no fueron considerados en los decretos anteriormente publicados. Ambos decretos establecen vedas que de acuerdo a sus características, permiten extracciones limitadas para usos doméstico, industrial, de riego y otros, por lo cual **se clasifican como vedas de control**.

Los principales usuarios del agua subterránea en este acuífero son los productores agrícolas del valle de Apatzingán, en segundo término se encuentran los Organismos Operadores y Comités de Agua Potable, el tercer lugar lo ocupa el uso de servicios y otros.

Dentro de la zona de estudio se encuentran los once módulos que conforman el distrito de riego 097 “General Lázaro Cárdenas”.

4.2.3. Fisiografía

El área de estudio queda comprendida dentro de la provincia fisiográfica del eje Neovolcánico (según Raisz, 1959; y. López Ramos, 1978).

Esta zona se caracteriza por ser netamente volcánica, ya que se elevan los cerros y lomeríos sobre los valles rellenos de cenizas y conglomerados, cuya altitud varía de 160 a 3838 msnm.

El tipo de drenaje es dendrítico y paralelo, con corrientes de tipo intermitente que fluyen de las partes altas hacia el valle para depositar sus aguas en los ríos importantes de corriente permanente como son: el Tepalcatepec o Grande, el Marqués, Cancita y el Tesorero.

En la imagen 4.1 se muestra la altitud en msnm de la superficie del acuífero, es una zona con topografía muy variable, con una fuerte pendiente desde el valle de Apatzingán hasta el Parque Nacional Pico de Tancítaro, el valle está a 160 msnm mientras que el Pico de Tancítaro está a 3838 msnm y la distancia entre estos dos lugares es de tan solo 32 kilómetros, por lo que al hacer una proyección lineal tenemos una pendiente de 11.5 %, esto a su vez provoca fuertes cambios en la temperatura, en la flora y fauna.

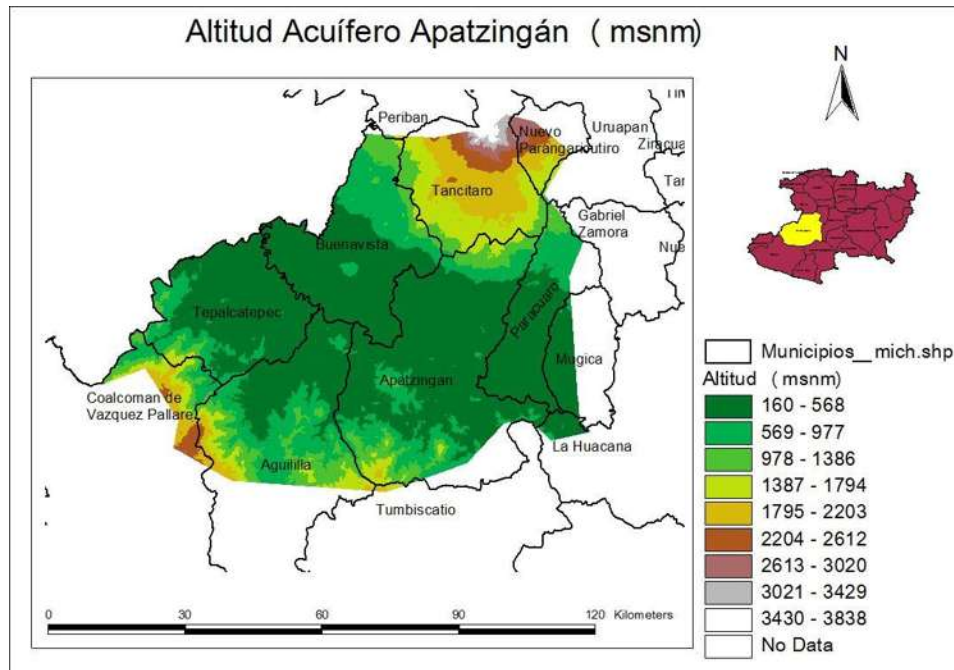


Figura 4.1. Altitud de la superficie del terreno en el acuífero Apatzingán

4.2.4. Clima

El clima que impera en la región es del tipo seco, según la clasificación de Koppen corresponde a un Bs, (h) (w) (w) semiseco semicalido y por lo que corresponde a la rivera del río Tepalcatepec, presenta un clima seco muy cálido (Bso (h) (w) (w)), hacia el norte y sur, o sea, en la parte montañosa corresponden climas cálidos (Acc (w) (w)) semi-húmedo y (Aw (w)) cálidos subhúmedos con lluvias en verano.

4.2.4.1. Temperatura media anual

La temperatura media anual es del orden de 21° C, sus máximas alrededor a 40° C (estación 16074, Panches CFE) presentándose durante los meses de mayo y junio, y con mínimas de 7 °C en los meses de enero y febrero (estación 16056, Jicalán CFE).

4.2.4.2. Precipitación media anual.

La precipitación media anual registrada en la región es del orden de 840 mm, ocurriendo su mayor incidencia en los meses de junio, julio y agosto.

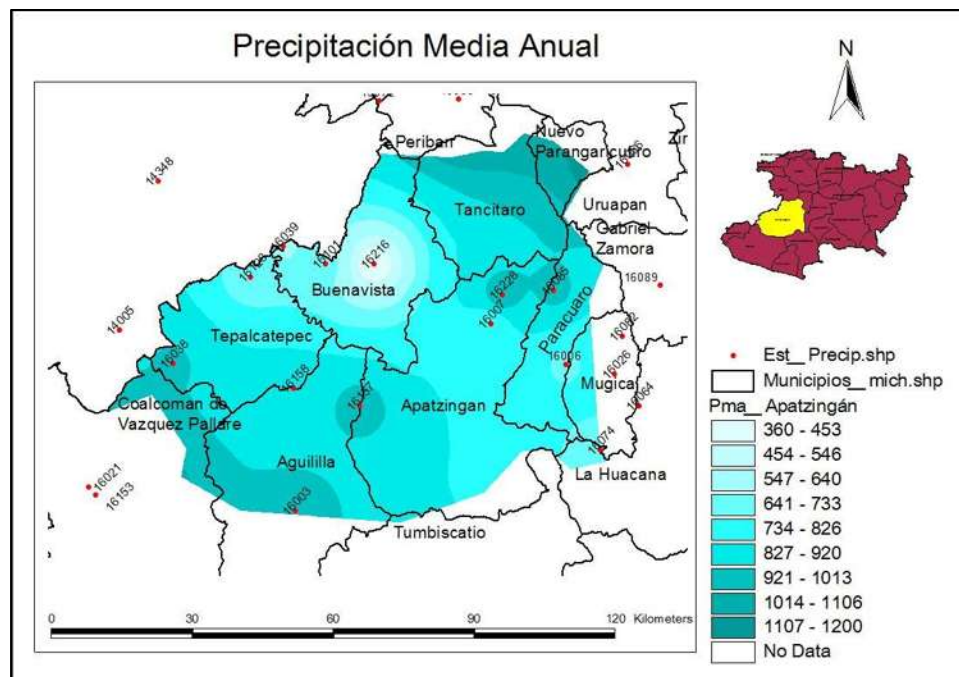


Figura 4.2. Precipitación media anual en el acuífero Apatzingán

4.2.5. Hidrografía

El acuífero Apatzingán se encuentra en la región Hidrológica del Balsas en la cuenca Río Tepalcatepec, subcuenca: Río Apatzingán, Río Tepalcatepec y Arroyo Tepalcatepec.

Cuenta con infraestructura hidráulica, en la zona de estudio se localizan las presas derivadoras Piedras Blancas, El Llano, Las Burras, y las presas de almacenamiento Chilatan y Los Olivos.

Existen dos ríos principales: el río Tepalcatepec o Grande y Márquez; el primero corre de oeste al este y el segundo de norte a sur; descargando ambos sus aguas en la presa Infiernillo.

4.2.6. Geomorfología

El área en estudio se localiza dentro de los límites de las provincias fisiográficas denominadas Eje Neovolcánico Transmexicano y la Sierra Madre del Sur, prácticamente localizada entre la transición de estas dos provincias denominando a esta región como la depresión del balsas formada por una distensión cortical terrestre que ocasionó un gran vacío dentro de las dos serranías, la edad aproximada de estos depósitos aluviales es del Reciente.

4.2.7. Geología

Las rocas predominantes en la zona de estudio son los depósitos fluviales procedentes de la porción suroccidental de la Meseta Tarasca, por lo tanto estos cantos rodados tienen poco arredondamiento dado que la distancia de transporte es pequeña, encontrando fragmentos angulosos y subangulosos; su edad es realmente corta, datan del reciente teniendo como característica principal una porosidad y permeabilidad elevada y una baja compactación interna; estos depósitos descansan sobre un manto rocoso de origen volcánico.

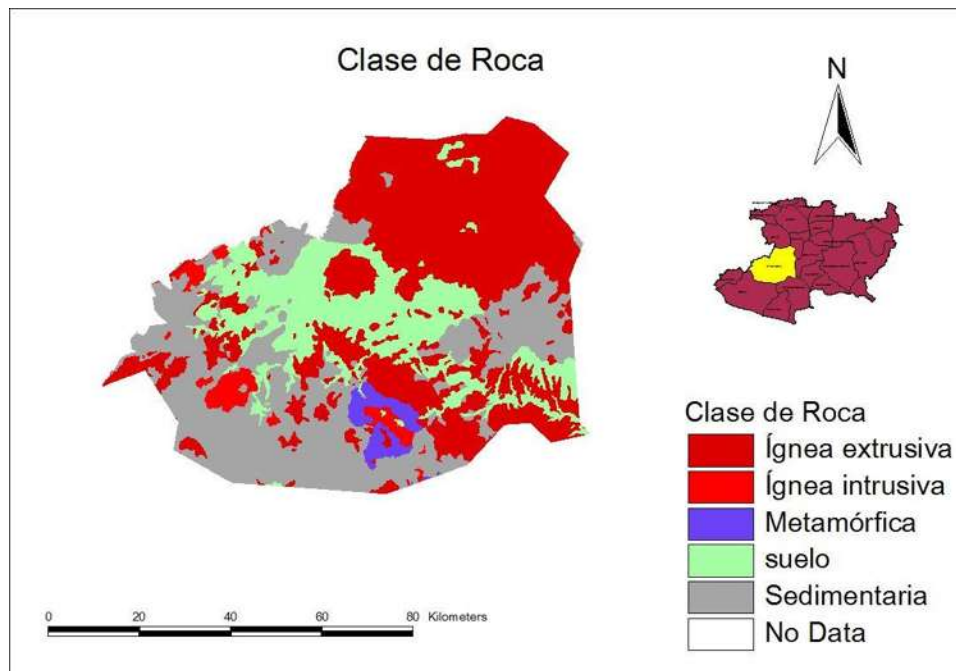


Figura 4.3 Condiciones geológicas del acuífero Apatzingán

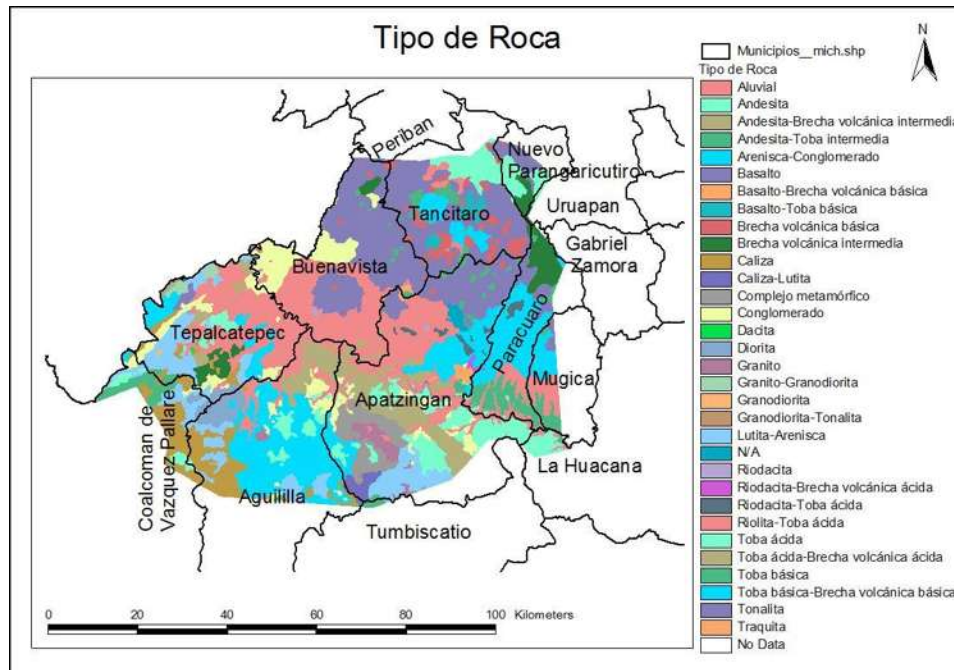


Figura 4.4 Tipo de Roca en el acuífero Apatzingán

4.2.8. Estratigrafía

4.2.8.1. Mesozoico

Rocas Ígneas Intrusivas. Estas rocas afloran al este de Nueva Italia y Gabriel Zamora y consiste en un batolito que aflora en diferentes partes de Michoacán constituidos por: granitos, granodioritas, cuarzodioritas y cuarzo monzonitas.

4.2.8.2. Terciario

Rocas Extrusivas y Efusivas. Estas rocas afloran en toda la región en estudio, aparecen en dos periodos, la primera de ellas de edad preterciaria y están constituidas en su gran mayoría por andesitas

4.2.8.3. Cuaternario

Conglomerados. Afloran en diferentes partes del área estudio, constituidas por fragmentos de rocas volcánicas, se encuentran aflorando en el valle, depósitos residuales y aluviones constituidos por: aglomerados, gravas, arenas y arcillas.

4.2.9. Hidrogeología

El intrusivo granítico de la región se considera de una porosidad y permeabilidad nula que funciona como una barrera impermeable al flujo subterráneo aflorando al este y sur del área, se desconoce a la profundidad que se encuentra en el valle, superficialmente presenta recarga al valle por medio de los fracturamientos que muestra.

Las rocas volcánicas aflorantes en toda la región algunas se consideran de baja permeabilidad como son: tobas riolíticas y andesíticas, andesíticas, andesitas y riolitas, que presentan fracturamientos por donde se infiltra el agua, pudiendo aportar cierta recarga al valle pero en muy mínima proporción, no impidiendo el paso del flujo subterráneo, y funcionan como barrera impermeable las rocas volcánicas como son: basaltos, tobas, cenizas volcánicas y conglomerados, los cuales presentan porosidad y permeabilidad secundaria.

Debido a las precipitaciones que se presentan en el valle y al norte de la zona, el agua se infiltra y llega a fluir y brotar en esta región de interés por medio de algunos manantiales.

En la región se presentan depósitos de piamonte, constituido por: aglomerados, gravas y arenas, por la permeabilidad de sus materiales y por su posición topográfica funcionan como zonas de recarga del acuífero del valle.

Los abanicos fluviales y depósitos del valle constituidos por: aglomerados, gravas, arenas y arcillas, presentan porosidad y permeabilidad alta, funcionando como almacenamientos de un **acuífero de tipo libre**.

4.2.9.1. Pruebas de bombeo

Para conocer la transmisividad del acuífero se efectuaron 13 pruebas de bombeo de corta duración en pozos particulares, con la finalidad de conocer la capacidad que tiene el acuífero para almacenar y transmitir el agua. Para determinar la transmisividad del acuífero se recurrió a la interpretación de pruebas de bombeo, valiéndose del método de Jacob.

N° de Pozo	TRANSMISIVIDAD			Gasto LPS	Profundidad Total m	N.E. m	N.D m	GASTO (Qe)
	Abatimiento 10-3 m ² /día	Recuperación 10-3 m ² /día	Promedio 10-3 m ² /día					
11	7.34	5.46	6.4	95.4	120	29.48	46.32	5.67
27	3.09	3.51	3.3	77.7	120	29.5	45.3	4.9
33	2.77	2.2	2.5	60.6	82	14.96	39.51	2.47
37	5.2	5.13	5.2	67.35	75	17.81	33.47	4.32
47	8.92	S/D	8.9	107.3	150	34.6	45.12	10.2
49	8.14	7.37	7.7	55.6	70	22.95	30.39	9.4
58	S/D	2.48	2.48	57.8	60	17.59	38.55	2.76
59	8.72	22	15.36	48.1	70	45.03	51.07	7.96
74	2.78	6.22	4.5	40.8	90	16.47	25.37	4.6
94	7.32	5.56	6.4	82	100	41.56	50.92	8.76
110	17.61	16.72	17.1	91.4	70	18.85	27.19	10.96
117	7.59	6	6.7	101.6	80	18.86	32.05	7.7
138	3.72	4.89	8.6	29.9	54	37.68	44.21	4.58

Tabla 4.2 Pruebas de bombeo en el acuífero Apatzingán

Del análisis de los resultados obtenidos se puede concluir que la mayor parte del acuífero presenta transmisividades relativamente altas, indicando una gran permeabilidad.

Considerando que el acuífero se comporta de libre a semi-confinado en rocas ígneas fracturadas y en materiales granulares, respectivamente, por lo cual se le asignó un valor teórico del coeficiente de almacenamiento de 0.01.

Los registros anteriormente relacionados corresponden a datos reportados en el informe del estudio cuantitativo de la zona de riego del río Tepalcatepec, Mich., elaborado por GEOEXPLORACIONES Y CONSTRUCCIONES S.A., registros que fueron tomados durante el mes de diciembre de 1982 (época de estiaje).

4.2.9.2. Profundidad al nivel estático

Del análisis de las profundidades al nivel estático que presentan los aprovechamientos subterráneos se observa que se tiene valores de 5 metros en porción central del valle a 45 metros en las zonas de mayor altitud.

4.2.9.3. Elevación del nivel estático

Analizando la elevación del nivel estático registrado por los aprovechamientos de la zona se puede deducir que el movimiento del agua subterránea ocurre de norte a sur, de las estribaciones de la sierra que forma la Meseta Tarasca hacia el río Tepalcatepec o Grande, que funciona como nivel base.

4.2.9.4. Evolución del nivel estático

Después del último recorrido piezométrico realizado durante el año de 1982, como parte de los trabajos desarrollados por el estudio cuantitativo de la zona de riego del río Tepalcatepec, Mich., realizado por Geoexploraciones y Construcciones, S. A., esta zona no ha sido estudiada, por lo que la información es escasa y solo se puede contar con algunos datos de campo, mismos que resultan insuficientes para establecer de manera precisa la evolución piezométrica.

4.2.10. Censo de aprovechamientos subterráneos.

Según el historial administrativo del Registro Público de Derechos del Agua (REPD, CONAGUA, 2014), se estima que existen aproximadamente 1,249 aprovechamientos subterráneos distribuidos de la siguiente forma:

Año de registro	No total de registros	Volumen Total (m3)	Agrícola	Vol (m3)	Múltiple	Vol (m3)	Servicios	Vol (m3)	Doméstico	Vol (m3)	Industrial	Vol (m3)	Público Urbano	Vol (m3)	Pecuario	Vol (m3)
1994	4	860,325	1	300,000	0	0	0	0	0	0	2	259,200	1	301,125	0	0
1995	8	2,093,628	6	1,684,128	0	0	1	109,500	0	0	1	300,000	1	0	0	0
1996	291	84,723,744	266	81,517,703	1	50,000	2	1,301,750	9	569,882	1	381,034	10	903,375	0	0
1997	14	2,422,500	13	2,242,500	0	0	1	180,000	0	0	0	0	0	0	0	0
1998	30	6,497,047	27	6,171,882	1	300,000	1	365	0	0	1	24,800	0	0	0	0
1999	90	26,176,882	56	24,567,169	4	1,004,331	1	546,901	0	21,900	0	0	27	36,582	1	0
2000	245	54,972,310	189	51,564,008	6	2,222,297	1	1,048,993	0	0	2	27,512	46	109,500	0	0
2001	87	20,715,328	80	20,218,453	3	108,150	1	0	0	0	0	0	3	388,725	0	0
2002	21	4,278,995	18	4,213,942	1	49,285	1	0	0	0	1	15,768	0	0	0	0
2003	23	5,300,349	21	5,174,096	0	0	0	0	0	0	0	0	2	126,254	0	0
2004	17	3,486,570	14	3,467,649	1	0	0	2,496	0	0	0	0	2	16,425	0	0
2005	16	2,236,630	14	1,974,497	2	203,003	0	59,130	0	0	0	0	1	0	0	0
2006	8	1,403,227	8	1,403,227	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2007	18	3,376,716	15	3,171,716	0	85,000	2	120,000	0	0	0	0	2	0	0	0
2008	23	2,952,823	19	2,852,823	0	0	1	40,000	0	0	1	60,000	0	0	0	0
2009	12	2,306,566	11	2,306,566	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2010	32	5,901,923	24	5,808,139	1	93,784	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0
2011	52	7,253,176	50	7,193,890	0	0	1	54,750	0	0	1	0	0	4,536	0	0
2012	86	8,110,642	78	7,913,400	2	141,427	3	46,538	0	0	1	0	1	8,000	1	1,278
2013	128	17,171,820	118	16,617,414	3	93,786	4	372,300	0	0	2	88,320	1	0	0	0
2014	44	4,856,579	39	4,429,449	2	137,612	1	289,518	0	0	0	0	2	0	0	0
Total	1249	267,097,782	1,067	254,792,654	28	4,488,673	22	4,172,240	9	591,782	13	1,156,634	101	1,894,522	2	1,278

Tabla 4.3 Distribución del agua concesionada he inscrita en el REPD para el acuífero

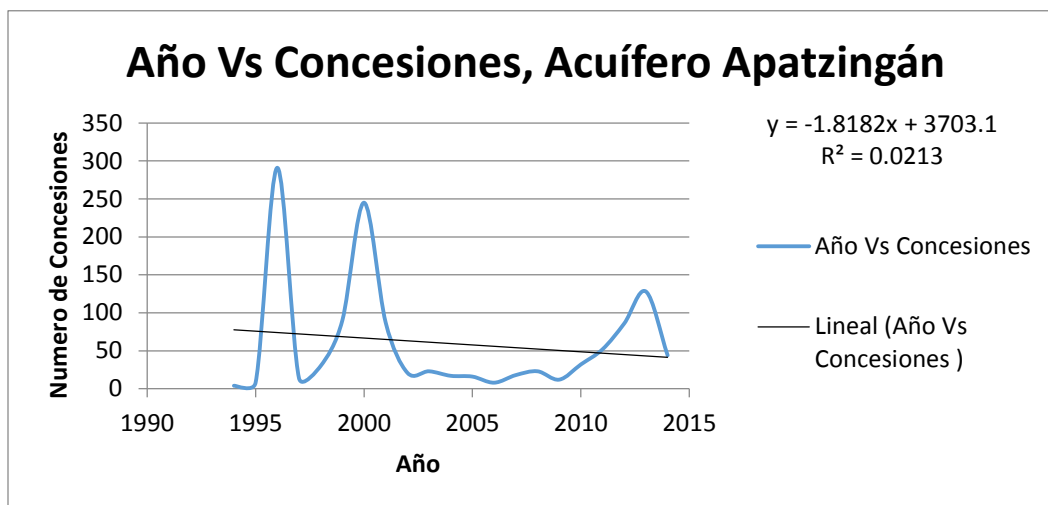


Figura 4.5 Número de concesiones a través del tiempo para el acuífero Apatzingán

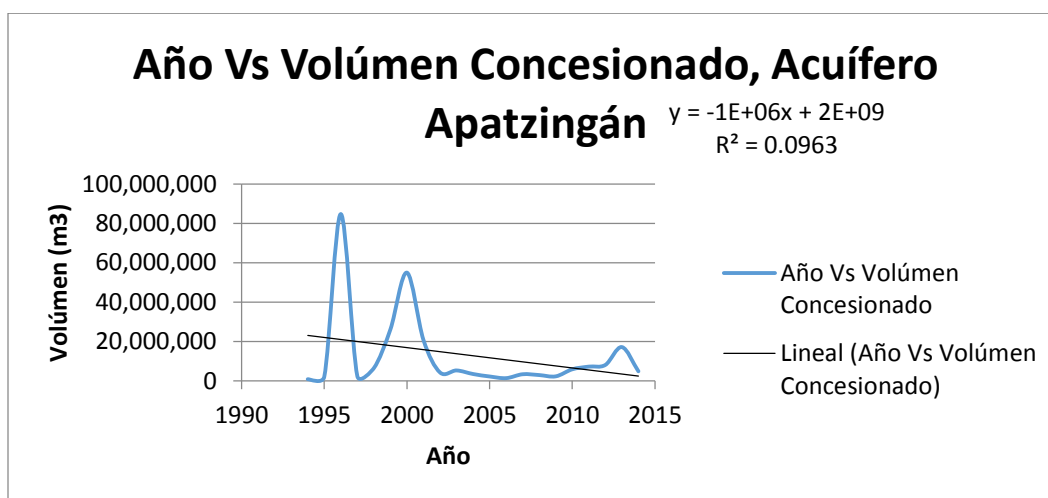


Figura 4.6 Volumen Concesionado a través del tiempo para el acuífero Apatzingán

De las imágenes anteriores vemos que existió un gran volumen concesionado en el año 1996, 2000 y 2001 periodo en el que se le da auge a la agricultura en la zona, mismo en el que se incrementa la plantación de aguacate debido al éxito que tiene este con las exportaciones a Estados Unidos.

En la figura 4.7 se puede apreciar que el 95% del volumen concesionado en el acuífero Apatzingán es usado para riego agrícola, lo cual nos indica que es una zona altamente productiva todo el año.

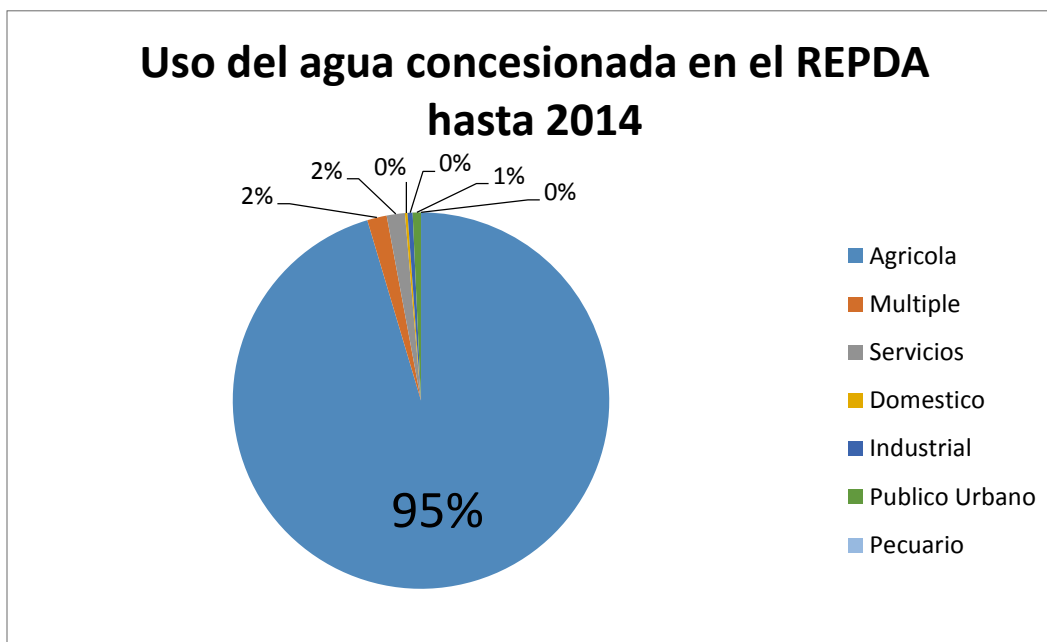


Figura 4.7 Uso del agua subterránea concesionada en el acuífero Apatzingán

4.3. ACUÍFERO (1622) COTIJA

4.3.1. Localización

El acuífero Cotija se encuentra ubicado en la porción occidental del Estado de Michoacán. Colinda al norte con los municipios de Jiquilpan, Villamar y Tangamandapio, al sur con Buenavista y Tancítaro, al este con Tangancicuaro, Charapan y Uruapan y al oeste con el estado de Jalisco. Forma parte de la cuenca del Río Tepalcatepec y de la subcuenca del Río Itzícuar, estando integrada en la región Hidrológica N° 18 Río Balsas.

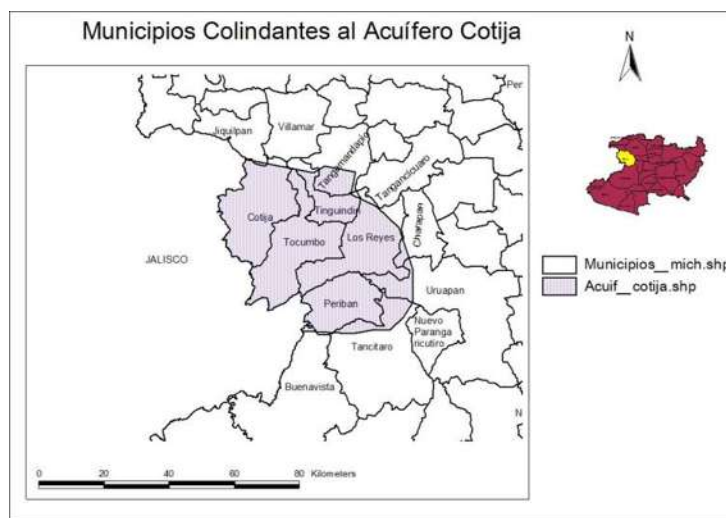


Figura 4.8 Localización del Acuífero Cotija

El área de este acuífero está conformada por territorio perteneciente a 10 municipios, en la tabla 4.4 se muestran estos, así como el porcentaje de participación de cada municipio en el acuífero Cotija, Tocumbo, Cotija y Peribán superan el 97 %, mientras Jiquilpan, Charapan y Uruapan no pasan del 10%.

Municipio	Área del Municipio en Acuífero (m2)	Área Municipio (m2)	% de Participación
Charapan	20,054,640	235,411,278	8.52
Cotija	493,807,173	508,229,245	97.16
Jiquilpan	3,219,052	254,136,252	1.27
Los Reyes	430,875,981	488,172,903	88.26
Peribán	321,775,480	325,065,889	98.99
Tancítaro	108,720,186	769,753,323	14.12
Tangamandapio	87,893,135	311,022,603	28.26
Tingüindín	148,679,218	176,068,195	84.44
Tocumbo	506,186,320	506,199,255	100
Uruapan	87,852,475	950,201,583	9.25

Tabla 4.4 Porcentaje de Participación Territorial de los Municipios en el Acuífero Cotija

Municipio	No. De Habitantes	Poblaciones Importantes
Cotija	22,171	Cotija de la Paz y La Magdalena
Peribán	18,955	Peribán de Ramos y San Fco. Peribán
Los Reyes	54,039	Los Reyes de Salgado
Tingüindín	12,355	Tingüindín
Tocumbo	12,237	Tocumbo

Tabla 4.5 Principales centros de población que se encuentran dentro del acuífero Cotija

4.3.2. Situación administrativa del acuífero.

Existen 6 decretos de veda en el Estado de Michoacán, el más reciente del 20 de octubre de 1987, en donde se estableció una veda en todo el estado por tiempo indefinido, para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en todos los municipios, aunque se trata de una **veda de control** que no limita la construcción de nuevos

aprovechamientos para todo uso, permitiendo extracciones limitadas para usos doméstico, industrial, de riego y otros. Hasta la fecha no se ha decretado ninguna zona de reserva de agua para uso específico.

Los usuarios del agua subterránea no están organizados bajo ninguna figura asociativa dentro de este acuífero.

Dentro de la zona de estudio se encuentra el módulo de riego No. I (La Magdalena), del Distrito de Riego 099 "Quitupán La Magdalena".

4.3.3. Fisiografía

El área estudiada está localizada en la subprovincia fisiográfica de fosas tectónicas, la cual a su vez integra la provincia denominada Cinturón Volcánico Transmexicano, que atraviesa la República Mexicana de oriente a poniente, con abundantes manifestaciones volcánicas de edad muy reciente. Esta subprovincia fisiográfica es caracterizada por grandes depresiones alargadas con orientación general norte-sur.

La característica tectónica principal del Eje es el alineamiento prácticamente E-W de los principales accidentes estructurales, los cuales han dado origen a cuencas o fosas tectónicas regionales.

Así mismo, los fallamientos E-W han sido de tal profundidad que han permitido que cámaras magmáticas profundas extruyan importantes volúmenes de lava, lo que dio origen en el terciario y cuaternario a reiterados procesos de vulcanismo, siendo uno de los últimos el que originó al Volcán Parícutín en 1943.

4.3.4. Clima

El clima en la región según clasificación de Köppen modificada para la República Mexicana por E. García, es de tipo semicálido subhúmedo con lluvias en verano y un porcentaje de lluvia invernal menor de 5.

4.3.4.1. *Temperatura media anual*

En la región la temperatura media anual calculada a partir de las estaciones climatológicas, para el periodo 1943-2010 es del orden de los 13.3° C, con máximas en los meses de mayo y junio del orden de 32 °C (estación 16088, PERIBÁN) y mínimas de -0.8 °C en los meses de enero y febrero (estación 16106, SAN ANGEL).

4.3.4.2. Precipitación media anual.

La precipitación media anual registrada en la región varía desde los 780 mm hasta los 1400 mm, con un valor medio para el acuífero de 1002 mm, ocurriendo su mayor incidencia en los meses de junio, julio y agosto.

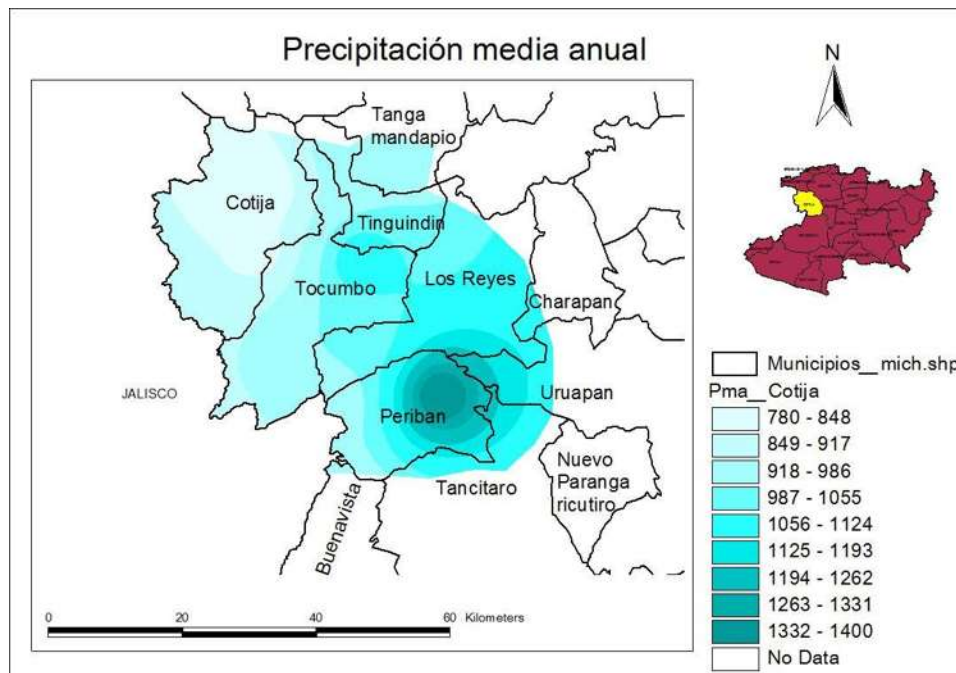


Figura 4.9 Precipitación media anual en el acuífero Cotija

4.3.5. Hidrografía

El acuífero Cotija se encuentra en la región Hidrológica 18 del Balsas en la cuenca Río Tepalcatepec, subcuenca Río Itzicuaró.

Dentro de la cuenca existen corrientes importantes como es el río Cotija, el cual tiene una cuenca de 258.8 km² y se origina con los escurrimientos que descienden del cerro Los Cigarros, desde una elevación aproximada de 2150 msnm. Este río vierte sus aguas a la Presa San Juanico, cuyos excedentes son derivados al Río Tarecuato mediante un dren de 23 km de longitud denominado dren de Tocumbo.

La Presa San Juanico, es un embalse importante dentro de este acuífero; beneficia a 3,400 hectáreas del distrito de riego 099 Quitupan – La Magdalena. El bordo tiene una longitud de 1.2 km, con un ancho de corona de 4 m y un ancho de la base de 20 m. Cuenta con un

vertedor de demasías con capacidad de 8 m³/s, el cual descarga su caudal al dren Tocumbo. Tiene dos obras de toma al lado del vertedor; la norte tiene una capacidad de 2.5 m³/s y la sur de 2.3 m³/s. La capacidad nominal del vaso es de 63 Mm³ de los cuales 30 son para almacenamiento, 30 para azolves y 3 para regulación.

4.3.6. Geomorfología

En lo que se refiere a la geomorfología, en la zona se observan dos etapas: en los valles una etapa geomórfica de madurez temprana, y en las áreas que los bordean, etapas de juventud temprana y tardía.

En la zona de Cotija el desnivel regional tiene una dirección NW-SE, que es la dirección de los principales drenes superficiales y escurrimientos, encontrándose por ejemplo el Valle de la Magdalena a una elevación media de 1600 msnm; el paisaje semiplano de este valle se ve interrumpido por algunos conos cineríticos como el Cerro de Tingüindín, que en algunas ocasiones modifican el paisaje y desvían las corrientes superficiales.

Todas las emanaciones volcánicas son de composición intermedia y básica, representada por andesitas basálticas, basaltos y depósitos piroclásticos de la misma composición, todos estos materiales cubiertos por una gruesa capa de suelo residual producto del intemperismo en las rocas antes mencionadas; una de las características más sobresalientes de estas rocas es que ocurren en formas de derrames lávicos y depósitos pseudo estratificados todos de color gris claro, tornándose a negro, totalmente fracturado y poco alterado a excepción de los depósitos piroclásticos.

4.3.7. Geología

Desde el punto de vista estratigráfico, la zona está constituida por una sucesión de rocas sedimentarias del Mioceno Temprano, así como una serie de manifestaciones asociadas al vulcanismo. También, es posible observar los productos de intemperismo de las rocas volcánicas, en ocasiones, dando origen a materiales vulcanoclásticos, con una distribución de regular amplitud en la zona. Así mismo, se localizan rocas de origen piroclástico cuyo depósito se realizó en cuencas continentales (lacustres).

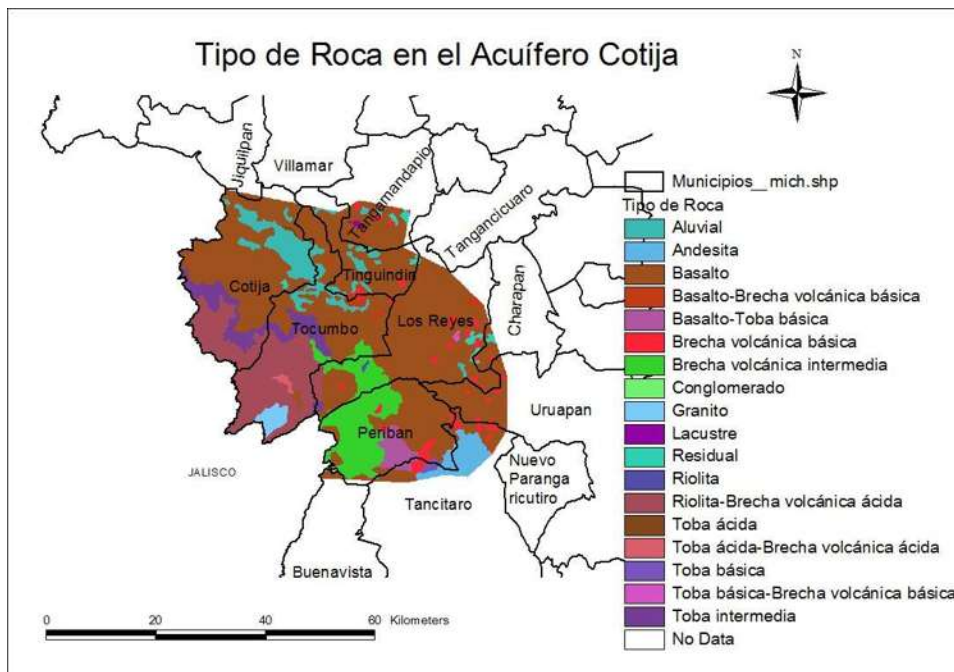


Figura 4.11 Tipo de Roca en el acuífero Cotija

Los principales tipos de roca que se presentan en el acuífero Cotija son los siguientes:

4.3.7.2. Toba Andesítica (Tta).

Esta unidad se encuentra en la base de la columna estratigráfica volcánica del Terciario. Cubre discordantemente a las calizas del Cretácico y forma el sostén de los eventos subsiguientes.

Las tobas andesíticas se presentan en una estratificación extremadamente burda, no presenta horizontes bien definidos.

Su estructura es frecuentemente deleznable, con una textura piroclástica definida y ocasionalmente llega a contener algunos fragmentos de cuarzo, sus constituyentes normales son de tipo andesítico como: fragmentos de roca con textura microlítica, plagioclasas medias (andesinas, oligoclasa) así como ceniza volcánica y vidrio también de composición media con alteraciones a sericita y minerales arcillosos.

4.3.7.3. *Andesitas (Tva).*

En general las andesitas presentan un color gris oscuro, verdoso y rojizo en ocasiones con vetillas. La estructura de estas rocas en sus afloramientos varía entre derrames y conos volcánicos bastante erosionados.

Las andesitas presentan una expresión topográfica en forma de lomas y montañas de elevación media con topografía generalmente abrupta.

4.3.7.4. *Basaltos Andesíticos (Qban).*

Como última muestra del vulcanismo terciario y cuaternario se tienen una serie de derrames de rocas básicas pertenecientes al pleistoceno y al reciente; una muestra de esto se tiene en el volcán Parícutín formado hace aproximadamente 70 años y que se encuentra en la vecindad inmediata de la zona en referencia.

El basalto andesítico que por lo anteriormente expuesto pertenece estratigráficamente al cuaternario, es el grupo de rocas más ampliamente distribuido en la zona ya sea en su variedad de basaltos andesíticos de olivino o de basalto andesítico de piroxena.

4.3.7.5. *Aluvión (Qal).*

Finalmente, los depósitos de aluvión se restringen a los valles intermontañosos presentes en la zona, y representan los últimos fenómenos geológicos que son originados por el intemperismo, erosión, transporte y depósito en áreas aluviales de la región (GEOPESA, 1979).

4.3.8. Hidrogeología

Los valles de la porción norte de esta región, todos son semejantes, ya que están formados por rocas basálticas que los limitan lateralmente y están rellenos por areniscas y conglomerados de tipo fluvial y lacustre, hacia el norte.

Estas pequeñas lagunas se abastecen de manantiales cuya recarga proviene de los grandes afloramientos basálticos de la Meseta Tarasca, la cual ocupa la porción noroccidental del área, en esa zona, la precipitación es favorable y la permeabilidad buena, por lo cual, la infiltración del agua de lluvia se efectúa en forma abundante, sin embargo, la gran elevación

topográfica del área evita que se formen acuíferos importantes a profundidades favorables, pues el agua desciende hasta encontrar en la base de la meseta niveles de saturación que la obligan a brotar en forma de manantiales como los de Zirosto y san Francisco Peribán. En las partes altas se forman únicamente **acuíferos colgados**, los cuales son debidos a la intercalación de materiales volcánicos permeables con ocasionales depósitos lacustres arcillosos. Estos acuíferos son en general de baja producción y difíciles de localizar en el subsuelo, pues están controlados por estructuras falladas muy complejas.

Inmediatamente debajo de la superficie, se encuentra un paquete de sedimentos compuestos por materiales granulares intercalados con horizontes arcillosos, según se infiere en la interpretación de los datos de los sondeos eléctricos verticales. En general la arcilla tiende a predominar en la mitad inferior de este paquete, clasificado como Qal, al cual se le estimó un espesor variable, pero en general inferior a los 200 metros. Desde el punto de vista hidrológico, este paquete de sedimentos puede constituir, como de hecho lo hace, diversos acuíferos en los materiales granulares, con niveles freáticos de profundidad variable, pero en general someros. La presencia de los horizontes arcillosos aísla probablemente a muchos de tales acuíferos, por lo que deben existir algunos acuíferos colgantes, confinados o semiconfinados, que explican algunos fenómenos de artesianismos observados sobre todo en las márgenes del Valle de La Magdalena. Ninguno de tales acuíferos someros parece ser explotable a gran escala con objetivos de riego, por lo que para efectos de modelado, y considerando como un todo, se asumió que presenta una porosidad y permeabilidad de media a baja que, **en su conjunto, lo clasifican como un acuitardo**, comunicado sólo parcialmente con el acuífero más profundo.

Bajo tales consideraciones, el acuífero a modelar tendría un espesor explotable de aproximadamente 200 metros, estando limitado hacia abajo por las andesitas y basaltos miocénicos.

4.3.9. Parámetros Hidráulicos.

La consulta de fuentes ajenas a este proyecto resultó obligada. En un estudio muy completo sobre el panorama general de las aguas subterráneas en el Estado de Michoacán, se encontró en el capítulo correspondiente a pruebas de bombeo realizadas en los valles de Tangancícuaro y de Zamora, que las transmisividades estimadas varían entre 9.0×10^{-3} y $4.4 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ para el primero, y entre 3.6×10^{-5} y $2.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ para el segundo. De aquí se pueden obtener dos promedios: uno bajo promediando todos los datos y que vale $T1 = 1.6 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$; y otro alto resultante de promediar sólo los valores altos y que es igual a $T2 = 2.7 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

4.3.9.1. *Coefficiente de Almacenamiento.*

Por su parte, el coeficiente de almacenamiento se obtuvo mediante cálculos con datos de tablas. La compresibilidad del agua fría es $\beta = 4.4 \times 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$. La compresibilidad de la roca es en promedio igual a $\alpha = 1.0 \times 10^{-4} \text{ bar}^{-1}$. Considerando una porosidad del 10%, es posible estimar un coeficiente de almacenamiento definido por:

$$S_s = 1000 \times g (\alpha + \phi \beta) = 9800 \times (1.0 \times 10^{-4} + 0.1 \times 4.4 \times 10^{-5}) = 10.2312 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$$

El coeficiente de almacenamiento es igual al valor anterior multiplicado por el espesor del acuífero, que, como se mencionó antes, se estimó en 200 metros; así:

$$S = S_s \times 200 \text{ m} = 2.04624 \times 10^{-3}$$

(GEOCONSUL, 1993)

4.3.9.2. *Profundidad al nivel estático.*

La profundidad del nivel estático en la cuenca de La Magdalena, permite establecer que en la porción noroeste del valle, entre los poblados de Vista Hermosa, Los Zapotes, El Potrero y Rubén Romero, el nivel se encuentra muy somero, con profundidades de 1.0 m hasta reportándose artesianismo en esta zona, lo que da indicios de un acuífero semiconfinado.

En la porción sureste del valle los niveles en los pozos se presentan más profundos, del orden de 12.5 m, 20 a 35 m y 57 m, por lo que es evidente que en esta porción que comprende los poblados de Tacátzcuaro y Santa Inés, no se presentan fenómenos de artesianismo.

4.3.10. **Censo de aprovechamientos subterráneos**

Según el historial administrativo del Registro Público de Derechos del Agua (REPDa, CONAGUA, 2014), se estima que existen aproximadamente 258 aprovechamientos subterráneos que extraen 38 hectómetros cúbicos de agua (volúmenes en tabla 4.6 están en m^3) distribuidos de la siguiente forma:

AÑO DE REGISTRO	N° DE REGISTROS	VOLUMEN TOTAL	VOLUMEN AGRICOLA	VOLUMEN MULTIPLE	VOLUMEN SERVICIOS	VOLUMEN DOMESTICO	VOLUMEN P. URBANO	VOLUMEN PECUARIO	VOLUMEN NO ESPECIFICADO
1994	5	997,578	90,092	-	-	876,000	31,536	-	-
1995	5	2,587,152	2,587,152	-	-	-	-	-	-
1996	35	5,377,612	3,784,188	35,000	-	37,884	1,335,900	-	184,640
1997	8	1,533,610	1,326,840	206,770	-	-	-	-	-
1998	12	3,252,488.40	2,977,919.40	82,944	-	136,875	54,750	-	-
1999	7	1,266,603.60	1,207,657	-	-	-	58,946.60	-	-
2000	45	8,239,695.45	7,925,583.20	150,980.50	-	-	161,087.75	2044	-
2001	10	3,623,794.60	3,623,794.60	-	-	-	-	-	-
2002	2	393,310	393,310	-	-	-	-	-	-
2003	12	988,331.75	987,255	529.25	-	547.5	-	-	-
2004	14	1,021,428.50	679,228	65,271	-	-	273,750	3179.5	-
2005	15	1,367,962.95	1,139,248.90	-	-	383.3	170,655.75	-	57,675
2006	3	497,491	251,116	-	-	-	246,375	-	-
2007	1	297,360	297,360	-	-	-	-	-	-
2008	1	181,440	181,440	-	-	-	-	-	-
2009	0	0	-	-	-	-	-	-	-
2010	11	1,298,620.25	1,281,702.50	-	-	-	16,917.75	-	-
2011	27	2,585,505.91	2,485,907.16	61,000	-	-	38,598.75	-	-
2012	16	831,079.20	819,558.20	11,521	-	-	-	-	-
2013	8	944,465	670,314	274,151	-	-	-	-	-
2014	21	744,617	740,617	-	4000	-	-	-	-
Total	258	38,030,146	33,450,282.96	888,167	4,000	1,051,690	2,388,518	5,224	242,315

Tabla 4.6 Distribución del agua concesionada e inscrita en el REPDA, acuífero Cotija

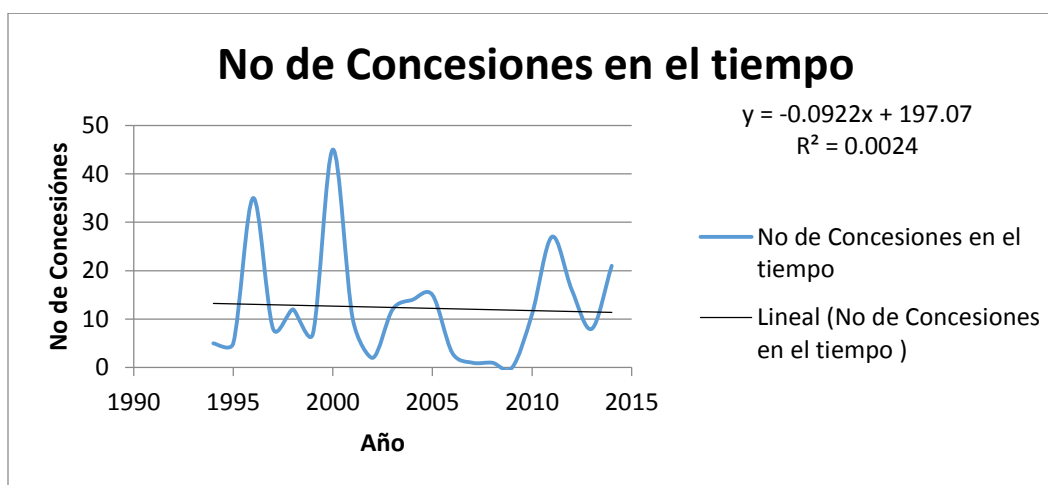


Figura 4.12 Número de concesiones a través del tiempo para el acuífero Cotija

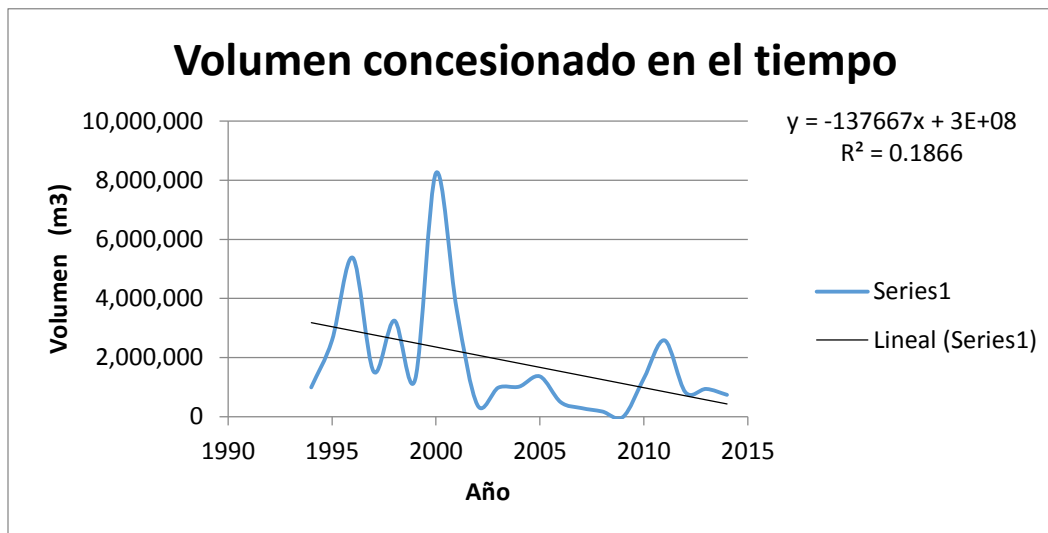


Figura 4.13 Volumen Concesionado a través del tiempo para el acuífero Cotija

De las imágenes anteriores vemos que en los años 1998, 2000, 2001 y 2011 hubo un gran volumen concesionado, el periodo del 95 al 01 se dio gran incremento en la franja aguacatera, la tendencia de volumen concesionado para el periodo que se reporta es descendente, esto porque el acuífero se encuentra en veda de control y es necesario mantener el acuífero en balance y no sobreexplotarlo.

La figura 4.14 nos muestra el uso que se le da al agua extraída del acuífero Cotija, vemos que el 88% es destinado para riego agrícola, el 6% es para uso urbano, el 3% para uso doméstico y el resto para múltiples usos.

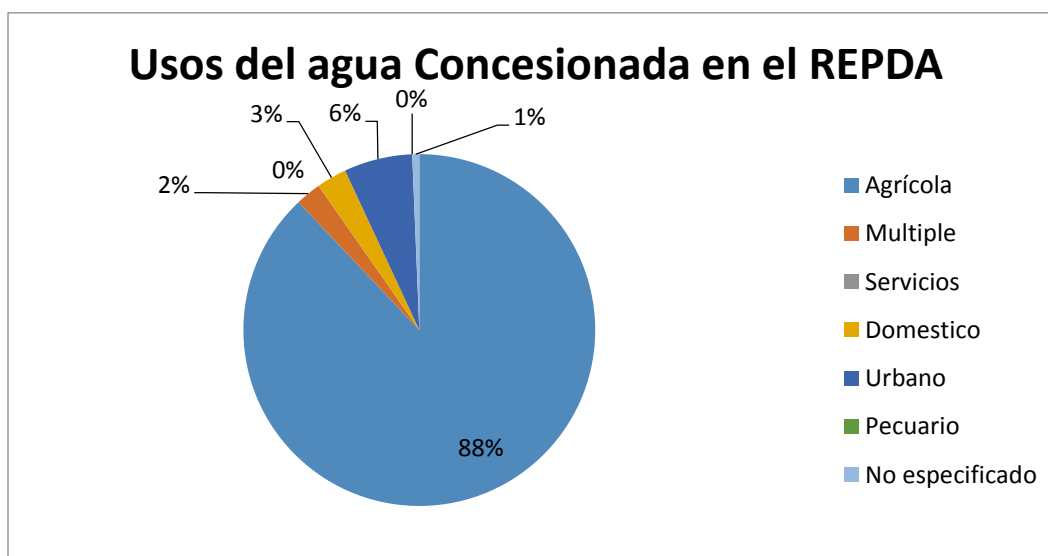


Figura 4.14 Uso del agua subterránea concesionada en el acuífero Cotija

5. FRANJA AGUACATERA

5.1. ANTECEDENTES

La persea americana o aguacate es un árbol perteneciente a la familia de las “lauráceas”. Originario en las partes altas del centro y este de México y partes altas de Guatemala. La palabra aguacate proviene del vocablo náhuatl “*ahuácatl*” que también significa testículos.



Figura 5.1 Aguacate Hass principal raza hortícola sembrada en el Estado de Michoacán

Las condiciones ambientales que prevalecen en las diferentes regiones donde se cultiva el aguacate pero principalmente en el estado de Michoacán, propician un desarrollo del árbol y la obtención del fruto prácticamente todo el año. Estos rasgos ambientales son la temperatura, humedad ambiental, precipitaciones y el viento; los cuales condicionan el desarrollo del fruto. El aguacate es sensible a bajas temperaturas, para un buen crecimiento requiere de 10° a 17°C como mínima y de 28° a 33°C como máxima pudiendo establecer que de los 16° a 24° °C es un intervalo aceptable. Para el caso de la precipitación se buscan promedios entre los 1000 mm a 1800 mm de precipitación anual; en el caso de la humedad relativa es óptima aquella que no supera el 60% y con un fotoperiodo anual de 980 a 1200 horas.

Otro aspecto importante para el desarrollo del aguacate es la altitud. En esta limitante se sabe que el aguacate tiene una amplia adaptación a diferentes altitudes pero se puede deducir que estas varían entre los 950 a 2400 msnm, pudiendo ser mayores o menores dependiendo de la raza hortícola.

El área de cultivo del aguacate se encuentra bastante extendida y comprende áreas de producción entre los 32° de latitud norte y 36° de latitud sur. La producción de aguacate mundial se estima en 3'363, 124 toneladas, en una superficie de 407, 135 hectáreas que se distribuyen en más de 50 países. En México se obtiene el 32.3 % de la producción mundial, por lo cual se considera el mayor productor en el mundo (FAOSTAT, 2007; APEAM 2006).

En base con lo antes mencionado se han reportado plantaciones de aguacate en casi todas las entidades federativas de México a excepción de los estados de Chihuahua, Coahuila, el Distrito Federal y Tlaxcala. En la tabla 5.1 se presenta la información de los estados del país donde se produce aguacate, así como la superficie sembrada, superficie cultivada, producción, rendimiento, precio por tonelada y valor producido (SIAP, 2015). De acuerdo con la tabla el estado de Michoacán es el principal productor de aguacate cuya superficie representa el 72% del total nacional.

Ubicación	Sup. Sembrada	Sup. Cosechada	Producción	Rendimiento	PMR	Valor Producción
	(Ha)	(Ha)	(Ton)	(Ton/Ha)	(\$/Ton)	(Miles de Pesos)
Michoacán	127,084.07	118,606.98	1,219,553.58	10.28	14,310.78	17,452,759.26
Jalisco	14,976.00	10,827.11	100,250.33	9.26	13,900.86	1,393,565.91
México	7,420.00	5,841.50	64,928.13	11.12	10,580.83	686,993.35
Nayarit	5,329.87	4,211.95	36,691.01	8.71	8,218.37	301,540.46
Guerrero	4,251.49	2,804.19	14,827.79	5.29	9,073.61	134,541.55
Morelos	3,763.00	3,405.50	27,656.05	8.12	8,880.40	245,596.87
Chiapas	3,293.40	1,022.00	7,547.55	7.38	10,729.07	80,978.16
Puebla	2,869.50	2,180.00	11,758.05	5.39	4,092.63	48,121.33
Oaxaca	1,905.60	1,025.90	5,484.48	5.35	12,200.92	66,915.69
Durango	1,094.00	918	3,442.72	3.75	13,050.02	44,927.57
Colima	717.25	412.75	3,931.75	9.53	13,362.44	52,537.77
Veracruz	693	343	3,671.50	10.7	11,794.90	43,304.96
Nuevo León	681.53	680.53	3,466.03	5.09	9,865.60	34,194.47
Hidalgo	558.5	426.5	3,040.30	7.13	12,405.18	37,715.47
Yucatán	462.3	430.3	10,980.00	25.52	5,320.83	58,422.66
Guanajuato	247	170	685.2	4.03	5,722.69	3,921.19
Baja California Sur	154.25	73	239.4	3.28	12,189.81	2,918.24
Querétaro	123	89	243.85	2.74	12,855.59	3,134.84
Campeche	64	59.75	534.15	8.94	4,321.98	2,308.58
Zacatecas	61	61	428.1	7.02	11,041.04	4,726.67
Tabasco	59	59	226.5	3.84	5,128.26	1,161.55
Baja California	34.5	30.5	136.03	4.46	17,658.18	2,402.04

Sinaloa	29.5	29.5	325.75	11.04	13,403.15	4,366.07
Sonora	27	27	366.35	13.57	14,517.66	5,318.54
San Luis Potosí	22	19	94.1	4.95	6,998.30	658.54
Aguascalientes	19	17	185.8	10.93	15,902.16	2,954.62
Total	175,939.76	153,770.96	1,520,694.50	9.89	13,622.71	20,715,986.37

Tabla 5.1 Producción de aguacate por entidad federativa

5.2. PRODUCCIÓN DEL AGUACATE EN EL ESTADO DE MICHOACÁN

La producción de aguacate es uno de los pilares de la economía del Estado de Michoacán, dado que genera una derrama económica del orden de los 17,452.76 millones de pesos al año, y genera más de 40 mil empleos permanentes y 60 mil estacionales por actividades indirectas. La superficie cultivada con aguacate en Michoacán se ha expandido a un ritmo acelerado a partir de 1997, cuando se reanudaron las exportaciones de aguacate a Estados Unidos de Norte América, de tal forma que entre dicho año y 2006 la superficie cultivada se incrementó en 37%, alcanzando una cifra de cerca de 90 mil hectáreas (CIGA, 2011), ubicándolo como el principal productor a nivel mundial. Esto constituye un incentivo económico y social para el crecimiento de la superficie plantada con aguacate en Michoacán.

Para el año 2007 se contaba con 92,187 has en el estado y para el año 2014 se cuenta con 127,084 Has, lo cual representa un incremento de 34,897 Has en 7 años, lo que corresponde a una tasa de incremento estatal de 4,985.29 Has/año.

En las décadas de 1970 a 1980, cuando se dio una expansión considerable de la superficie cultivada con aguacate en el estado, se empezaron a escuchar opiniones sobre la manera en que se estaban deforestando los bosques naturales la cual fue calificada de **irracional**.

En estudios recientes sugieren que el cultivo de aguacate está generando un impacto ecológico negativo de envergadura, en distintas zonas de Michoacán (Bravo Espinosa et al 2009) y se espera que, de seguir en expansión, dicho impacto se acentúe en un futuro (Toledo et al. 2009). Los efectos se dejan ver sobre distintos componentes ecológicos, incluyendo el cambio de la cubierta vegetal de bosques nativos (Bocco et al. 2001, Barsimantov y Navia, 2009), la pérdida de biodiversidad (Aguirre et al. 2009, Sánchez 2007), la reducción y contaminación de los mantos acuíferos y cuerpos de agua (Tapia et al. 2006, Tapia et al. 2007, Tapia et al. 2009) y la erosión y contaminación de suelos (Aguirre et al. 2009).

Como resultado de la gran expansión del cultivo, en la meseta Purépecha, principal zona productora de aguacate, se reportó que la superficie con cambio de uso de suelo fue de

15,543 ha en bosque de coníferas y de 6,243 ha en bosque de coníferas con latifoliadas, durante el periodo 1976 a 2005 teniendo como consecuencia que la disponibilidad y calidad del agua se vean amenazadas por los procesos de cambio en el uso del suelo.

Estos cambios se realizaron sin considerar su impacto en los servicios hidrológicos y sin visión a largo plazo. La condición de cambio acelerado de uso del suelo da origen al factor de presión sobre la diversidad biológica, específicamente sobre la flora y fauna silvestre, modificando o destruyendo los habitats por la degradación y deforestación de los bosques. Por otro lado los bosques captan, regulan y mantienen el flujo y la calidad del agua en función de que la cobertura forestal contribuye a regular los ciclos eco-hidrológicos, así como de otros procesos relacionados con el agua, tales como la erosión, las inundaciones, la precipitación regional y el cambio climático (Brooks y Vivoni, 2008).

5.3. UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS

La zona aguacatera se ubica en la porción central del estado de Michoacán, incluyendo la denominada Región Purépecha, con una extensión aproximada de 127,084 has para el año 2014, representa el 2.12% del territorio estatal (figura 5.2). La franja aguacatera se localiza en territorio de 49 de los 113 municipios del estado, siendo Tancítaro, Tacámbaro, Salvador Escalante, Uruapan, Ario de Rosales y Peribán los de mayor extensión abarcando más del 70% del área de plantación estatal.

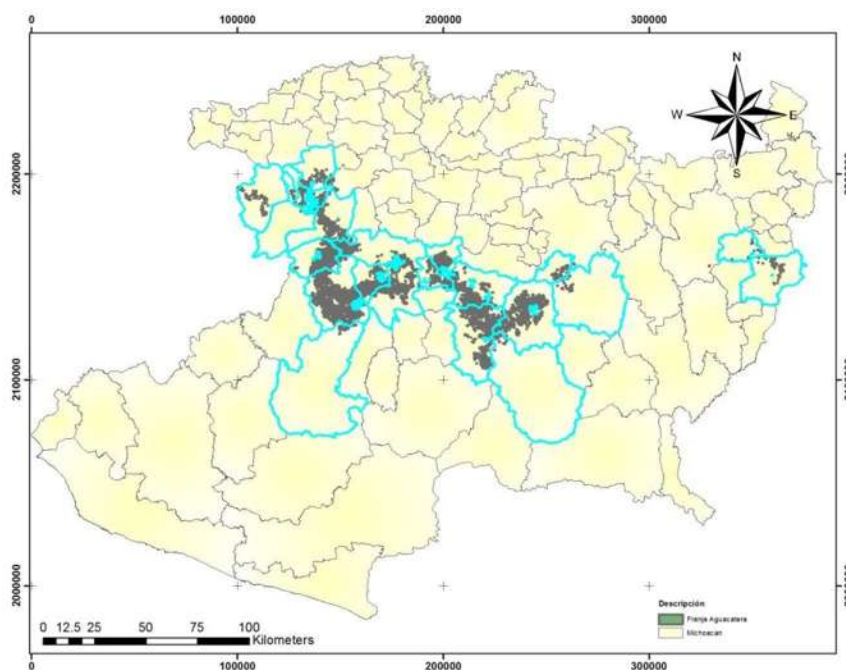


Figura 5.2 Ubicación de la franja aguacatera en el Estado de Michoacán

La franja aguacatera, se encuentra enclavada en la porción sur del Eje Neovolcánico, con un estrato geológico superior constituido por roca basáltica, brechas recientes permeables, brechas alteradas de baja permeabilidad y materiales volcánicos sueltos. El gradiente de elevaciones varía entre los 1300 a 3600 msnm, donde dominan las unidades geomorfológicas de montaña, mesetas, valles y lomeríos, las elevaciones más predominantes son el del Tancítaro y el Cerro Prieto. Los suelos con mayor distribución son los andosoles (82%) y acrisoles (5%) que ocupan el 87% del área, los cuales poseen unas excelentes características para la actividad agrícola.

Estas condiciones geológicas y edáficas con distinto grado de permeabilidad producen una serie de manantiales, los cuales a su vez aportan escurrimientos para formar el Río Cupatitzio y otros arroyos. Los principales tipos de clima son el semicálido subhúmedo (58%) y el templado subhúmedo (26%). En la zona ocurre un importante disturbio antropogénico que altera la estructura y función de los ecosistemas naturales, siendo los incendios forestales y el cambio de uso del suelo los principales agentes de alteración, con un fuerte impacto en la biodiversidad de las comunidades forestales.

Cabe mencionar que la franja aguacatera se localiza acentuada sobre 10 acuíferos (Figura 5.3), una de las fuentes principales del suministro del recurso agua para el riego del cultivo. Los acuíferos que ocupan mayor superficie son el acuífero Cotija 26.47 %, Apatzingán 25.11% y Nueva Italia 19.62%; los que ocupan menor área son Huetamo 0.78 %, Morelia – Queréndaro 0.64 % y por último el acuífero Cd. Hidalgo – Tuxpan con el 0.32 %

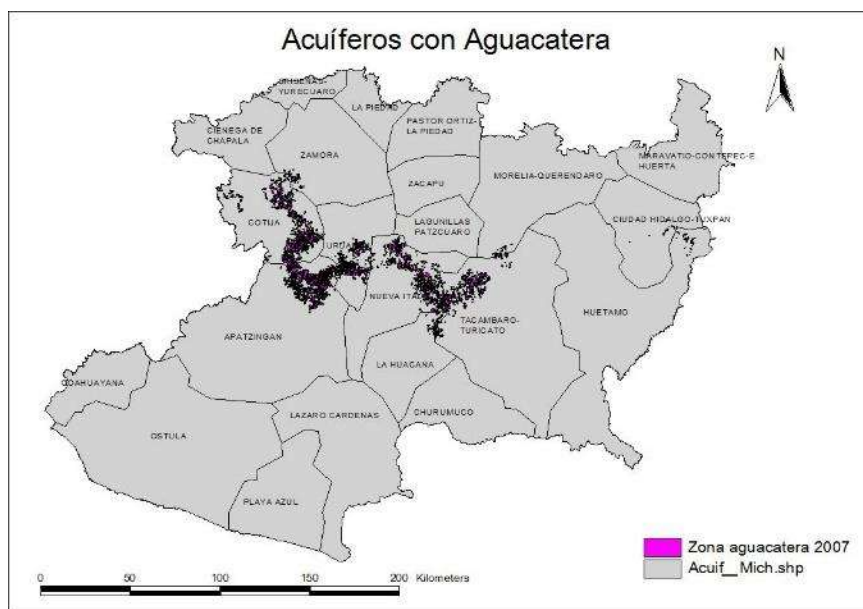


Figura 5.3 Acuíferos con Aguacatera en el Estado de Michoacán

Los acuíferos se encuentran en diferente situación de disponibilidad de agua subterránea y la comisión Nacional del Agua ha realizado estudios para conocer la disponibilidad de agua subterránea en cada uno de ellos, en la tabla siguiente se puede observar los datos más relevantes de dichos estudios.

ACUÍFERO	SPCA	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DEFICIT
Cojita	26.47	134.8	92.7	32.3	27	9.765	0
Apatzingán	25.11	494.2	94.6	242.94	229.8	155.85	0
Nueva Italia	19.62	99.2	0.3	7.49	44.2	91.425	0
Tacambaro-Turicato	13.14	N D	N D	N D	N D	N D	N D
Uruapan	11.24	97.3	29.5	24.69	12.8	43.1	0
La Huacana	1.62	N D	N D	N D	N D	N D	N D
Zamora	1.06	308.5	180.2	96.3	61.4	32.02	0
Huetamo	0.78	219.8	197.4	8.16	-	14.04	0
Morelia-Queréndaro	0.64	286.7	127.8	165.07	-	-6.168	6.168
Cd. Hidalgo-Tuxpan	0.32	60.5	41.3	64.53	-	-45.33	45.33

Tabla 5.2 Disponibilidad media de agua subterránea en los acuíferos con aguacatera

SPCA: superficie en porcentaje con cultivo de aguacate R: recarga media anual

DNCOM: descarga natural comprometida

VCAS: volumen concesionado de agua subterránea

VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos

DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea.

(Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales “3” y “4” de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000)

En la tabla anterior se puede observar que solo dos acuíferos presentan caso de déficit, para los acuíferos de Morelia–Queréndaro y Cd Hidalgo–Tuxpan, sin embargo también es de destacar que son los acuíferos con menor participación en cuanto a la superficie cultivada con aguacate, así que se puede deducir que su situación de sobreexplotación se debe a otras causas. Los acuíferos La Huacana y Tacámbaro-Turicato no cuentan con información disponible. Por último los 6 acuíferos restantes se encuentran con disponibilidad de agua subterránea.

5.4. FRANJA AGUACATERA EN EL ACUÍFERO COTIJA

La zona aguacatera en el acuífero Cotija ocupa una superficie de 24,357 hectáreas, lo que significa el 26.47 % del total de la franja aguacatera del estado, convirtiéndolo en el acuífero con mayor superficie cultivada de aguacate, siendo así uno de los acuíferos que ha sufrido el impacto por el cambio de cobertura del suelo a lo largo del tiempo.

Por otra parte el acuífero Cotija se ubica bajo 8 municipios, de forma total o parcial, de los cuales todos tienen presencia del cultivo de aguacate; con Peribán y los Reyes como los municipios con mayor área sembrada comprendida en el acuífero con 6,828.51 Has y 4,269.65 Has respectivamente. Tancítaro Y Uruapan están presentes de forma parcial, teniendo su mayor área de aguacatera en los Acuíferos Apatzingán y Uruapan respectivamente.

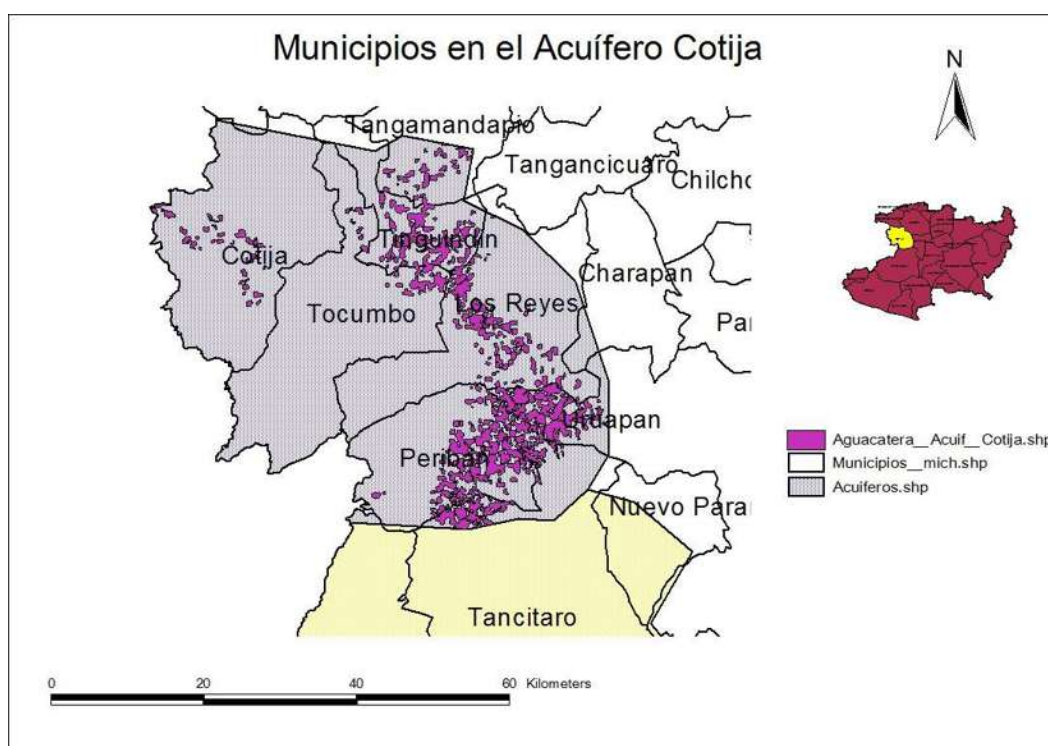


Figura 5.4 Franja aguacatera sobre el Acuífero Cotija

5.5. FRANJA AGUACATERA EN EL ACUÍFERO APATZINGÁN

Para el Acuífero Apatzingán la superficie es de 23,109 hectáreas, lo que significa el 25.11% del total de la franja aguacatera del estado, convirtiéndolo en el segundo acuífero con mayor superficie cultivada de aguacate, siendo así también uno de los acuíferos que ha sufrido el impacto por el cambio de uso del suelo a lo largo del tiempo.

El acuífero Apatzingán Alberga 14 municipios de forma total o parcial, Tancítaro ocupa el primer lugar en aguacatera con 19,694 Has en este acuífero y 2,347 has en el acuífero Cotija, seguido por Nuevo Parangaricutiro con 4,984 Has y por ultimo Apatzingán con 691 Has.

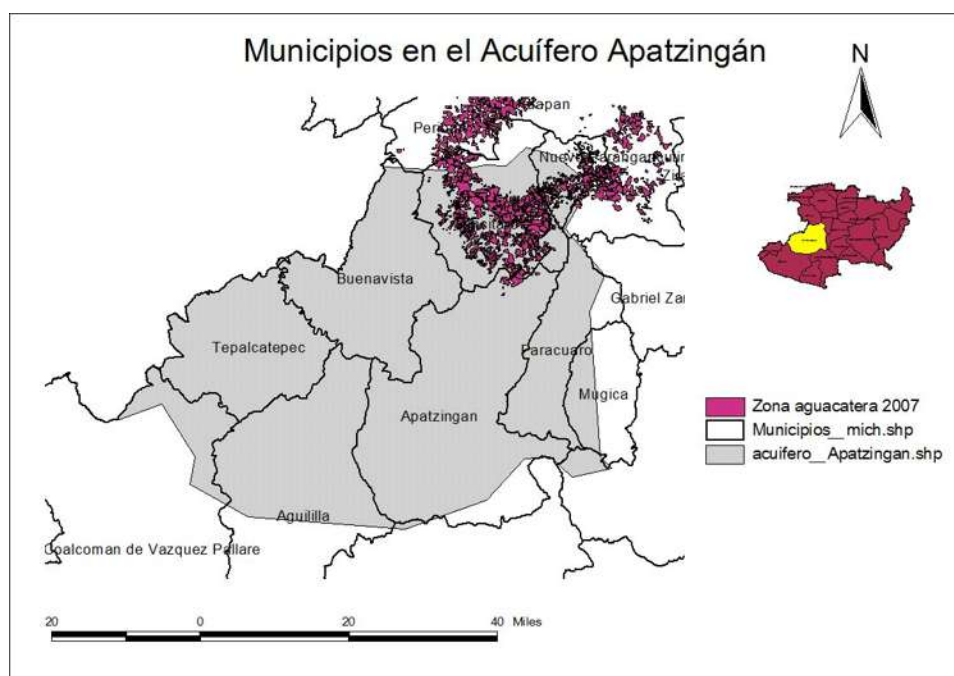


Figura 5.5 Franja aguacatera sobre el Acuífero Apatzingán

5.6. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y RIEGO DE LA FRANJA AGUACATERA

Para el año 2014 en el Estado de Michoacán existen 49 municipios que tienen plantaciones de aguacate tipo Hass, la cifra supera las 127 mil hectáreas, la mayor parte de esta superficie se encuentra en la meseta purépecha, la cual posee principalmente suelo del tipo Andosol, este es una categoría del sistema de clasificación de suelos de la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO) que agrupa suelos de origen volcánico de color oscuro y muy porosos. Se desarrollan a partir de cenizas y otros materiales volcánicos ricos en

elementos vítreos. Tienen altos valores en contenido de materia orgánica, alrededor de un 20%, además tienen una gran capacidad de retención de agua y mucha capacidad de cambio. Se encuentran en regiones húmedas, desde las regiones circumpolares hasta las tropicales, y pueden encontrarse junto una gran variedad de vegetales. Su rasgo más sobresaliente es la formación masiva de complejos amorfos humus-aluminio.

Los suelos Andosoles son ideales para el cultivo del aguacate, ya que su alto contenido de porosidad permite que la raíz del cultivo se desarrolle correctamente y sin enfermedades, el alto contenido de cenizas volcánicas y el humus es ideal para nutrir a la planta y la gran capacidad de retención de agua hace tan rentable este suelo que incluso gran cantidad de hectáreas de aguacate no se riegan en época de secas, sobreviven solo con la humedad del suelo, a lo anterior favorece que las temperaturas en esta zona no son tan extremas y que la misma sombra de los arboles ya grandes ayudan a que el suelo conserve dicha humedad.

En la tabla 5.3 se muestran todos los municipios del Estado de Michoacán que tienen aguacate (SIAP, 2015), esta tabla muestra el total de superficie sembrada: esta incluye el área que se riega y el área de temporal; La agricultura de temporal es un sistema de producción que depende del comportamiento de las lluvias durante el ciclo de producción y de la capacidad del suelo para captar el agua y conservar la humedad.

***ESTADO Michoacán, Ciclo: Cíclicos y Perennes 2014, Modalidad: Riego + Temporal,
Aguacate***

Municipio	Sup. Sembrada (Ha)	Sup. Cosechada (Ha)	Producción (Ton)	Rendimie nto (Ton/Ha)	PMR (\$/Ton)	Valor Producción (Miles de Pesos)
Tancítaro	21,600.00	21,600.00	206,812.00	9.58	13,091.40	2,707,457.89
Tacámbaro	14,232.00	13,760.00	140,782.18	10.23	15,162.59	2,134,622.28
Salvador Escalante	14,194.00	12,793.00	141,822.00	11.09	14,051.45	1,992,804.88
Uruapan	14,030.00	14,030.00	141,107.80	10.06	14,261.57	2,012,418.50
Ario	12,536.00	11,445.00	128,058.50	11.19	13,920.70	1,782,663.96
Peribán	12,393.00	12,378.00	137,268.22	11.09	15,879.70	2,179,778.26
Nuevo Parangaricutiro	6,500.00	6,500.00	63,339.00	9.74	14,386.21	911,208.32
Ziracuaretiro	3,770.00	3,770.00	34,935.50	9.27	14,203.91	496,220.73
Los Reyes	3,769.60	2,890.00	33,166.00	11.48	15,454.23	512,555.05
Tingambato	3,036.00	3,036.00	29,259.00	9.64	13,292.65	388,929.76
Turicato	2,684.00	2,582.00	28,787.50	11.15	13,379.81	385,171.23
Tingüindín	2,281.00	2,240.00	25,968.00	11.59	15,134.28	393,006.95
Tangamandapio	1,932.00	1,570.00	16,785.00	10.69	14,975.78	251,368.50
Tangancícuaro	1,812.56	1,232.54	13,434.69	10.9	14,500.00	194,803.00
Acuitzio	1,638.85	1,070.85	9,242.25	8.63	17,000.00	157,118.25
Zitácuaro	1,238.00	1,104.50	11,293.25	10.22	12,817.80	144,754.64

Madero	1,148.25	732	4,448.00	6.08	15,831.84	70,420.00
Cotija	919	870	7,728.00	8.88	14,653.52	113,242.38
Taretan	905	905	9,050.00	10	14,987.37	135,635.70
Coalcomán de Vázquez Pallares	900	200	2,362.00	11.81	11,745.21	27,742.19
Chilchota	877.67	526.6	4,581.42	8.7	14,773.75	67,684.75
Morelia	784	479	2,874.00	6	14,666.67	42,152.01
Purépero	726.56	290.62	2,470.27	8.5	14,800.00	36,560.00
Tocumbo	526	509	5,312.50	10.44	14,541.85	77,253.57
Erongarícuaro	485	415	5,104.50	12.3	14,075.52	71,848.49
Apatzingán	448.82	385.82	2,897.51	7.51	13,781.49	39,932.01
Tuxpan	312	312	2,548.00	8.17	9,501.31	24,209.33
Pátzcuaro	211	190	1,805.00	9.5	13,653.04	24,643.74
Susupuato	200	175	1,802.50	10.3	12,390.00	22,332.98
Tlazazalca	168.81	39.35	314.8	8	13,998.68	4,406.78
Huiramba	94	69	634.8	9.2	13,720.36	8,709.68
Irimbo	92	92	680.8	7.4	8,900.00	6,059.12
Charapan	90	0	0	0	0	0
Quiroga	73	59	523	8.86	13,607.31	7,116.62
Aguililla	70	20	178.4	8.92	11,992.72	2,139.50
Ocampo	69.5	42.5	379.1	8.92	12,326.44	4,672.95
Zinapécuaro	65	55	215	3.91	13,637.21	2,932.00
Jiquilpan	60	60	432	7.2	10,500.00	4,536.00
Charo	36.7	36.7	135.79	3.7	13,540.54	1,838.67
Juárez	30	26	270.4	10.4	12,545.68	3,392.35
Tzitzio	30	6	13.2	2.2	12,545.45	165.6
Jungapeo	23.5	23.5	199.7	8.5	9,395.70	1,876.32
Hidalgo	22	22	167.2	7.6	10,255.39	1,714.70
Queréndaro	20	20	80	4	14,000.00	1,120.00
Tarímbaro	20	20	120	6	12,000.00	1,440.00
Tzintzuntzan	17	14	110	7.86	13,710.15	1,508.12
Maravatío	8.25	6	40.8	6.8	9,840.00	401.47
Álvaro Obregón	2	2	8	4	14,000.00	112
Copándaro	2	2	6	3	13,000.00	78
	127,084.07	118,606.98	1,219,553.58	10.28	14,310.78	17,452,759.26

Tabla 5.3 Área total de aguacatera por municipio en el Estado de Michoacán

En la figura 5.6 vemos que Tancítaro tiene el 17 % del área aguacatera estatal, siguen Tacámbaro, Salvador Escalante y Uruapan empatados con el 11%, Ario y Peribán empatados con el 10%, Nuevo Parangaricutiro con el 5% y finalmente el 25% restante lo componen entre 41 municipios que tienen poca superficie de plantación de aguacatera.

Por otra parte en la tabla 5.3 se deja ver que Tancítaro, Uruapan, Peribán, Nuevo Parangaricutiro, Ziracuaretiro, Tingambato, Taretan, Tuxpan, Irimbo, Jiquilpan, Hidalgo, Queréndaro y Tarímbaro han frenado su crecimiento en cuanto a superficie sembrada, ya que tiene las mismas hectáreas sembradas que en producción y tomando en cuenta que

este cultivo tarda 5 años en producir, podemos deducir que estos municipios ya no ha podido crecer en los últimos años, caso contrario pasa con la mayoría de los municipios donde la cantidad de superficie sembrada es mayor que la cosechada, esto se traduce como que estos municipios tienen plantaciones jóvenes (menores a 5 años) y se encuentran en crecimiento.

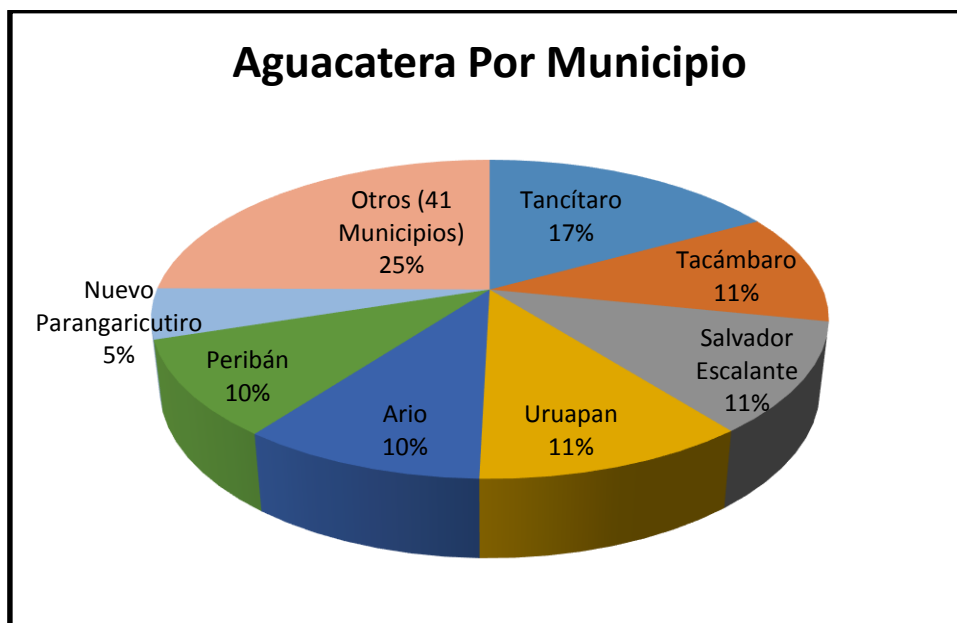


Figura 5.6 Porcentaje de participación municipal en superficie cultivada de aguacatera en el Estado de Michoacán

En la tabla 5.4 se muestra la cantidad de hectáreas de aguacatera que se riegan en cada municipio de Michoacán, vemos que el área depende de la zona (suelo y temperatura) donde se encuentre dicha huerta de aguacate, es decir; en las zonas donde la temperatura no asciende mucho y el suelo conserva la humedad (ejemplo, acuífero Cotija) la cantidad de hectáreas que se riegan son pocas comparadas con las que existen en el lugar.

Para el caso de nuestro estudio se involucran los municipios resaltados en la tabla; para el acuífero Apatzingán con color verde y para el acuífero Cotija con color rojo.

Área de aguacatera con modalidad de riego en el acuífero Apatzingán = 11,320 Has

Área de aguacatera con modalidad de riego en el acuífero Cotija = 8,173 Has

Se considera que 3,000 Has de riego del municipio de Uruapan están sobre el acuífero Cotija, el resto en el acuífero Uruapan.

ESTADO Michoacán, Ciclo: Perennes 2014, Modalidad: Riego, Aguacate

Municipio	Sup. Sembrada	Sup. Cosechada	Producción	Rendimient o	PMR	Valor Producción
	(Ha)	(Ha)	(Ton)	(Ton/Ha)	(\$/Ton)	(Miles de Pesos)
Uruapan	9,070.00	9,070.00	91,607.00	10.1	15,348.54	1,406,033.70
Tacámbaro	7,506.00	7,234.00	68,996.18	9.54	14,882.17	1,026,812.83
Salvador Escalante	6,710.00	6,040.00	74,292.00	12.3	14,209.26	1,055,634.34
Tancítaro	6,250.00	6,250.00	63,750.00	10.2	15,540.61	990,713.89
Ario	5,035.00	4,625.00	57,812.50	12.5	14,102.17	815,281.70
Nuevo Parangaricutiro	4,100.00	4,100.00	39,483.00	9.63	15,525.88	613,008.32
Ziracuaretiro	2,515.00	2,515.00	23,389.50	9.3	14,798.21	346,122.73
Tingüindín	1,966.00	1,936.00	23,232.00	12	15,166.58	352,349.99
Acuitzio	1,420.00	972	8,748.00	9	17,000.00	148,716.00
Peribán	1,283.00	1,278.00	14,068.22	11.01	14,836.36	208,721.18
Taretan	905	905	9,050.00	10	14,987.37	135,635.70
Coalcomán de Vázquez Pallares	900	200	2,362.00	11.81	11,745.21	27,742.19
Chilchota	877.67	526.6	4,581.42	8.7	14,773.75	67,684.75
Tingambato	834	834	8,340.00	10	14,026.71	116,982.76
Morelia	784	479	2,874.00	6	14,666.67	42,152.01
Madero	745	380	3,040.00	8	16,506.58	50,180.00
Tangamandapio	687	600	6,600.00	11	15,710.00	103,686.00
Los Reyes	591.6	520	5,200.00	10	14,970.00	77,844.00
Erongarícuaro	485	415	5,104.50	12.3	14,075.52	71,848.49
Zitácuaro	460	426.5	4,648.85	10.9	12,700.32	59,041.88
Cotija	359	330	3,300.00	10	14,859.51	49,036.38
Turicato	309	257	3,212.50	12.5	11,156.90	35,841.54
Tuxpan	260	260	2,184.00	8.4	9,629.86	21,031.61
Tocumbo	226	209	2,612.50	12.5	14,461.08	37,779.57
Tlazazalca	168.81	39.35	314.8	8	13,998.68	4,406.78
Aguililla	70	20	178.4	8.92	11,992.72	2,139.50
Jiquilpan	60	60	432	7.2	10,500.00	4,536.00
Charo	36.7	36.7	135.79	3.7	13,540.54	1,838.67
Juárez	30	26	270.4	10.4	12,545.68	3,392.35

Tzitzio	30	6	13.2	2.2	12,545.45	165.6
Jungapeo	21	21	182.7	8.7	9,477.01	1,731.45
Tarímbaro	20	20	120	6	12,000.00	1,440.00
Ocampo	8.5	8.5	79.9	9.4	12,444.27	994.3
Maravatío	6	6	40.8	6.8	9,840.00	401.47
Zinapécuaro	5	5	15	3	13,466.66	202
Álvaro Obregón	2	2	8	4	14,000.00	112
Copándaro	2	2	6	3	13,000.00	78
	54,738.28	50,614.65	530,285.16	10.48	14,862.42	7,881,319.71

Tabla 5.4 Área de riego en aguacateras por municipio en el Estado de Michoacán

En la tabla 5.5 hacemos una comparación a nivel municipal, donde dividimos el área de riego entre superficie sembrada, esto nos da como resultado un Coeficiente de riego municipal (Crm), el cual lo subdividimos en tres categorías: de 0 a 0.33 lo clasificamos como un municipio donde es rentable el cultivo del aguacate desde el punto de vista hidrológico, ya que solo una tercera parte o menos de la superficie sembrada se riega, la segunda categoría de 0.33 a 0.67, es un municipio con gran demanda de agua para riego, y la tercer categoría de 0.67 a 1.00, son municipios con exagerada demanda de agua para riego, donde prácticamente se riega toda el área de plantación, municipios poco factibles para el cultivo del aguacate desde el punto de vista hidrológico.

Municipio	Sup. Sembrada	Riego	% de Área de Riego Municipal	Crm
	(Ha)	(Ha)		
Tancítaro	21,600.00	6,250.00	29	0.29
Tacámbaro	14,232.00	7,506.00	53	0.53
Salvador Escalante	14,194.00	6,710.00	47	0.47
Uruapan	14,030.00	9,070.00	65	0.65
Ario	12,536.00	5,035.00	40	0.40
Peribán	12,393.00	1,283.00	10	0.10
Nuevo Parangaricutiro	6,500.00	4,100.00	63	0.63
Ziracuaretiro	3,770.00	2,515.00	67	0.67
Los Reyes	3,769.60	591.60	16	0.16
Tingambato	3,036.00	834.00	27	0.27
Turicato	2,684.00	309.00	12	0.12

Tingüindín	2,281.00	1,966.00	86	0.86
Tangamandapio	1,932.00	687.00	36	0.36
Tangancícuaro	1,812.56	S/D	S/D	S/D
Acuitzio	1,638.85	1,420.00	87	0.87
Zitácuaro	1,238.00	460.00	37	0.37
Madero	1,148.25	745.00	65	0.65
Cotija	919.00	359.00	39	0.39
Taretan	905.00	905.00	100	1.00
Coalcomán de Vázquez Pallares	900.00	900.00	100	1.00
Chilchota	877.67	877.67	100	1.00
Morelia	784.00	784.00	100	1.00
Purépero	726.56	S/D	S/D	S/D
Tocumbo	526.00	226.00	43	0.43
Erongarícuaro	485.00	485.00	100	1.00
Apatzingán	448.82	S/D	S/D	S/D
Tuxpan	312.00	260.00	83	0.83
Pátzcuaro	211.00	S/D	S/D	S/D
Susupuato	200.00	S/D	S/D	S/D
Tlazazalca	168.81	168.81	100	1.00
Huiramba	94.00	S/D	S/D	S/D
Irimbo	92.00	S/D	S/D	S/D
Charapan	90.00	S/D	S/D	S/D
Quiroga	73.00	S/D	S/D	S/D
Aguililla	70.00	70.00	100	1.00
Ocampo	69.50	8.50	12	0.12
Zinapécuaro	65.00	5.00	8	0.08
Jiquilpan	60.00	60.00	100	1.00
Charo	36.70	36.70	100	1.00
Juárez	30.00	30.00	100	1.00
Tzitzio	30.00	30.00	100	1.00
Jungapeo	23.50	21.00	89	0.89
Hidalgo	22.00	S/D	S/D	S/D
Queréndaro	20.00	S/D	S/D	S/D
Tarímbaro	20.00	20.00	100	1.00
Tzintzuntzan	17.00	S/D	S/D	S/D
Maravatío	8.25	6.00	73	0.73
Álvaro Obregón	2.00	2.00	100	1.00
Copándaro	2.00	2.00	100	1.00
	127,084.07	54,738.28	43	0.43

Tabla 5.5 Porcentaje de área de riego municipal

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. MATERIALES

En el desarrollo de este estudio fue necesario la obtención y manipulación de múltiples materiales y herramientas, entre ellas información climatológica de la zona en estudio y cercana a esta, la utilización de cartas vectoriales con diversa información provenientes del INEGI, información relacionada con los cultivos existentes en la zona de estudio, principalmente los “coeficientes de cultivo” utilizados para conocer los usos consuntivos de los diferentes bloques de cobertura vegetal, lo anterior para así poder conocer las características físicas, geográficas y climáticas en los acuíferos Apatzingán y Cotija. Para el manejo de la información tanto vectorial como climática, se usó como herramienta el software ArcView 3.2 que es un sistema de información geográfica (SIG) desarrollado por la empresa ESRI.

6.1.1. Información Meteorológica

La información meteorológica fue obtenida de la base de datos CLICOM (Climate Computing Project), que es un sistema de software de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas y administrada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en México, por medio del programa SIHIMAX, que es un software desarrollado en el departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil perteneciente a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, el cual nos ayuda a conocer la ubicación espacial de cada estación climatológica en la república mexicana, así como toda la información que contiene cada estación meteorológica, este programa nos ayuda a hacer una elección preliminar de las estaciones a utilizar en el estudio así como a descargar la información climática directamente a hojas de Excel para hacer la manipulación de datos y hacer una elección final de las mejores estaciones para un estudio en específico.

Para un adecuado análisis climatológico en los acuíferos Apatzingán y Cotija se utilizaron 35 estaciones, extrayendo la información de temperatura y precipitación a un intervalo de tiempo mensual, con los datos de precipitación pudimos conocer la lámina de lluvia para cada mes y con los datos de temperatura nos apoyamos para calcular demandas de agua por los distintos bloques de cobertura vegetal, con esta información en combinación con las cartas de tipo y uso de suelo se pudo estimar los volúmenes de precipitación, escurrimiento, infiltración, uso consuntivo y recarga para ambos acuíferos a una escala de tiempo mensual.

Es importante mencionar que la forma en que se trabajó en el programa ArcView 3.2 fue a base de operaciones entre mapas y que se usaron los dos acuíferos juntos para cada operación en particular, pudiendo separar a conveniencia una vez realizada la operación por acuífero o municipio o algún sector de importancia en el estudio como lo es la franja aguacatera.

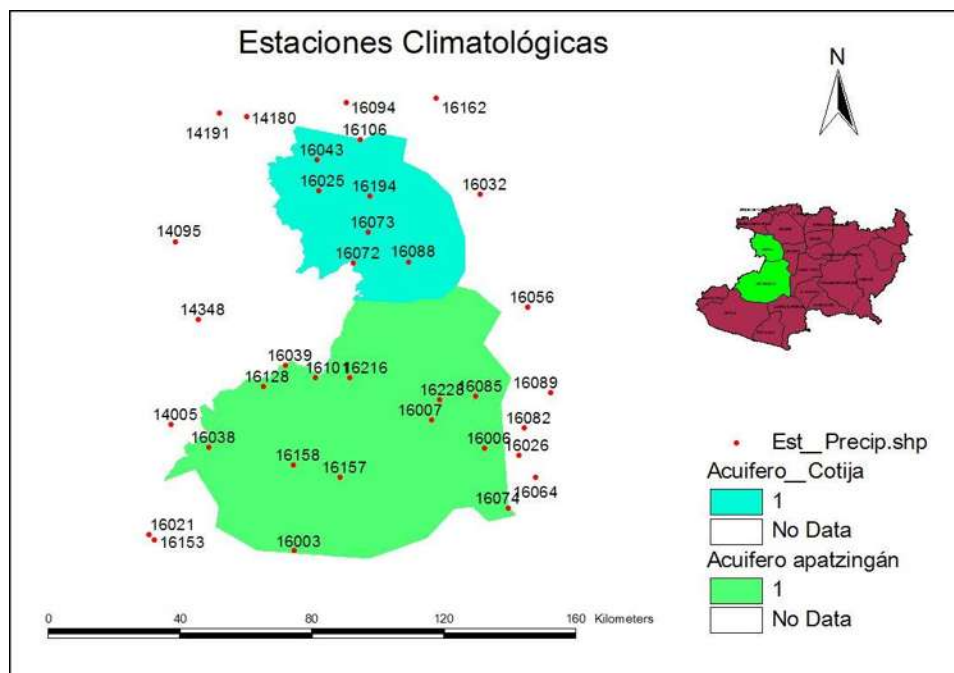


Figura 6.1 Estaciones Climatológicas ubicadas dentro o cerca de los Acuíferos Apatzingán y Cotija

En la tabla 6.1 tenemos las estaciones utilizadas para este estudio, estas estaciones fueron seleccionadas a detalle por su información temporal y por su localización espacial, resultando con información consistente y confiable las siguientes 35 estaciones.

Codigo	Nombre	Longitud	Latitud	Altitud
14095	MANUEL M DIEGUEZ CFE	-103.083333	19.5833333	1225
14191	VALLE DE JUAREZ SMN	-102.95	19.9333333	1950
16025	COTIJA	-102.666667	19.7166667	2341
16032	CHARAPAN	-102.2	19.7	2407
16039	PIEDRAS BLANCAS	-102.767833	19.2415	419
16043	EL PUERTO	-102.668833	19.8006667	1640
16056	JICALAN CFE	-102.068667	19.3895	1610
16072	CHORROS DEL VARAL CFE	-102.568833	19.5186667	930
16073	LIMONES CFE	-102.5235	19.601	1175
16088	PERIBAN	-102.409	19.5193333	1640
16094	PRESA GUARACHA	-102.584	19.9563333	1580
16106	SAN ANGEL	-102.5425	19.856	1840
16128	TEPACALTEPEC	-102.833333	19.1833333	365
16162	ORANDINO	-102.321667	19.9666667	1580
16194	ETA 039 TOCUMBO	-102.518833	19.7011667	1600
14005	AHUIJULLO	-103.1	19.0838333	820
14348	JILOTLAN	-103.018333	19.369	740
16003	AGUILILLA	-102.75	18.7333333	933
16006	ANTUNEZ	-102.2	19.0075	360
16007	APATZINGAN SMN	-102.3505	19.0865	320
16021	COALCOMAN CFE	-103.166667	18.7833333	1020
16064	LA PASTORIA CFE	-102.054	18.9248333	221
16074	PANCHES CFE	-102.133333	18.8425	207
16085	PARACUARO	-102.221667	19.15	597
16153	COALCOMAN DGE	-103.151667	18.7683333	1086
16228	ACAHUATO	-102.326167	19.142	227
16157	CHILA	-102.616667	18.9333333	278
16158	EL CAJON	-102.75	18.9691667	296
16038	EL CARRIZO	-102.993	19.0196667	520
16026	CUATRO CAMINOS	-102.101833	18.9861667	672
16101	PUNTA DE AGUA	-102.683333	19.2066667	384
16216	BUENAVISTA II	-102.585167	19.2056667	450
16082	NUEVA ITALIA CFE	-102.085167	19.0593333	391
16089	PLANTA EL COBANO CFE	-102.006333	19.1556667	643
14180	QUITUPAN	-102.872167	19.9226667	1660

Tabla 6.1 Estaciones Climatológicas

6.1.2. Información Vectorial

La información vectorial fue adquirida en el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la cual se puede dividir en tres grupos: Uso de suelo, Edafología y Modelos Digitales de Elevación (MDE's).

6.1.2.1. Modelos Digitales de Elevación

Esta información se utilizó para generar un mapa de altitud y con este buscar las zonas que cumplen con el parámetro que necesita el cultivo del aguacate que oscila entre los 950 y 2400 Msnm (Sánchez, 1999; Vieira, et al., 2001). Se necesitaron un total de 18 MDE's escala 1:50,000 con datum ITRF92 para cubrir toda el área de ambos acuíferos.

MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (MDE)		
CODIGO	NOMBRE	ESTADO
E13B67	Aguililla	Michoacán
E13B48	Apatzingán	Michoacán
E13B58	Chila	Michoacán
E13B56	Coalcomán	Michoacán
E13B57	Dos Aguas	Michoacán
E13B59	Gambara	Michoacán
E13B27	Santa María Del Oro	Jalisco
E13B37	Rancho Nuevo	Jalisco
E13B67	Aguililla	Michoacán
E13B17	Jiquilpan	Michoacán
E13B28	Los Reyes	Michoacán
E13B49	Nueva Italia	Michoacán
E13B29	Paracho	Michoacán
E13B38	Tancítaro	Michoacán
E13B18	Tarecuato	Michoacán
E13B47	Tepalcatepec	Michoacán
E13B68	Tumbiscatío	Michoacán
E13B39	Uruapan	Michoacán

Tabla 6.2 Clave de cartas de Modelos Digitales de Elevación

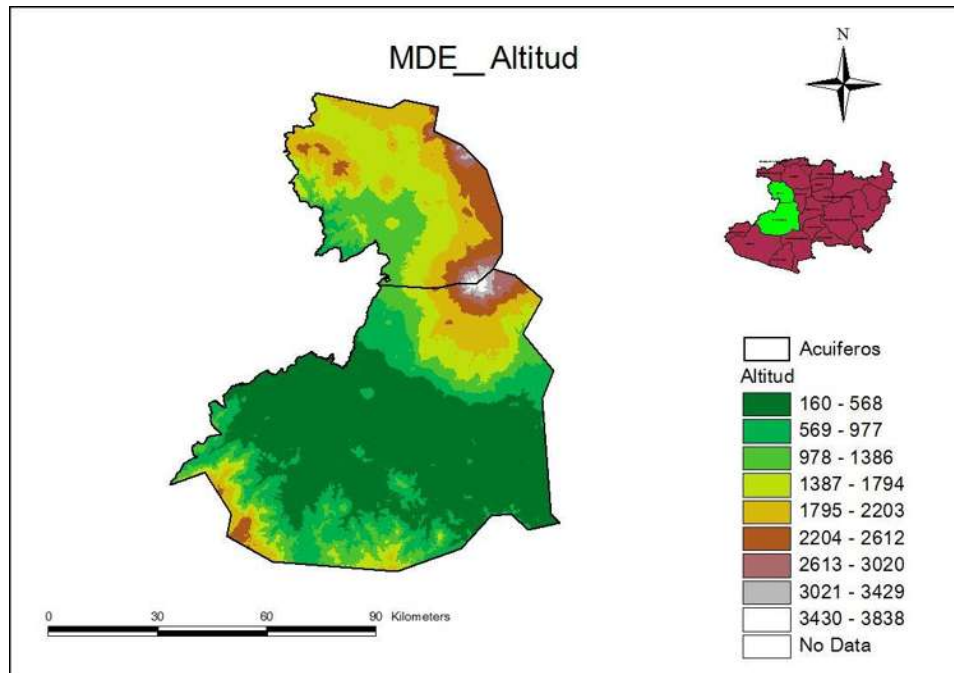


Figura 6.2 Mapa de Altitud en los Acuíferos Apatzingán y Cotija

6.1.2.2. Uso de Suelo y Edafología

Los conjuntos de datos vectoriales tanto de uso de suelo como edafología se muestran a una escala 1:250,000. La información del uso de suelo corresponde a la serie IV del conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación, serie desarrollada en el periodo 2007-2010 por el INEGI. El conjunto de datos edafológicos corresponde a la serie II elaborada entre el 2002-2007. Las cartas utilizadas para este estudio fueron las E1303 y E1306 ubicadas en el estado de Michoacán.

Las cartas de uso de suelo nos ayudan a representar de forma gráfica, la cobertura y distribución de los diferentes usos que se le da al suelo. Por otra parte las cartas edafológicas nos dan una descripción del suelo, mostrándonos sus características morfológicas y propiedades físicas y químicas.

Para el caso de la franja aguacatera, fue determinada por medio de imágenes satelitales, trabajo realizado por el cuerpo académico Gestión Integral del Agua (GIA) del departamento de hidráulica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en el año 2007, se actualizó la carta de uso de suelo con esta información ya que no existe otra más reciente.

Con los conjuntos uso de suelo y edafología se puede calcular el parámetro K utilizado en el método del coeficiente de escurrimiento por la Norma Oficial Mexicana 011 de la Comisión Nacional del Agua (NOM-011-CNA, 2000).

6.2. METODOLOGÍA

Para determinar el impacto ambiental, actual y futuro dentro de los acuíferos Apatzingán y Cotija generado por la franja aguacatera, consistirá en una comparación entre las condiciones presentes en la actualidad, donde se analizara todos los usos de suelo existentes dentro de los acuíferos, pero poniendo mayor énfasis en la zona de cultivo de aguacate para saber las afectaciones que ha dejado la degradación de los bosques de coníferas, por la modificación inducida por el hombre en la vegetación natural. Para determinar las afectaciones futuras que se podrían producir, se proyectara un posible crecimiento de la superficie cubierta con dicho cultivo, dado que en el acuífero Cotija se presentan las condiciones idóneas para la producción de este fruto.

El procedimiento a seguir estará en función del balance hídrico que es la relación de los procesos hidrológicos, precipitación, escurrimiento, infiltración y por ultimo recarga, que nos permite determinar la disponibilidad de agua subterránea en una unidad hidrogeológica y de agua superficial en una cuenca hídrica. Además el balance hídrico constituye uno de los insumos más importantes en el manejo de los recursos hídricos y en la evaluación tanto del agua como a los procesos asociados a este ciclo natural. Cabe destacar que el balance hídrico se realizará en cada acuífero por separado, pudiendo operarlos juntos siempre y cuando se trate del mismo proceso. En la figura 6.3 se muestra la metodología a seguir para encontrar el volumen de recarga para condiciones señaladas.

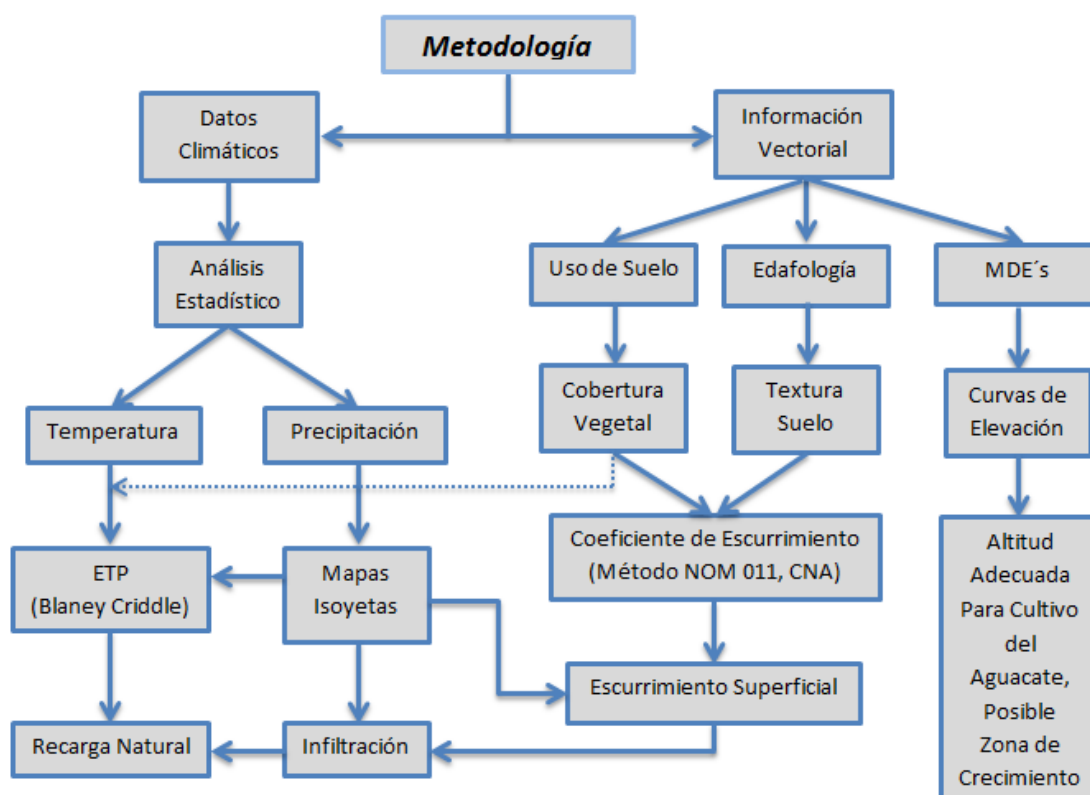


Figura 6.3 Metodología para el cálculo de la recarga natural

Para finalizar el proceso se determinara la disponibilidad de agua actual en la zona aguacatera, y en función de la demanda hídrica del cultivo del aguacate así como de los parámetros de elevación, tipo de suelo, temperatura y precipitación se buscara un posible crecimiento de la franja aguacatera presente en los acuíferos Apatzingán y Cotija, pudiendo evaluar el impacto que esto causaría.

6.2.1. Elaboración de las Coberturas Vegetales en los Acuíferos

6.2.1.1. Situación actual

Para conocer la condición actual de los diversos usos de uso de suelo, presentes en los acuíferos Apatzingán y Cotija, se utilizara información de la **serie IV del conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación**, serie desarrollada en el periodo 2007-2010 por el INEGI. Con el objetivo de detallar en lo mayor posible la franja aguacatera, se usó la información vectorial generada por el cuerpo académico “Gestión Integral del Agua”, del

departamento de hidráulica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, la cual fue determinada por medio de imágenes satelitales.

Lo anterior para crear un mapa con información más detallada de la cobertura del suelo presente en los acuíferos en estudio y así poder analizar más a detalle el impacto ambiental que está ocasionando la franja aguacatera en la recarga de los acuíferos, así como proponer un escenario de crecimiento de dicha zona para ver el impacto que esta ocasionaría.

En figura 6.4 se muestra el mapa de uso de suelo actual en los acuíferos Apatzingán y Cotija, observándose una gran cantidad de bosque, con sembradíos agrícolas distribuidos por toda la superficie de los acuíferos, la franja aguacatera zona de importancia de este estudio, se localiza en la parte norte del acuífero de Apatzingán y a lo largo de todo el acuífero de Cotija rodeada en gran porcentaje por zonas boscosas y agrícolas.

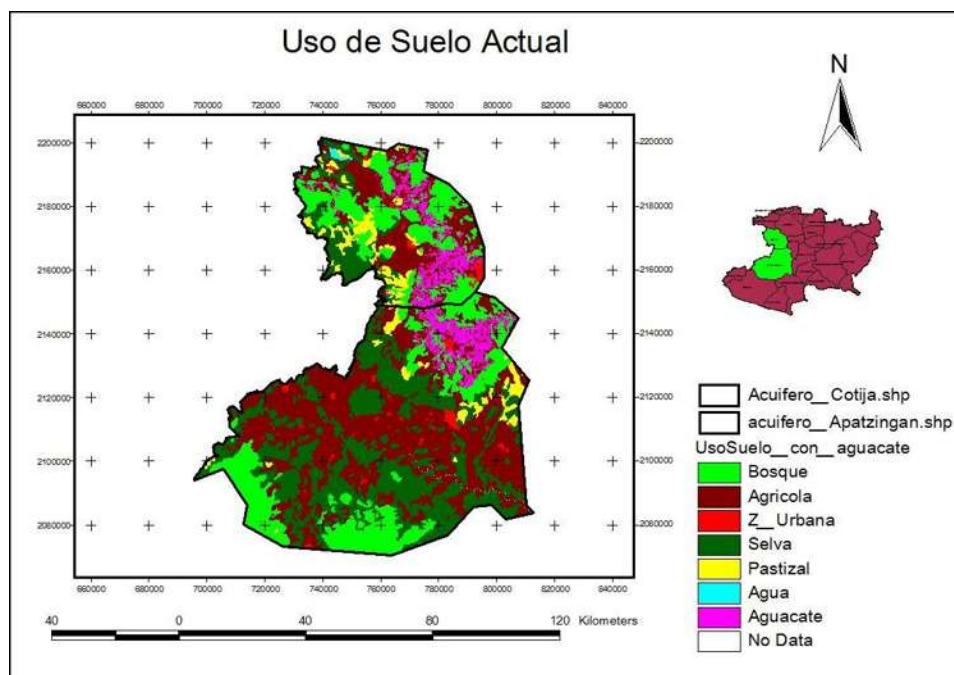


Figura 6.4 Mapa de uso de suelo actual en los Acuíferos Apatzingán y Cotija

Uso de suelo	Área Acuífero Apatzingán			% de uso
	m ²	Has	Km ²	
Bosque	988659022	98865.9022	988.659022	17.39
Agrícola	2375979191	237597.919	2375.97919	41.78
Zona Urbana	60190305	6019.0305	60.190305	1.06
Selva	1880725730	188072.573	1880.72573	33.07
Pastizal	142314725	14231.4725	142.314725	2.50
Agua	7355521	735.5521	7.355521	0.13
Aguacate	231144515	23114.4515	231.144515	4.06
TOTAL	5686369009	568636.901	5686.36901	100.00

Tabla 6.3 Distribución vegetal en el Acuífero Apatzingán

Uso de suelo	Área Acuífero Cotija			% de uso
	m ²	Has	Km ²	
Bosque	722766552	72276.6552	722.766552	32.68
Agrícola	672228275	67222.8275	672.228275	30.39
Zona Urbana	43741668	4374.1668	43.741668	1.98
Selva	318779337	31877.9337	318.779337	14.41
Pastizal	200344434	20034.4434	200.344434	9.06
Agua	11768674	1176.8674	11.768674	0.53
Aguacate	242254530	24225.453	242.25453	10.95
TOTAL	2211883470	221188.347	2211.88347	100.00

Tabla 6.4 Distribución vegetal en el Acuífero Cotija

6.2.1.2. *Situación Futura*

En esta condición fue necesario determinar los límites del máximo crecimiento posible de la franja aguacatera, en función de sus condiciones agroecológicas e Hídricas, las cuales son Altitud, Temperatura, Tipo de suelo y Precipitación; características de máxima importancia para el desarrollo del cultivo.

a) Altitud

El aguacate tiene una amplia adaptación a diferentes altitudes, dependiente de la raza hortícola. En las áreas donde el aguacate es nativo, la raza antillana prospera desde el nivel del mar hasta 800 msnm, la raza Guatemalteca se adapta a un rango que oscila del nivel del mar hasta 1200 msnm, y la raza Mexicana de 950 a 2250 msnm. (Campos Campos, 2012).

Dependiendo de la raza de origen del aguacate, este se puede establecer desde el nivel del mar hasta los 3000 msnm de altitud, aunque en la práctica huertos a más de 2400 msnm se consideran fuera del área apropiada para una producción rentable.

Para el caso de nuestra zona de estudio la experiencia y el conocimiento de la misma nos muestra que el rango de altitud para este cultivo oscila entre los 950 msnm y los 2400 msnm, siendo el rango óptimo entre los 1500 y los 2000 msnm.

Para determinar la altitud se trabajó con los Modelos Digitales de Elevación (MDE), seleccionando la superficie con altitudes entre los 950 y 2400 msnm dentro del área de los acuíferos.

En la figura 6.5 se muestra con color verde las zonas que cumplen con el rango de altitud comprendido entre los 950 y los 2400 msnm, se puede apreciar que el acuífero Cotija casi cumple en su totalidad; es por esto que es el acuífero número uno en producción del aguacate seguido por el acuífero Apatzingán.



durante el invierno. Temperatura superior a 32 °C reduce la asimilación de nutrientes y el grado de fertilidad del polen (Lomas, 1988; Jasso, 1989; Galán, 1988; y Avilán, 1996, citado por Marín y Lelys, 2005).

El mayor amarre de frutos de aguacate ocurre con temperaturas entre 20 y 25 °C, en tanto que temperatura superior a 28 °C provoca la abscisión de flores individuales (Lovatt, 1990).

El aguacate es un frutal de hoja persistente, y la principal condicionante son las bajas temperaturas por el problema de las heladas. La resistencia al frío de la variedad “Hass” es de -1.1 °C. Por otro lado, temperatura en época de floración, menores a 20 °C en el día y 10 °C en la noche, pueden provocar una reducción considerable en el cuajado de frutos (Gardiazabal, 1990).

Para esta condición se calculó la temperatura media anual que se presenta en los acuíferos usando la información de las estaciones climatológicas circundantes al área de estudio.

Para el acuífero Cotija tenemos temperaturas medias anuales que oscilan entre los 7 y los 18 °C, temperaturas promedio mensuales mínimas de 6 °C que se presentan en enero y máximas de 29 °C que se presentan en mayo, aunque es de notarse que se trata del estudio de una zona ampliamente variable en sus condiciones climatológicas, topográficas y de suelo; por ejemplo las estaciones climatológicas San Diego, Charapan y San Ángel; códigos 14124, 16032 y 16106 respectivamente presentan temperaturas mínimas en enero, que es el mes más frío del año de 3.8, 1.6 y -0.8 °C. Esta zona tiene sus temperaturas máximas presentes en el mes de mayo, con temperatura promedio de 29.3 °C y la estación que registra las máximas temperaturas en el lugar es la de Chorros del Varal CFE con una temperatura de 36 °C

En la tabla 6.5 se muestran las temperaturas medias mensuales, mínimas mensuales y máximas mensuales para las estaciones climatológicas que se utilizaron en el estudio del acuífero Cotija, estos datos de temperatura fueron obtenidos de la base de datos CLICOM y pertenecen a estaciones con más de veinte años de estudio.

TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES, ACUÍFERO COTIJA																	
Codigo	Nombre	X	Y	Z	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	annual
14124	SAN DIEGO	-102.834	19.8865	1620	8.9	8.7	11.2	14.7	16.7	16.9	17.0	16.0	15.8	14.9	11.1	8.7	13.4
16019	CERRITO PELON	-102.7	19.9666667	1754	6.7	9.7	11.3	15.1	17.5	18.2	15.3	14.7	16.2	14.4	10.4	8.4	13.1
16025	COTIJA	-102.666667	19.7166667	2341	12.4	14.0	15.6	17.9	19.6	19.1	18.0	18.1	17.8	16.6	15.4	13.6	16.5
16032	CHARAPAN	-102.2	19.7	2407	5.4	5.0	5.9	7.8	9.5	10.3	9.8	10.0	10.1	8.8	6.7	6.3	7.9
16043	EL PUERTO	-102.668833	19.8006667	1640	6.1	7.2	9.3	12.4	15.6	17.3	16.3	15.8	15.5	13.4	10.1	7.4	12.2
16072	CHORROS DEL VARAL CFE	-102.568833	19.5186667	930	13.1	14.2	15.7	18.2	20.1	20.9	19.5	19.1	18.8	17.6	15.9	14.6	17.3
16073	LIMONES CFE	-102.5235	19.601	1175	11.5	11.8	13.4	16.5	19.2	20.4	19.3	18.7	18.0	16.7	14.7	13.0	16.1
16088	PERIBAN	-102.409	19.5193333	1640	12.4	14.9	16.5	18.8	19.7	19.5	19.0	19.0	17.7	17.6	16.7	16.0	17.3
16106	SAN ANGEL	-102.5425	19.856	1840	2.3	2.9	4.9	7.2	9.4	10.4	9.8	9.5	9.4	7.6	4.7	3.0	6.7
16194	ETA 039 TOCUMBO	-102.518833	19.7011667	1600	8.7	9.4	10.9	13.1	14.8	15.7	15.1	15.6	15.7	14.7	12.4	10.4	13.0
16251	PATAMBAN	-102.286667	19.8015	2140	4.4	9.2	10.5	12.9	14.8	16.1	15.9	14.9	14.9	13.4	10.9	8.6	12.2
PROMEDIO				1735.2	8.3	9.7	11.4	14.0	16.1	16.8	15.9	15.6	15.4	14.1	11.7	10.0	13.3

TEMPERATURAS MINIMAS MENSUALES, ACUÍFERO COTIJA																	
Codigo	Nombre	X	Y	Z	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	annual
14124	SAN DIEGO	-102.834	19.8865	1620	3.8	4.3	5.3	7.4	7.9	7.1	6.6	5.6	6.4	5.9	4.9	4.2	5.8
16019	CERRITO PELON	-102.7	19.9667	1754	5.6	8.3	8.2	12.7	15.2	16.1	12.5	10.5	14.2	12.5	7.5	6.4	10.8
16025	COTIJA	-102.66667	19.7167	2341	7.8	8.7	9.9	11.2	13	13.4	12.8	12.9	12.8	11.5	9.7	8.1	11.0
16032	CHARAPAN	-102.2	19.7	2407	1.6	1.9	2.9	4.6	6.3	7.5	7.1	7	7.4	6	4	2.5	4.9
16043	EL PUERTO	-102.66883	19.80067	1640	4.1	4.8	6.8	9.4	12.1	14.6	13.9	13.5	13.3	10.8	7.3	5.2	9.7
16072	CHORROS DEL VARAL CFE	-102.56883	19.51867	930	12.5	13.1	14.5	16.8	18.7	19.6	18.3	17.9	17.6	16.5	14.8	13.6	16.2
16073	LIMONES CFE	-102.5235	19.601	1175	10.2	10.2	11.3	13.2	15.4	17.7	17	16.6	16.4	14.9	12.9	11.4	13.9
16088	PERIBAN	-102.409	19.51933	1640	9	9.5	10.4	11.7	13.5	13.7	13.6	13.2	12.8	12.1	10.9	9.9	11.7
16106	SAN ANGEL	-102.5425	19.856	1840	-0.8	0	2	3.9	6	7.4	6.9	6.6	6.4	4.6	1.7	0	3.7
16194	ETA 039 TOCUMBO	-102.51883	19.70117	1600	6	6.3	7.5	9.1	10.5	11.9	11.2	11.9	12.4	11	8.7	7.3	9.5
16251	PATAMBAN	-102.28667	19.8015	2140	5.9	5.7	7.1	8.5	9	10.3	9.3	9.8	11	8.8	6.7	5.6	8.1
PROMEDIO				1735.2	6.0	6.6	7.8	9.9	11.6	12.7	11.7	11.4	11.9	10.4	8.1	6.7	9.6

TEMPERATURAS MÁXIMAS MENSUALES, ACUÍFERO COTIJA																	
Codigo	Nombre	X	Y	Z	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	annual
14124	SAN DIEGO	-102.834	19.8865	1620	23.1	24.7	27.3	29.7	30.6	27.3	25.8	25.2	25.5	25.3	24.1	23.1	26.0
16019	CERRITO PELON	-102.7	19.9667	1754	24	24	27.4	30.6	28.8	28.7	24.2	24.6	25.6	25	22.7	22.8	25.7
16025	COTIJA	-102.667	19.7167	2341	23.3	24.7	26.5	28	29.2	26.7	25	24.9	24.5	24.3	24	23	25.3
16032	CHARAPAN	-102.2	19.7	2407	18.5	19.3	20.3	21.6	22.4	20.4	19.2	19.8	19.8	19.7	19.7	19.3	20.0
16043	EL PUERTO	-102.669	19.8007	1640	23.1	24.5	27.1	29.2	30.1	27.3	24.7	24.8	24.4	24.6	24.3	23	25.6
16072	CHORROS DEL VARAL CFE	-102.569	19.5187	930	30.6	31.9	34	36	36	32.7	29.5	29.5	29.3	30.6	31.2	30.4	31.8
16073	LIMONES CFE	-102.524	19.601	1175	26	27.5	29.7	31.5	31.9	28.7	26.2	26.6	26.7	27.4	27.6	26.3	28.0
16088	PERIBAN	-102.409	19.5193	1640	25.5	27	28.9	31.3	32.1	29	26.9	27.3	26.4	26.9	26.8	26.2	27.9
16106	SAN ANGEL	-102.543	19.856	1840	17.9	19.3	21.6	23.4	24.3	21.7	19	19	19.2	19.8	19.4	17.7	20.2
16194	ETA 039 TOCUMBO	-102.519	19.7012	1600	24.7	26.2	28.6	30.5	31.1	28	25.4	25.5	25.5	25.9	25.7	25.1	26.9
16251	PATAMBAN	-102.287	19.8015	2140	21.4	23.3	23.6	25.6	26.1	24.3	23.5	22	22.2	22	22.5	20.8	23.1
PROMEDIO				1735.2	23.5	24.8	26.8	28.9	29.3	26.8	24.5	24.5	24.5	24.7	24.4	23.4	25.5

Tabla 6.5 Temperaturas medias, mínimas y máximas mensuales para el acuífero Cotija

Para el acuífero Apatzingán tenemos temperaturas medias anuales que oscilan entre los 15 y los 24 °C, temperaturas promedio mensuales mínimas de 15 °C que se presentan en enero y máximas de 37 °C que se presentan en mayo. En la tabla 6.6, 6.7 y 6.8 se muestran las temperaturas medias mensuales, mínimas mensuales y máximas mensuales, respectivamente, para las estaciones climatológicas que se utilizaron en el estudio del acuífero Apatzingán, estos datos de temperatura fueron obtenidos de la base de datos CLICOM y pertenecen a estaciones con más de veinte años de estudio.

TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES, ACUÍFERO APATZINGÁN																	
Codigo	Nombre	X	Y	Z	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	annual
14005	AHUIJULLO	-103.1	19.084	820	12.47	13.82	14.48	17.56	20.22	21.24	20.5	20.3	20.14	19.8	17.2	14.87	17.7
14092	OLIVOS CFE	-102.87	19.2	420	15.57	18.03	19.78	22.43	24.89	25.2	23.83	23.66	23.46	22.87	21.43	19.54	21.7
16003	AGUILILLA	-102.75	18.733	933	16.17	18.01	19.75	21.71	22.39	22.34	21.18	21.16	21.03	21.23	19.71	18.35	20.3
16006	ANTUNEZ	-102.2	19.008	360	18.87	20.4	22.4	24.11	24.97	24.58	23.83	23.72	23.45	23.17	21.99	20.23	22.6
16007	APATZINGAN SMN	-102.35	19.087	320	18.48	19.92	21.91	23.95	26.09	25.96	24.39	24.11	23.89	23.59	21.89	19.55	22.8
16011	BUENAVISTA I	-102.59	19.205	450	17.09	19.12	21.18	23.72	25.65	25.11	24.02	23.43	23.14	22.78	20.8	19.41	22.1
16026	CUATRO CAMINOS	-102.1	18.986	672	14.3	18.24	20.18	22.19	23.62	24.14	23.28	23.05	22.86	22.33	20.7	19.26	21.2
16038	EL CARRIZO	-102.99	19.02	520	14.12	17.88	19.44	21.56	22.46	23.11	22.13	22.22	21.67	21.19	19.39	17.49	20.2
16039	PIEDRAS BLANCAS	-102.77	19.242	419	17.69	19.75	21.08	23	24.85	25.26	23.73	23.52	23.42	22.96	21.62	20.07	22.2
16056	JICALAN CFE	-102.07	19.39	1610	9.2	9.77	11.62	14.82	16.95	17.77	16.95	16.43	16.16	14.91	12.86	10.88	14.0
16074	PANCHES CFE	-102.13	18.843	207	15.67	16.65	18.38	21.68	24.95	26.44	24.96	24.69	24.17	23.08	20.25	17.51	21.5
16082	NUEVA ITALIA CFE	-102.09	19.059	391	14.09	20.08	21.37	23.15	24.96	25	23.96	23.74	23.34	22.88	21.93	20.35	22.1
16085	PARACUARO	-102.22	19.15	597	12	18.69	19.67	21.97	23.15	23.12	22.26	22.1	21.71	21.7	20.55	18.8	20.5
16090	PIEDRAS BLANCAS CFE	-102.77	19.241	400	16.71	19.78	21.18	23.18	25.14	25.44	23.82	23.55	23.48	22.95	21.71	20.14	22.3
16101	PUNTA DE AGUA	-102.68	19.207	384	15.23	18.59	20.16	23.21	25.62	26.3	24.62	24.16	24.02	23.52	20.91	18.87	22.1
16128	TEPACALTEPEC	-102.83	19.183	365	18.24	20.48	22.05	24.16	26.22	26.7	25.64	25.21	25.16	24.44	22.74	20.77	23.5
16149	APATZINGAN DGE	-102.35	19.083	332	16.83	18.77	21.05	23.84	25.99	26.1	24.25	23.83	23.62	23.41	21.04	18.86	22.3
16154	COALCOMAN SMN	-103.15	18.767	1086	13.18	13.83	15.34	17.15	19.98	21.85	21.1	20.9	21.18	20.06	17.67	15.19	18.1
16156	CHARAPENDO	-102.07	19.267	1013	11.16	15.5	18	20.69	22.1	21.86	20.79	20.85	20.44	19.96	18.25	16.7	18.9
16157	CHILA	-102.62	18.933	278	16.97	19.44	21.18	23.1	24.95	25.2	23.39	23.21	23.03	22.73	21.09	19.62	22.0
16158	EL CAJON	-102.75	18.969	296	14.26	18.48	20.34	22.8	25.23	25.48	23.88	23.46	23.47	22.92	20.96	18.81	21.7
16190	ARCEO	-102.27	18.719	320	17.72	19.18	20.36	22.88	24.73	25.44	23.88	23.83	23.38	22.83	20.8	19.92	22.1
16216	BUENAVISTA II	-102.59	19.206	450	12.57	19.84	20.84	23.01	24.59	24.72	23.79	23.48	23.24	23.11	21.89	19.86	21.7
16228	ACAHUATO	-102.33	19.142	227	15.96	17.4	18.7	20.58	21.72	21.49	20.33	20.17	19.98	19.7	18.44	17.32	19.3
16259	TZINDIO	-102.11	19.402	1778	11.3	11.47	11.41	13.01	13.87	16.1	16.01	15.46	15.2	14.51	13.08	12.06	13.6
PROMEDIO				585.9	15.0	17.7	19.3	21.6	23.4	23.8	22.7	22.4	22.2	21.7	20.0	18.2	20.7

Tabla 6.6 Temperaturas medias mensuales por estación utilizada en el acuífero Apatzingán

TEMPERATURAS MÍNIMAS MENSUALES, ACUÍFERO APATZINGÁN																	
Codigo	Nombre	X	Y	Z	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	annual
14005	AHUJULLO	-103.1	19.08	820	12.2	11.8	12.8	15	17.4	19.4	18.9	18.7	18.9	18	15.4	13	16.0
14092	OLIVOS CFE	-102.9	19.2	420	16.6	16.7	18.3	20.1	22	22.4	21.6	21.7	21.8	21.1	19.8	18.1	20.0
16003	AGUILILLA	-102.8	18.73	933	15.5	15.5	16.9	18.3	20.1	20.1	19	19	18.3	18.8	17.6	16	17.9
16006	ANTUNEZ	-102.2	19.01	360	15.7	16.6	18.8	20.9	22.1	22	21.1	21.1	20.2	19.5	17.9	16.1	19.3
16007	APATZINGAN SMN	-102.4	19.09	320	16.6	18	19.5	21.5	23.8	24	22.8	22.4	22.4	21.9	20.1	17.6	20.9
16011	BUENAVISTA I	-102.6	19.21	450	16.7	17	18.3	19.8	21.6	22.2	21.2	20.9	21	20.7	18.6	17.1	19.6
16026	CUATRO CAMINOS	-102.1	18.99	672	16.3	16.5	17.6	18.9	20.5	21.6	21.1	21	20.7	20.1	18.4	17	19.1
16038	EL CARRIZO	-103	19.02	520	14.8	16.3	17.4	19	20	21	20.2	20.1	19.7	19.1	17.4	15.7	18.4
16039	PIEDRAS BLANCAS	-102.8	19.24	419	18	18.3	19.4	20.9	22.5	23.4	22.2	22	22	21.6	20.2	18.7	20.8
16056	JICALAN CFE	-102.1	19.39	1610	7.1	7.2	7.9	9.6	11.7	14.5	14.2	14	13.9	12.2	10	8.4	10.9
16074	PANCHES CFE	-102.1	18.84	207	14.5	15.4	16.7	18.9	21.8	24.1	23	22.8	22.7	21.8	19	16.1	19.7
16082	NUEVA ITALIA CFE	-102.1	19.06	391	17.6	17.9	18.7	19.7	21.3	22	21.4	21.3	21.1	20.6	19.6	18.2	20.0
16085	PARACUARO	-102.2	19.15	597	16	16.9	17.4	19.3	20.8	21.2	20.5	20.4	20.3	19.9	18.5	17.1	19.0
16090	PIEDRAS BLANCAS CFE	-102.8	19.24	400	17.9	18.2	19.1	20.3	22.1	23.2	22.1	21.9	22	21.4	20.1	18.5	20.6
16101	PUNTA DE AGUA	-102.7	19.21	384	15.7	16.6	17.9	20.1	22.4	23.5	22.2	22.2	22.2	21.5	18.6	16.8	20.0
16128	TEPACALTEPEC	-102.8	19.18	365	18.5	19.1	20.4	21.8	23.5	24.7	23.9	23.6	23.6	22.9	21.2	19.4	21.9
16149	APATZINGAN DGE	-102.4	19.08	332	16.6	17.6	19.1	20.6	22.4	22.8	21.7	21.7	21.7	21.6	19.4	17.6	20.2
16154	COALCOMAN SMN	-103.2	18.77	1086	10.1	10.4	11.3	12.8	15.6	18.9	18.8	18.3	18.6	17.2	14.3	11.7	14.8
16156	CHARAPENDO	-102.1	19.27	1013	14	14	14.7	15.7	16.8	18.1	17.7	17.6	17.5	17.1	16.1	14.8	16.2
16157	CHILA	-102.6	18.93	278	16.5	17.3	18.7	20.1	22.1	22.7	21.2	21.1	21.1	20.8	18.9	17.2	19.8
16158	EL CAJON	-102.8	18.97	296	15.7	16	18.3	20	22.4	22.8	21.6	21.3	21.4	20.7	18.5	16.6	19.6
16190	ARCEO	-102.3	18.72	320	16.2	16.6	17.2	19.2	21	22.6	21.7	21.6	21.3	20.9	19	18.1	19.6
16216	BUENAVISTA II	-102.6	19.21	450	16.9	17.3	18.3	19.8	21.7	22.1	21.1	21.1	21.1	20.3	19.3	18	19.8
16228	ACAHUATO	-102.3	19.14	227	14.3	14.5	15.2	16.9	18.2	18.9	17.9	17.9	17.7	17.2	16.2	15.3	16.7
16259	TZINDIO	-102.1	19.4	1778	8.2	7.4	8.2	8.5	10	12.4	12.8	12.6	12.4	11.2	10.1	8.4	10.2
PROMEDIO				585.9	15.1	15.6	16.7	18.3	20.2	21.2	20.4	20.3	20.1	19.5	17.8	16.1	18.4

Tabla 6.7 Temperaturas mínimas mensuales por estación utilizada en el acuífero Apatzingán

TEMPERATURAS MÁXIMAS ACUÍFERO APATZINGÁN																	
Codigo	Nombre	X	Y	Z	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	annual
14005	AHUJULLO	-103.1	19.08	820	34.3	36	38.3	39.4	39.8	37.7	35.8	35.4	35.6	35.6	35.9	34.4	36.5
14092	OLIVOS CFE	-102.87	19.2	420	33	34.6	36.7	39	39.6	36.8	34.9	34.7	34.2	34.2	34.8	33.7	35.5
16003	AGUILILLA	-102.75	18.73	933	26.6	27.7	30.3	31.7	32.2	29.8	27.4	27.2	26.7	27.3	27.2	26.3	28.4
16006	ANTUNEZ	-102.2	19.01	360	32.5	33.7	35.6	37.3	38	35.8	33.3	33	32.4	33.1	33.4	32.8	34.2
16007	APATZINGAN SMN	-102.35	19.09	320	33	34.9	37.2	39.3	39.9	37.6	34.6	34	33.5	34	34	33	35.4
16011	BUENAVISTA I	-102.59	19.21	450	33	34.3	36	37.4	38.8	35.4	33.5	33.2	33.2	33.8	33.5	33	34.6
16026	CUATRO CAMINOS	-102.1	18.99	672	32.4	33.5	35.6	37.7	38.1	35.7	33.5	33.2	32.7	33.2	33.1	32.5	34.3
16038	EL CARRIZO	-102.99	19.02	520	31.4	33.3	36	38.1	37.8	35.2	31.3	31.7	31.4	32.2	32.3	31.6	33.5
16039	PIEDRAS BLANCAS	-102.77	19.24	419	33.2	34.7	37	39.2	39.7	36.9	34.3	33.7	33.5	33.9	34.1	33.3	35.3
16056	JICALAN CFE	-102.07	19.39	1610	23.5	24.7	26.6	28.4	28.7	26.2	24.6	24.6	24.4	24.7	24.5	23.7	25.4
16074	PANCHES CFE	-102.13	18.84	207	34.3	36	38.4	40.4	40.6	38.2	35.4	35.1	34.5	35.1	35.1	34.1	36.4
16082	NUEVA ITALIA CFE	-102.09	19.06	391	32.5	33.7	35.4	36.8	37.6	35.5	33.1	33	32.5	32.9	33.1	32.3	34.0
16085	PARACUARO	-102.22	19.15	597	31	32.5	34	36.1	36.2	33.7	31	31.1	30.6	31.5	31.8	30.9	32.5
16090	PIEDRAS BLANCAS CFE	-102.77	19.24	400	33.8	35.7	37.8	39.9	40.2	37.4	34.9	34.6	34.1	34.7	35.1	34.2	36.0
16101	PUNTA DE AGUA	-102.68	19.21	384	33.2	35.1	37.3	39.5	39.6	37.1	33.9	34	33.8	34.8	34.4	33.7	35.5
16128	TEPACALTEPEC	-102.83	19.18	365	33.6	36	38.5	39.5	40	37.8	35.8	35.4	34.4	34.7	34.4	33.5	36.1
16149	APATZINGAN DGE	-102.35	19.08	332	32.7	34.3	36.4	37.9	38.6	35.8	33.2	33	32.9	33.8	33.4	32.6	34.6
16154	COALCOMAN SMN	-103.15	18.77	1086	30.1	31.8	33.5	35.5	36	32.8	30.8	30.9	30.8	31.5	31.4	30.3	32.1
16156	CHARAPENDO	-102.07	19.27	1013	27.8	28.4	29.5	31.3	31.7	29.9	28.2	28	28.2	28.9	27.6	27.5	28.9
16157	CHILA	-102.62	18.93	278	32.4	34	36.4	38.4	38.9	35.6	32.4	32.5	32.3	33.1	33.2	32.6	34.3
16158	EL CAJON	-102.75	18.97	296	33.8	35.6	37.4	39.7	40.4	37.2	33.7	33.7	33.3	34.2	34.5	33.8	35.6
16190	ARCEO	-102.27	18.72	320	33.2	34.4	36.8	39.1	39.1	36.6	34	33.6	33.2	33.6	33.6	33.6	35.1
16216	BUENAVISTA II	-102.59	19.21	450	32.9	34.1	35.8	37.9	38	35.6	33	33.9	33.6	33.8	33.6	32.4	34.6
16228	ACAHUATO	-102.33	19.14	227	28.4	30.1	31.8	33.5	33.7	31	27.8	27.9	27.6	28.2	28.8	28.7	29.8
16259	TZINDIO	-102.11	19.4	1778	22.4	22.4	24.1	25.3	26.1	24.3	24.3	24.4	24.5	24.4	23.6	23	24.1
PROMEDIO				585.92	31.4	32.86	34.896	36.732	37.172	34.624	32.188	32.072	31.756	32.288	32.256	31.5	33.312

Tabla 6.8 Temperaturas máximas mensuales por estación utilizada en el acuífero Apatzingán

En la tabla 6.9 se muestran las temperaturas medias anuales por estación, para el estudio de los Acuíferos Apatzingán y Cotija se utilizaron un total de 36 estaciones climatológicas, que fueron las que mejor información nos aportaron, ya que cuentan con más de veinte años de estudio y están bien distribuidas espacialmente por toda el área de los acuíferos

Código	Nombre	Altitud	Temperatura media anual
14005	AHUIJULLO	820	17.7
14092	OLIVOS CFE	420	21.7
14124	SAN DIEGO	1620	13.4
16003	AGUILILLA	933	20.3
16006	ANTUNEZ	360	22.6
16007	APATZINGAN SMN	320	22.8
16011	BUENAVISTA I	450	22.1
16019	CERRITO PELON	1754	13.1
16025	COTIJA	2341	16.5
16026	CUATRO CAMINOS	672	21.2
16032	CHARAPAN	2407	7.9
16038	EL CARRIZO	520	20.2
16039	PIEDRAS BLANCAS	419	22.2
16043	EL PUERTO	1640	12.2
16056	JICALAN CFE	1610	14.0
16072	CHORROS DEL VARAL CFE	930	17.3
16073	LIMONES CFE	1175	16.1
16228	ACAHUATO	227	19.3
16082	NUEVA ITALIA CFE	391	22.1
16085	PARACUARO	597	20.5
16088	PERIBAN	1640	17.3
16090	PIEDRAS BLANCAS CFE	400	22.3
16101	PUNTA DE AGUA	384	22.1
16106	SAN ANGEL	1840	6.7
16128	TEPACALTEPEC	365	23.5
16149	APATZINGAN DGE	332	22.3
16154	COALCOMAN SMN	1086	18.1
16156	CHARAPENDO	1013	18.9
16157	CHILA	278	22.0
16158	EL CAJON	296	21.7
16190	ARCEO	320	22.1
16194	ETA 039 TOCUMBO	1600	13.0
16216	BUENAVISTA II	450	21.7
16228	ACAHUATO	227	19.3
16251	PATAMBAN	2140	12.2
16259	TZINDIO	1778	13.6

Tabla 6.9 Temperaturas medias anuales por estación

Por otra parte se ha considerado importante observar la relación que guarda la altitud con la temperatura, ya que son parámetros definitivos en el cultivo del aguacate, en la figura 6.6 vemos que la temperatura esta inversamente relacionada con la altitud; cuando se trata de zonas altas la temperatura es relativamente baja.

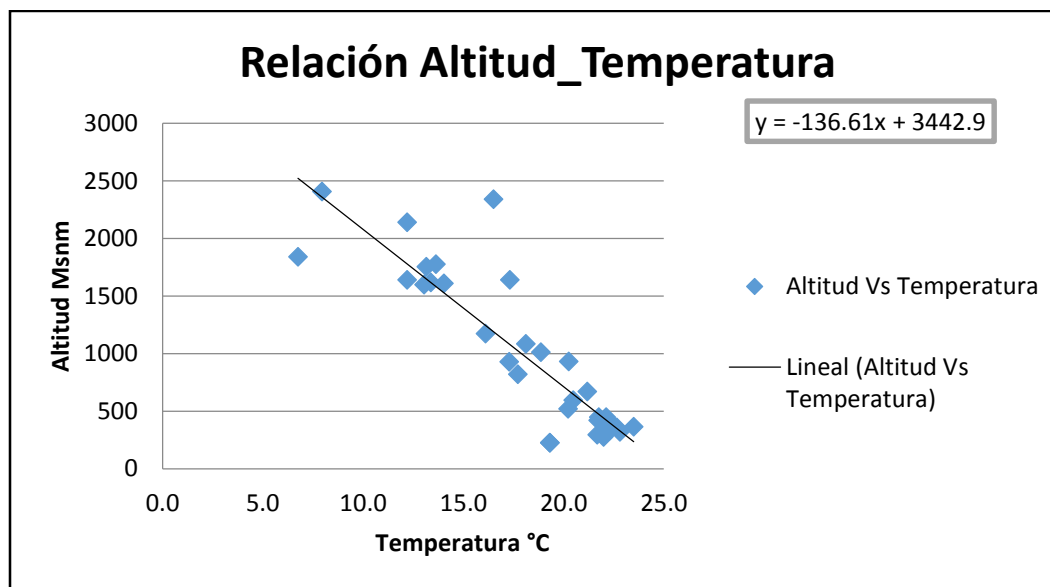


Figura 6.6 Relación entre altitud y temperatura

De acuerdo con las características agro-climáticas del aguacate se estableció el rango de 17 °C a 33° C como la temperatura óptima para asegurar el amarre de frutos por temperaturas bajas y para la asimilación de nutrientes y el grado de fertilidad del polen en temperaturas altas respectivamente; es de mencionarse que aunque la gran mayoría del área de los acuíferos cumple con este rango de temperatura media no es un indicador definitivo para la elección de una ampliación en la zona aguacatera, ya que se trata de una temperatura media anual y existen meses muy fríos donde en la zona caen heladas (Parque Nacional Pico de Tancítaro y alrededores) y otras zonas muy calurosas en verano donde se hace imposible cultivar el aguacate tipo Hass (valle de Apatzingán y alrededores).

En la figura 6.7 se muestra el mapa de temperatura media anual para los Acuíferos Apatzingán y Cotija, el cual nos sirvió para el reconocimiento de zonas con temperatura óptima para el desarrollo del cultivo.

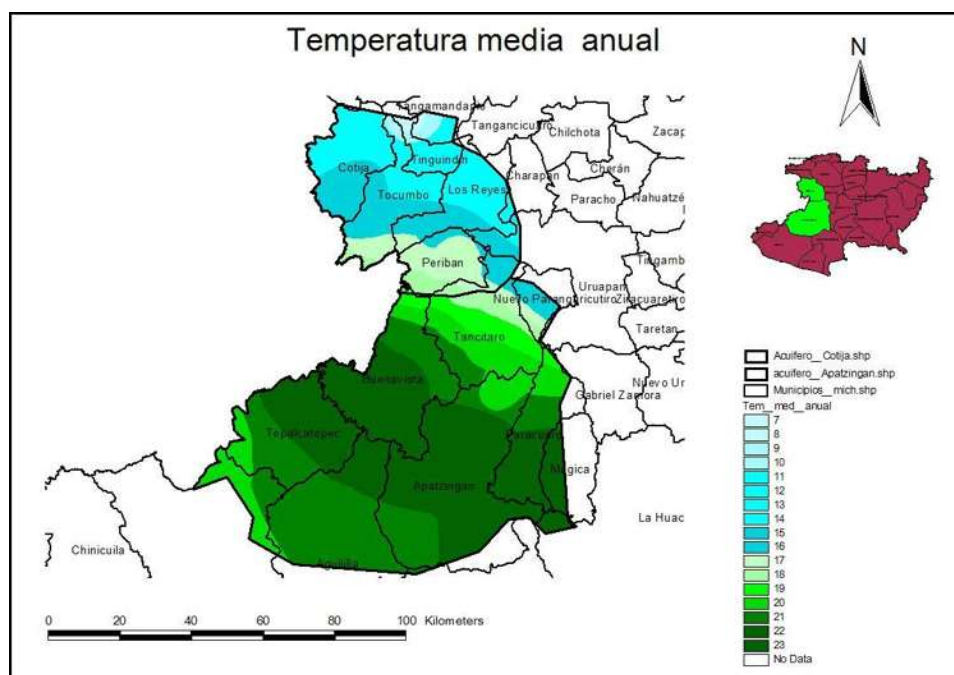


Figura 6.7 Temperatura media anual en los acuíferos Apatzingán y Cotija

c) Tipo de suelo

El aguacate requiere un suelo con buenas características químicas, físicas, biológicas y topográficas que repercutirán en el buen desarrollo de los árboles y a la vez se reflejará en un tiempo más corto para inicio de producción.

El aguacate se adapta a una amplia gama de suelos, desde casi totalmente arenosos hasta arcillosos, siempre que posean un buen drenaje interno, factor de vital importancia, pues el exceso de humedad propicia un medio adecuado para el desarrollo de enfermedades de la raíz, fisiológicas como las asfixias radicales y fungosas como *Phytophthora*. Es aconsejable disponer al menos de 0.8 a 1.0 m de suelo de buena estructura sobre un subsuelo poroso para garantizar una larga vida del árbol (B.J.A., 2008).

Los suelos ideales para el cultivo de aguacate son aquellos de textura media: franco, franco arenoso, franco arcillo arenoso y migajón, profundos y con buen drenaje, con un pH neutro o ligeramente ácido entre 5.5 a 7.0 para facilitar la absorción de los principales nutrientes

garantizando así el desarrollo radicular, ya que es muy sensible a la salinidad y entre más alcalino, presenta problemas para la asimilación de calcio y sodio. (Coria, 2009).

Es conveniente que el contenido de materia orgánica sea óptimo de 2.5 a 5 % para una buena estructura que permita la porosidad y consecuentemente las proporciones adecuadas de aire y agua en el suelo (B.J.A., 2008). Los tipos de suelo más favorables y sobre los cuales se localizan la mayor superficie ocupada por aguacate, de acuerdo a la clasificación de la FAO (1975), son el **Andosol** y el **Luvisol** (Aguilera, Vidales, & Salazar, 2004). El primero se caracteriza por ser un suelo derivado de cenizas volcánicas recientes, muy ligeros y con alta capacidad de retención de agua y nutrientes, susceptibles a la erosión y fuertes fijadores de fósforo, el segundo son los suelos de color rojo o claro y moderadamente ácidos, con susceptibilidad alta a la erosión (Anguiano, Coria, Ruiz, Chávez, & Alcántar, 2003).

Para nuestro estudio solo se consideraron los tipos de suelos con mejores propiedades para este cultivo, los cuales son el Andosol y el Luvisol, en la figura 6.8 se muestra la distribución espacial de los diferentes tipos de suelo que se tienen en los acuíferos Apatzingán y Cotija, y en la figura 6.9 se muestran las zonas de los acuíferos donde se encuentran presentes los suelos óptimos para el aguacate, y con los cuales se buscara la posible zona de crecimiento de la franja aguacatera, en esta última imagen vemos que el acuífero Cotija tiene estos suelos en su mayoría de su superficie y que el municipio que tienen en su mayor parte estos suelos es Tancítaro.

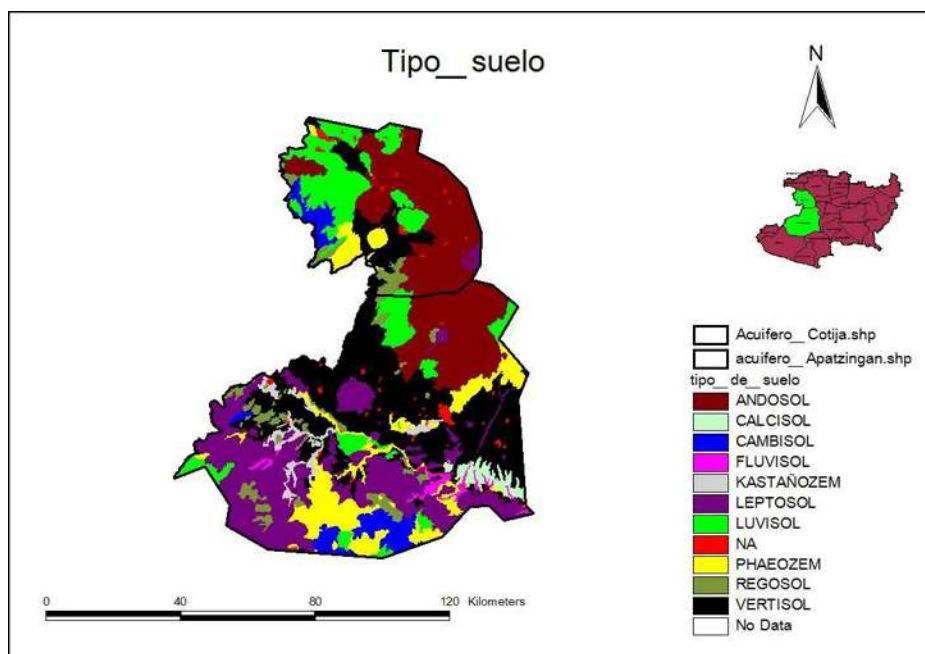


Figura 6.8 Tipo de suelo en los acuíferos Apatzingán y Cotija

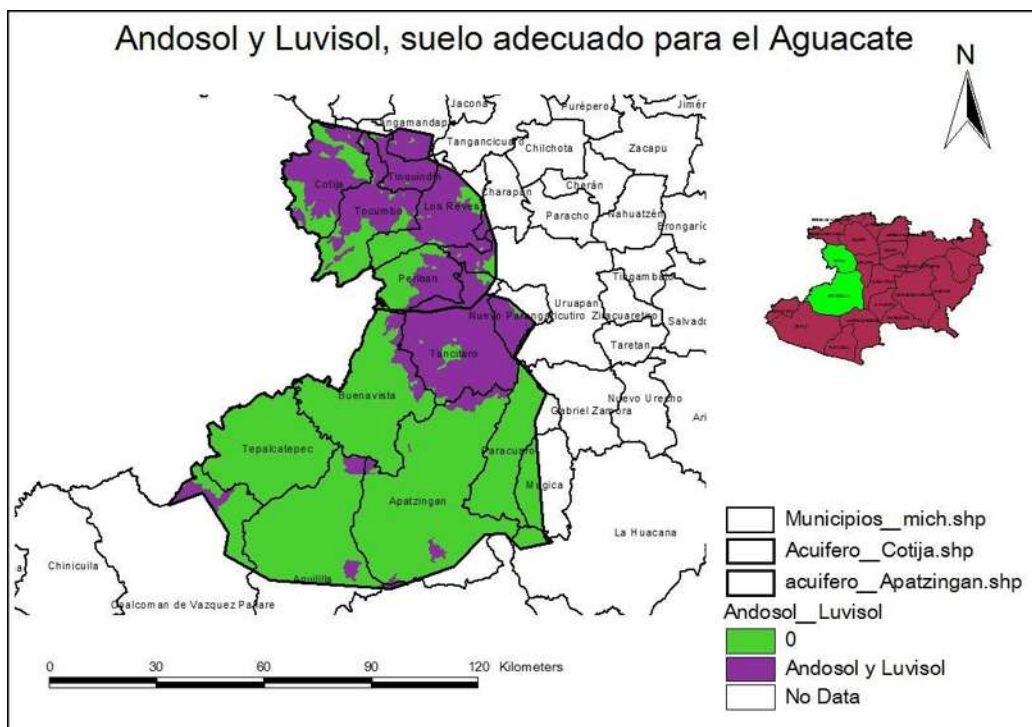


Figura 6.9 Suelo Andosol y Luvisol en los acuíferos Apatzingán y Cotija

d) Precipitación

El aguacate de manera natural no prospera en ambientes con isoyetas menores a 650 mm, al introducirse a ambientes más secos, necesariamente requiere irrigación. Las necesidades de agua del cultivo varían con respecto a su fenología y su estado de desarrollo. El cultivo del aguacate tiene una evapotranspiración real de mínimo 650 mm.

En la zona aguacatera de Michoacán, el agua es un recurso natural escaso, salvo por las abundantes precipitaciones de junio a octubre y representa uno de los factores limitantes de la producción del aguacate, sobre todo en los tipos de clima semicálido subhúmedo que representan el 57% de la superficie total con aguacate en el estado de Michoacán (Tapia, Larios, Alcántar, & Anguiano, 2006), y es donde los requerimientos de agua son más urgentes, dependiendo de las condiciones de exposición al sol, topografía, tipo de suelo y precipitación.

Las propiedades físicas de los suelos volcánicos donde se cultiva el aguacate, le confieren propiedades hidráulicas de 20 a 50 mm h⁻¹ de conductividad hidráulica, esta propiedad al mismo tiempo que protege al sistema radical de enfermedades de la raíz al desalojar los grandes excedentes de agua durante los meses de junio a octubre, también favorece la

rápida desecación del suelo y la pérdida de nutrimentos y bases fuera de la superficie radical, y posibles efectos en los acuíferos los cuales en algunas regiones aguacateras pueden llegar a un metro de profundidad. (Alcántar, 2009).

En la figura 6.10 se muestra la distribución espacial de la precipitación media anual en los acuíferos Apatzingán y Cotija, vemos que en el aspecto de precipitación la única zona que no cumple lo mínimo requerido pertenece a los municipios de Buenavista y Tepalcatepec, y que la zona con mayor precipitación está comprendida entre el municipio de Nuevo Parangaricutiro, la parte norte del municipio de Tancítaro, el noreste del municipio de Peribán, el sureste del municipio de los Reyes y el noroeste del municipio de Uruapan. En parte de esta zona se encuentra el Parque Nacional Pico de Tancítaro, el cual es la montaña con mayor altitud en el estado de Michoacán; este nace en el municipio de Nuevo Parangaricutiro y termina en el municipio de Peribán.

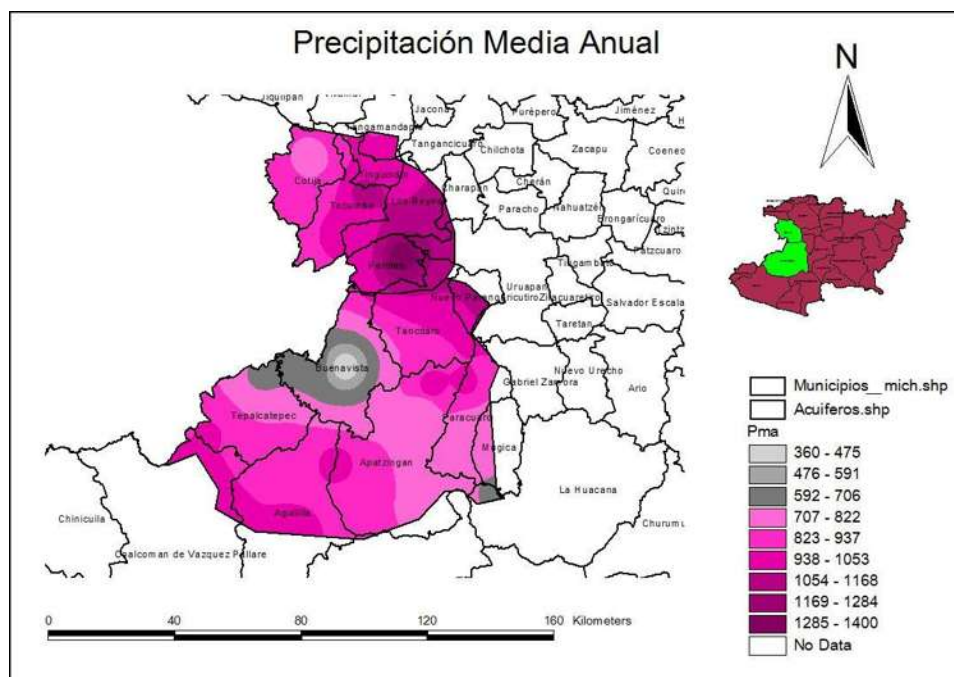


Figura 6.10 Distribución espacial de la precipitación media anual en los Acuíferos Apatzingán y Cotija

6.2.2. Futura Franja Aguacatera

En consideración de los mapas anteriores se interceptaron todos los criterios y se creó un mapa con el probable crecimiento de la franja aguacatera. Las limitantes a considerar fueron que los cuerpos de agua no pueden ser alterados en este proceso y que las zonas urbanas no serían modificadas.

Analizando el procedimiento anterior el posible crecimiento de la franja aguacatera en los Acuíferos Apatzingán y Cotija alcanzaría un 413.69 %. La superficie cultivada pasaría de 47,466.41 Has a 196,362.78 Has.

En la tabla 6.10 se detalla la forma en que está presente la franja aguacatera en los acuíferos en la actualidad y como podría llegar a crecer; tenemos que para el acuífero Cotija el área ocupada por la franja aguacatera es el 11.08 % del total del área del acuífero y que esta podría llegar a ocupar hasta el 53.73 %.

Para el acuífero Apatzingán el área ocupada por la franja aguacatera es tan solo del 4.06 %, pudiendo esta llegar a ocupar hasta el 13.75 %, por lo que vemos que el acuífero Cotija es el principal en cuestión de este cultivo.

Acuífero	Área Aguacatera Actual (Has)	Área Aguacatera Futura (Has)	Área Acuífero (Has)	Aguacatera actual en acuífero %	Aguacatera futura en acuífero %	crecimiento Aguacatera %
Cotija	24357.01	118124.72	219842	11.08	53.73	484.97
Apatzingán	23109.40	78238.06	568872.62	4.06	13.75	338.56
Total	47466.41	196362.78	788714.62	6.02	24.90	413.69

Tabla 6.10 Área ocupada por la franja aguacatera en los acuíferos y crecimiento de la franja aguacatera

En la tabla 6.11 se muestran datos relacionados a la aguacatera y a los municipios que están total o parcialmente sobre estos acuíferos en estudio, para el municipio de Uruapan solo se analizó la parte que esta sobre el acuífero Cotija, ya que la mayor parte de Uruapan esta sobre el acuífero que lleva su mismo nombre y no forma parte de este estudio.

Vemos que los municipios con mayor posibilidad de crecimiento son Tancítaro, Cotija, Tocumbo y Los Reyes.

Como se mencionó con anterioridad las limitantes del crecimiento de la franja aguacatera fueron respetar cuerpos de agua existentes y zonas urbanas, entonces el posible

crecimiento que aquí se muestra contempla zonas como bosque, pastizal, agrícola, hablamos entonces de un posible crecimiento potencial en base a las características ideales para el aguacate, aunque sabemos que en la realidad tenemos otras limitantes más fuertes como que legalmente no se puede hacer un cambio de uso de suelo de bosque a huertos de aguacate y la limitante hídrica para riego que es uno de los objetivos de este estudio.

Municipio	Área Municipio (Km ²)	Área Municipio (Has)	Área Aguacatera Actual (Has)	Área Aguacatera Futura (Has)	Aguacatera actual en Municipio (%)	Aguacatera Futura en Municipio (%)	Área de Crecimiento en municipio (Has)	Crecimiento (Decimal)
Tancítaro	769.75	76975.33	22042.19	56880.3	28.64	73.89	34838.11	2.58
Apatzingán	1630.69	163068.85	691.48	6984.32	0.42	4.28	6292.84	10.10
Parangaricutiro	214.54	21454.22	4984.72	7181.74	23.23	33.47	2197.02	1.44
Peribán	325.07	32506.59	6828.51	14394.81	21.01	44.28	7566.30	2.11
Los Reyes	488.17	48817.29	4269.65	24895.6	8.75	51.00	20625.95	5.83
Uruapan	950.20	95020.16	12282.63	6563.46	12.93	6.91	Sin Dato	0.53
Tocumbo	506.20	50619.93	1201.53	27894.86	2.37	55.11	26693.33	23.22
Tingüindín	176.07	17606.82	3540.53	10381.08	20.11	58.96	6840.55	2.93
Cotija	508.23	50822.92	1218.91	28974.62	2.40	57.01	27755.71	23.77
Tangamandapio	311.02	31102.26	1642.57	204.02	5.28	0.66	Sin Dato	0.12
Jiquilpan	254.14	25413.63	0.00	317.35	0.00	1.25	317.35	Municipios sin aguacatera actual
Charapan	235.41	23541.13	0	995.49	0.00	4.23	995.49	
Buenavista	902.84	90284.28	0	3228.38	0.00	3.58	3228.38	
Coalcomán	2796.97	279696.79	0	4884.86	0.00	1.75	4884.86	
Aguililla	1433.70	143369.59	0	1731.07	0.00	1.21	1731.07	
Tumbiscatío	2071.84	207183.77	0	701.11	0.00	0.34	701.11	

Tabla 6.11 Relaciones entre aguacatera 2007 y Municipios con presencia total o parcial en los acuíferos Apatzingán y Cotija

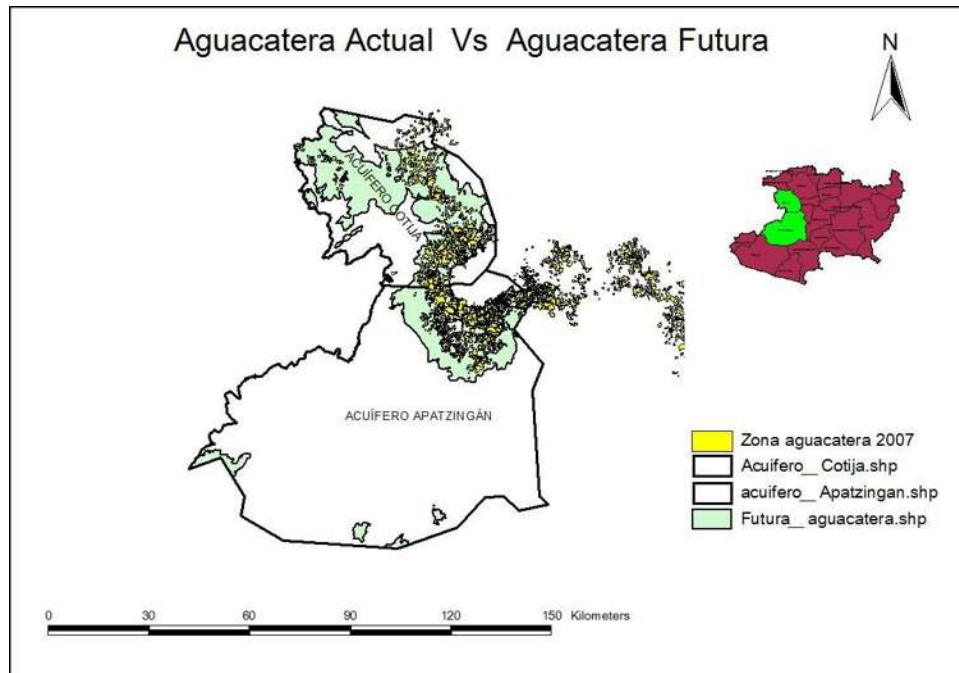


Figura 6.11 Aguacatera actual contra aguacatera futura espacialmente ubicada en los acuíferos Apatzingán y Cotija

Para detallar el uso de suelo futuro se volvió a combinar la información de la serie IV desarrollado por el INEGI con la franja futura probable. En la siguiente figura 6.12 se muestra la cobertura futura en los acuíferos.

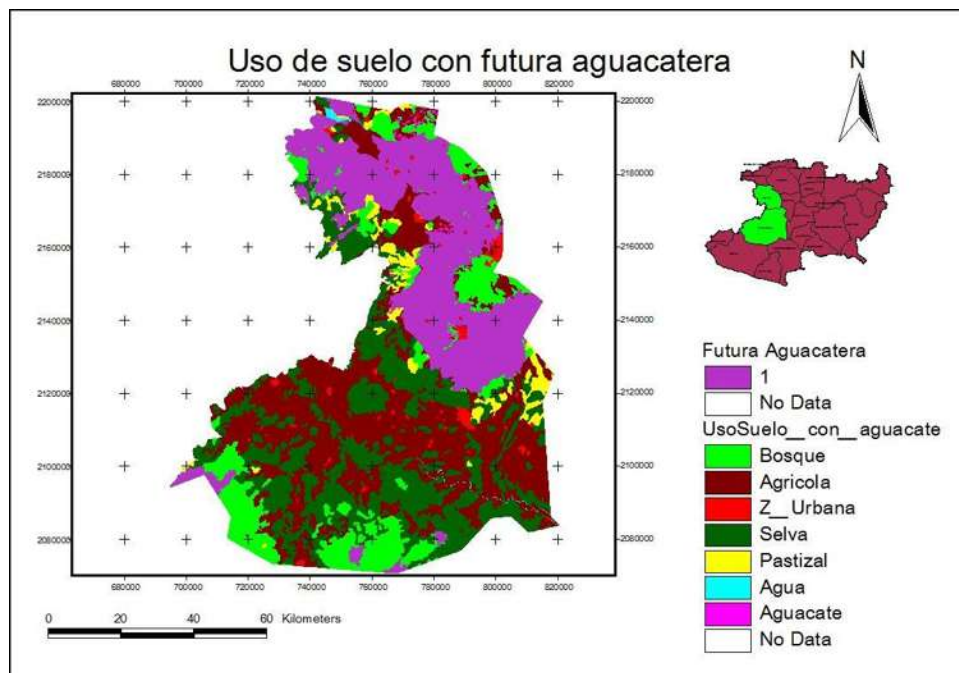


Figura 6.12 Uso de suelo con futura aguacatera en los Acuíferos Apatzingán y Cotija

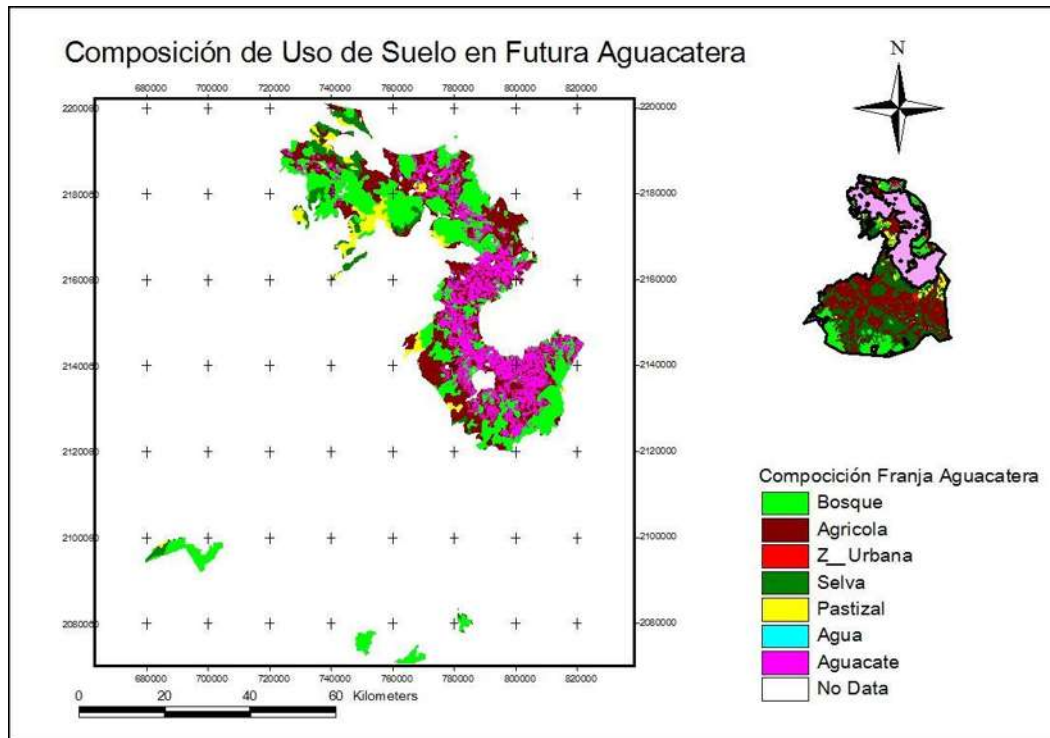


Figura 6.13 Composición del uso de suelo actual de la probable futura franja aguacatera

En la tabla 6.12 se describe numéricamente lo que se muestra en la figura 6.13, lo cual es el porcentaje de usos de suelo que se encuentran comprendidos dentro de los límites de la futura franja aguacatera, vemos que los bosques que se encuentran adentro de la futura franja aguacatera representan el 42.08 % del total de los bosques que hay en existencia en los acuíferos Apatzingán y Cotija, también vemos que solo el 91.96% de la aguacatera actual estaría comprendida en la futura franja aguacatera; esto se debe a que en la parte norte del acuífero Cotija existe una zona con aguacate que no se consideró en la ampliación de la nueva zona aguacatera, esto porque esa zona no cumplía con los parámetros óptimos para este cultivo y no resulta rentable por la baja producción.

La interpretación de la siguiente tabla nos dice que si la franja aguacatera pudiera crecer hasta su límite los bosques disminuirían en 42.08%, el cambio de uso de suelo agrícola sería de 19.30%, etcétera.

Uso de suelo	Área en Acuíferos (Has)	Composición Futura Franja Aguacatera (Has)	Porcentaje (%)
Bosque	171043	71967	42.08
Agrícola	305037	58858	19.30
Zona Urbana	10430	127	1.22
Selva	220048	12002	5.45
Pastizal	34309	9692	28.25
Agua	1946	9	0.46
Aguacate	47428	43616	91.96
TOTAL	790241	196271	24.84

Tabla 6.12 uso de suelo que forma la posible futura franja aguacatera

En la figura 6.14 se muestra los usos de suelo actuales que se tienen en la posible zona de crecimiento de la aguacatera, estos usos de suelo están presentados por municipio, la zona de crecimiento para los acuíferos Apatzingán y Cotija están presentes en 16 municipios, de los cuales 6 municipios aun no cuentan con el cultivo del aguacate, pero si cuentan con las condiciones agroclimáticas he hídricas para que el aguacate exista en pequeñas zonas de estos municipios: Jiquilpan, Charapan, Buenavista, Coalcomán, Aguililla y Tumbiscatío.

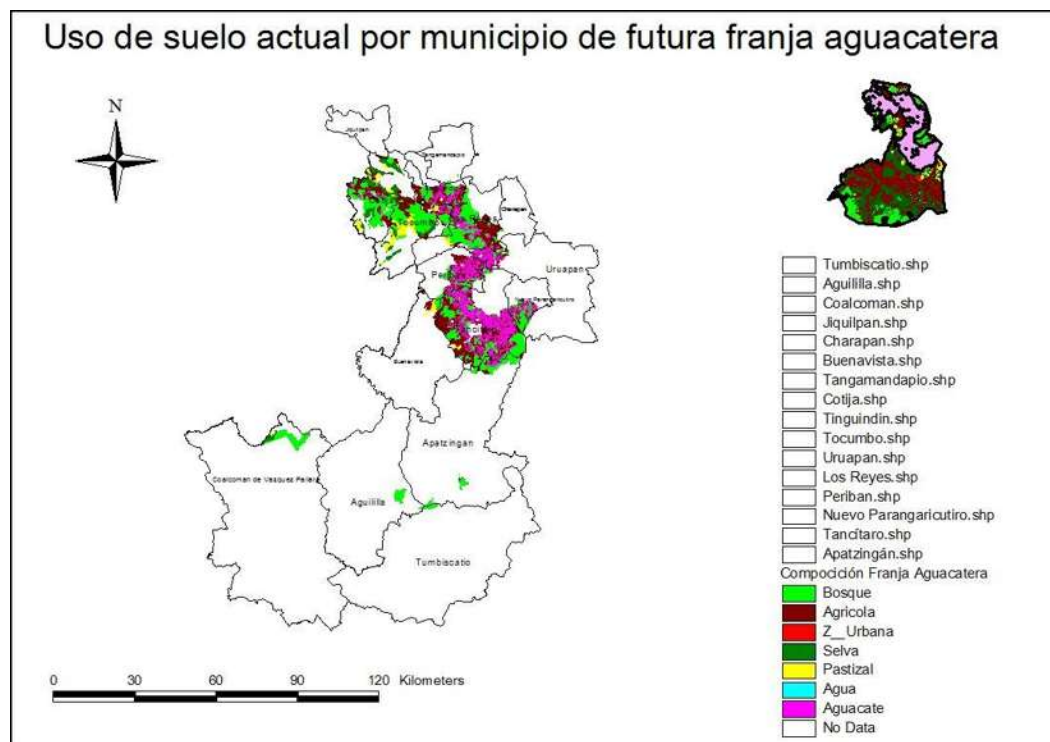


Figura 6.14 usos de suelo actuales que se tienen en la posible zona de crecimiento de la aguacatera

De la imagen anterior se obtuvo el uso de suelo por municipio, la tabla 6.13 nos muestra de forma discreta y contable la cantidad de hectáreas que posee cada uno de estos 16 municipios que abarca la posible zona de crecimiento de la franja aguacatera, en esta tabla podemos ver los usos de suelo que se tienen en la actualidad donde en un futuro todo podría ser zona aguacatera.

Municipio	Área Municipio (Km ²)	Área Municipio (Has)	USOS DE SUELO ACTUALES EN POSIBLE FUTURA FRANJA AGUACATERA						
			Bosque 1 (Has)	Agrícola 2 (Has)	Zona Urbana3 (Has)	Selva 4 (Has)	Pastizal 5 (Has)	Agua 6 (Has)	Aguacate 7 (Has)
Tancítaro	769.75	76975.33	14502	20442	10	396	433	0	21112
Apatzingán	1630.69	163068.85	5010	986	0	308	0	0	683
Parangaricutiro	214.54	21454.22	3154	1505	0	0	0	0	2505
Peribán	325.07	32506.59	2796	5397	3	0	19	0	6118
Los Reyes	488.17	48817.29	11833	8505	18	0	565	0	4019
Uruapan	950.20	95020.16	978	1811	40	0	47	0	3685
Tocumbo	506.20	50619.93	12743	5969	17	3077	4930	0	1105
Tingüindín	176.07	17606.82	2815	4225	17	0	114	0	3207
Cotija	508.23	50822.92	10759	7170	16	7263	2537	9	1166
Tangamandapio	311.02	31102.26	181	6	0	0	0	0	3
Jiquilpan	254.14	25413.63	33	273	0	7	0	0	0
Charapan	235.41	23541.13	325	699	0	0	0	0	0
Buenavista	902.84	90284.28	554	1636	0	50	921	0	0
Coalcomán	2796.97	279696.79	3877	0	0	870	122	0	0
Aguililla	1433.70	143369.59	1720	0	0	1	0	0	0
Tumbiscatío	2071.84	207183.77	700	0	0	2	0	0	0
TOTAL			71982	58627	123	11974	9688	9	43602

Tabla 6.13 Usos de suelo actuales por municipio donde en un futuro podría ser zona aguacatera

6.2.3. Análisis Estadístico de Datos Climatológicos

Se entiende como gestión de datos climatológicos al proceso de determinación de estaciones climatológicas, englobando la evaluación de la consistencia y el procedimiento de llenado de las mismas si fuese necesario. Cabe mencionar que un buen análisis de datos climatológicos resultará en información confiable y determinará la calidad de todo estudio.

6.2.3.1. Selección de estaciones

En el procedimiento de selección de estaciones, se analizara el contenido de la información de cada estación considerando parámetros como años de registro, intervalo de registro, distancia al centro de gravedad, porcentaje de vacíos y localización estratégica de cada estación respecto a los acuíferos.

Inicialmente para hacer una preselección de estaciones se identificaron espacialmente con ayuda del programa SIHIMAX y se descargaron los datos de resumen de cada estación, parámetros antes mencionados. Estos datos fueron analizados en el programa Excel.

Con el fin de poder hacer una selección final del conjunto de estaciones se realizó una codificación para cada uno de los primeros cuatro parámetros antes mencionados y el quinto parámetro fue evaluado en el programa Arc View 3.2, de más de 200 estaciones se tuvo que seleccionar las más confiables, ya que existen muchas estaciones con información inconsistente e incompleta que perjudica. Por esto es necesario apoyarse de estaciones con amplio periodo de registro que tengan buena localización respecto a los acuíferos, bajo porcentaje de vacíos, consistentes en su información y que además la información sea de años recientes.

Para hacer uso de las estaciones de mejor aplicación tanto en contenido de información como en ubicación espacial se tendrá el siguiente criterio. Se hará una suma de los valores asignados a cada parámetro a analizar y los que resulten con menor valor serán consideradas como estaciones principales siempre y cuando cumplan con el quinto parámetro.

Codificación de parámetros de selección							
1		2		3		4	
N° Años	valor	intervalo	Valor	Distancia (Km)	Valor	% Vacíos	Valor
10,15	11	1900-1910	11	5,10	1	0,1	1
16,20	10	1910-1920	10	10,15	2	1,2	2
21,25	9	1920-1930	9	15,20	3	2,3	3
26,30	8	1930-1940	8	20,25	4	3,4	4
31,35	7	1940-1950	7	25,30	5	4,5	5
36,40	6	1950-1960	6	30,35	6	5,6	6
41,45	5	1960-1970	5	35,40	7	6,7	7
46,50	4	1970-1980	4	40,45	8	7,8	8
51,55	3	1980-1990	3	45,50	9	8,9	9
56,60	2	1990-2000	2	50,55	10	9,10	10
61,65	1	2000-2010	1	55,60	11	10,11	11

Tabla 6.14 Codificación de parámetros para selección de estaciones principales

En la tabla 6.15 se muestra un ejemplo de selección de estaciones, solo se muestra una fracción del total de estaciones preseleccionadas ya que se tenían más de doscientas.

Código	N° Años (1)	Intervalo (2)		Distancia (Km) (3)	% vacíos (4)	puntuación ponderada	Suma
14095	26	1961	1987	72.23	0.07	8+3+11+1	23
16053	14	1961	1975	56.48	0	11+4+11+1	27
16072	29	1965	1994	49.15	2.97	8+2+9+3	22
16088	29	1969	1998	50.83	2.64	8+2+10+3	23
16077	63	1923	1986	57.65	39.87	1+3+11+11	26
16056	35	1963	1998	62.19	0.06	7+2+11+1	21
16012	29	1970	1999	61.85	3.84	8+2+11+4	25
16089	30	1953	1983	52.40	16.67	8+3+10+11	32
16147	33	1952	1985	52.97	33.33	7+3+11+11	32
16085	32	1969	2001	41.72	22.49	7+1+8+11	27
16064	26	1965	1991	48.64	2.99	8+2+9+3	22
16082	48	1941	1989	42.70	27.89	4+3+8+11	26
16074	35	1964	1999	41.47	0	7+2+8+1	18
16190	11	1974	1985	54.63	41.67	11+4+10+11	36
16236	4	1981	1985	63.48	33.33	11+3+11+11	36
16021	12	1963	1975	74.17	66.67	11+4+11+11	37
14005	29	1961	1990	68.20	9.99	8+3+11+10	32
14348	23	1980	2003	66.11	8.33	9+1+11+9	30
14177	38	1961	1999	43.53	19.07	6+2+8+11	27
16128	40	1943	1983	37.25	6.44	6+3+7+7	23
16038	16	1969	1985	50.61	36.29	10+3+10+11	34
16216	23	1976	1999	18.34	27.41	9+2+3+11	25
16101	16	1969	1985	12.26	33.33	10+3+2+11	26
16011	11	1969	1980	6.48	41.67	11+4+1+11	27
16039	24	1961	1985	9.10	33.33	9+3+1+11	24
16157	16	1969	1985	18.76	33.33	10+3+3+11	27
16037	16	1962	1978	20.15	8.93	10+4+4+9	27
16006	40	1962	2002	28.03	0	6+1+4+1	12
14095	26	1961	1987	83.91	7.03	8+3+11+8	30
16088	29	1969	1998	51.47	11.2	8+2+11+11	32
16212	18	1977	1995	62.78	24.13	10+2+11+11	34
16164	67	1921	1988	60.33	12.46	1+3+11+11	26
16156	33	1952	1985	51.16	43.97	7+3+10+11	31
16082	48	1941	1989	43.97	31.12	4+3+8+11	26

16026	18	1962	1980	43.14	44.61	10+3+8+11	32
16064	26	1965	1991	49.69	11.07	8+2+9+11	30
16147	33	1952	1985	55.93	3.5	7+3+10+4	24
16074	35	1964	1999	45.98	2.27	7+2+8+3	20
16190	11	1974	1985	45.49	8.99	11+3+9+9	32
16236	4	1981	1985	62.18	1.44	11+3+9+9	32
16003	39	1943	1982	44.88	12.51	6+3+8+11	28
16154	80	1926	2006	75.73	34.51	1+1+11+11	24
14005	29	1961	1990	62.94	16.76	8+2+11+11	32
14348	29	1980	2009	63.95	11.88	8+1+11+11	31
16039	49	1961	2010	34.12	3.53	4+1+6+4	15
14177	38	1961	1999	40.45	23.79	6+2+8+11	27
16038	16	1969	1985	51.87	55.87	10+3+10+11	34
16128	40	1943	1983	37.25	11.77	6+3+7+11	27
16101	16	1969	1985	24.75	5.59	10+3+4+6	23
16011	11	1969	1980	17.98	2.48	11+4+3+3	21
16085	41	1969	2010	31.17	29.17	5+1+6+11	23
16228	28	1981	2009	20.55	3.67	8+1+3+4	16
16007	88	1922	2010	16.26	4.12	1+1+2+5	9

Tabla 6.15 Codificación y selección de estaciones

De la tabla anterior se ve que existen diferentes combinaciones, como se mencionó anteriormente las cifras menores en la suma son las estaciones con mayor posibilidad de ser principales, pero para definir las estaciones finales fue necesario cargar los puntos de localización espacial de las estaciones finalistas en el programa Arc View 3.2 y ahí se tomó la decisión final de las mejores estaciones para este estudio.

Realizado el análisis anterior tenemos que 35 estaciones cumplieron con todos los parámetros anteriormente descritos, además se tomó en cuenta el mínimo de estaciones que se deben de considerar dependiendo del área a analizar, este dato se obtiene del libro Hidrología superficial de Aparicio (Aparicio, 2012).

En las siguientes figuras se muestra el área de influencia de cada estación principal por el método de POLÍGONOS DE THIESSEN, vemos que existen estaciones que no tienen influencia sobre los acuíferos por este método, pero se tomaron en cuenta ya que por el método de isoyetas si tienen influencia en la interpolación de valores.



6.2.3.2. *Análisis de consistencia*

El proceso de Consistencia de los datos, permite identificar estaciones con información aceptable, y es utilizada con la finalidad de validar la información meteorológica o de rechazar la información de la estación analizada, esto es necesario para conocer si las series de datos son independientes y homogéneas. Para conocer la consistencia de los datos se realizaron las siguientes pruebas a cada serie.

Test de Helmer. Consiste en un procedimiento sencillo que se consiste en ordenar la serie en función del tiempo y analizar el signo de las desviaciones con respecto a la media aritmética de la serie. Si una desviación de un cierto signo es seguida por otra del mismo signo, entonces se dice que se forma una secuencia “S”, de lo contrario se considera un cambio “C”. Para comprobar que la serie es homogénea se aplica el siguiente criterio:

$$-\sqrt{n-1} \leq (S - C) \leq \sqrt{n-1}$$

Test de secuencias. Esta prueba consiste en analizar el signo de las desviaciones con respecto a la mediana para cada dato y comparar el número de cambios de signo con el número de cambios permitido en base al tamaño de la muestra. Si el número de cambios está entre los valores establecidos la serie es homogénea

Las pruebas de consistencia anteriores se realizaron con ayuda del programa SIHIMAX, este software ya cuenta con una función para ejecutar estos test, por lo cual solo se verificó que las estaciones elegidas como candidatas a ser principales fueran consistentes en su información.

6.2.3.3. *Llenado de datos*

Este proceso tiene finalidad de llenar los espacios vacíos en las series de datos climatológicos con datos razonables y consistentes.

Existen diversos métodos para el llenado de datos, para este estudio se utilizaron los siguientes:

a) **Llenado por Inverso de la Distancia al Cuadrado**

Para la aplicación de este método es necesario contar con la distancia euclidiana entre cada estación. Entendiendo como “distancia euclidiana” a la distancia ordinaria entre dos puntos deducida con el teorema de Pitágoras. Siendo así necesario conocer las coordenadas de

cada estación en un espacio tridimensional con el fin de realizar una “matriz de distancias”. Por último la distancia euclidiana queda definida con la siguiente expresión:

$$Dist. Eucli. = \sqrt{[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2]}$$

Dónde:

$x_i, y_i, z_i \rightarrow$ Coordenadas (x, y, z) de la estación “i”

$x_j, y_j, z_j \rightarrow$ Coordenadas (x, y, z) de la estación “j”

Ahora con la matriz de distancias euclidianas, se continúa con la elaboración de la matriz del inverso de la distancia al cuadrado.

Para el llenado de datos faltantes de la estación principal se necesita calcular un promedio ponderado por cada estación, es decir se asigna un peso a cada estación auxiliar en función del valor del inverso de la distancia al cuadrado entre la sumatoria de los inversos de la distancia euclidiana al cuadrado de las estaciones auxiliares. Por último se sumaran los productos calculados entre el peso de cada estación por el valor de precipitación de un intervalo de tiempo dado. Se puede resumir el proceso con las siguientes expresiones:

$$W_i = \frac{(Inverso\ Distancia)^2}{\sum (Inverso\ Distancia)^2} \quad Dato\ faltante = \sum_{i=1}^n (W_i * P_i)$$

Dónde:

$W_i \rightarrow$ Promedio ponderado o peso de la estación i

$P_i \rightarrow$ Precipitación del tiempo i

$i = 1...n \rightarrow$ Numero de estaciones auxiliares para el llenado

b) Llenado por Regresión Lineal

En muchos de los casos no es suficiente el llenado por el método antes descrito por lo cual es necesario tomar opciones complementarias y así tener una serie de precipitación adecuada. En el desarrollo de este estudio se tomó como método adicional el llenado por regresión lineal simple, este es un método relativamente sencillo y se necesita de solo una estación auxiliar para realizar el llenado y consiste en asumir que la influencia de la serie a llenar con respecto a la auxiliar tiene un comportamiento lineal.

$$Dato\ faltante = m \cdot p_i + b$$

Dónde: P_i es la Precipitación de la estación i, m y b son valores constantes en la ecuación de la recta.

Para el llenado de datos faltantes en la series de precipitación de las 35 estaciones principales que se consideran en este estudio nos auxiliamos del programa SIHIMAX, el cual cuenta con estos métodos en su programación así como las matrices de correlación espacial, distancia euclidiana y todos los elementos necesarios para la correcta ejecución de los métodos que los estudios hidrológicos requieren.

Una vez llenadas las estaciones fue necesario hacer la validación del llenado, esta se hace en función de los estadísticos Media, Desviación estándar y Sesgo. Los valores estadísticos nos permitirán observar las variaciones de las series al finalizar el llenado, estos estadísticos también se pueden analizar en el programa SIHIMAX.

6.2.4. Determinación del parámetro K

El parámetro K está en función del uso y tipo de suelo, por lo cual fue necesario determinar dichos mapas con la información vectorial operándola en el software Arc View 3.2.

Con apoyo de información espacial obtenida del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), se clasifican los suelos de los acuíferos en estudio, en tres diferentes tipos: A (suelos permeables), B (suelos medianamente permeables), y C (suelos casi impermeables), que se especifican en la tabla 6.16 y al tomar en cuenta el uso actual del suelo, se obtiene el valor del parámetro K.

TIPO DE SUELO	CARACTERÍSTICAS
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos.
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess algo más compactos que los correspondientes a los suelos A; terrenos migajosos.
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas.

Tabla 6.16 Características de acuerdo al tipo de suelo

USO DEL SUELO	TIPO DE SUELO		
	A	B	C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0.26	0.28	0.30
Cultivos:			
En Hileras	0.24	0.27	0.30
Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.30
Granos pequeños	0.24	0.27	0.30
Pastizal:			
% del suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75 % - Poco -	0.14	0.20	0.28
Del 50 al 75 % - Regular -	0.20	0.24	0.30
Menos del 50 % - Excesivo -	0.24	0.28	0.30
Bosque:			
Cubierto más del 75 %	0.07	0.16	0.24
Cubierto del 50 al 75 %	0.12	0.22	0.26
Cubierto del 25 al 50 %	0.17	0.26	0.28
Cubierto menos del 25 %	0.22	0.28	0.30
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
Caminos	0.27	0.30	0.33
Pradera permanente	0.18	0.24	0.30

Tabla 6.17 Valores del parámetro K dependiendo el uso y tipo de suelo

Como en los acuíferos en estudio existen diferentes tipos y usos de suelo, el valor de K se calcula como la resultante de subdividir los acuíferos en zonas homogéneas y obtener el promedio ponderado de todas ellas.

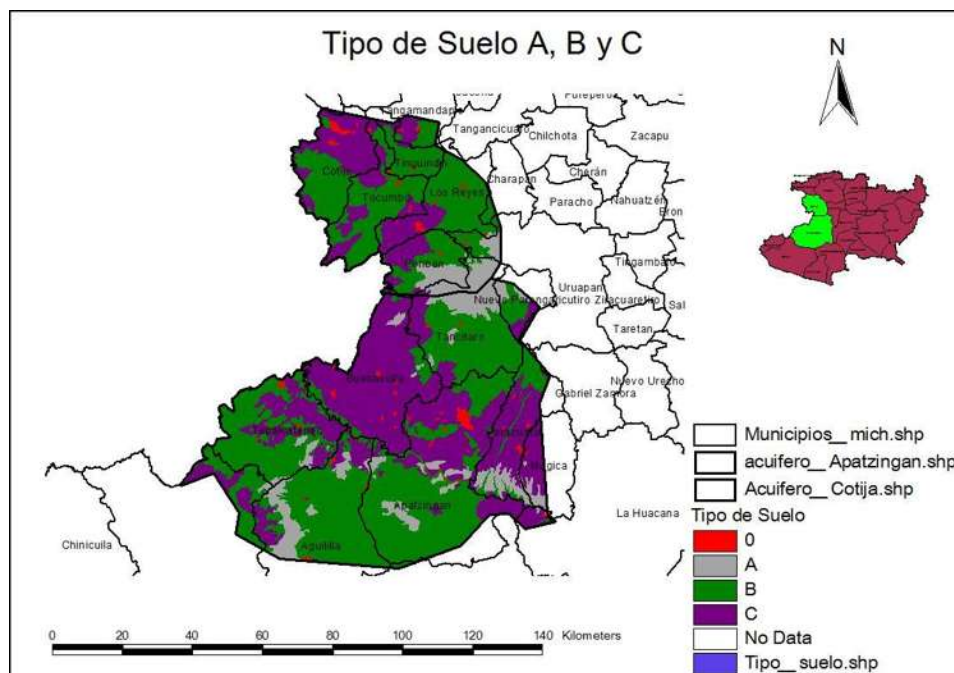


Figura 6.17 Tipo de suelo clasificado en A, B y C para obtener el parámetro K

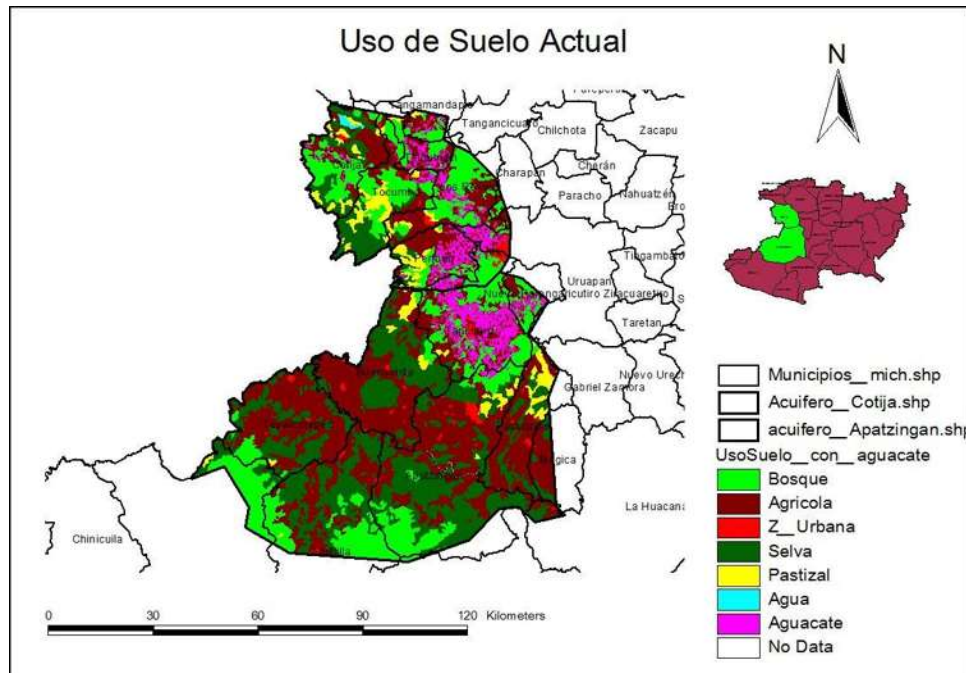


Figura 6.18 Uso de suelo para obtener parámetro K

Con los mapas anteriores detallados se procede a interponer un mapa sobre el otro, con el fin de determinar áreas homogéneas y asignar el valor de K para cada combinación posible según la tabla 6.17.

Aplicando la metodología descrita para la determinación del coeficiente K utilizado en el método del coeficiente de escurrimiento por la norma oficial mexicana 011 de la comisión del agua (NOM-011-CNA, 2000) se obtiene el mapa del parámetro K para los acuíferos Apatzingán y Cotija.

Los valores del parámetro K del acuífero Cotija varían en un rango de 0.11 a 0.32, teniendo como valor medio 0.23, (los valores en la figura están en porcentaje). Para el acuífero Apatzingán el parámetro K varía de 0.07 a 0.32, con valor medio de 0.22.

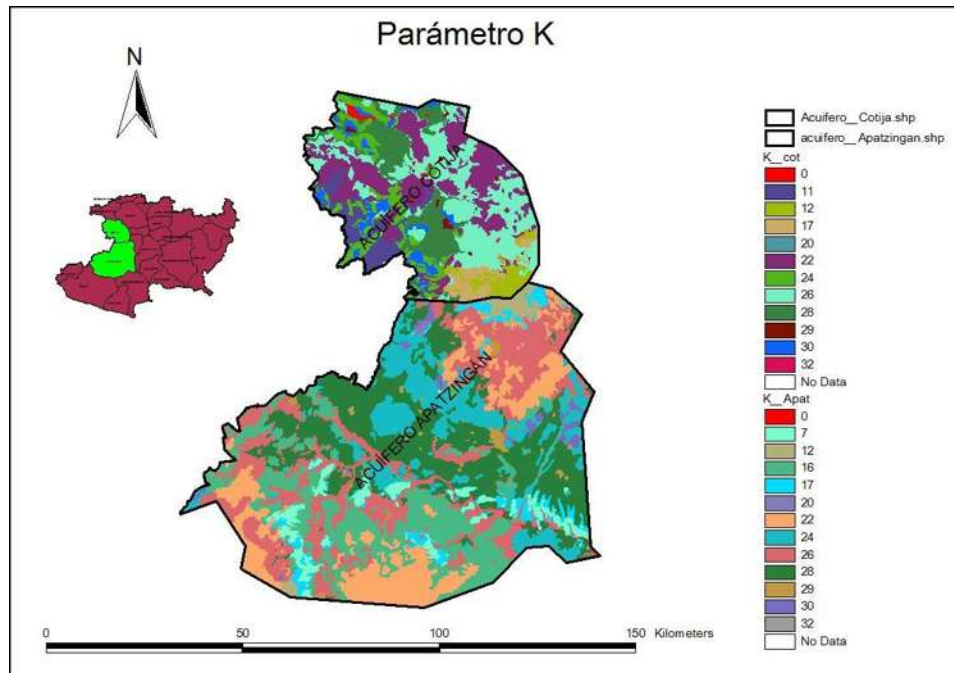


Figura 6.19 Mapa del parámetro K de los acuíferos Apatzingán y Cotija

6.2.5. Determinación de la Precipitación media anual y mensual

La precipitación incluye todos los procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre incluyendo la lluvia, el granizo y la nieve. La formación de la precipitación requiere la elevación de una masa de agua en la atmósfera, de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense. Desde el punto de vista de la ingeniería hidrológica se puede decir que la precipitación es la principal fuente de agua en la superficie terrestre. Las lluvias presentan una gran variación en el espacio y en el tiempo. Para los estudios ingenieriles es necesario conocer la lluvia media en una zona dada. Existen varios métodos de uso común para determinar dicho fenómeno, los más conocidos son el método aritmético, los polígonos de Thiessen y el método de las isoyetas: este último se utilizara para conocer la precipitación media en los acuíferos.

El método de las isoyetas consiste en trazar con la información de las estaciones, líneas que unen puntos de igual altura de lluvia llamadas isoyetas. La precipitación media se calcula con la siguiente expresión:

$$P_m = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n (P_i A_i)$$

Dónde:

P_m es la Precipitación media, P_i es la altura de precipitación promedio entre isoyetas para un tiempo dado, A_T es el área total de la zona de estudio, A_i es el área entre isoyetas y n es número de áreas A_i consideradas.

6.2.5.1. Aplicación

Para el cálculo de la precipitación media anual y mensual se utilizaron las 35 estaciones principales, obteniendo precipitaciones en todo los meses del año, siendo los meses de junio a octubre meses donde se concentra prácticamente toda la precipitación anual y de noviembre a mayo el de estiaje.

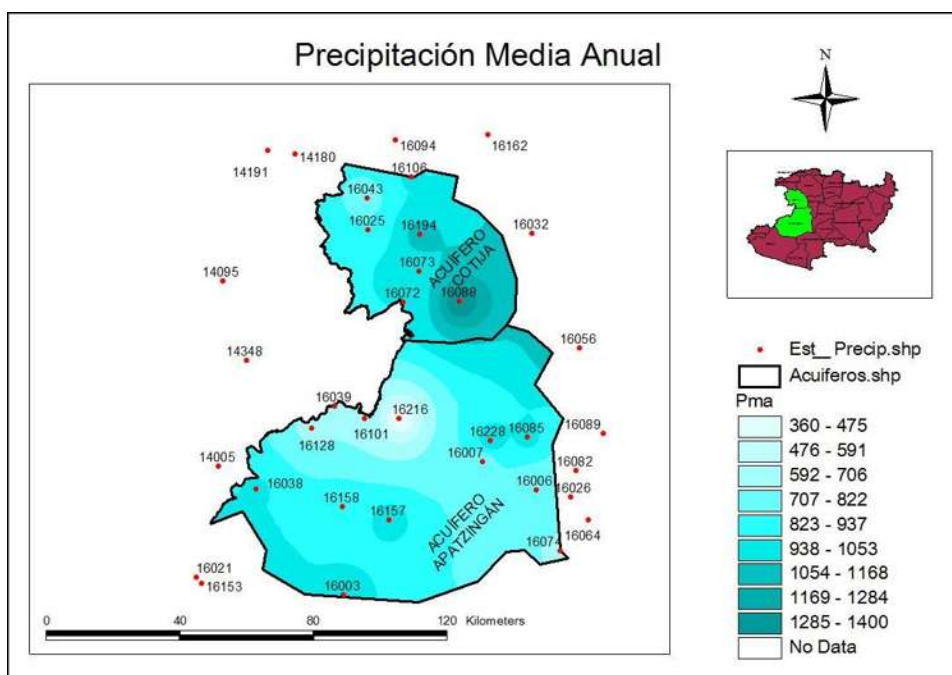


Figura 6.20 Precipitación media anual en los acuíferos Apatzingán y Cotija

Del cálculo del mapa anterior tenemos que la precipitación media anual para el acuífero Cotija es de 1,003 mm mientras para el acuífero Apatzingán es de 842 mm.

6.2.5.2. Características de la Precipitación

Para el caso de este estudio se trata de una zona bastante amplia, el acuífero Apatzingán con 5,656.09 Km² y el acuífero Cotija con 2,198.42 Km² lo cual en conjunto se trata de una zona de casi 8,000 Km², con poco más de 130 Km de distancia desde la parte norte del acuífero Cotija hasta la parte sur del acuífero Apatzingán, además es una zona donde la temperatura, topografía y elevación varían enormemente, es de reconocerse que la precipitación también tiene una variabilidad muy significativa.

La zona de estudio contempla de forma total o parcial 16 municipios, en la figura 6.21 se muestra la precipitación media anual por municipio, de la cual vemos que las mayores precipitaciones están presentes en los municipios de Peribán, parte norte de Tancítaro y los Reyes.

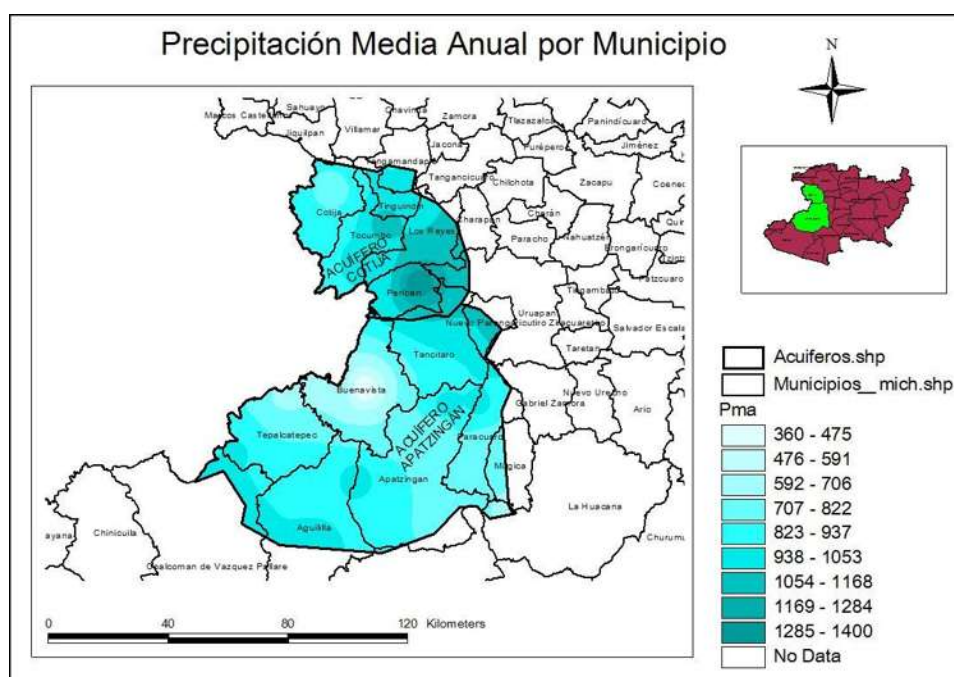


Figura 6.21 Precipitación Media Anual por Municipio en los Acuíferos Apatzingán y Cotija

Para el caso de esta investigación, se consideraron los datos de 35 estaciones cercanas a los acuíferos o inmersas en ellos (Tabla 6.18).

Los periodos considerados de precipitación siempre fueron mayores a 20 años, (excepto las estaciones Chila 16157, El Carrizo 16038, Punta de Agua 16101, y Buenavista II 16216, que fueron aceptadas con 15 años de registro por su estratégica localización espacial) de los cuales se obtuvieron las medias mensuales y anuales. En algunos casos fue necesario rellenar los datos debido a la ausencia de éstos, utilizándose para ello, las técnicas expuestas en el apartado 6.2.3.3 (Llenado de datos).

Estaciones		Coordenadas		Años de Registro		Precipitación Media												anual
Codigo	Nombre	X	Y	Z		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
14095	MANUEL M DIEGUEZ CFE	-103.083	19.583	1225	27	24	7	6	5	35	197	256	199	217	105	35	14	1101
14191	VALLE DE JUAREZ SMN	-102.950	19.933	1950	26	35	11	11	10	54	172	178	131	138	62	21	18	840
16025	COTIJA	-102.667	19.717	2341	54	22	11	5	8	34	147	198	159	134	67	21	20	824
16032	CHARAPAN	-102.200	19.700	2407	21	20	7	8	12	62	213	260	268	223	123	26	13	1237
16039	PIEDRAS BLANCAS	-102.768	19.242	419	50	18	6	15	1	16	120	143	129	114	54	12	5	633
16043	EL PUERTO	-102.669	19.801	1640	61	21	7	5	7	37	144	175	151	120	64	22	13	766
16056	JICALAN CFE	-102.069	19.390	1610	36	46	11	7	9	36	250	309	310	290	117	33	14	1433
16072	CHORROS DEL VARAL CFE	-102.569	19.519	930	30	26	7	5	3	36	175	193	184	179	85	21	10	923
16073	LIMONES CFE	-102.524	19.601	1175	45	24	5	3	7	30	185	225	198	213	96	27	11	1025
16088	PERIBAN	-102.409	19.519	1640	26	23	7	5	3	32	251	312	362	251	128	29	12	1414
16094	PRESA GUARACHA	-102.584	19.956	1580	57	19	5	4	8	41	159	189	154	128	58	15	13	794
16106	SAN ANGEL	-102.543	19.856	1840	38	21	7	6	9	37	179	226	211	152	69	18	11	946
16128	TEPACALTEPEC	-102.833	19.183	365	36	12	1	3	4	16	121	158	131	142	65	15	6	674
16162	ORANDINO	-102.322	19.967	1580	41	15	6	4	6	44	149	198	188	137	54	12	8	820
16194	ETA 039 TOCUMBO	-102.519	19.701	1600	25	30	8	3	3	30	177	257	274	196	97	24	9	1109
14005	AHUIJULLO	-103.100	19.084	820	26	16	6	4	3	18	179	223	175	160	78	21	12	896
14348	JILOTLAN	-103.018	19.369	740	28	18	3	3	1	19	159	203	157	159	78	12	4	816
16003	AGUILILLA	-102.750	18.733	933	28	13	3	4	6	20	181	236	193	194	108	17	7	982
16006	ANTUNEZ	-102.200	19.008	360	49	16	2	3	3	17	117	156	150	159	64	10	5	701
16007	APATZINGAN SMN	-102.351	19.087	320	83	12	4	1	2	17	121	178	167	158	66	11	7	744
16021	COALCOMAN CFE	-103.167	18.783	1020	18	20	11	5	4	48	233	201	275	231	152	39	25	1243
16064	LA PASTORIA CFE	-102.054	18.925	221	26	16	3	3	2	17	125	159	156	134	55	12	6	689
16074	PANCHES CFE	-102.133	18.843	207	36	23	3	3	3	18	101	141	151	138	73	10	5	669
16085	PARACUARO	-102.222	19.150	597	33	18	6	3	2	21	163	218	221	196	97	14	6	963
16153	COALCOMAN DGE	-103.152	18.768	1086	23	23	9	9	19	61	223	262	257	226	171	34	23	1316
16228	ACAHUATO	-102.326	19.142	227	29	18	2	2	0	18	172	243	222	215	85	17	5	998
16157	CHILA	-102.617	18.933	278	15	16	0	2	2	15	180	220	210	215	92	21	9	981
16158	EL CAJON	-102.750	18.969	296	42	21	5	5	2	23	154	204	187	182	78	17	10	889
16038	EL CARRIZO	-102.993	19.020	520	15	17	4	1	4	40	182	222	192	165	87	25	6	944
16026	CUATRO CAMINOS	-102.102	18.986	672	29	19	8	3	3	22	141	174	169	159	73	13	6	791
16101	PUNTA DE AGUA	-102.683	19.207	384	15	15	0	3	1	17	144	142	138	128	54	20	5	669
16216	BUENAVISTA II	-102.585	19.206	450	15	8	2	2	0	6	57	90	68	63	42	6	6	349
16082	NUEVA ITALIA CFE	-102.085	19.059	391	38	15	2	1	4	22	133	165	161	144	58	13	5	724
16089	PLANTA EL COBANO CFE	-102.006	19.156	643	31	16	2	1	6	23	152	218	183	185	83	15	7	890
14180	QUITUPAN	-102.872	19.923	1660	64	23	11	8	10	43	165	186	144	129	68	21	12	819
Promedio				975.06	34.74	19.99	5.53	4.44	4.95	29.21	163.37	203.31	189.31	170.67	82.99	19.42	10.00	903.21

Tabla 6.18 Precipitación media mensual y anual por estación climatológica

Estaciones	Precipitación Media													% según Temporada	
Código	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	anual	Estiaje	Lluvias
14095	24	7	6	5	35	197	256	199	217	105	35	14	1101	11.51	88.49
14191	35	11	11	10	54	172	178	131	138	62	21	18	840	19.10	80.90
16025	22	11	5	8	34	147	198	159	134	67	21	20	824	14.62	85.38
16032	20	7	8	12	62	213	260	268	223	123	26	13	1237	11.99	88.01
16039	18	6	15	1	16	120	143	129	114	54	12	5	633	11.53	88.47
16043	21	7	5	7	37	144	175	151	120	64	22	13	766	14.54	85.46
16056	46	11	7	9	36	250	309	310	290	117	33	14	1433	10.94	89.06
16072	26	7	5	3	36	175	193	184	179	85	21	10	923	11.68	88.32
16073	24	5	3	7	30	185	225	198	213	96	27	11	1025	10.47	89.53
16088	23	7	5	3	32	251	312	362	251	128	29	12	1414	7.81	92.19
16094	19	5	4	8	41	159	189	154	128	58	15	13	794	13.32	86.68
16106	21	7	6	9	37	179	226	211	152	69	18	11	946	11.54	88.46
16128	12	1	3	4	16	121	158	131	142	65	15	6	674	8.48	91.52
16162	15	6	4	6	44	149	198	188	137	54	12	8	820	11.51	88.49
16194	30	8	3	3	30	177	257	274	196	97	24	9	1109	9.70	90.30
14005	16	6	4	3	18	179	223	175	160	78	21	12	896	9.05	90.95
14348	18	3	3	1	19	159	203	157	159	78	12	4	816	7.38	92.62
16003	13	3	4	6	20	181	236	193	194	108	17	7	982	7.10	92.90
16006	16	2	3	3	17	117	156	150	159	64	10	5	701	8.11	91.89
16007	12	4	1	2	17	121	178	167	158	66	11	7	744	7.40	92.60
16021	20	11	5	4	48	233	201	275	231	152	39	25	1243	12.17	87.83
16064	16	3	3	2	17	125	159	156	134	55	12	6	689	8.61	91.39
16074	23	3	3	3	18	101	141	151	138	73	10	5	669	9.63	90.37
16085	18	6	3	2	21	163	218	221	196	97	14	6	963	7.25	92.75
16153	23	9	9	19	61	223	262	257	226	171	34	23	1316	13.49	86.51
16228	18	2	2	0	18	172	243	222	215	85	17	5	998	6.16	93.84
16157	16	0	2	2	15	180	220	210	215	92	21	9	981	6.61	93.39
16158	21	5	5	2	23	154	204	187	182	78	17	10	889	9.41	90.59
16038	17	4	1	4	40	182	222	192	165	87	25	6	944	10.25	89.75
16026	19	8	3	3	22	141	174	169	159	73	13	6	791	9.47	90.53
16101	15	0	3	1	17	144	142	138	128	54	20	5	669	9.18	90.82
16216	8	2	2	0	6	57	90	68	63	42	6	6	349	8.26	91.74
16082	15	2	1	4	22	133	165	161	144	58	13	5	724	8.72	91.28
16089	16	2	1	6	23	152	218	183	185	83	15	7	890	7.80	92.20
14180	23	11	8	10	43	165	186	144	129	68	21	12	819	15.63	84.37
Promedio	20	6	4	5	29	163	203	189	171	83	19	10	903	10	90

Tabla 6.19 Distribución de la precipitación según temporada de lluvias o estiaje

Por otra parte, de los datos de precipitación se obtuvieron no solo la precipitación anual y mensual, sino también el porcentaje de lluvia para las dos épocas del año: lluvia y estiaje, con el objeto de establecer algunas relaciones con el balance hídrico (Tabla 6.19).

Cuando se analizan las gráficas de distribución anual de la lluvia, podemos observar que la lluvia efectivamente se concentra en los meses de junio a octubre con porcentajes del total anual que varían entre 80% y 93%; y aunque hay lluvia significativa en los meses de mayo y noviembre, ésta no rebasa el 9% de la lluvia anual promedio de cada estación, de echo el promedio de lluvia de estos dos meses respecto al año es del 5%. Lo anterior se traduce en la existencia de una estación seca muy marcada y otra de lluvia igualmente evidente en el año (Figura 6.22) que afectan directamente al volumen de agua tanto de ríos permanentes y escurrimientos de temporal como al de los manantiales registrados.

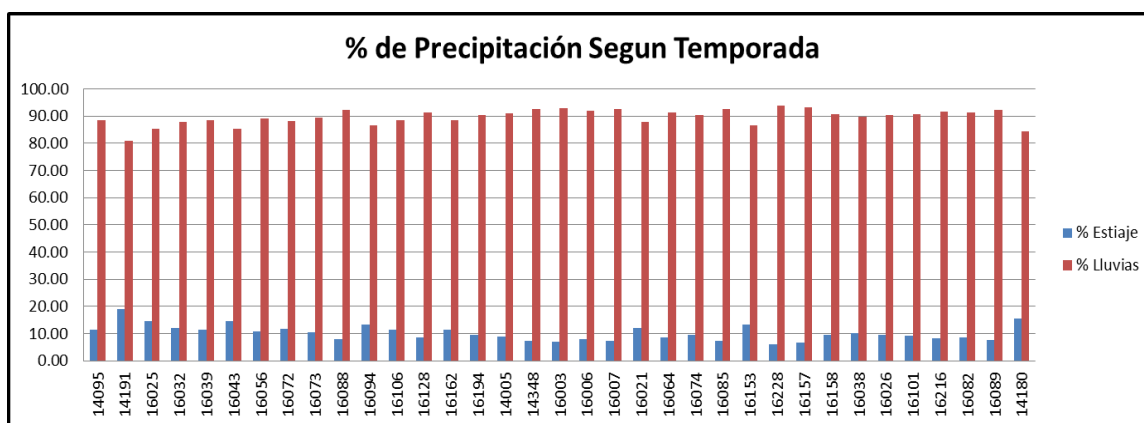


Figura 6.22 Porcentaje de precipitación para cada estación del área de estudio en las temporadas de estiaje y lluvias

Por otra parte se ha considerado importante el observar la relación que guarda la altitud con la precipitación, toda vez que dicho comportamiento en la región afecta al modelo de balance pues tiene la particularidad de que la lluvia va aumentando con la altitud, pero al llegar a ciertas altitudes, ésta vuelve a disminuir tal como se muestra en la figura 6.23.

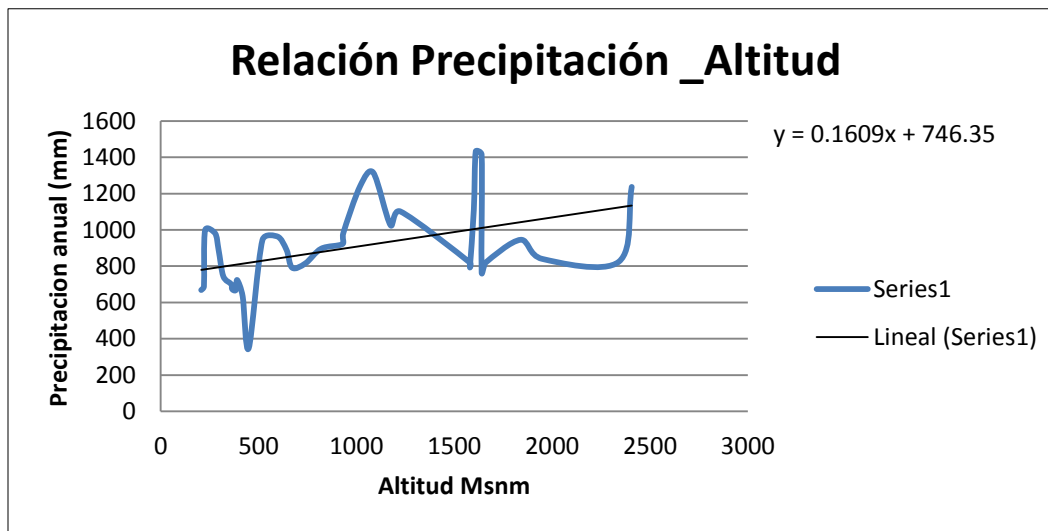


Figura 6.23 Relación de la precipitación con la altitud para estaciones en estudio

6.2.6. Coeficiente de escurrimiento Anual

El coeficiente de escurrimiento (C_e) es la proporción de lluvia que se convierte en escurrimiento para la región determinada. El método que se aplica para la determinación de este elemento fue adoptado de la Norma Oficial Mexicana (NOM-011-CNA, 2000), que establece las especificaciones y el criterio para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Su ventaja radica en la sencillez de los datos que requiere, lo que facilita su aplicación.

Este método considera dos factores en su fórmula, es decir el escurrimiento en una determinada zona está dado en primer lugar por la lámina de precipitación, obtenida de las estaciones climatológicas, esta se analiza a un intervalo de tiempo mensual. El segundo parámetro considera las características de permeabilidad del suelo y la capacidad de interrupción de la lluvia por parte de la vegetación, ambas incluidas en el parámetro K .

A pesar de que la permeabilidad del suelo es un elemento complejo que depende de diversos factores, se hace la simplificación de considerar la textura del suelo como una media de ese factor, debido a la permeabilidad, esto deberá remplazar a las texturas.

Sin embargo hay que señalar que el coeficiente de escurrimiento no es un valor exacto, sino únicamente una aproximación, pues además de que se obtendrá a partir de datos muy generales para el tamaño de los acuíferos, el coeficiente en sí mismo tiende a variar

espacialmente y temporalmente en el transcurso del año, según la intensidad de lluvia y las condiciones de humedad, previas en la superficie de los acuíferos.

Conociendo el coeficiente de escurrimiento, es posible obtener el volumen medio mensual del escurrimiento, al multiplicar el coeficiente de escurrimiento, por la media ponderada de la precipitación o lamina media mensual de lluvia (m) por la superficie (m²), obteniendo un volumen total del agua que cae como precipitación en los acuíferos expresado en m³/mes.

La norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, establece una metodología para obtener el coeficiente de escurrimiento, que está en función del uso y tipo de suelo y de la precipitación en la zona, mediante las siguientes ecuaciones.

$$C_e = \frac{K(PMA - 250)}{2000} \quad , \quad \text{si } K \leq 0.15$$

$$C_e = \frac{K(PMA - 250)}{2000} + \frac{(K - 0.15)}{1.5} \quad , \quad \text{si } K > 0.15$$

Dónde:

C_{ea}: Coeficiente de escurrimiento medio anual

K: Parámetro que depende del uso y tipo de suelo

P: Precipitación media anual en mm

Para obtener el coeficiente mensual se divide la precipitación mensual entre la anual y se multiplica por el coeficiente de escurrimiento. Es decir:

$$C_{em} = \frac{P_{mmi}}{P_{ma}} * C_{ea}$$

Dónde:

C_{em}: Coeficiente de escurrimiento medio mensual

P_{mmi}: Precipitación media mensual del mes i

P_{ma}: Precipitación media anual

C_{ea}: Coeficiente de escurrimiento medio anual

Con los mapas del parámetro K y el mapa de precipitación media anual se procede a encontrar el mapa del coeficiente de escurrimiento medio anual, el siguiente mapa se obtendrá con ayuda del método de los polígonos de Thiessen, verificando para cada área de influencia de cada estación el valor medio de la precipitación anual y el valor del parámetro K, dichos valores del coeficiente de escurrimiento se encuentran en la tabla 6.20.

Codigo	Nombre	X	Y	Z	Ce
14095	MANUEL M DIEGUEZ CFE	-103.083	19.583	1225	0.14
14191	VALLE DE JUAREZ SMN	-102.950	19.933	1950	0.11
16025	COTIJA	-102.667	19.717	2341	0.11
16032	CHARAPAN	-102.200	19.700	2407	0.16
16039	PIEDRAS BLANCAS	-102.768	19.242	419	0.09
16043	EL PUERTO	-102.669	19.801	1640	0.10
16056	JICALAN CFE	-102.069	19.390	1610	0.18
16072	CHORROS DEL VARAL CFE	-102.569	19.519	930	0.12
16073	LIMONES CFE	-102.524	19.601	1175	0.13
16088	PERIBAN	-102.409	19.519	1640	0.17
16094	PRESA GUARACHA	-102.584	19.956	1580	0.11
16106	SAN ANGEL	-102.543	19.856	1840	0.12
16128	TEPACALTEPEC	-102.833	19.183	365	0.09
16162	ORANDINO	-102.322	19.967	1580	0.11
16194	ETA 039 TOCUMBO	-102.519	19.701	1600	0.14
14005	AHUIJULLO	-103.100	19.084	820	0.12
14348	JILOTLAN	-103.018	19.369	740	0.11
16003	AGUILILLA	-102.750	18.733	933	0.13
16006	ANTUNEZ	-102.200	19.008	360	0.10
16007	APATZINGAN SMN	-102.351	19.087	320	0.10
16021	COALCOMAN CFE	-103.167	18.783	1020	0.16
16064	LA PASTORIA CFE	-102.054	18.925	221	0.09
16074	PANCHES CFE	-102.133	18.843	207	0.09
16085	PARACUARO	-102.222	19.150	597	0.13
16153	COALCOMAN DGE	-103.152	18.768	1086	0.16
16228	ACAHUATO	-102.326	19.142	227	0.13
16157	CHILA	-102.617	18.933	278	0.13
16158	EL CAJON	-102.750	18.969	296	0.12
16038	EL CARRIZO	-102.993	19.020	520	0.12
16026	CUATRO CAMINOS	-102.102	18.986	672	0.11
16101	PUNTA DE AGUA	-102.683	19.207	384	0.09
16216	BUENAVISTA II	-102.585	19.206	450	0.06
16082	NUEVA ITALIA CFE	-102.085	19.059	391	0.10
16089	PLANTA EL COBANO CFE	-102.006	19.156	643	0.12
14180	QUITUPAN	-102.872	19.923	1660	0.11

Tabla 6.20 Valor del coeficiente de escurrimiento por área de influencia de cada estación

Con los datos anteriores generados, el cálculo del coeficiente de escurrimiento es relativamente sencillo, pues con la ayuda de los sistemas de información geográfica, se puede manipular toda esta información agrupándola en un solo mapa vectorial y hacer operaciones matemáticas con las herramientas del software; teniendo como resultado el mapa siguiente con valores medios para el acuífero Cotija de 0.20 y para el acuífero Apatzingán de 0.08.

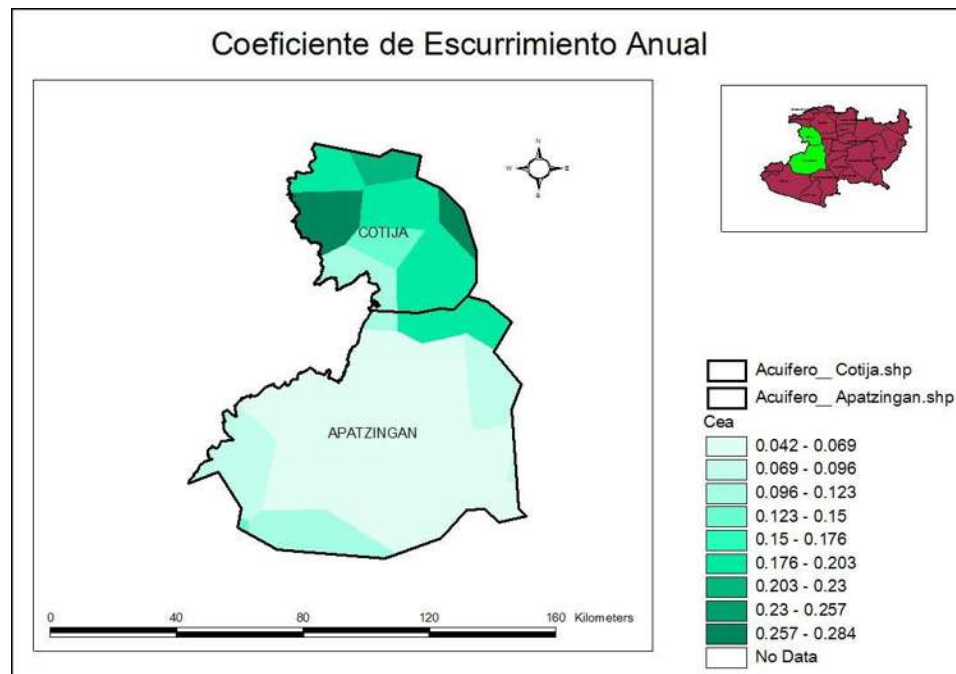


Figura 6.24 Coeficiente de escurrimiento medio anual de los Acuíferos Apatzingán y Cotija

Se obtuvieron los mapas de coeficiente de escurrimiento para cada mes del año, esto con el fin de obtener el escurrimiento medio mensual (Figura 6.25).

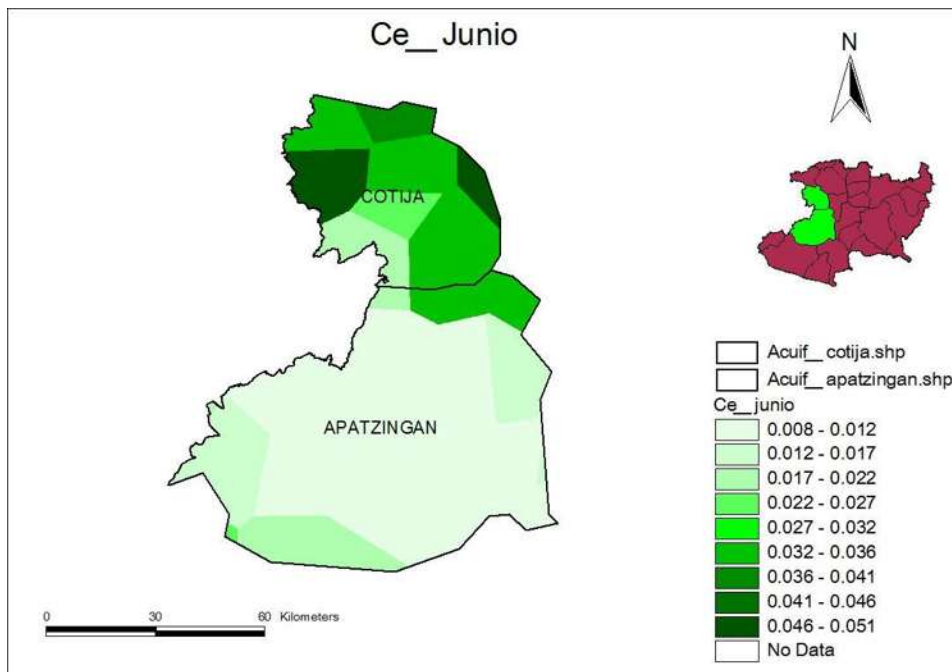


Figura 6.25 Coeficiente de escurrimiento medio para el mes de Junio

6.2.7. Determinación del Escurrimiento Superficial

Una vez que la precipitación alcanza la superficie del suelo, se infiltra hasta que las capas superiores del mismo se saturan, a partir de este punto las depresiones en el terreno tienden a llenarse y al mismo tiempo el agua empieza escurrir sobre la superficie.

El escurrimiento es un componente fundamental del balance hídrico, pues representa una pérdida en dicho balance. De acuerdo con Chow, el escurrimiento es la parte de la precipitación que aparece en las corrientes fluviales superficiales, perennes, intermitentes o efímeras, y que regresa al mar o a los cuerpos de agua interiores (Maderey, 2005). Es decir que corresponde a la parte del ciclo hidrológico en la que el agua se desliza sobre o en la superficie terrestre sin intervención del hombre.

Son varios los factores que afectan al escurrimiento y pueden clasificarse de forma genérica en los siguientes tipos:

6.2.7.1. Factores climáticos.

En especial nos referimos a la forma, intensidad duración y distribución de la precipitación que condiciona enormemente el comportamiento del escurrimiento.

6.2.7.2. Factores fisiográficos.

Entre éstos tenemos a los morfométricos como el área de cuenca, la forma, la pendiente, la red de drenaje y la altitud; pero también están los de tipo físico y biológico como el tipo de suelo, la geología, la topografía y la cobertura y uso del suelo.

El escurrimiento que aquí se describe se obtuvo básicamente a partir del modelo empleado en el desarrollo del balance hídrico y es por esta razón, resultado de la estimación que dicho modelo hace con los datos provenientes de la precipitación medida en las estaciones climáticas consideradas y ya descritas con anterioridad y con el coeficiente de escurrimiento, elemento que fue adoptado de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000.

$$\text{Escurrimiento} = \text{Precipitación} * \text{Coeficiente de escurrimiento}$$

Este escurrimiento puede calcularse anual o mensual, se calculó un mapa de precipitación para cada mes y uno anual y de la misma manera para el mapa del coeficiente de escurrimiento.

Con ayuda de los sistemas de información geográfica; en este caso el Software Arc View 3.2 nos ayuda a operar entre mapas con ayuda de la herramienta Map Calculator.

En la figura 6.26 se muestra el mapa de escurrimiento para el mes de junio, visualizando que en el acuífero de Apatzingán los escurrimientos son muy bajos; esto porque como ya se vio también el mapa de coeficiente de escurrimiento y de precipitación tiene valores bajos para esta zona.

En la tabla 6.21 se detalla un resumen de las láminas de escurrimiento mensual y anual de ambos acuíferos, estas láminas fueron obtenidas con operaciones entre mapas, vemos que el mayor escurrimiento corresponde a los meses donde se concentra la mayor parte de la precipitación esto hace que existan muchas corrientes solo en tiempo de lluvias y que estos escurrimientos anuales son del orden del 20% de la lámina de precipitación para el acuífero Cotija y del 8% para el acuífero Apatzingán.

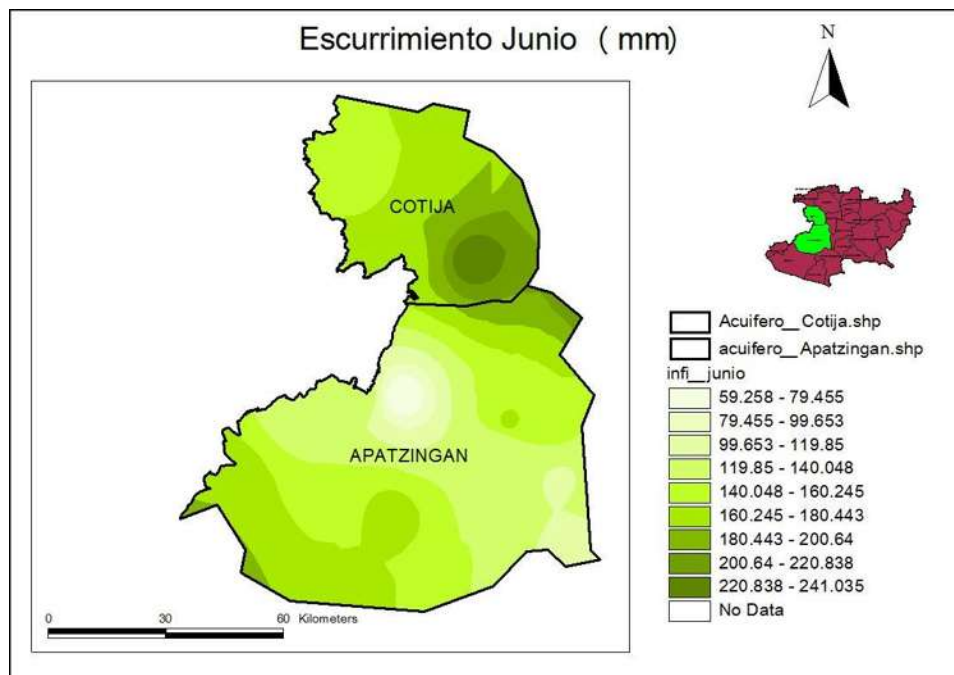


Figura 6.26 Escurrimiento en los acuíferos Apatzingán y Cotija para el mes de junio

Mes	Acuífero	
	Cotija	Apatzingán
	Escurrimiento (mm)	Escurrimiento (mm)
Enero	0.1023	0.0274
Febrero	0.0077	0.0014
Marzo	0.0037	0.001
Abril	0.0044	0.0008
Mayo	0.2043	0.0455
Junio	6.6085	2.0669
Julio	10.6867	3.3754
Agosto	9.8332	2.9971
Septiembre	7.1806	2.521
Octubre	1.6698	0.5629
Noviembre	0.1022	0.0276
Diciembre	0.0268	0.0059
Anual	202.6363	64.0489

Tabla 6.21 Valores del escurrimiento medio por mes y anual obtenidos con sistemas de información geográfica

6.2.8. Determinación de la infiltración

Posteriormente se obtiene la infiltración en los acuíferos. La infiltración total (I_t) se define con la ecuación:

$$I_t = P (1 - C_e)$$

Donde

I_t = Infiltración en mm

P = Precipitación en mm

C_e = Coeficiente de escurrimiento

Es decir, se considera que representa la proporción de la lluvia que no se pierde en forma de escurrimiento, sin embargo, una parte de la precipitación que no escurre se pierde por procesos de evaporación y transpiración. Es posible calcular el volumen de la evapotranspiración potencial en función de la precipitación y la temperatura a partir de la fórmula de Blaney-Criddle.

En la figura 6.27 se muestra un mapa de infiltración para el mes de junio, estos se calcularon de la misma forma que los anteriores; por operaciones entre mapas con sistemas de información geográfica. En la tabla 6.22 se muestra un resumen de láminas de infiltración para ambos acuíferos para cada mes y anual.

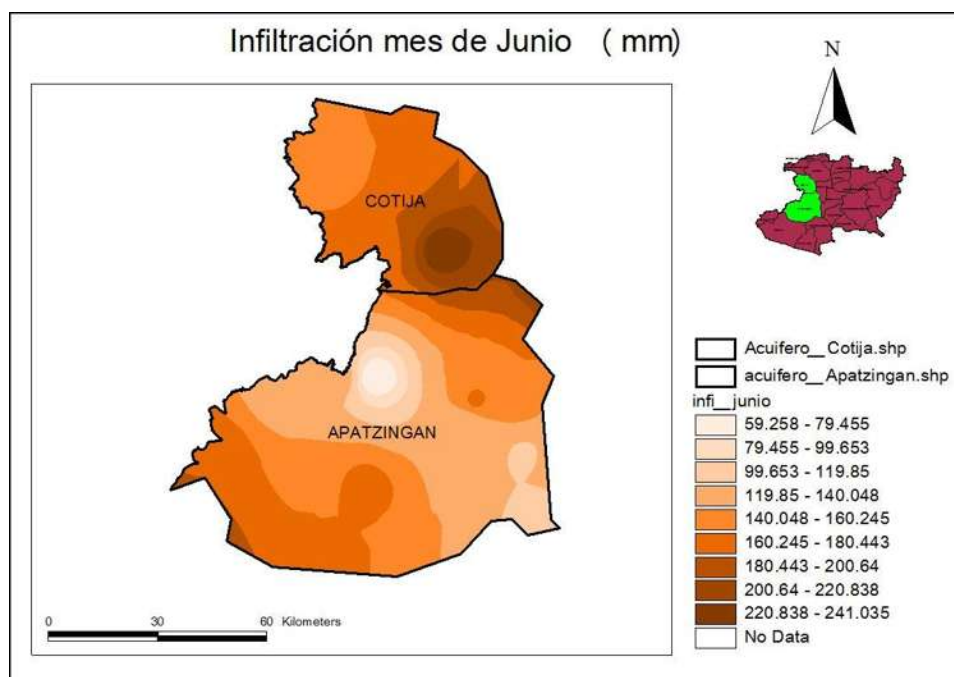


Figura 6.27 Lámina de infiltración para ambos acuíferos expresada en milímetros

Mes	Acuífero	
	Cotija	Apatzingán
	Infiltración (mm)	Infiltración (mm)
Enero	23.9793	16.5272
Febrero	7.3433	3.313
Marzo	4.5963	3.0311
Abril	5.6738	2.3176
Mayo	35.4627	20.5419
Junio	175.845	147.8242
Julio	219.3801	189.2568
Agosto	215.368	176.3552
Septiembre	175.7789	167.1447
Octubre	87.9649	78.5778
Noviembre	23.9101	16.5313
Diciembre	12.7325	7.4289
Anual	799.9753	777.9079

Tabla 6.22 Valores de infiltración media por mes y anual obtenidos con sistemas de información geográfica

6.2.9. Determinación de la Evapotranspiración o Uso Consuntivo

Se conoce como evapotranspiración a la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo; por evaporación y por otra parte la transpiración de las plantas.

La evapotranspiración es un fenómeno muy complejo de calcular por el número de variables que intervienen en este proceso, como lo son el clima y las características del cultivo. Los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación, la temperatura, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. En lo referente a las características del cultivo nos encontramos con el tipo de cultivo, la etapa de desarrollo, la profundidad radicular, la altura de cultivo entre otras.

Analizando lo anterior nos encontramos con un gran problema, porque los métodos existentes para calcular estas demandas o no engloban todos los factores que intervienen en el proceso, o no existe la información requerida para aplicarlos, los métodos más conocidos en el país son el de Thornthwaite que solo está en función de la variable temperatura, Blaney Criddle el cual considera además de la temperatura y las horas diarias de sol, el tipo de cultivo, la duración del ciclo vegetativo la temporada de siembra y la zona.

Por último está el método de Penman Monteith que hace referencia de datos climáticos, como la radiación solar, temperatura, humedad del aire y velocidad del viento y de parte del cultivo considera propiedades como la profundidad radicular, altura del cultivo de las etapas de crecimiento, épocas de siembra, los coeficientes de desarrollo lo cual hace que sea un método muy completo pero a su vez sumamente complejo.

Así que nosotros consideramos que el método de Blaney Criddle es el que mejor se adecua para nuestras necesidades ya que no solo considera los factores climáticos si no que tiene en cuenta las características del cultivo y se desarrolla de siguiente forma:

$$E_t = K_{ci} \cdot F \quad F = \sum_{i=1}^n f_i \quad f_i = P_i \left(\frac{T_i + 17.8}{21.8} \right)$$

Dónde:

E_t = evapotranspiración durante el ciclo vegetativo (cm).

F = factor de temperatura y luminosidad.

K_{ci} = coeficiente de desarrollo parcial del cultivo.

n = número de meses que dura el ciclo vegetativo.

P_i = porcentaje de horas de sol del mes i .

T_i = temperatura media del mes i en °C.

De la misma forma que en procedimientos anteriores, todo el método de Blaney Criddle fue aplicado con ayuda del Software Arc View 3.2, es decir todo el proceso fue realizado con operación entre mapas, de esta manera nos aseguramos que el cálculo sea más preciso.

6.2.9.1. *Coeficiente de Desarrollo Parcial del Cultivo. (K_{ci})*

Para determinar la evapotranspiración de los distintos usos de suelo fue necesario investigar la localización espacial de cada tipo de cultivo, para esto se usó el mapa de uso de suelo serie IV del conjunto de datos vectoriales, serie desarrollada en el periodo 2007-2010 por el INEGI y se complementó con el shape de la franja aguacatera, mismo que fue desarrollado por el grupo gestión integral del agua del departamento de hidráulica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, los bloques de cobertura vegetal como bosque, selva, zona urbana, pastizal son fácil de identificar, pero el bloque de cobertura agrícola es más complejo ya que el mapa está construido de una forma muy general y no especifica qué tipo de cultivo está posicionado en determinada área, esto nos limita para hacer un cálculo más fino de demandas hídricas.

Por lo anterior fue necesario superponer el contorno de las zonas agrícolas comprendidas en los acuíferos en estudio directamente sobre el software de Google Earth y con ayuda de

esta herramienta y el conocimiento generalizado de usos de suelo por municipio y zonas en específico se hicieron visitas virtuales de campo para identificar cada tipo de cultivo y se delimitaron a grandes rasgos sus contornos obteniendo así los cultivos reales y en áreas aproximadas, logrando conocer tipo de cultivo y área que ocupa; con estos datos se investigaron los coeficientes de desarrollo parcial (coeficientes utilizados en el método de Blaney Criddle) y con las áreas se obtuvo el porcentaje que ocupa cada cultivo comprendido en el bloque de agrícola, una vez determinado el porcentaje de área por cultivo este nos sirvió para hacer un promedio pesado de los valores del coeficiente de cultivo y por ultimo este valor asignarlo como el valor representativo del bloque agrícola . En la tabla 6.23 se muestran los datos anteriormente descritos.

kc_Cotija												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Zarzamora con Cubierta	0.62	0.69	0.87	1	1.12	1.15	1.15	1.12	1	0.87	0.75	0.62
Zarzamora sin cubierta	0.17	0.25	0.37	0.63	0.87	1	1	0.75	0.5	0.31	0.19	0.13
Caña de Azúcar	0.3	0.35	0.5	0.6	0.77	0.9	0.98	1.02	1.02	0.98	0.9	0.78
Maíz	0.54	0.72	1	1.1	1.05	0.85	0.54	0.72	1	1.1	1.05	0.85
PROMEDIO	0.33	0.42	0.59	0.75	0.90	0.95	0.92	0.88	0.83	0.76	0.67	0.55

kc_Apatzingán												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Limón	0.63	0.65	0.67	0.7	0.72	0.74	0.74	0.72	0.7	0.67	0.65	0.62
Mango	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.8	0.8	0.8	0.8	0.75	0.75	0.75
Plátano	0.6	1.05	1.05	1.05	1.1	1.1	1.1	1.05	0.9	0.6	0.6	0.6
Jitomate	0.48	0.6	0.9	1	0.95	0.8	0.48	0.6	0.9	1	0.95	0.8
Maíz	0.54	0.72	1	1.1	1.05	0.85	0.54	0.72	1	1.1	1.05	0.85
PROMEDIO	0.60	0.75	0.87	0.92	0.91	0.86	0.73	0.78	0.86	0.82	0.80	0.72

Tabla 6.23 Coeficientes de desarrollo parcial para los cultivos comprendidos en el bloque agrícola en los Acuíferos en estudio

La cobertura de suelo en los acuíferos está compuesta por 5 grandes bloques vegetales, los cuales se muestran en la tabla 6.24. Estos valores son los que se utilizaron para el cálculo de la evapotranspiración en los acuíferos en estudio, siguiendo el mismo procedimiento; estos valores fueron utilizados por sistemas de información geográfica para hacer mapas del coeficiente de desarrollo parcial de la cobertura vegetal en ambos acuíferos.

Los coeficientes del cultivo fueron localizados en diferentes fuentes de información; los coeficientes de bosque, pastizal y aguacate se obtuvieron de publicaciones del Instituto

Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP, SAGARPA, 2014). En el caso de las selvas y el área agrícola se apoyó del libro de fundamentos de hidrología de superficie.

Coeficientes de Desarrollo Parcial												
Bloque	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Agrícola Cotija	0.33	0.42	0.59	0.75	0.90	0.95	0.92	0.88	0.83	0.76	0.67	0.55
Agrícola Apatzingán	0.60	0.75	0.87	0.92	0.91	0.86	0.73	0.78	0.86	0.82	0.80	0.72
Aguacate	0.60	0.75	0.85	1.10	1.10	1.20	1.20	1.05	1.00	0.85	0.75	0.60
bosque	0.20	0.30	0.40	0.50	0.68	0.85	0.75	0.61	0.50	0.43	0.35	0.20
pastos	0.37	0.62	0.75	0.85	0.88	0.93	0.89	0.88	0.85	0.75	0.63	0.43
selva	0.20	0.25	0.37	0.65	0.80	1.00	0.95	0.85	0.50	0.35	0.23	0.20

Tabla 6.24 Coeficientes de desarrollo parcial para los distintos bloques presentes en los acuíferos Apatzingán y Cotija

Con los datos anteriores se hizo un mapa para cada mes, en la imagen 6.28 se muestra el mapa correspondiente al mes de junio, en este se puede ver la variación que presenta el coeficiente de cultivo en los distintos bloques de cobertura vegetal, (los puntos blancos son cuerpos de agua y ciudades) siendo estos mayores en el bloque de la franja aguacatera y en agrícola en general.

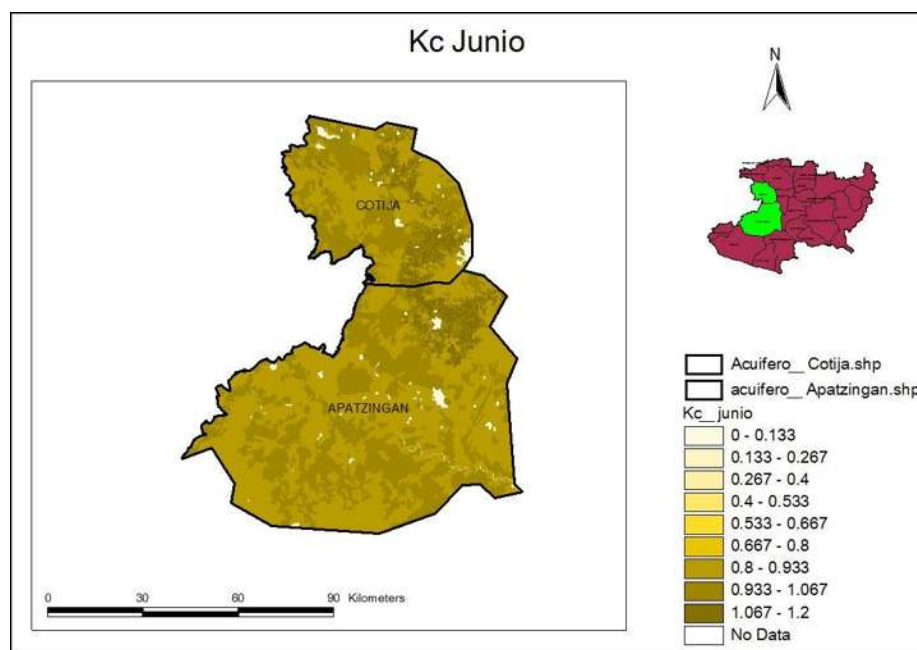


Figura 6.28 Coeficiente de cultivo para el mes de junio

6.2.9.2. *Factor de temperatura y luminosidad (fi).*

Para obtener el factor de temperatura y luminosidad mensual (fi) necesitamos dos parámetros, la temperatura en el mes i (Ti) y un Porcentaje de horas de sol del mes i con respecto al año (Pi).

$$fi = Pi * ((Ti + 17.8) / 21.8)$$

Vamos a obtener primero el factor de temperatura el cual contemplará el segundo término de la multiplicación de la ecuación anterior es decir: $((Ti + 17.8) / 21.8)$.

Para esto se necesita la temperatura mensual en el área en estudio, esta se obtendrá de las estaciones climatológicas, las cuales se muestran en la tabla 6.25.

Temperaturas Media Mensuales Por Estación													
Código	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
14005	12.5	13.8	14.5	17.6	20.2	21.2	20.5	20.3	20.1	19.8	17.2	14.9	17.7
14092	15.6	18.0	19.8	22.4	24.9	25.2	23.8	23.7	23.5	22.9	21.4	19.5	21.7
14124	8.9	8.7	11.2	14.7	16.7	16.9	17.0	16.0	15.8	14.9	11.1	8.7	13.4
16003	16.2	18.0	19.8	21.7	22.4	22.3	21.2	21.2	21.0	21.2	19.7	18.4	20.3
16006	18.9	20.4	22.4	24.1	25.0	24.6	23.8	23.7	23.5	23.2	22.0	20.2	22.6
16007	18.5	19.9	21.9	24.0	26.1	26.0	24.4	24.1	23.9	23.6	21.9	19.6	22.8
16011	17.1	19.1	21.2	23.7	25.7	25.1	24.0	23.4	23.1	22.8	20.8	19.4	22.1
16019	6.7	9.7	11.3	15.1	17.5	18.2	15.3	14.7	16.2	14.4	10.4	8.4	13.1
16025	12.4	14.0	15.6	17.9	19.6	19.1	18.0	18.1	17.8	16.6	15.4	13.6	16.5
16026	14.3	18.2	20.2	22.2	23.6	24.1	23.3	23.1	22.9	22.3	20.7	19.3	21.2
16032	5.4	5.0	5.9	7.8	9.5	10.3	9.8	10.0	10.1	8.8	6.7	6.3	7.9
16038	14.1	17.9	19.4	21.6	22.5	23.1	22.1	22.2	21.7	21.2	19.4	17.5	20.2
16039	17.7	19.8	21.1	23.0	24.9	25.3	23.7	23.5	23.4	23.0	21.6	20.1	22.2
16043	6.1	7.2	9.3	12.4	15.6	17.3	16.3	15.8	15.5	13.4	10.1	7.4	12.2
16056	9.2	9.8	11.6	14.8	17.0	17.8	17.0	16.4	16.2	14.9	12.9	10.9	14.0
16072	13.1	14.2	15.7	18.2	20.1	20.9	19.5	19.1	18.8	17.6	15.9	14.6	17.3
16073	11.5	11.8	13.4	16.5	19.2	20.4	19.3	18.7	18.0	16.7	14.7	13.0	16.1
16074	15.7	16.7	18.4	21.7	25.0	26.4	25.0	24.7	24.2	23.1	20.3	17.5	21.5
16082	14.1	20.1	21.4	23.2	25.0	25.0	24.0	23.7	23.3	22.9	21.9	20.4	22.1
16085	12.0	18.7	19.7	22.0	23.2	23.1	22.3	22.1	21.7	21.7	20.6	18.8	20.5
16088	12.4	14.9	16.5	18.8	19.7	19.5	19.0	19.0	17.7	17.6	16.7	16.0	17.3
16090	16.7	19.8	21.2	23.2	25.1	25.4	23.8	23.6	23.5	23.0	21.7	20.1	22.3
16101	15.2	18.6	20.2	23.2	25.6	26.3	24.6	24.2	24.0	23.5	20.9	18.9	22.1
16106	2.3	2.9	4.9	7.2	9.4	10.4	9.8	9.5	9.4	7.6	4.7	3.0	6.7

16128	18.2	20.5	22.1	24.2	26.2	26.7	25.6	25.2	25.2	24.4	22.7	20.8	23.5
16149	16.8	18.8	21.1	23.8	26.0	26.1	24.3	23.8	23.6	23.4	21.0	18.9	22.3
16154	13.2	13.8	15.3	17.2	20.0	21.9	21.1	20.9	21.2	20.1	17.7	15.2	18.1
16156	11.2	15.5	18.0	20.7	22.1	21.9	20.8	20.9	20.4	20.0	18.3	16.7	18.9
16157	17.0	19.4	21.2	23.1	25.0	25.2	23.4	23.2	23.0	22.7	21.1	19.6	22.0
16158	14.3	18.5	20.3	22.8	25.2	25.5	23.9	23.5	23.5	22.9	21.0	18.8	21.7
16190	17.7	19.2	20.4	22.9	24.7	25.4	23.9	23.8	23.4	22.8	20.8	19.9	22.1
16194	8.7	9.4	10.9	13.1	14.8	15.7	15.1	15.6	15.7	14.7	12.4	10.4	13.0
16216	12.6	19.8	20.8	23.0	24.6	24.7	23.8	23.5	23.2	23.1	21.9	19.9	21.7
16228	16.0	17.4	18.7	20.6	21.7	21.5	20.3	20.2	20.0	19.7	18.4	17.3	19.3
16251	4.4	9.2	10.5	12.9	14.8	16.1	15.9	14.9	14.9	13.4	10.9	8.6	12.2
16259	11.3	11.5	11.4	13.0	13.9	16.1	16.0	15.5	15.2	14.5	13.1	12.1	13.6

Tabla 6.25 Temperaturas medias mensuales por estación climatológica

Con las temperaturas medias mensuales se obtuvo los factores de temperatura para cada mes, estos se muestran en la tabla 6.26.

Factores de Temperatura														
Código	X	Y	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
14005	-103.10	19.08	1.39	1.45	1.48	1.62	1.74	1.79	1.76	1.75	1.74	1.72	1.61	1.50
14092	-102.87	19.20	1.53	1.64	1.72	1.85	1.96	1.97	1.91	1.90	1.89	1.87	1.80	1.71
14124	-102.83	19.89	1.22	1.22	1.33	1.49	1.58	1.59	1.60	1.55	1.54	1.50	1.32	1.21
16003	-102.75	18.73	1.56	1.64	1.72	1.81	1.84	1.84	1.79	1.79	1.78	1.79	1.72	1.66
16006	-102.20	19.01	1.68	1.75	1.84	1.92	1.96	1.94	1.91	1.90	1.89	1.88	1.83	1.74
16007	-102.35	19.09	1.66	1.73	1.82	1.92	2.01	2.01	1.94	1.92	1.91	1.90	1.82	1.71
16011	-102.59	19.21	1.60	1.69	1.79	1.90	1.99	1.97	1.92	1.89	1.88	1.86	1.77	1.71
16019	-102.70	19.97	1.12	1.26	1.33	1.51	1.62	1.65	1.52	1.49	1.56	1.48	1.29	1.20
16025	-102.67	19.72	1.38	1.46	1.53	1.64	1.72	1.69	1.64	1.65	1.63	1.58	1.52	1.44
16026	-102.10	18.99	1.47	1.65	1.74	1.83	1.90	1.92	1.88	1.87	1.87	1.84	1.77	1.70
16032	-102.20	19.70	1.06	1.05	1.09	1.17	1.25	1.29	1.27	1.27	1.28	1.22	1.12	1.11
16038	-102.99	19.02	1.46	1.64	1.71	1.81	1.85	1.88	1.83	1.84	1.81	1.79	1.71	1.62
16039	-102.77	19.24	1.63	1.72	1.78	1.87	1.96	1.98	1.91	1.90	1.89	1.87	1.81	1.74
16043	-102.67	19.80	1.09	1.15	1.24	1.38	1.53	1.61	1.56	1.54	1.53	1.43	1.28	1.16
16056	-102.07	19.39	1.24	1.26	1.35	1.50	1.59	1.63	1.59	1.57	1.56	1.50	1.41	1.32
16072	-102.57	19.52	1.42	1.47	1.53	1.65	1.74	1.78	1.71	1.69	1.68	1.62	1.54	1.49
16073	-102.52	19.60	1.35	1.36	1.43	1.57	1.70	1.75	1.70	1.67	1.64	1.58	1.49	1.41
16074	-102.13	18.84	1.54	1.58	1.66	1.81	1.96	2.03	1.96	1.95	1.93	1.88	1.75	1.62
16082	-102.09	19.06	1.46	1.74	1.80	1.88	1.96	1.96	1.92	1.91	1.89	1.87	1.82	1.75
16085	-102.22	19.15	1.37	1.67	1.72	1.82	1.88	1.88	1.84	1.83	1.81	1.81	1.76	1.68

16088	-102.41	19.52	1.39	1.50	1.57	1.68	1.72	1.71	1.69	1.69	1.63	1.62	1.58	1.55
16090	-102.77	19.24	1.58	1.72	1.79	1.88	1.97	1.98	1.91	1.90	1.89	1.87	1.81	1.74
16101	-102.68	19.21	1.52	1.67	1.74	1.88	1.99	2.02	1.95	1.92	1.92	1.90	1.78	1.68
16106	-102.54	19.86	0.92	0.95	1.04	1.15	1.25	1.29	1.26	1.25	1.25	1.16	1.03	0.96
16128	-102.83	19.18	1.65	1.76	1.83	1.92	2.02	2.04	1.99	1.97	1.97	1.94	1.86	1.77
16149	-102.35	19.08	1.59	1.68	1.78	1.91	2.01	2.01	1.93	1.91	1.90	1.89	1.78	1.68
16154	-103.15	18.77	1.42	1.45	1.52	1.60	1.73	1.82	1.78	1.78	1.79	1.74	1.63	1.51
16156	-102.07	19.27	1.33	1.53	1.64	1.77	1.83	1.82	1.77	1.77	1.75	1.73	1.65	1.58
16157	-102.62	18.93	1.59	1.71	1.79	1.88	1.96	1.97	1.89	1.88	1.87	1.86	1.78	1.72
16158	-102.75	18.97	1.47	1.66	1.75	1.86	1.97	1.99	1.91	1.89	1.89	1.87	1.78	1.68
16190	-102.27	18.72	1.63	1.70	1.75	1.87	1.95	1.98	1.91	1.91	1.89	1.86	1.77	1.73
16194	-102.52	19.70	1.21	1.25	1.32	1.42	1.50	1.54	1.51	1.53	1.53	1.49	1.38	1.29
16216	-102.59	19.21	1.39	1.73	1.77	1.87	1.94	1.95	1.91	1.89	1.88	1.88	1.82	1.73
16228	-102.33	19.14	1.55	1.61	1.67	1.76	1.81	1.80	1.75	1.74	1.73	1.72	1.66	1.61
16251	-102.29	19.80	1.02	1.24	1.30	1.41	1.50	1.55	1.55	1.50	1.50	1.43	1.31	1.21
16259	-102.11	19.40	1.33	1.34	1.34	1.41	1.45	1.56	1.55	1.53	1.51	1.48	1.42	1.37

Tabla 6.26 Factores de Temperatura mensuales para cada estación climatológica

La tabla anterior se exportó al programa Arc View 3.2, y con ayuda de los polígonos de Thiessen se obtuvieron los mapas para cada mes del factor de temperatura, en la imagen 6.29 se muestra el mapa correspondiente al mes de junio.

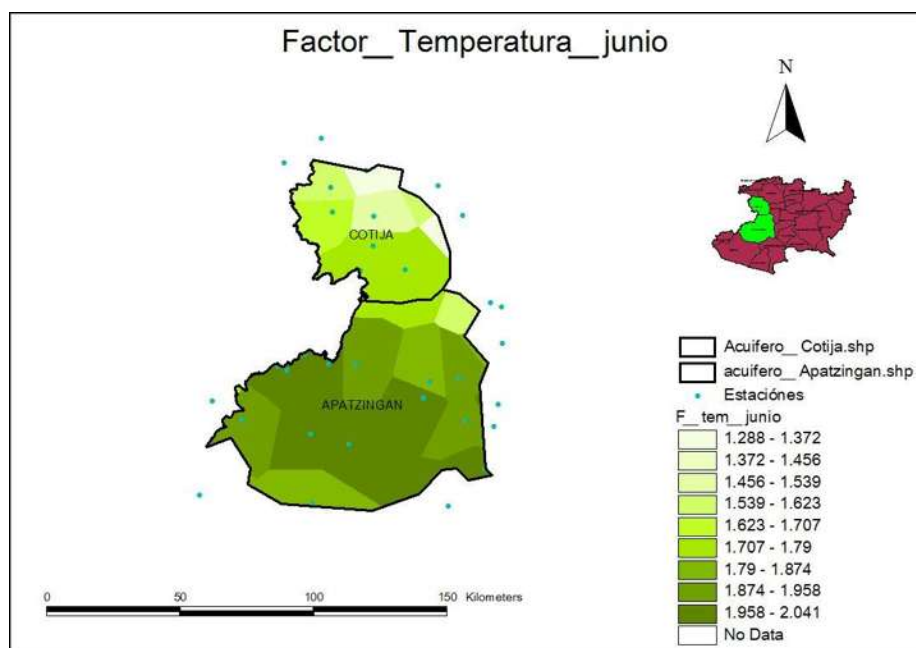


Figura 6.29 Factor de temperatura para el mes de junio

Para obtener el Porcentaje de horas de sol del mes i con respecto al año (P_i) fue necesario interpolar entre los valores de latitud entre los que se encuentran los acuíferos Apatzingán y Cotija.

En la tabla 6.27 se muestra el porcentaje de horas de sol mensual para latitudes Norte y Sur, esta tabla fue tomada del libro Fundamentos de Hidrología de Superficie de Aparicio

<i>Porciento de horas de sol mensual</i>												
LATITUD NORTE	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OTC.	NOV.	DIC.
0°	8.5	7.66	8.49	8.21	8.5	8.22	8.5	8.49	8.21	8.5	8.22	8.5
5	8.32	7.57	8.47	8.29	8.65	8.41	8.67	8.6	8.23	8.42	8.07	8.3
10	8.13	7.47	8.45	8.37	8.81	8.6	8.86	8.71	8.25	8.34	7.91	8.1
15	7.94	7.36	8.43	8.44	8.98	8.8	9.05	8.83	8.28	8.2	7.75	7.88
16	7.93	7.35	8.44	8.46	9.07	8.83	9.07	8.85	8.27	8.24	7.72	7.83
17	7.86	7.32	8.43	8.48	9.04	8.87	9.11	8.87	8.27	8.22	7.69	7.8
18	7.83	7.3	8.42	8.5	9.09	8.92	9.16	8.9	8.27	8.21	7.66	7.74
19	7.79	7.28	8.41	8.51	9.11	8.97	9.2	8.92	8.28	8.19	7.63	7.71
20	7.74	7.25	8.41	8.52	9.15	9	9.25	8.96	8.3	8.18	7.58	7.66
21	7.71	7.24	8.4	8.54	9.18	9.05	9.29	8.98	8.29	8.15	7.54	7.62
22	7.66	7.21	8.4	8.56	9.22	9.09	9.33	9	8.3	8.13	7.5	7.55
23	7.62	7.19	8.4	8.57	9.24	9.12	9.35	9.02	8.3	8.11	7.47	7.5
24	7.58	7.17	8.4	8.6	9.3	9.2	9.41	9.05	8.31	8.09	7.43	7.46
25	7.53	7.14	8.39	8.61	9.33	9.23	9.45	9.09	8.32	8.09	7.4	7.42
26	7.49	7.12	8.4	8.64	9.38	9.3	9.49	9.1	8.31	8.06	7.36	7.31
27	7.43	7.09	8.38	8.65	9.4	9.32	9.52	9.13	8.32	8.03	7.36	7.31
28	7.4	7.07	8.39	8.68	9.46	9.38	9.58	9.16	8.32	8.02	7.27	7.27
29	7.35	7.04	8.37	8.7	9.49	9.43	9.61	9.19	8.32	8	7.24	7.2
30	7.3	7.03	8.38	8.72	9.53	9.49	8.67	9.22	8.33	7.99	7.19	7.15
31	7.25	7	8.36	8.73	9.57	9.54	9.72	9.24	8.33	7.95	7.15	7.09
32	7.2	6.97	8.37	8.76	9.62	9.59	9.77	9.27	8.34	7.95	7.11	7.05
33	7.15	6.94	8.36	8.78	9.68	9.65	9.82	9.31	8.35	7.94	7.07	6.98
34	7.1	6.91	8.36	8.8	9.72	9.7	9.88	9.33	8.36	7.9	7.02	6.92
35	7.05	6.88	8.35	8.83	9.77	9.76	9.94	9.37	8.37	7.88	6.97	6.85
36	6.99	6.85	8.35	8.85	9.82	9.82	9.09	9.4	8.37	7.85	6.92	6.79
38	6.87	6.79	8.34	8.9	9.92	9.95	10.1	9.47	8.38	7.8	6.82	6.66
40	6.76	6.72	8.33	8.95	10.02	10.08	10.22	9.54	8.39	7.75	6.72	7.52
42	6.63	6.65	8.31	9	10.14	10.22	10.35	9.62	8.4	7.69	6.62	6.37
44	6.49	6.58	8.3	9.06	10.26	10.38	10.49	9.7	8.41	7.63	6.49	6.21

46	6.34	6.5	8.29	9.12	10.39	10.54	10.64	9.79	8.42	7.57	6.36	6.04
48	6.17	6.41	8.27	9.18	10.53	10.71	10.8	9.89	8.44	7.51	6.23	5.86
50	5.98	6.3	8.24	9.24	10.68	10.91	10.9	10	8.46	7.45	6.1	5.65
52	5.77	6.19	8.21	9.29	10.85	11.13	11.2	10.12	8.49	7.39	5.93	5.43
54	5.55	6.08	8.18	9.36	11.03	11.38	11.43	10.26	8.51	7.3	5.74	5.18
56	5.3	5.95	8.15	9.45	11.22	11.67	11.69	10.4	8.52	7.21	5.54	4.89
58	5.01	5.81	8.12	9.55	11.46	12	11.98	10.55	8.51	7.1	4.31	4.56
60	4.67	5.65	8.08	9.65	11.74	12.39	12.31	10.7	8.51	6.98	5.04	4.22
LATITUD SUR												
0°	8.5	7.66	8.49	8.21	8.5	8.22	8.5	8.49	8.21	8.5	8.22	8.5
5	8.68	7.76	8.51	8.15	8.34	8.05	8.33	8.38	8.19	8.56	8.37	8.68
10	8.86	7.87	8.53	8.09	8.18	7.86	8.14	8.27	8.17	8.62	8.53	8.88
15	9.05	7.98	8.55	8.02	8.02	7.65	7.95	8.15	8.15	8.68	8.7	9.1
20	9.24	8.09	8.57	7.94	7.85	7.43	7.76	8.03	8.13	8.76	8.87	9.33
25	9.46	8.21	8.6	7.94	7.66	7.2	7.54	7.9	8.11	8.86	9.04	9.58
30	9.7	8.33	8.62	7.73	7.45	6.96	7.31	7.76	8.07	8.97	9.24	9.85
32	9.81	8.39	8.63	7.69	7.36	6.85	7.21	7.7	8.96	9.01	9.33	9.96
34	9.92	8.45	8.64	7.64	7.27	6.74	7.1	7.63	8.05	9.06	9.42	10.08
36	10.03	8.51	8.65	7.59	7.18	6.62	6.99	7.56	8.04	9.11	9.51	10.21
38	10.15	8.57	8.66	7.54	7.08	6.5	6.87	7.49	8.03	9.16	9.61	10.34
40	10.27	8.63	8.67	7.49	6.97	6.37	6.76	7.41	8.02	9.21	9.71	10.49
42	10.4	8.7	8.68	7.44	6.85	6.23	6.64	7.33	8.01	9.26	9.82	10.64
44	10.54	8.78	8.69	7.38	6.73	6.08	6.51	7.25	7.99	9.31	9.94	10.8
46	10.69	8.86	8.7	7.32	6.61	5.02	6.37	7.16	7.96	9.37	10.07	10.97

Tabla 6.27 Porcentaje de horas de sol mensual

En la tabla 6.28 se muestra la interpolación de valores para un incremento de dos centésimas de grado en la latitud, comenzando en la latitud Norte igual a 18.7 ° y terminando en la latitud Norte igual a 20.1 °, en este rango de latitudes se encuentra comprendidos los acuíferos en estudio. Las columnas de longitud izquierda y derecha se encuentran delimitando a los acuíferos y nos servirán para la construcción de puntos auxiliares en el programa Arc View 3.2.

lon_izq	lon_cen	lon_der	lat_N	Pi_ene	Pi_feb	Pi_mar	Pi_abr	Pi_may	Pi_jun	Pi_jul	Pi_ago	Pi_sep	Pi_oct	Pi_nov	Pi_dic
-103.27	-102.56	-102.05	18.700	7.802	7.286	8.413	8.507	9.104	8.955	9.188	8.914	8.277	8.196	7.639	7.719
-103.27	-102.56	-102.05	18.720	7.801	7.286	8.413	8.507	9.104	8.956	9.189	8.914	8.277	8.196	7.638	7.718
-103.27	-102.56	-102.05	18.740	7.800	7.285	8.413	8.507	9.105	8.957	9.190	8.915	8.277	8.195	7.638	7.718
-103.27	-102.56	-102.05	18.760	7.800	7.285	8.412	8.508	9.105	8.958	9.190	8.915	8.278	8.195	7.637	7.717
-103.27	-102.56	-102.05	18.780	7.799	7.284	8.412	8.508	9.106	8.959	9.191	8.916	8.278	8.194	7.637	7.717
-103.27	-102.56	-102.05	18.800	7.798	7.284	8.412	8.508	9.106	8.960	9.192	8.916	8.278	8.194	7.636	7.716
-103.27	-102.56	-102.05	18.820	7.797	7.284	8.412	8.508	9.106	8.961	9.193	8.916	8.278	8.194	7.635	7.715
-103.27	-102.56	-102.05	18.840	7.796	7.283	8.412	8.508	9.107	8.962	9.194	8.917	8.278	8.193	7.635	7.715
-103.27	-102.56	-102.05	18.860	7.796	7.283	8.411	8.509	9.107	8.963	9.194	8.917	8.279	8.193	7.634	7.714
-103.27	-102.56	-102.05	18.880	7.795	7.282	8.411	8.509	9.108	8.964	9.195	8.918	8.279	8.192	7.634	7.714
-103.27	-102.56	-102.05	18.900	7.794	7.282	8.411	8.509	9.108	8.965	9.196	8.918	8.279	8.192	7.633	7.713
-103.27	-102.56	-102.05	18.920	7.793	7.282	8.411	8.509	9.108	8.966	9.197	8.918	8.279	8.192	7.632	7.712
-103.27	-102.56	-102.05	18.940	7.792	7.281	8.411	8.509	9.109	8.967	9.198	8.919	8.279	8.191	7.632	7.712
-103.27	-102.56	-102.05	18.960	7.792	7.281	8.410	8.510	9.109	8.968	9.198	8.919	8.280	8.191	7.631	7.711
-103.27	-102.56	-102.05	18.980	7.791	7.280	8.410	8.510	9.110	8.969	9.199	8.920	8.280	8.190	7.631	7.711
-103.27	-102.56	-102.05	19.000	7.790	7.280	8.410	8.510	9.110	8.970	9.200	8.920	8.280	8.190	7.630	7.710
-103.27	-102.56	-102.05	19.020	7.789	7.279	8.410	8.510	9.111	8.971	9.201	8.921	8.280	8.190	7.629	7.709
-103.27	-102.56	-102.05	19.040	7.788	7.279	8.410	8.510	9.112	8.971	9.202	8.922	8.281	8.190	7.628	7.708
-103.27	-102.56	-102.05	19.060	7.787	7.278	8.410	8.511	9.112	8.972	9.203	8.922	8.281	8.189	7.627	7.707
-103.27	-102.56	-102.05	19.080	7.786	7.278	8.410	8.511	9.113	8.972	9.204	8.923	8.282	8.189	7.626	7.706
-103.27	-102.56	-102.05	19.100	7.785	7.277	8.410	8.511	9.114	8.973	9.205	8.924	8.282	8.189	7.625	7.705
-103.27	-102.56	-102.05	19.120	7.784	7.276	8.410	8.511	9.115	8.974	9.206	8.925	8.282	8.189	7.624	7.704
-103.27	-102.56	-102.05	19.140	7.783	7.276	8.410	8.511	9.116	8.974	9.207	8.926	8.283	8.189	7.623	7.703
-103.27	-102.56	-102.05	19.160	7.782	7.275	8.410	8.512	9.116	8.975	9.208	8.926	8.283	8.188	7.622	7.702
-103.27	-102.56	-102.05	19.180	7.781	7.275	8.410	8.512	9.117	8.975	9.209	8.927	8.284	8.188	7.621	7.701
-103.27	-102.56	-102.05	19.200	7.780	7.274	8.410	8.512	9.118	8.976	9.210	8.928	8.284	8.188	7.620	7.700
-103.27	-102.56	-102.05	19.220	7.779	7.273	8.410	8.512	9.119	8.977	9.211	8.929	8.284	8.188	7.619	7.699
-103.27	-102.56	-102.05	19.240	7.778	7.273	8.410	8.512	9.120	8.977	9.212	8.930	8.285	8.188	7.618	7.698
-103.27	-102.56	-102.05	19.260	7.777	7.272	8.410	8.513	9.120	8.978	9.213	8.930	8.285	8.187	7.617	7.697
-103.27	-102.56	-102.05	19.280	7.776	7.272	8.410	8.513	9.121	8.978	9.214	8.931	8.286	8.187	7.616	7.696
-103.27	-102.56	-102.05	19.300	7.775	7.271	8.410	8.513	9.122	8.979	9.215	8.932	8.286	8.187	7.615	7.695
-103.27	-102.56	-102.05	19.320	7.774	7.270	8.410	8.513	9.123	8.980	9.216	8.933	8.286	8.187	7.614	7.694
-103.27	-102.56	-102.05	19.340	7.773	7.270	8.410	8.513	9.124	8.980	9.217	8.934	8.287	8.187	7.613	7.693
-103.27	-102.56	-102.05	19.360	7.772	7.269	8.410	8.514	9.124	8.981	9.218	8.934	8.287	8.186	7.612	7.692
-103.27	-102.56	-102.05	19.380	7.771	7.269	8.410	8.514	9.125	8.981	9.219	8.935	8.288	8.186	7.611	7.691
-103.27	-102.56	-102.05	19.400	7.770	7.268	8.410	8.514	9.126	8.982	9.220	8.936	8.288	8.186	7.610	7.690
-103.27	-102.56	-102.05	19.420	7.769	7.267	8.410	8.514	9.127	8.983	9.221	8.937	8.288	8.186	7.609	7.689
-103.27	-102.56	-102.05	19.440	7.768	7.267	8.410	8.514	9.128	8.983	9.222	8.938	8.289	8.186	7.608	7.688
-103.27	-102.56	-102.05	19.460	7.767	7.266	8.410	8.515	9.128	8.984	9.223	8.938	8.289	8.185	7.607	7.687

-103.27	-102.56	-102.05	19.480	7.766	7.266	8.410	8.515	9.129	8.984	9.224	8.939	8.290	8.185	7.606	7.686
-103.27	-102.56	-102.05	19.500	7.765	7.265	8.410	8.515	9.130	8.985	9.225	8.940	8.290	8.185	7.605	7.685
-103.27	-102.56	-102.05	19.520	7.764	7.264	8.410	8.515	9.131	8.986	9.226	8.941	8.290	8.185	7.604	7.684
-103.27	-102.56	-102.05	19.540	7.763	7.264	8.410	8.515	9.132	8.986	9.227	8.942	8.291	8.185	7.603	7.683
-103.27	-102.56	-102.05	19.560	7.762	7.263	8.410	8.516	9.132	8.987	9.228	8.942	8.291	8.184	7.602	7.682
-103.27	-102.56	-102.05	19.580	7.761	7.263	8.410	8.516	9.133	8.987	9.229	8.943	8.292	8.184	7.601	7.681
-103.27	-102.56	-102.05	19.600	7.760	7.262	8.410	8.516	9.134	8.988	9.230	8.944	8.292	8.184	7.600	7.680
-103.27	-102.56	-102.05	19.620	7.759	7.261	8.410	8.516	9.135	8.989	9.231	8.945	8.292	8.184	7.599	7.679
-103.27	-102.56	-102.05	19.640	7.758	7.261	8.410	8.516	9.136	8.989	9.232	8.946	8.293	8.184	7.598	7.678
-103.27	-102.56	-102.05	19.660	7.757	7.260	8.410	8.517	9.136	8.990	9.233	8.946	8.293	8.183	7.597	7.677
-103.27	-102.56	-102.05	19.680	7.756	7.260	8.410	8.517	9.137	8.990	9.234	8.947	8.294	8.183	7.596	7.676
-103.27	-102.56	-102.05	19.700	7.755	7.259	8.410	8.517	9.138	8.991	9.235	8.948	8.294	8.183	7.595	7.675
-103.27	-102.56	-102.05	19.720	7.754	7.258	8.410	8.517	9.139	8.992	9.236	8.949	8.294	8.183	7.594	7.674
-103.27	-102.56	-102.05	19.740	7.753	7.258	8.410	8.517	9.140	8.992	9.237	8.950	8.295	8.183	7.593	7.673
-103.27	-102.56	-102.05	19.760	7.752	7.257	8.410	8.518	9.140	8.993	9.238	8.950	8.295	8.182	7.592	7.672
-103.27	-102.56	-102.05	19.780	7.751	7.257	8.410	8.518	9.141	8.993	9.239	8.951	8.296	8.182	7.591	7.671
-103.27	-102.56	-102.05	19.800	7.750	7.256	8.410	8.518	9.142	8.994	9.240	8.952	8.296	8.182	7.590	7.670
-103.27	-102.56	-102.05	19.820	7.749	7.255	8.410	8.518	9.143	8.995	9.241	8.953	8.296	8.182	7.589	7.669
-103.27	-102.56	-102.05	19.840	7.748	7.255	8.410	8.518	9.144	8.995	9.242	8.954	8.297	8.182	7.588	7.668
-103.27	-102.56	-102.05	19.860	7.747	7.254	8.410	8.519	9.144	8.996	9.243	8.954	8.297	8.181	7.587	7.667
-103.27	-102.56	-102.05	19.880	7.746	7.254	8.410	8.519	9.145	8.996	9.244	8.955	8.298	8.181	7.586	7.666
-103.27	-102.56	-102.05	19.900	7.745	7.253	8.410	8.519	9.146	8.997	9.245	8.956	8.298	8.181	7.585	7.665
-103.27	-102.56	-102.05	19.920	7.744	7.252	8.410	8.519	9.147	8.998	9.246	8.957	8.298	8.181	7.584	7.664
-103.27	-102.56	-102.05	19.940	7.743	7.252	8.410	8.519	9.148	8.998	9.247	8.958	8.299	8.181	7.583	7.663
-103.27	-102.56	-102.05	19.960	7.742	7.251	8.410	8.520	9.148	8.999	9.248	8.958	8.299	8.180	7.582	7.662
-103.27	-102.56	-102.05	19.980	7.741	7.251	8.410	8.520	9.149	8.999	9.249	8.959	8.300	8.180	7.581	7.661
-103.27	-102.56	-102.05	20.000	7.740	7.250	8.410	8.520	9.150	9.000	9.250	8.960	8.300	8.180	7.580	7.660
-103.27	-102.56	-102.05	20.020	7.739	7.250	8.410	8.520	9.151	9.001	9.251	8.960	8.300	8.179	7.579	7.659
-103.27	-102.56	-102.05	20.040	7.739	7.250	8.410	8.521	9.151	9.002	9.252	8.961	8.300	8.179	7.578	7.658
-103.27	-102.56	-102.05	20.060	7.738	7.249	8.409	8.521	9.152	9.003	9.252	8.961	8.299	8.178	7.578	7.658
-103.27	-102.56	-102.05	20.080	7.738	7.249	8.409	8.522	9.152	9.004	9.253	8.962	8.299	8.178	7.577	7.657
-103.27	-102.56	-102.05	20.100	7.737	7.249	8.409	8.522	9.153	9.005	9.254	8.962	8.299	8.177	7.576	7.656

Tabla 6.28 Porcentaje de horas de sol mensual para el área en estudio

Con la tabla anterior y con ayuda del Programa Arc View 3.2 obtuvimos los mapas de porcentaje de horas de sol mensual para cada mes (Figura 6.30).

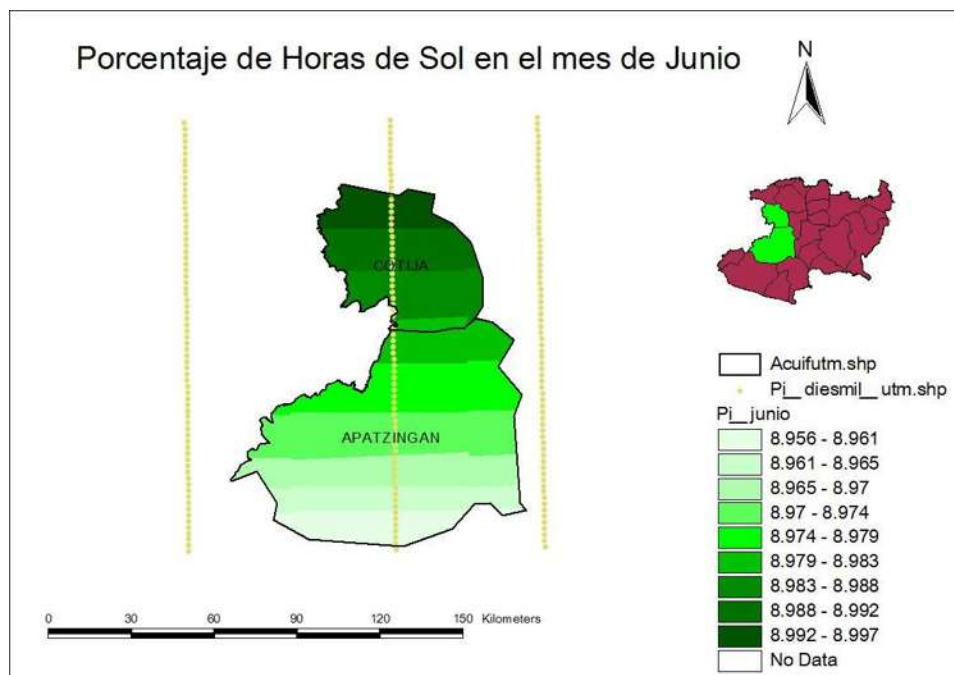


Figura 6.30 Porcentaje de Horas de Sol en el mes de junio

Paso seguido es multiplicar los dos mapas anteriormente obtenidos para cada mes, y de esta forma obtenemos el mapa de factor de temperatura y luminosidad (Figura 6.40), este mapa tiene implícito todos los factores que definen a la temperatura en el lugar con un registro de datos mayor a veinte años y el porcentaje de horas de sol mensual para cada punto en específico que está contenido en los límites de los acuíferos Apatzingán y Cotija.

Hasta este instante ya se cuenta con los dos términos fundamentales de la ecuación de evapotranspiración, es decir se cuenta con los mapas de Kci y los de fi, por lo tanto se procede a hacer la multiplicación entre mapas para de esta manera obtener la evapotranspiración para cada mes, en la figura 6.32 se muestra el mapa de evapotranspiración o uso consuntivo del mes de junio y en la tabla 6.29 se presenta un resumen de los usos consuntivos que fueron obtenidos con la multiplicación de los mapas anteriormente descritos.

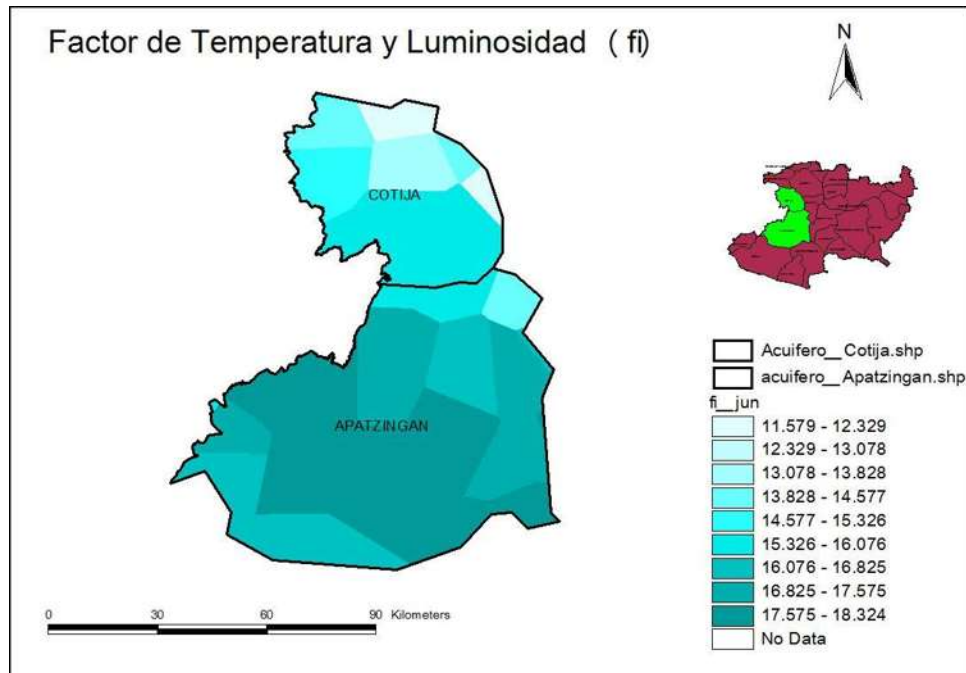


Figura 6.31 Factor de temperatura y luminosidad para el mes de junio

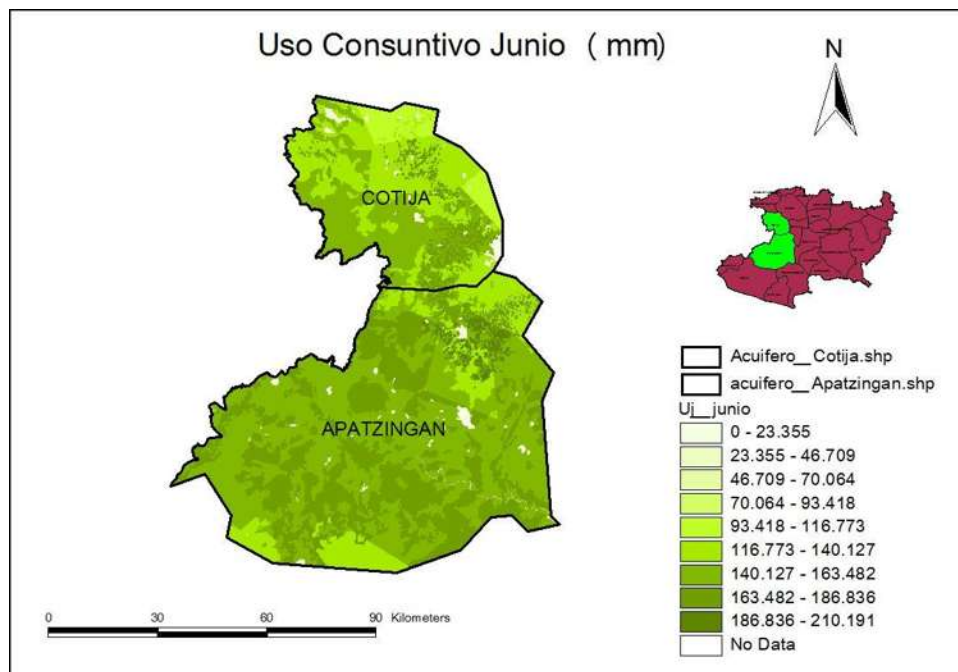


Figura 6.32 Uso Consuntivo para el mes de junio en los acuíferos Apatzingán y Cotija

Uso Consuntivo Mensual (mm)													
Acuífero	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Cotija	29.03	38.9	62.25	88.65	118.98	135.87	128.54	111.3	87.43	72.2	53.19	38.21	964.55
Apatzingán	44.08	57.79	86.81	115.59	144.92	157.22	141.94	129.3	102.35	87.15	68.19	55.28	1190.62

Tabla 6.29 Usos consuntivos medios mensuales en los Acuíferos Apatzingán y Cotija

En la tabla anterior se muestran los usos consuntivos mensuales por acuífero, aunque estos son valores promedio de toda el área del acuífero y nos describen la demanda de agua que se tiene de acuerdo a la vegetación existente y de factores climáticos en el lugar de una forma generalizada es de mencionarse que en el presente estudio se obtuvieron estos usos consuntivos por medio de mapas, lo cual nos da la forma de conocer el uso consuntivo en un punto en específico o en una zona de interés como lo podría ser un municipio o una parcela delimitada por sus coordenadas conocidas haciendo que este estudio tenga una cantidad infinita de usos consuntivos así como de puntos comprendidos en sus casi 8,000 km² de los cuales trata este estudio.

6.2.10. Determinación de la Recarga

Este factor es el que tiene mayor relevancia en el ciclo hidrológico en la relación a los acuíferos, pues este fenómeno determinará la cantidad de agua disponible para el aprovechamiento de los diversos usos que se le dan al agua subterránea.

La recarga representa uno de los objetivos de este estudio, ya que nos resulta de suma importancia saber la cantidad de agua con la que contamos en nuestros acuíferos en estudio, para determinar la recarga siguiendo la metodología adoptada por este estudio fue necesario restar los mapas de uso consuntivo a los de infiltración (mapas anteriormente obtenidos y descritos), de esta manera nos encontramos con que solo en los meses donde se concentra la mayor parte de la lluvia (periodo junio-Octubre) existe recarga, en la figura 6.33 se muestra el mapa de recarga para el mes de junio y en la tabla 6.30 se muestra la tabla resumen de los valores medios de recarga para los acuíferos Apatzingán y Cotija obtenidos con la Norma Oficial Mexicana 011 de la Comisión Nacional del Agua (NOM 011) y sistemas de información geográfica (Arc View 3.2).

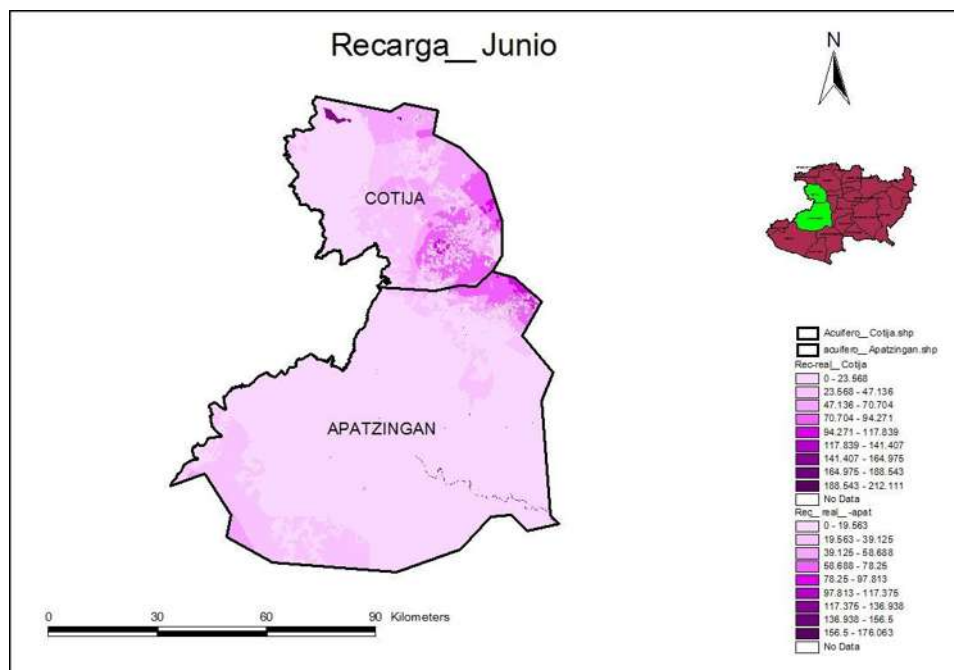


Figura 6.33 Recarga en el mes de junio en los acuíferos Apatzingán y Cotija

Mes	Acuífero	
	Cotija	Apatzingán
	Recarga (mm)	Recarga (mm)
Enero	0	0
Febrero	0	0
Marzo	0	0
Abril	0	0
Mayo	0	0
Junio	36.4862	8.2109
Julio	86.0311	47.6699
Agosto	99.1063	47.2759
Septiembre	84.3349	64.1946
Octubre	18.1216	12.9376
Noviembre	0	0
Diciembre	0	0
Anual	324.0801	180.2889

Tabla 6.30 Láminas de recarga mensuales para los acuíferos Apatzingán y Cotija

Para determinar el volumen de recarga por acuífero, se separa el área que recarga de la que no para cada mes (figura 6.34), esta área está determinada por la lámina de lluvia del mes en análisis, Uso de suelo y edafología, esta área se determina con ayuda de la herramienta Map Query dando un tamaño de celda adecuado, para nuestro caso se determinó ésta área con tamaño de celda de 100 m x 100 m, a esta área que recarga (representada en color rojo en la figura 6.34) restamos el área de las ciudades y poblados más importantes comprendidos dentro de los acuíferos (figura 6.35, representadas en color blanco), esto considerando una recarga nula en las áreas urbanas debido a lo impermeable de los pavimentos.

Ya que se tiene el mapa de área que recarga, este se multiplica por el mapa de lámina de recarga (figura 6.33), se debe homogenizar unidades, para nuestro caso se multiplicó el área en hectómetros cuadrados y la lámina de recarga en hectómetros, lo cual nos genera un mapa de volumen de recarga en Hm^3 , el cual se muestra en la imagen 6.36.

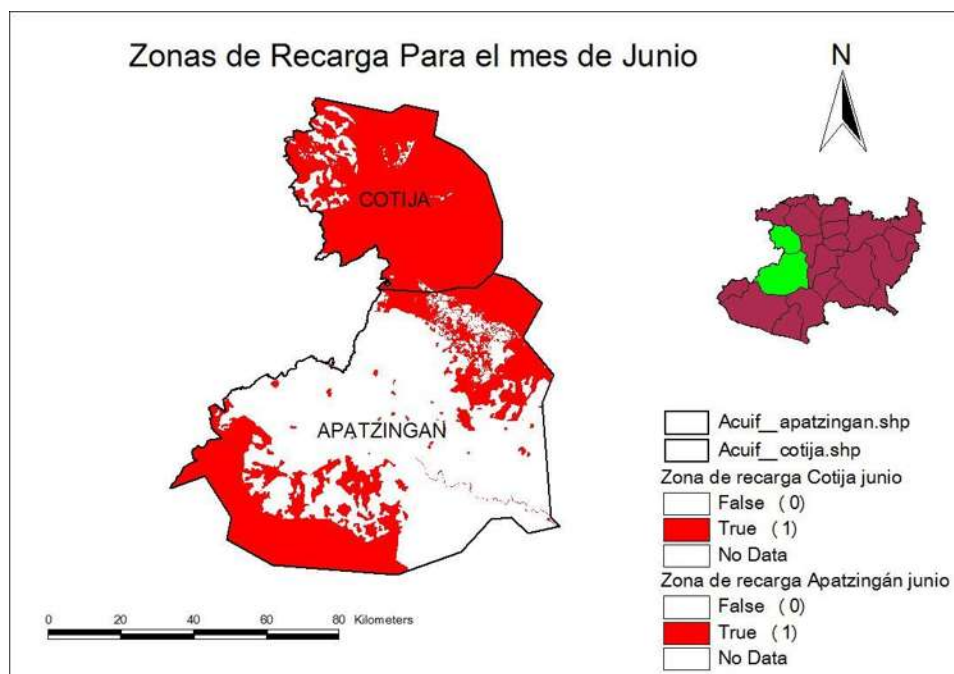


Figura 6.34 Zona de recarga para el mes de Junio

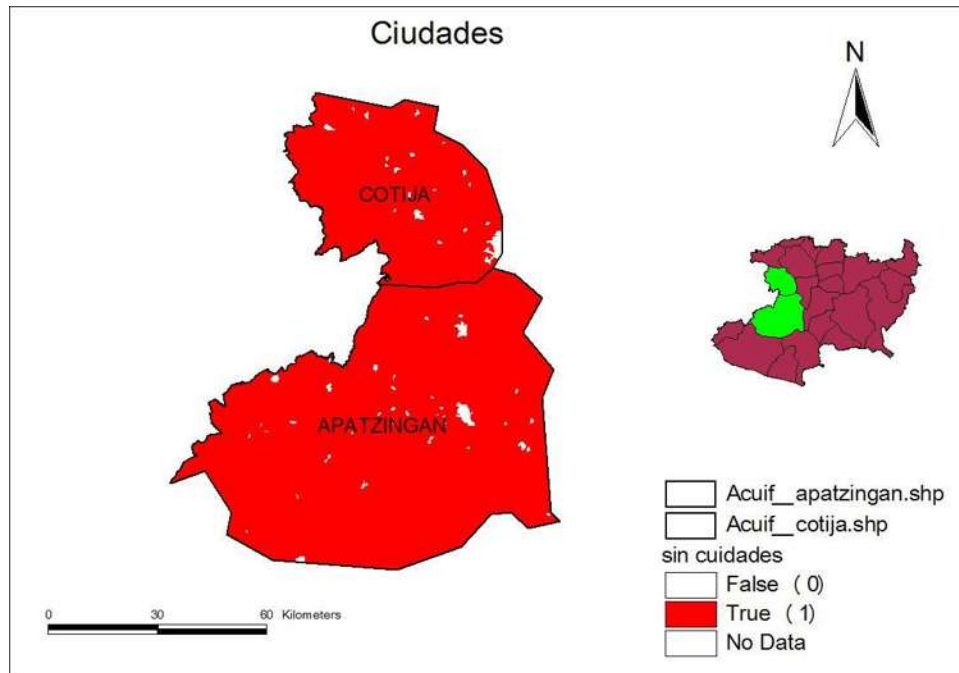


Figura 6.35 Ciudades comprendidas en los acuíferos Apatzingán y Cotija

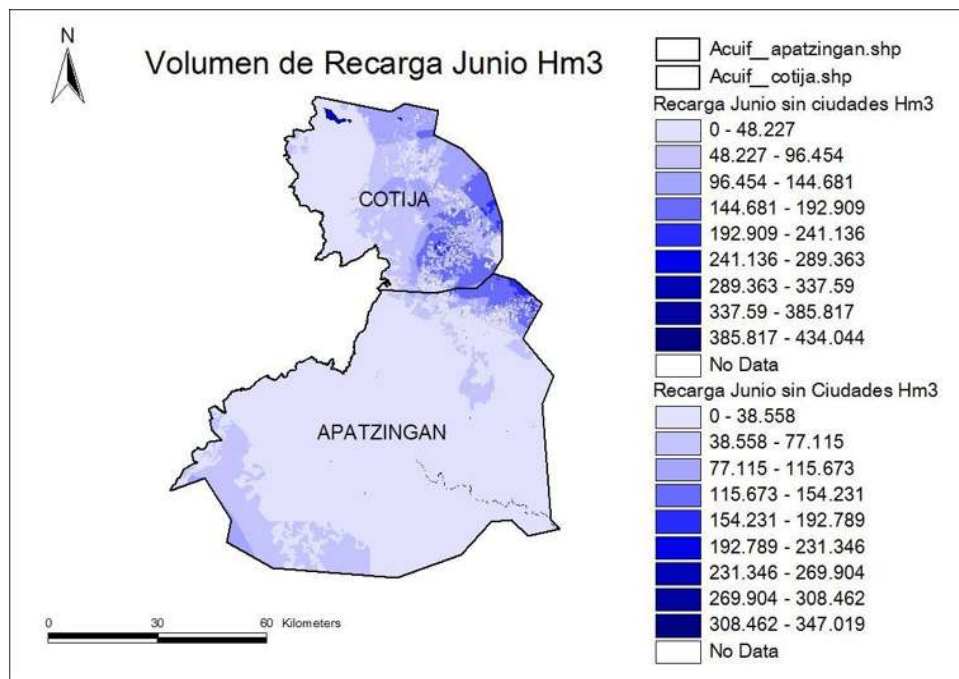


Figura 6.36 Volumen de recarga para el mes de junio

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1. COMPARACIÓN ENTRE LAS CONDICIONES ACTUAL Y FUTURA

Para realizar el impacto ambiental que causa toda esta área de agricultura, y principalmente la franja aguacatera en los acuíferos Apatzingán y Cotija fue necesario hacer el balance hidrológico con las condiciones de uso de suelo actual (situación descrita anteriormente), esto nos arrojó un balance de la distribución del agua de lluvia en estos dos acuíferos.

Una vez realizado el balance hidrológico actual, se planteó un segundo escenario que consistió en hacer otro balance hidrológico modificando el mapa de uso de suelo en condiciones del máximo crecimiento que pudiera tener la franja aguacatera (explicado en el subcapítulo 6.2.1), con estos dos escenarios se hizo una comparación cuantitativa en los términos de la ecuación del balance hidrológico la cual se muestra enseguida.

7.1.1. Esguerrimiento

La zona aguacatera ha ido ganando terreno por el cambio de uso de suelo, principalmente de bosque a aguacate, esto tiene repercusión directa sobre la lámina o volumen de esguerrimiento. En este apartado vemos que el esguerrimiento muestra cambios considerables al analizar las condiciones actual y futura (tabla 7.1 y 7.2), para el Acuífero Cotija se tiene un incremento anual en el esguerrimiento de 67.27 Hm³, mientras para el Acuífero Apatzingán es de 159.548 Hm³, esto debido a que el Acuífero Apatzingán es 2.57 veces más grande que el acuífero Cotija.

Para el acuífero Cotija vemos que el esguerrimiento anual aumentaría en un 15%, este a causa del cambio de uso de suelo, para este acuífero el cambio se daría de bosque a aguacate y de agrícola a aguacate; es decir se cambiaría de cultivo la zona. Para el acuífero Apatzingán aumentaría 44%, esto nos dice que el acuífero Apatzingán tiene una gran vulnerabilidad ante el cambio de uso de suelo y es que el crecimiento de la zona aguacatera se encuentra localizado donde en la actualidad es bosque y esta es una de las zonas más grandes e importantes de bosque dentro del acuífero Apatzingán (Figura 7.1).

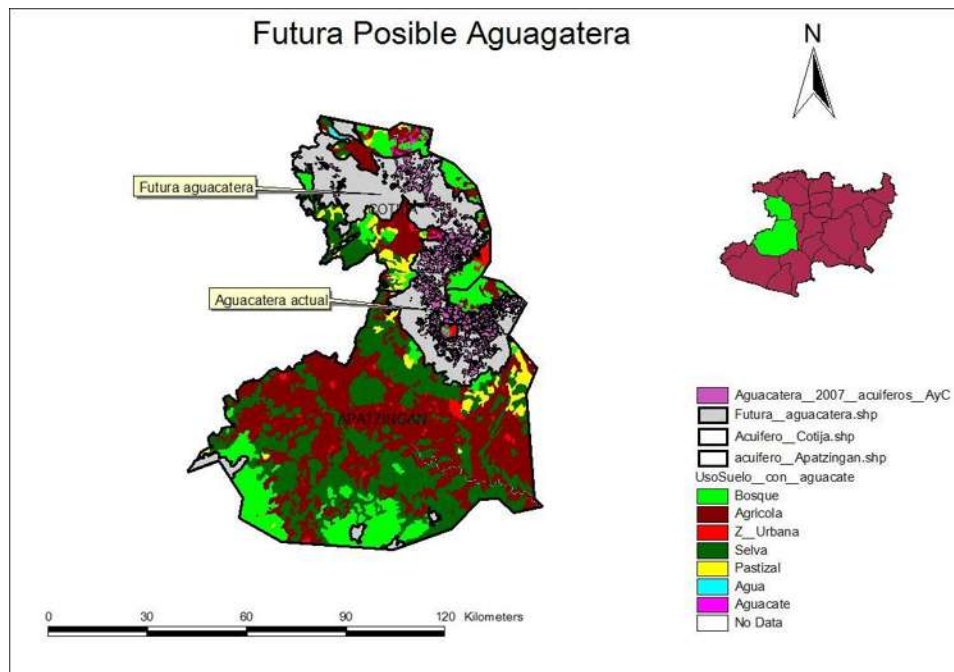


Figura 7.1 Localización de Franja aguacatera actual y Franja aguacatera futura en los acuíferos Apatzingán y Cotija

La alteración de este factor modifica las condiciones del suelo provocando que el mismo se erosione por la falta de los ecosistemas boscosos, también se ocasiona que el suelo pierda paulatinamente su fertilidad para el desarrollo de flora además de reducir las fronteras que forman los bosques para evitar inundaciones en las zonas de menor altitud.

Área	Esguerrimiento Acuífero Cotija													Unidad
219842 Has	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual mapas	
Actual	0.102	0.008	0.004	0.004	0.204	6.609	10.687	9.833	7.181	1.670	0.102	0.027	202.636	mm
Futuro	0.117	0.009	0.004	0.005	0.231	7.581	12.275	11.428	8.284	1.937	0.117	0.030	233.236	mm
Actual	0.225	0.017	0.008	0.010	0.449	14.528	23.494	21.618	15.786	3.671	0.225	0.059	445.480	Hm3
Futuro	0.258	0.019	0.009	0.012	0.508	16.666	26.985	25.122	18.212	4.259	0.257	0.065	512.750	Hm3

Tabla 7.1 Esguerrimiento mensual para condiciones actuales y futuras en el Acuífero Cotija

Área	Esguerrimiento Acuífero Apatzingán													Unidad
565609 Has	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual Mapas	
Actual	0.027	0.001	0.001	0.001	0.046	2.067	3.375	2.997	2.521	0.563	0.028	0.006	64.049	mm
Futuro	0.038	0.002	0.001	0.001	0.063	2.938	4.831	4.269	3.621	0.804	0.038	0.008	92.257	mm
Actual	0.155	0.008	0.006	0.005	0.257	11.691	19.092	16.952	14.259	3.184	0.156	0.033	362.266	Hm3
Futuro	0.217	0.011	0.007	0.006	0.359	16.619	27.323	24.148	20.481	4.547	0.215	0.045	521.814	Hm3

Tabla 7.2 Esguerrimiento mensual para condiciones actuales y futuras en el Acuífero Apatzingán

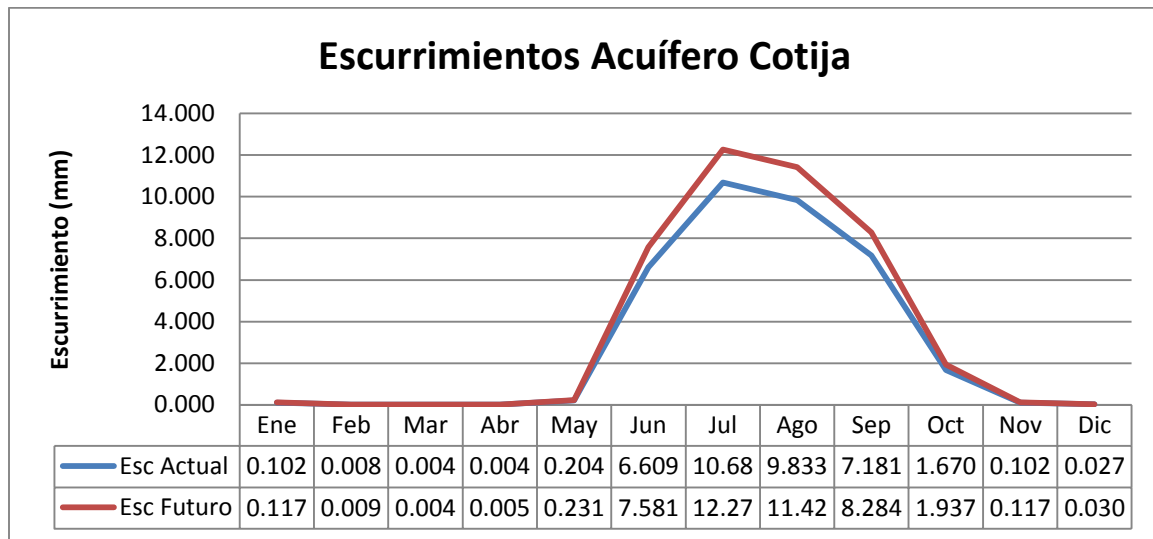


Figura 7.2 Escurreimiento en el acuífero Cotija para condiciones actuales y futuras

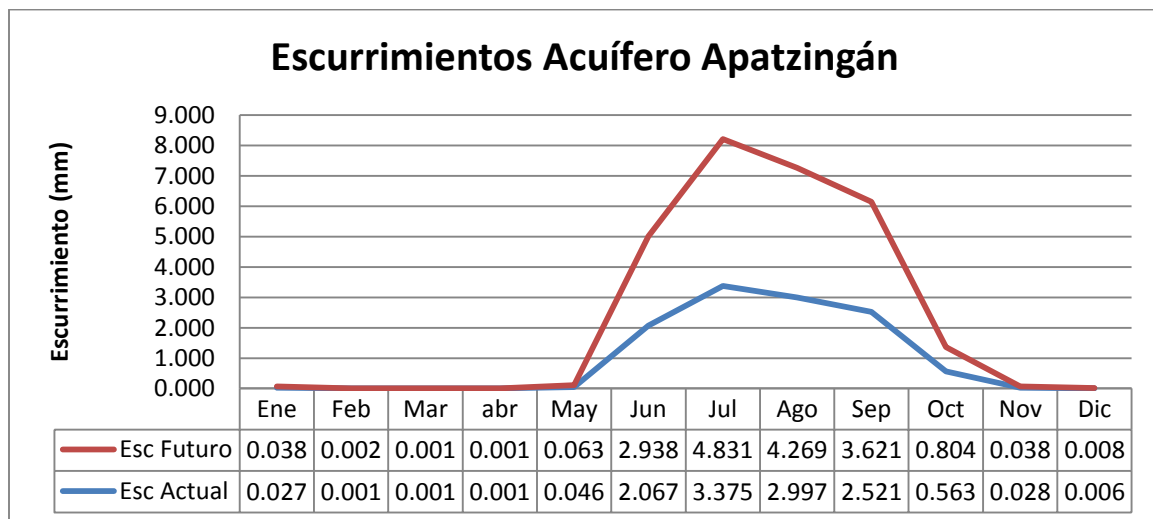


Figura 7.3 Escurreimiento en el acuífero Apatzingán para condiciones actuales y futuras

7.1.2. Infiltración

La infiltración fue un parámetro donde vario poco, la variación se debe a que la vegetación del suelo cambia de bosque a aguacate principalmente, el bosque permite mayor infiltración, pero en todos los meses de estiaje donde se tiene aproximadamente el 10 % de la precipitación media anual para estos acuíferos (según el análisis en el apartado 6.2.5) se infiltra de igual manera en un escenario actual o futuro, la diferencia la hace la época de lluvias donde existen tormentas a gran magnitud y el suelo no tiene la misma capacidad de

infiltración debido a la vegetación, aun así la variación parece no ser tan alarmante ya que si consideramos que se trata de la misma edafología de material en ambos escenarios y para una intensidad de lluvia moderada el suelo infiltra igual.

En la tabla 7.3 vemos como los meses de estiaje no varían y solo existe un poco de variación en épocas de lluvias. Para el acuífero Cotija el decremento en la infiltración es de 3.98% y para el acuífero Apatzingán es de 3.76%.

Infiltración Acuífero Cotija														
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual mapas	Unidad
Actual	23.98	7.34	4.60	5.67	35.46	175.85	219.38	215.37	175.78	87.96	23.91	12.73	799.98	mm
Futuro	23.96	7.34	4.60	5.67	35.44	174.87	217.79	213.77	174.68	87.70	23.90	12.73	769.38	mm

Tabla 7.3 Infiltración actual y futura en el acuífero Cotija

Infiltración Acuífero Apatzingán														
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual mapas	Unidad
Actual	16.53	3.31	3.03	2.32	20.54	147.82	189.26	176.36	167.14	78.58	16.53	7.43	777.91	mm
Futuro	16.52	3.31	3.03	2.32	20.52	146.95	187.80	175.08	166.04	78.34	16.52	7.43	749.70	mm

Tabla 7.4 Infiltración actual y futura en el acuífero Apatzingán

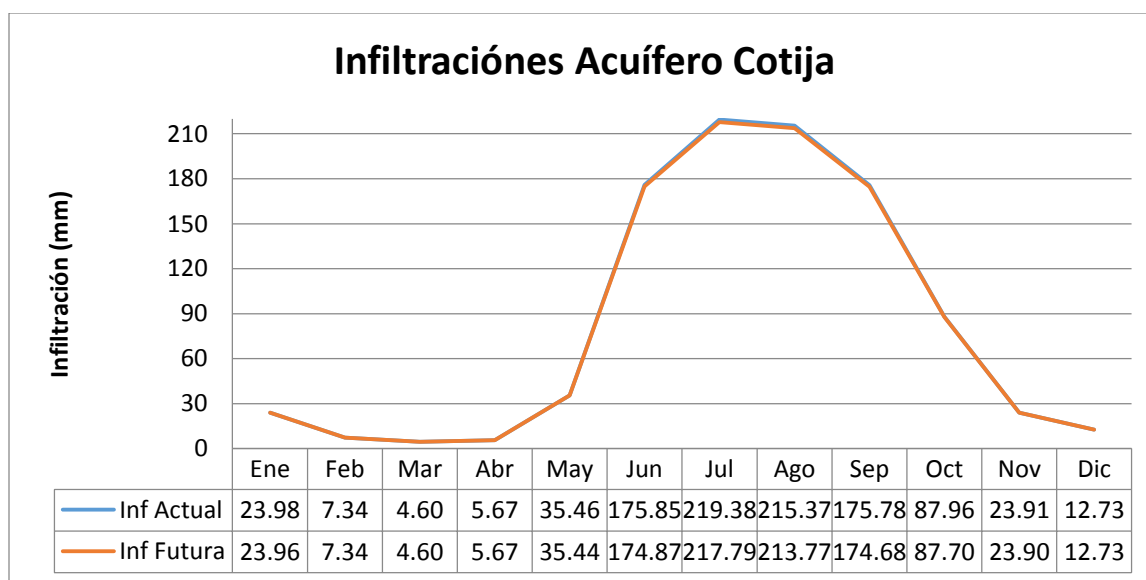


Figura 7.4 Infiltración mensual actual y futura en el Acuífero Cotija

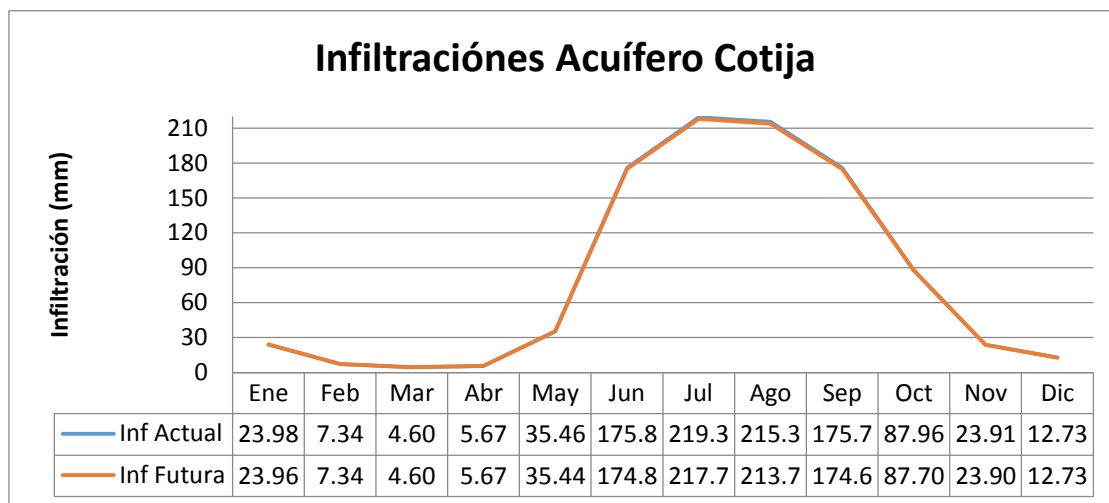


Figura 7.5 Infiltración mensual actual y futura en el Acuífero Apatzingán

7.1.3. Evapotranspiración o Uso Consuntivo

De la tabla siguiente podemos ver como incrementan considerablemente los usos consuntivos tanto en láminas como en volumen para una condición futura de máximo crecimiento de la franja aguacatera, la demanda de agua pasaría de ser 964.5 mm anuales a 1202.7 mm, y esto traducido a volumen pasaría de 2120.46 Hm³ a 2643.95 Hm³; es decir 523.49 Hm³ de incremento, esto representa un incremento en el uso consuntivo en el acuífero Cotija del 24.69%, esto se justifica considerando que el acuífero Cotija puede crecer en su Zona aguacatera un 484.97 % , es decir puede pasar de 24,357 Has a 118,124 Has, lo que representa que en la actualidad el acuífero se encuentra ocupado en un 11.08% por la aguacatera, pero en un futuro esta podría a llegar a ocupar el 53.73% de la superficie del Acuífero (como se describe en la tabla 6.10, y se ilustra en la figura 6.11).

La mayor consecuencia por el incremento en este proceso aumentaría el volumen requerido para el mantenimiento de los cultivos, provocando un mayor volumen en las extracciones de agua en el acuífero.

Área 219842 Has														
Uso Consuntivo Acuífero Cotija														
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual	Unidad
Actual	29.0	38.9	62.3	88.6	119.0	135.9	128.5	111.3	87.4	72.2	53.2	38.2	964.5	mm
Futuro	47.3	59.6	85.4	117.9	139.6	154.6	151.6	129.7	107.8	88.7	68.2	52.2	1202.7	mm
Actual	63.82	85.52	136.85	194.88	261.56	298.69	282.60	244.68	192.22	158.72	116.93	84.00	2120.46	Hm3
Futuro	104.07	131.03	187.80	259.22	306.82	339.98	333.18	285.13	236.89	195.00	150.00	114.83	2643.95	Hm3

Tabla 7.5 Usos Consuntivos Mensuales en Láminas y en Volumen para condiciones actuales y futuras en el Acuífero Cotija

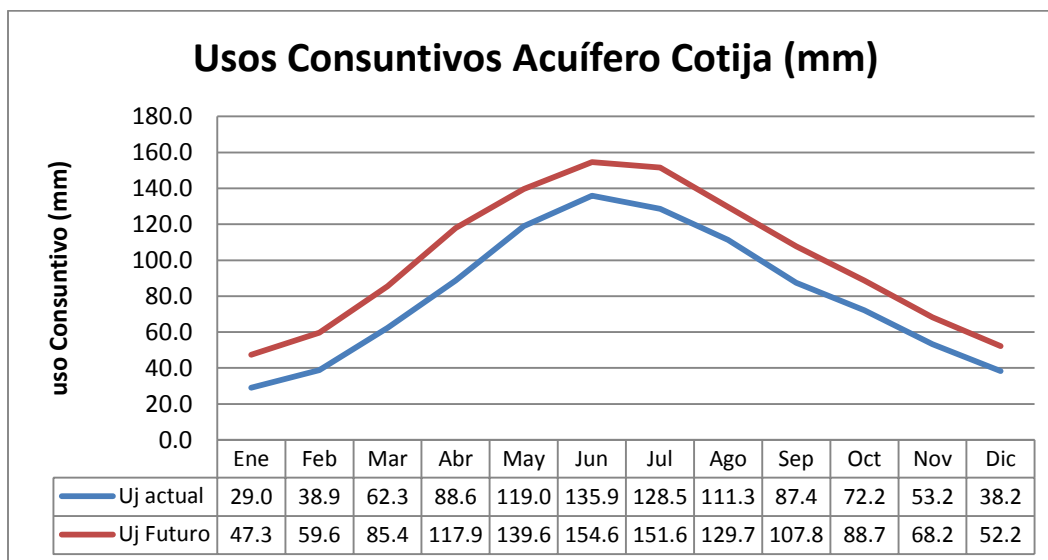


Figura 7.6 Usos consuntivos Mensuales en Laminas para condiciones Actuales y Futuras

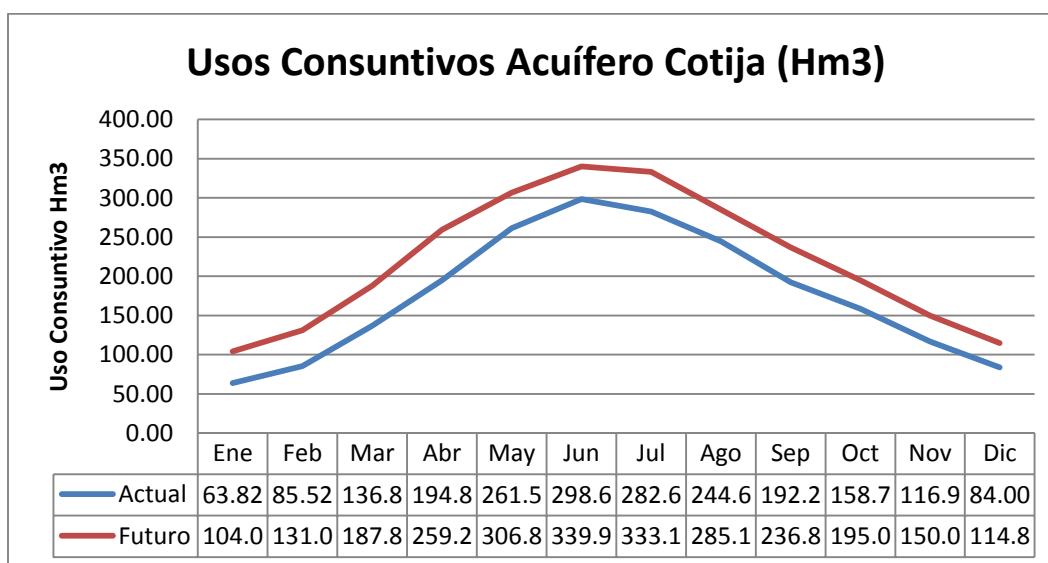


Figura 7.7 Usos consuntivos Mensuales en Volumen para condiciones Actuales y Futuras

Para el Acuífero Apatzingán se tienen temperaturas medias mensuales más altas que en el Acuífero Cotija, lo cual genera usos consuntivos mayores, el Acuífero Apatzingán también posee gran cantidad de agricultura, aunque este solo posee el 4.06 % de su superficie ocupado por el Aguacate actualmente, este podría llegar a ser ocupado en un 13.75 % si es que la franja aguacatera creciera al máximo, esto representa pasar de 23,109 Has a 78,238 Has, (crecimiento explicado en la tabla 6.10) esto traería como consecuencia un aumento

en el uso consuntivo en el acuífero de 6.83%, (para el caso de este estudio solo se calculó el incremento de la evapotranspiración variando únicamente el cultivo del aguacate).

Para el caso de este acuífero pasaría de tener un uso consuntivo medio anual de 1190 mm a 1272 mm, y esto en volumen pasaría de 6734.33 Hm³ a 7194.57 Hm³, es decir se tendría un incremento de 460.24 Hm³ anuales.

Área 565609 Has		Acuífero Apatzingán												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual	Unidad
Actual	44.08	57.79	86.81	115.59	144.92	157.22	141.94	129.30	102.35	87.15	68.19	55.28	1190.63	mm
Futuro	48.12	62.58	92.62	122.82	150.11	167.90	160.13	140.37	106.23	91.07	71.60	58.46	1272.00	mm
Actual	249.34	326.88	491.01	653.78	819.70	889.24	802.83	731.36	578.89	492.95	385.68	312.67	6734.33	Hm3
Futuro	272.18	353.97	523.85	694.68	849.04	949.67	905.69	793.93	600.84	515.11	404.99	330.64	7194.57	Hm3

Tabla 7.6 Usos Consuntivos Mensuales en Láminas y en Volumen para condiciones actuales y futuras en el Acuífero Apatzingán

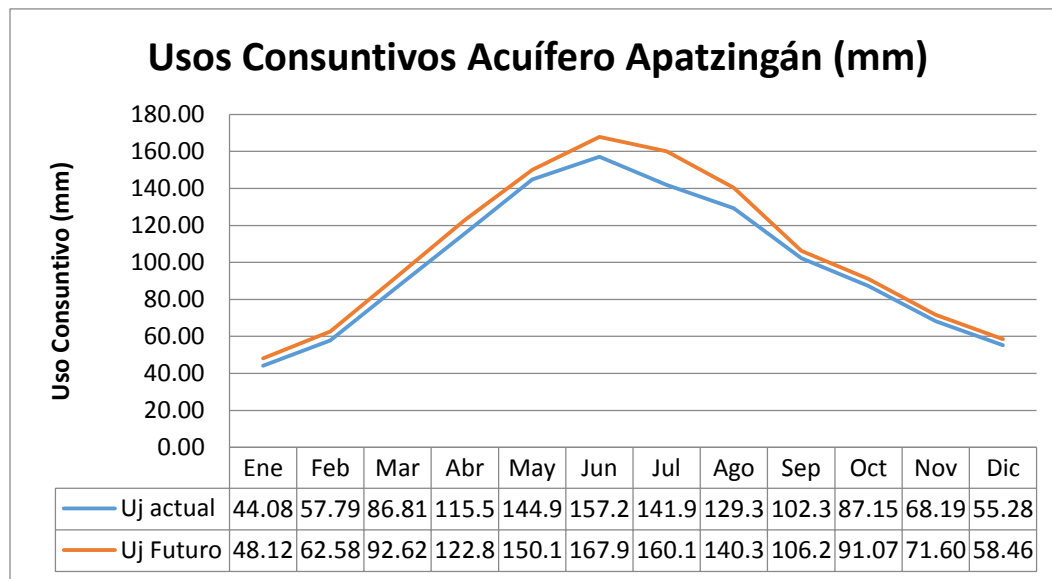


Figura 7.8 Usos consuntivos Mensuales en Láminas para condiciones Actuales y Futuras

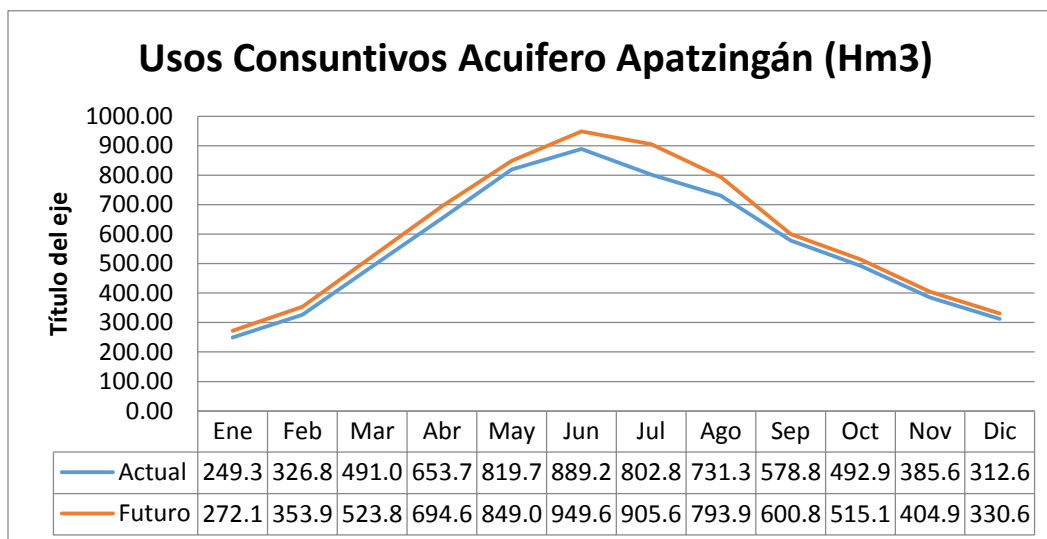


Figura 7.9 Usos consuntivos Mensuales en Volumen para condiciones Actuales y Futuras

7.1.4. Recarga

Este factor es el que tiene mayor relevancia en el ciclo hidrológico en relación a los acuíferos, pues este fenómeno determinará la cantidad de agua disponible para el aprovechamiento de los diversos usos que se le dan al agua, como el uso doméstico, ganadero o uso para riego; que es el uso principal que se le da en estos Acuíferos de Apatzingán y Cotija según registros de concesiones de aprovechamiento de agua subterránea inscritos en el Registro Público de Derechos de agua (REPDA, CONAGUA, 2014).

Al igual que en los factores anteriores, en la recarga existen impactos importantes dando a entender que si no se tiene un cuidado con los cambios de uso de suelo se tendrán consecuencias irreversibles.

7.1.4.1. Para el acuífero Cotija

Los resultados nos indican que para condiciones actuales la lámina de recarga es de 324 mm y está en una condición futura llegaría a bajar hasta 237 mm, lo cual representa que en un futuro el acuífero Cotija solo recargaría el 73% de lo que recarga en el presente; expresado de diferente manera la recarga disminuiría en 27% lo cual es una cifra alarmante. En cuanto al volumen de recarga se ve más fuertemente afectado, ya que ciertas zonas del acuífero dejarían de recargar por el alto uso consuntivo y el incremento en el escurrimiento, entonces este pasaría de recargar 696.26 Hm³ a 466.45 Hm³, lo que significa que solo estaría recargando el 67% de lo que recarga en el presente; o expresado de diferente forma esta recarga en volumen disminuiría en un 33%.

Recarga Acuífero Cotija															
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual mapas	Unidad	% Recarga
Actual	0	0	0	0	0	36.49	86.03	99.11	84.33	18.12	0	0	324.08	mm	1.00
Futuro	0	0	0	0	0	22.83	61.83	79.50	63.46	9.70	0	0	237.32	mm	0.73
Actual	0	0	0	0	0	74.66	190.08	218.93	185.88	26.71	0	0	696.26	Hm3	1.00
Futuro	0	0	0	0	0	36.25	130.51	168.57	123.84	7.28	0	0	466.45	Hm3	0.67

Tabla 7.7 Recargas Mensuales en Láminas y en Volumen para condiciones actuales y futuras en el Acuífero Cotija

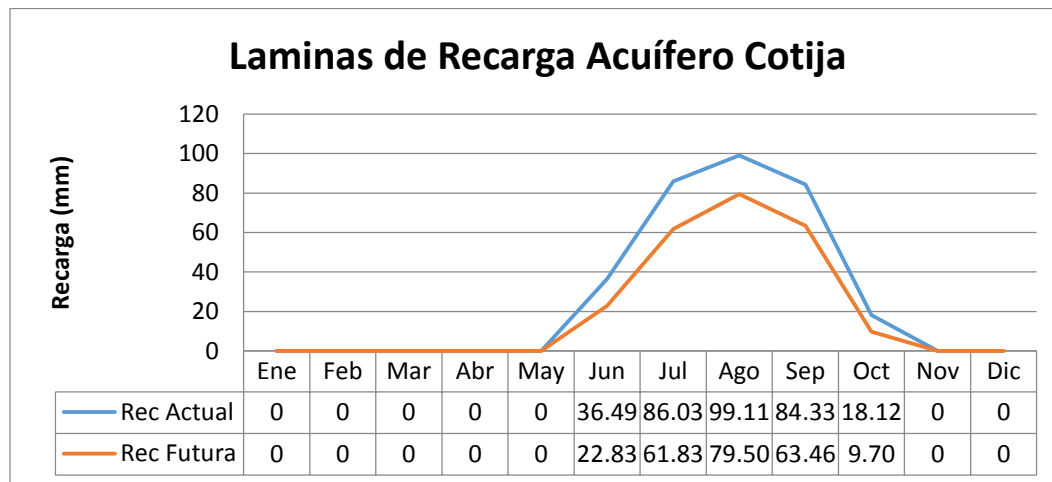


Figura 7.10 Láminas de Recarga Mensuales para condiciones Actuales y Futuras en el Acuífero Cotija

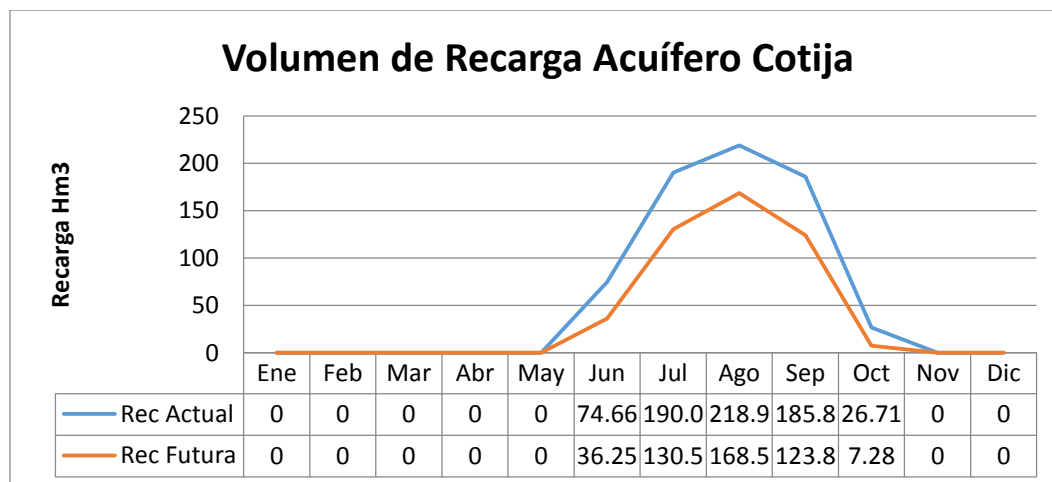


Figura 7.11 Volúmenes de Recarga Mensuales para condiciones Actuales y Futuras en el acuífero Cotija

7.1.4.2. Para el acuífero Apatzingán

Los resultados nos indican que para condiciones actuales la lámina de recarga es de 180 mm y está en una condición futura llegaría a bajar hasta 143 mm, lo cual representa que en un futuro el acuífero Apatzingán solo recargaría el 79% de lo que recarga en el presente, en cuanto al volumen de recarga se ve más fuertemente afectado, ya que ciertas zonas del acuífero dejarían de recargar por el alto uso consuntivo y el incremento en el escurrimiento, entonces este pasaría de recargar 883.09 Hm³ a 647.17 Hm³, lo que significa que solo estaría recargando el 73% de lo que recarga en el presente.

Recarga Acuífero Apatzingán															
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual mapas	Unidad	% Recarga
Actual	0	0	0	0	0	8.21	47.67	47.28	64.19	12.94	0	0	180.29	mm	1.00
Futuro	0	0	0	0	0	5.33	30.38	36.53	59.25	11.45	0	0	142.92	mm	0.79
Actual	0	0	0	0	0	16.18	246.55	242.84	340.63	36.89	0	0	883.09	Hm3	1.00
Futuro	0	0	0	0	0	6.76	134.06	171.18	307.21	27.96	0	0	647.17	Hm3	0.73

Tabla 7.8 Recargas Mensuales en Láminas y en Volumen para condiciones actuales y futuras en el Acuífero Apatzingán

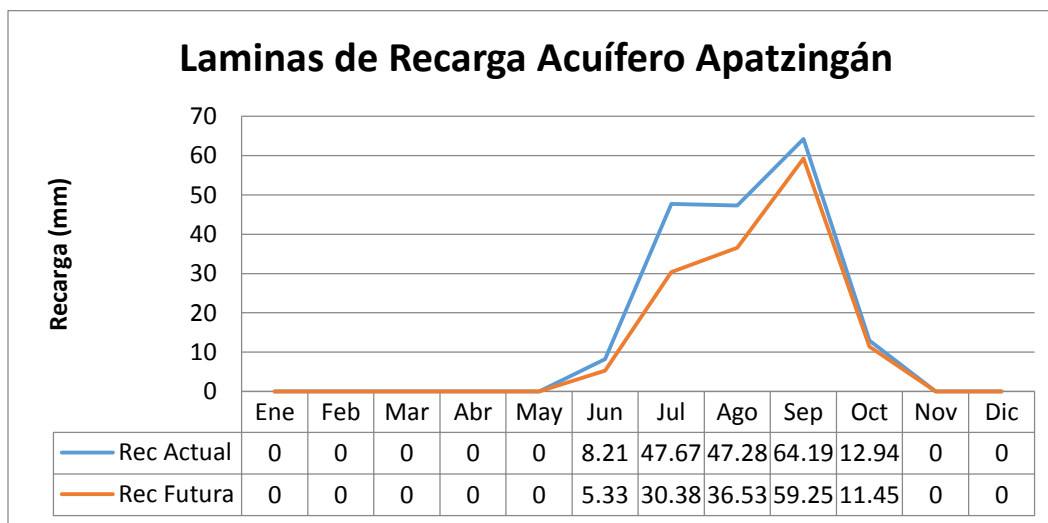


Figura 7.12 Láminas de Recarga Mensuales para condiciones Actuales y Futuras en el Acuífero Apatzingán

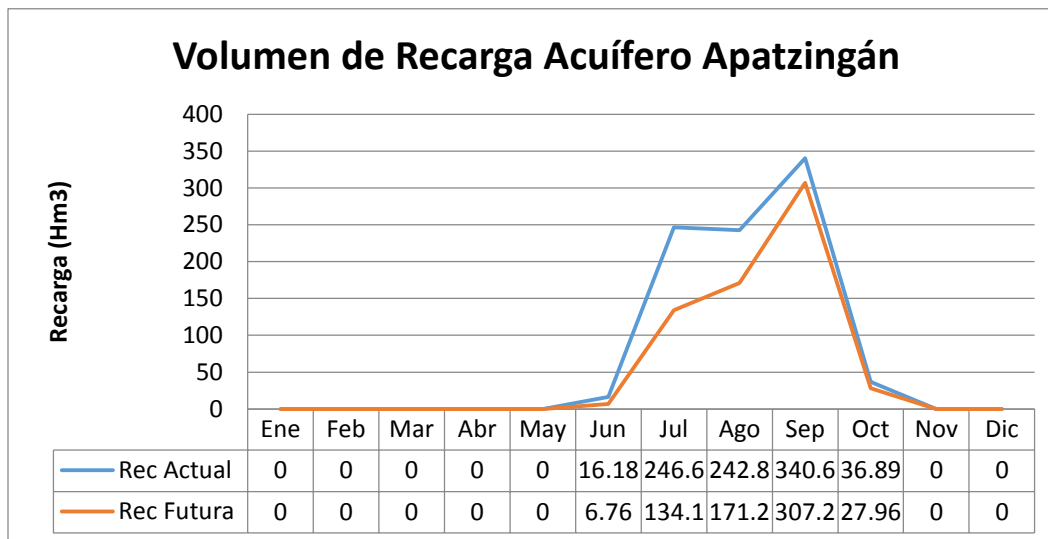


Figura 7.13 Volúmenes de Recarga Mensuales para condiciones Actuales y Futuras en el acuífero Apatzingán

De los resultados anteriores recordemos que el tamaño en superficie del acuífero Apatzingán es de aproximadamente 2.6 veces la del acuífero Cotija, el acuífero Cotija dejaría de recargar 87 mm, que en volumen representa 229.81 Hm³. El acuífero Apatzingán dejaría de recargar 38 mm, en volumen representa 235.72 Hm³.

Vemos que ambos acuíferos se encontrarían en condiciones muy preocupantes si la franja aguacatera llegara a tener su crecimiento máximo, ya que el acuífero Cotija a pesar de su abundante precipitación media anual se encontraría con tanta demanda hídrica por parte de los cultivos que afectaría enormemente al agua subterránea, de la misma manera el acuífero Apatzingán se vería fuertemente afectado, ya que en este la precipitación media anual no es tan abundante y la recarga es limitada, si se llega a extraer demasiada agua subterránea esto causaría un desequilibrio en los acuíferos donde la recarga anual no sería suficiente para equilibrar las extracciones provocando así el descenso del nivel freático y por consiguiente la desaparición de numerosos manantiales.

7.2. BALANCE DEL ACUÍFERO COTIJA

Para conocer el estado de disponibilidad hídrica del acuífero Cotija se realizará un balance que depende de las entradas y salidas de agua en la unidad hidrogeológica. El balance se desarrollará para condición actual, donde los valores de la recarga vertical son calculados en este estudio y los valores de recarga horizontal, recarga inducida y las salidas son datos tomados del estudio Geohidrológico del Acuífero Cotija, en el estado de Michoacán, desarrollado por la empresa Sanx Ingeniería Integral y Desarrollo S.A. DE C.V. publicado en noviembre del 2010, y de la última actualización de la disponibilidad media anual de agua

subterránea para el acuífero (1622), Cotija Publicada en el diario oficial de la federación el 28 de agosto del 2009 y de la base de datos del REPDA, CONAGUA.

7.2.1. Entradas

7.2.1.1. *Recarga Natural o vertical (R_n)*

La principal fuente de recarga es la precipitación a través del mecanismo de la infiltración. Sin embargo es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Estas entradas son muy difíciles de determinar dado que dependen de una cantidad considerable de factores que intervienen en el proceso de infiltración del agua hacia el acuífero. En este estudio se trabajó en el cálculo del volumen recargado por este medio apoyándonos para el cálculo de la disponibilidad del agua subterránea con el procedimiento indicado en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, en la fracción relativa a las aguas subterráneas.

La Comisión Nacional del Agua en su última actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea para el Acuífero (1622) Cotija, Publicada en el diario oficial de la federación el 28 de agosto del 2009 (CONAGUA, ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA SUBTERRÁNEA ACUÍFERO (1622) COTIJA ESTADO DE MICHOACÁN, 2009), menciona que el acuífero Cotija cuenta con disponibilidad de agua subterránea para nuevas concesiones, tal es el caso de este estudio.

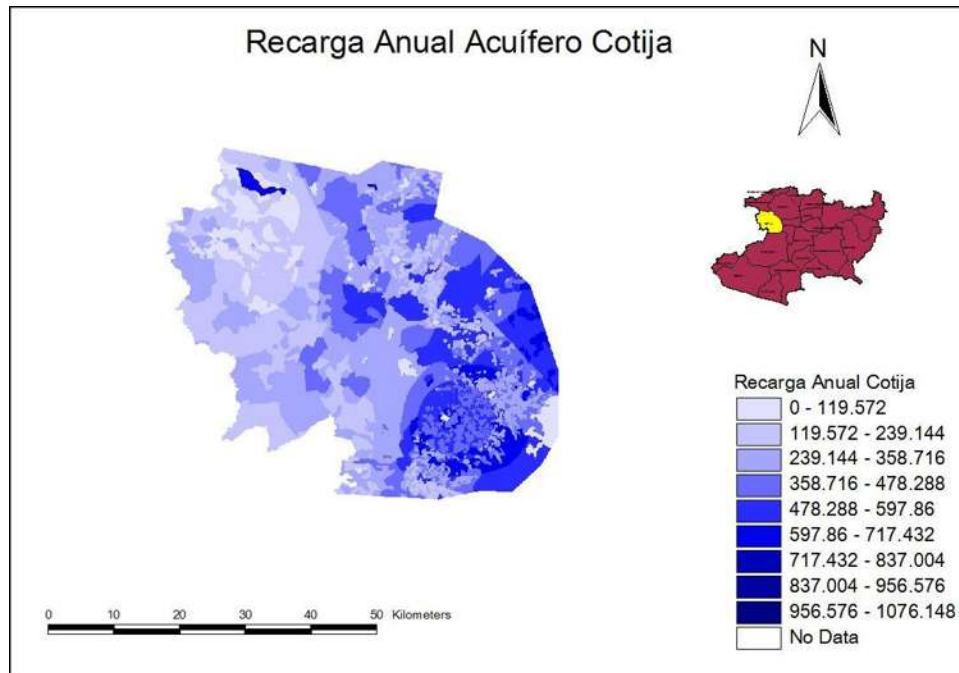


Figura 7.14 Mapa de Recarga vertical anual en el Acuífero Cotija

En la figura 7.14 se muestra el mapa de la recarga natural en el acuífero Cotija el cual es del orden de 324.08 mm anuales y con un volumen de 696.26 Hm³ anuales. $R_n = 696.26 \text{ Hm}^3/\text{año}$

7.2.1.2. Entradas Horizontales (Eh)

Estas aportaciones al acuífero son producto del flujo subterráneo, provenientes de acuíferos vecinos. El flujo que se abre paso a través de las grietas o fracturas de las rocas. Este gasto queda definido por la ecuación de continuidad de Darcy el cual depende de la transmisibilidad (T), el gradiente hidráulico (i) y el espesor de los canales del flujo (b).

$$Q = T i B$$

Se considera que la recarga horizontal del acuífero proviene de un flujo regional profundo que entra al Valle de La Magdalena por el noroeste (Presa de San Juanico) y sale por el sureste (Tocumbo); El volumen de entrada subterránea de agua, aplicando los parámetros mencionados, resulta ser de casi 205 lps (6.5 Hm³/año) en promedio. $R_{fhz} = 6.5 \text{ Hm}^3/\text{año}$

7.2.1.3. Recarga Inducida (Rrr)

Considerando únicamente los aprovechamientos destinados para uso agrícola, en las dos zonas de explotación con un volumen de 35.69 y 16.38 Mm³, respectivamente para las zona

de Los Reyes-Peribán y Cotija-Tingüindín, y tomando en cuenta un coeficiente de infiltración del 10%, se tiene que el volumen por retorno de riego es de 3.57 y 1.64 Mm³, respectivamente para dichas zonas de explotación.

Cabe mencionar que en la zona de explotación de Cotija-Tingüindín, se encuentra la Presa San Juanico con una capacidad nominal de 64 Mm³, la cual riega tierras agrícolas del módulo de riego No. 1 (La Magdalena), del Distrito de Riego 099 “Quitupan-La Magdalena”, de este volumen, el 55% es el que se utiliza para el riego de estas tierras, de manera que considerando también un coeficiente de infiltración del 10%, se tiene que por retorno de riego con agua de la presa el volumen es de 3.5 Mm³. En total en toda la zona el retorno por riego agrícola es de 8.73 Mm³. $Rrr = 8.73 \text{ Hm}^3/\text{año}$

7.2.2. Salidas

7.2.2.1. Descargas naturales (S_m)

Los volúmenes que salen del acuífero en forma natural, son las descargas por medio de los manantiales, se tiene registro de 102 aprovechamientos, que juntos descargan un volumen anual por el orden de 153.416 Hm³ anuales. $S_m = 153 \text{ Hm}^3/\text{año}$

Manantiales	Gasto Promedio (Lps)	Volumen (Hm ³ /año)
ZIPICHA	170	5.361
LA YERBABUENA	70	2.207
LA MAJADA	2000	63.072
TARECUATO	200	6.307
OJO DE AGUA	500	15.768
EL CABRIO	0.5	0.016

Tabla 7.9 Gastos de algunos manantiales en el acuífero Cotija

7.2.2.2. Descargas por bombeo (S_b)

En el acuífero Cotija el volumen anual concesionado, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa), de la Subdirección General de Administración del Agua, al año 2014 es de 38.40 Hm³/año. También se cuenta registro de algunas norias en la zona por el orden de 0.517 Hm³, lo cual nos da un volumen de extracción por bombeo de 38.92 Hm³ anual.

$S_b = 38.92 \text{ Hm}^3/\text{año}$

7.2.2.3. Evapotranspiración (Sev)

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 10 m, bajo el siguiente proceso: En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 10 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 10 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 10 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 5 m el 50%, etc.

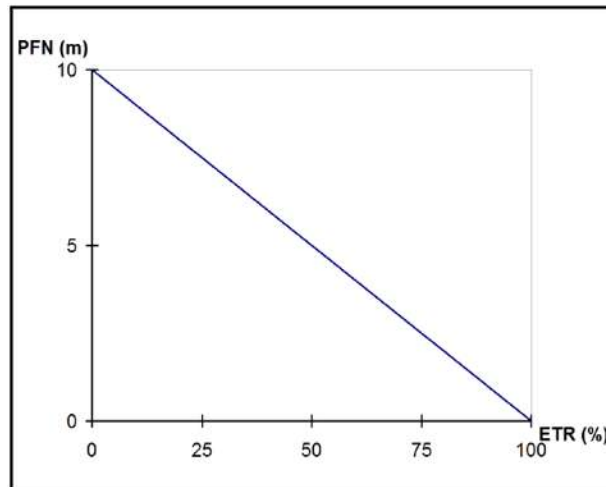


Figura 7.15 Variación lineal de la evapotranspiración Vs Profundidad del nivel freático

Profundidad Al Nivel Estático							
CLAVE	X	Y	PNE	CLAVE	X	Y	PNE
CNA-22-113	-102.433	19.491	102	CNA-22-211	-102.615	19.820	5
CNA-22-013	-102.489	19.581	2	CNA-22-226	-102.638	19.836	3
CNA-22-020	-102.484	19.611	3	CNA-22-222	-102.658	19.819	13
CNA-22-045	-102.400	19.519	105	CNA-22-209	-102.659	19.803	9
CNA-22-064	-102.322	19.589	90	CNA-22-142	-102.595	19.749	16
CNA-22-071	-102.477	19.512	128	CNA-22-146	-102.612	19.760	1
CNA-22-081	-102.432	19.445	53	CNA-22-154	-102.585	19.743	6
CNA-22-096	-102.390	19.545	160	CNA-22-214	-102.568	19.793	31
CNA-22-100	-102.327	19.544	124	CNA-22-231	-102.594	19.810	20
CNA-22-109	-102.373	19.552	139	CNA-22-282	-102.732	19.880	33
CNA-22-110	-102.425	19.523	21	CNA-22-230	-102.650	19.805	8

CNA-22-111	-102.465	19.451	24	CNA-22-218	-102.598	19.802	2
CNA-22-118	-102.420	19.546	53	A	-102.621	19.797	1
CNA-22-122	-102.445	19.551	29	B	-102.576	19.762	1
CNA-22-132	-102.492	19.734	42	CNA-22-132	-102.492	19.734	42
CNA-22-138	-102.496	19.699	27	CNA-22-138	-102.496	19.699	27
CNA-22-165	-102.692	19.805	15	CNA-22-189	-102.487	19.761	38
CNA-22-173	-102.645	19.791	7	CNA-22-270	-102.465	19.751	108
CNA-22-179	-102.618	19.750	29	CNA-22-186	-102.492	19.745	73
CNA-22-189	-102.487	19.761	38	CNA-22-113	-102.433	19.491	102
CNA-22-193	-102.542	19.734	58	CNA-22-013	-102.487	19.591	2
CNA-22-200	-102.556	19.783	47	CNA-22-020	-102.484	19.611	3
CNA-22-269	-102.426	19.700	4	CNA-22-045	-102.400	19.519	105
CNA-22-211	-102.615	19.820	5	CNA-22-071	-102.477	19.512	53
CNA-22-226	-102.638	19.836	3	CNA-22-081	-102.432	19.445	128
CNA-22-241	-102.470	19.814	138	CNA-22-096	-102.390	19.545	160
CNA-22-259	-102.429	19.763	2	CNA-22-100	-102.327	19.544	124
CNA-22-265	-102.428	19.691	91	CNA-22-109	-102.373	19.552	139
CNA-22-270	-102.465	19.751	108	CNA-22-110	-102.425	19.523	21
CNA-22-279	-102.443	19.691	88	CNA-22-111	-102.465	19.451	24
CNA-22-293	-102.509	19.573	50	CNA-22-118	-102.420	19.546	53
CNA-22-165	-102.692	19.805	15	CNA-22-122	-102.445	19.551	29
CNA-22-173	-102.645	19.791	7	CNA-22-293	-102.509	19.573	50
CNA-22-179	-102.618	19.750	29	cna-22-300	-102.504	19.575	26
CNA-22-193	-102.542	19.734	58	CNA-2-70	-102.469	19.529	10
CNA-22-200	-102.556	19.783	47	CNA-22-68	-102.442	19.537	35

Tabla 7.10 Profundidades al nivel estático de algunos aprovechamientos subterráneos del acuífero Cotija de los cuales se cuenta con registro

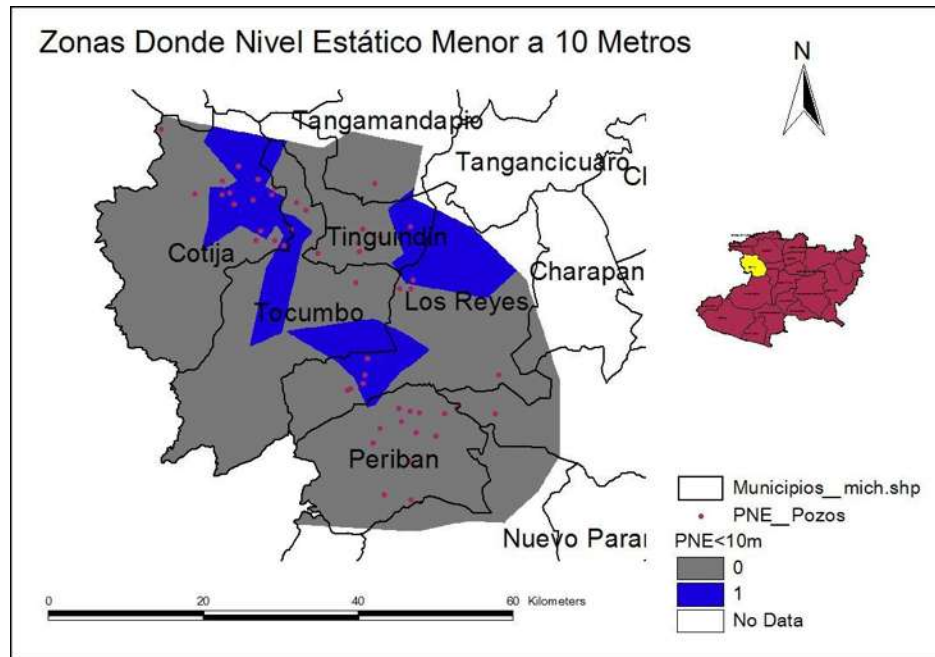


Figura 7.16 Zonas en el Acuífero Cotija donde el nivel estático se encuentra a menos de 10 metros de profundidad

Temporada	Uj (m)	Área (Has)	% según PNE	Volumen Evapotranspiración (Hm3)
Lluvias	0.535	39206	0.7	146.919
Secas	0.429			117.790
Anual	0.965			264.710

Tabla 7.11 Volumen de evapotranspiración por niveles estáticos someros menores a 10 metros de profundidad para el Acuífero Cotija

En la tabla 7.10 se muestra un registro de la Comisión Nacional del Agua donde se especifica para algunos aprovechamientos subterráneos de los cuales se tiene registro el nivel estático, vemos que existen zonas comprendidas en el acuífero Cotija donde el nivel freático varía en profundidad, pero existen zonas donde este nivel es muy somero, lo cual provoca salidas de agua por evapotranspiración.

Estas zonas fueron calculadas con ayuda de sistemas de información geográfica (Figura 7.16), lo cual nos permitió conocer el área donde el nivel estático es menor a 10 m de profundidad, esta área resultó ser de 39,206 Has.

Una vez conocida el área calculamos el nivel estático medio en la zona, el cual nos resultó de 3 metros, con ese valor entramos a la gráfica de la figura 7.15, la cual nos dice que en la zona existe el 70% de evapotranspiración de la lámina anteriormente calculada con el

método de Blaney Criddle explicado en el apartado 6.2.9, En la tabla 7.11 se muestra el cálculo de las salidas por evapotranspiración.

Para realizar una estimación más real del valor de la evapotranspiración, se tomará en cuenta únicamente la evapotranspiración del agua freática que se produce durante los meses de estiaje que es cuando el agua se transfiere del subsuelo a la atmósfera por el proceso de evapotranspiración, y durante el periodo de lluvias, el agua susceptible de evapotranspirarse es la que queda almacenada en la superficie, sobre todo en depresiones del terreno, antes de infiltrarse al subsuelo. Por lo que tenemos una salida por evapotranspiración de 117.79 Hm³ anuales. Sev = 117.79 Hm³/año

7.2.2.4. Flujo Subterráneo (Sfs)

Es probable que existan descargas del acuífero a través de las fallas orientadas noroeste y sureste más sin embargo no se tiene la información necesaria para determinarla.

7.2.3. Cambio de almacenamiento

El cambio de almacenamiento se deduce en la variación entre las entradas y salidas al acuífero. Este parámetro en el estudio realizado se dejará como incógnita, dado que el acuífero Cotija no cuenta con un monitoreo reciente del comportamiento hidráulico del acuífero, entonces no se puede saber con precisión el valor de este.

Para tener un intervalo con el cual comparar se espera que el cambio de almacenamiento sea muy próximo a cero, pues los ríos que fluyen en el acuífero llevan aportaciones del agua subterránea y por ende se acepta que no han existido grandes variaciones en el cambio de almacenamiento.

7.2.4. Balance

Aplicando la ecuación del balance tenemos lo siguiente:

$$\text{Entradas (Rt)} - \text{Salidas (Dt)} = \text{Cambio de Almacenamiento } (\Delta V_s)$$

$$\text{Entradas} = R_n + E_h + R_{rr}$$

$$\text{Entradas} = 696.26 + 6.5 + 8.73 = 711.49 \text{ Hm}^3$$

$$\text{Salidas} = S_m + S_b + S_{ev} + S_{fs}$$

$$\text{Salidas} = 153.41 + 38.92 + 117.79 + S_{fs}$$

Cambio de almacenamiento= $(696.26 + 6.5 + 8.73) - (153.41 + 38.92 + 117.79 + Sfs) = 401.37 - Sfs \text{ Hm}^3$

El acuífero Cotija no cuenta con datos suficientes de aforo de manantiales, solo se cuenta con unos pocos que no nos dan una lectura real o representativa del agua que descarga de forma natural el acuífero Cotija.

Se sabe que el volumen de extracción y el número de concesiones registrado en el REPDA es solo un porcentaje de lo que realmente se extrae; ya que existen muchos aprovechamientos no registrados, lo cual nos incrementa el volumen de salidas por bombeo.

Las salidas por evapotranspiración solo se estimaron para una región donde se conocen los niveles freáticos, en la parte restante del área del acuífero no se tienen datos de piezometría lo cual nos hace imposible calcular las salidas reales por evapotranspiración.

Se sabe que el agua en el acuífero se mueve en NW-SE y que existen descargas del acuífero a través de las fallas orientadas noroeste y sureste más sin embargo no se tiene la información necesaria para determinarla.

Por lo cual concluimos que el cambio de almacenamiento por el orden de 401.37 Hm^3 está distribuido en las diferentes salidas, las cuales son: naturales por manantiales no registrados, bombeo no registrado, evapotranspiración y flujo subterráneo y que el acuífero Cotija se encuentra con disponibilidad hídrica y con un cambio de almacenamiento cercano a cero.

7.3. BALANCE DEL ACUÍFERO APATZINGÁN

Para conocer el estado de disponibilidad hídrica del acuífero Apatzingán se realizará un balance que depende de las entradas y salidas de agua en la unidad hidrogeológica. El balance se desarrollará para condición actual, donde los valores de la recarga vertical son calculados en este estudio y los valores de recarga horizontal, recarga inducida y las salidas son datos tomados del estudio de la última actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea para el acuífero (1620), Apatzingán. Publicada en el diario oficial de la federación el 28 de agosto del 2009, (CONAGUA, 2009) y de la base de datos del REPDA, (REPDA, CONAGUA, 2014).

7.3.1. Entradas

7.3.1.1. *Recarga Natural o vertical (Rn)*

La Comisión Nacional del Agua en su última actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea para el Acuífero (1620) Apatzingán, Publicada en el diario oficial de la federación el 28 de agosto del 2009 menciona que el acuífero Cotija cuenta con disponibilidad de agua subterránea para nuevas concesiones, tal es el caso de este estudio.

Para el acuífero Apatzingán se tiene una lámina de recarga vertical anual de 180.29 mm, en volumen representa 883.09 Hm³, en la figura 7.17 se muestra el mapa de recarga anual para este acuífero, donde se aprecia que existen dos zonas de recarga muy importantes y bien marcadas (una al noreste y la otra al suroeste), en donde el acuífero recarga volúmenes importantes, estas zonas corresponden a superficies boscosas (como se puede ver en la figura 6.4), las cuales contribuyen de forma muy importante en la recarga, en la imagen vemos que existe una tercer zona de recarga importante la cual corresponde al río Tepalcatepec, ya que la permanencia de sus aguas permite una infiltración continua hacia el acuífero.

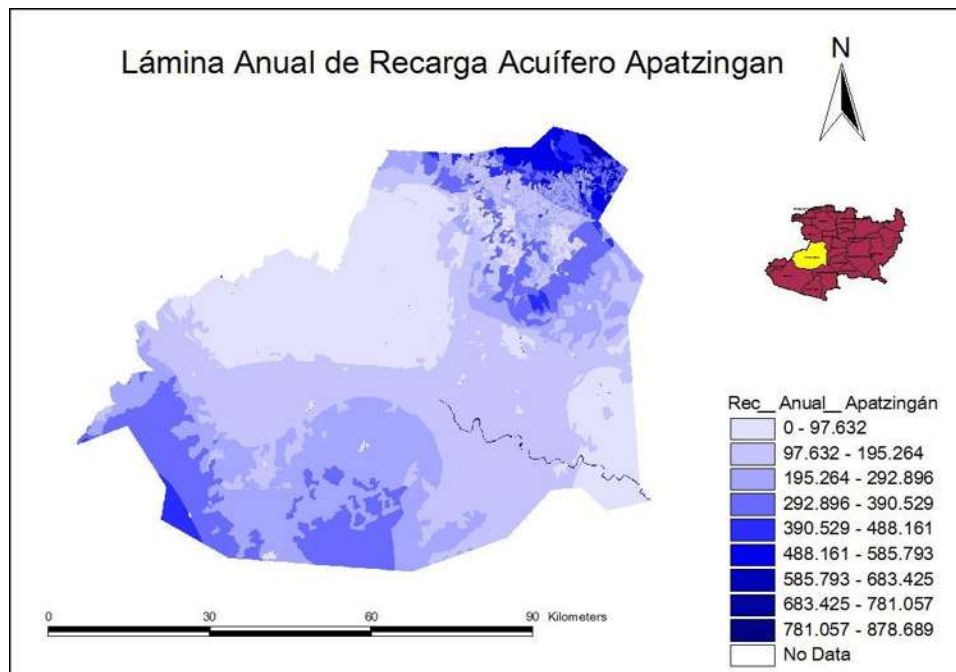


Figura 7.17 Mapa de Recarga Vertical Anual en el Acuífero Apatzingán

Otro aspecto importante en la recarga para este acuífero se presenta en su zona centro y zona Noreste, donde debido a que son zonas potencialmente agrícolas la recarga se ve

afectada debido a los altos requerimientos por uso consuntivo. Para la parte norte del Acuífero tenemos una situación muy particular, ya que es una zona de poca precipitación pluvial (Figura 6.10) y con importante actividad agrícola que provoca una recarga anual mínima, esta zona corresponde al municipio de Buenavista y parte de Tepalcatepec.

7.3.1.2. Entradas Horizontales (Eh)

Debe existir una recarga por flujo horizontal proveniente de otros acuíferos, pero no se cuenta con datos de esta.

a) Profundidad al nivel estático

Del análisis de las profundidades al nivel estático que presentan los aprovechamientos subterráneos se observa que se tiene valores de 5 metros en porción central del valle a 45 metros en las zonas de mayor altitud.

b) Elevación del nivel estático

Analizando la elevación del nivel estático registrado por los aprovechamientos de la zona se puede deducir que el movimiento del agua subterránea ocurre de norte a sur, de las estribaciones de la sierra que forma la Meseta Tarasca hacia el río Tepalcatepec o Grande, que funciona como nivel base.

c) Evolución del nivel estático

Después del último recorrido piezométrico realizado durante el año de 1982, como parte de los trabajos desarrollados por el estudio cuantitativo de la zona de riego del río Tepalcatepec, Michoacán, realizado por Geoexploraciones y Construcciones, S. A., esta zona no ha sido estudiada, por lo que la información es escasa y solo se puede contar con algunos datos de campo, mismos que resultan insuficientes para establecer de manera precisa la evolución piezométrica.

7.3.1.3. Recarga Inducida (Rrr).

Los acuíferos reciben una importante alimentación inducida por el desarrollo agrícola, originada por las pérdidas en los canales de riego no revestidos y por la infiltración de

excedentes de riego, para lo cual se consideró que un porcentaje de retorno de acuerdo al tipo de material en las zonas de riego es del 4% (CONAGUA, ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA SUBTERRÁNEA ACUÍFERO (1622) COTIJA ESTADO DE MICHOACÁN, 2009), el volumen anual utilizado para riego es 1,000.0 Mm³, proveniente de fuentes subterráneas, superficiales de este y otros acuíferos captados por las presas que suministran el agua para riego (presa J Múgica y Chilatan) así como de los manantiales que existen en la zona, la superficie aproximada es de 113,000 Has, por lo que el volumen de retorno por excedentes de riego se estima tiene una magnitud de:

$$Rrr = 1000 \times 0.04 = 40 \text{ Mm}^3$$

7.3.2. Salidas

7.3.2.1. Descargas naturales (*Sm*)

Como salidas del acuífero se consideraron las descargas por manantiales, que en conjunto producen un gasto de 3 m³/s, lo cual representa un volumen anual producido del orden de 94. 608 Mm³.

La situación piezométrica actual nos indica que el flujo subterráneo en exceso es drenado por el río Tepalcatepec que constituye el nivel base del embalse subterráneo, la magnitud promedio de esta descarga es del orden de 170 Mm³.

7.3.2.2. Descargas por bombeo (*Sb*)

En el acuífero Apatzingán el volumen anual concesionado, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA, CONAGUA, 2014), de la Subdirección General de Administración del Agua, al año 2014 es de 273.82 Hm³/año.

En la figura 7.18 se observa la distribución espacial de los pozos artesianos registrados en el REPDA, existe una sobre explotación en la parte sureste de la ciudad de Apatzingán, debida a la concentración de pozos existentes en esa área, de tal forma que se puede clasificar como una sobreexplotación localizada. El resto del área no manifiesta descenso en los niveles piezométricos.

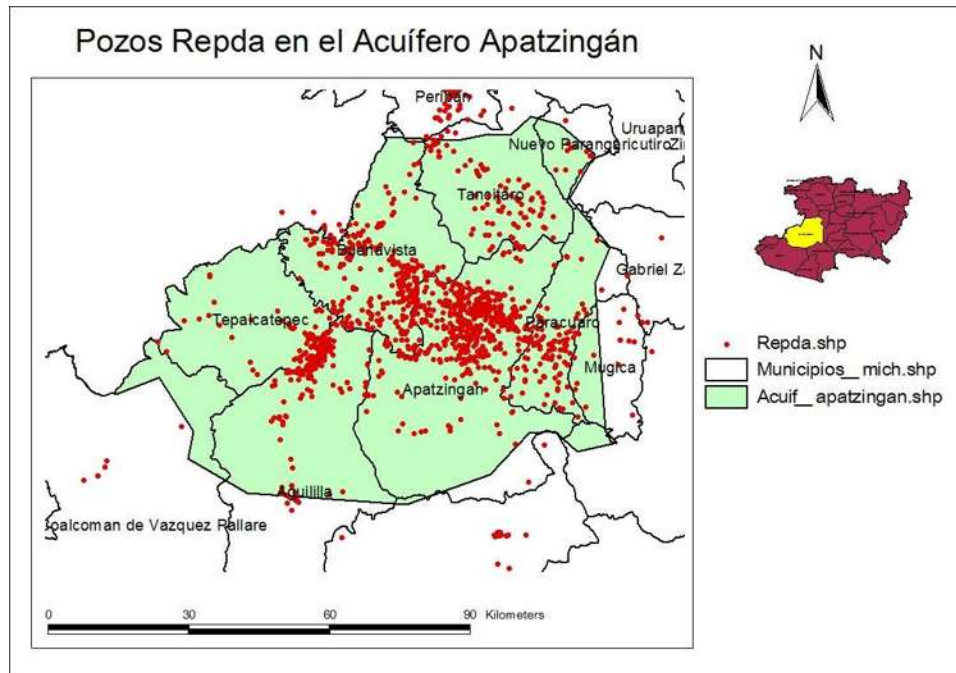


Figura 7.18 Distribución espacial de los pozos artesianos en el Acuífero Apatzingán

7.3.2.3. Evapotranspiración (Sev)

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 10 m, bajo el siguiente proceso: En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 10 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 10 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 10 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 5 m el 50%, etc.

PROPIETARIO	X	Y	NIVEL ESTÁTICO (m)
ALGODONERÍA DE ORIENTE S.A. DE C.V.	-102.350556	19.0747	0
POZO No.3 GRAL. LÁZARO CÁRDENAS	-102.21375	19.0313	49.87
GRUPO DE TRABAJO	-102.242361	19.0130	44.21
ENRIQUE MARTÍNEZ ÁLVAREZ	-102.335083	19.3204	167.8
LUIS ZAMORA GARCÍA Y LUIS ZAMORA CUEVAS	-102.302778	19.2464	88.65
POBLADO LOS CHARCOS	-102.507444	19.0230	9.33
EJIDO ZIMANCA O PINZANDARO	-102.544861	19.1324	15.63
EJIDO LA PAROTA	-102.62125	19.2057	97.37
JAVIER BARRAGÁN VALENCIA	-102.5175	19.1348	7.23

GRUPO LA PAROTERA DEL EJIDO SAN A. LALADOR	-102.290972	19.0100	32.55
EULALIO BEJAR	-102.325694	19.0200	30.75
FERNANDO ZARAGOZA SANDOVAL	-102.201167	19.0206	41.8
JOSÉ MARTÍNEZ VILLEGAS	-102.191083	19.0606	98.75
EJIDO PUERTA DEL SOL	-102.689667	19.2060	110.1
EJIDO PRESA DEL ROSARIO	-102.412028	19.0528	10
MARIBEL Y DIANA VEGA PULIDO	-102.639639	19.0764	37.9
ALEJANDRO UREÑA PAZ	-102.553361	19.0617	20.15
GRUPO No. 5 DEL EJIDO APATZINGÁN	-102.361583	19.0848	22.95
JESÚS PULIDO IBARRA	-102.66425	19.0840	37.18
MARIO MORENO ZEPEDA	-102.42825	19.0928	5.97
ROSENDO WENCES RODRÍGUEZ	-102.53275	19.1598	14.78
EJIDO NOPALERA ORIENTE	-102.336944	19.0583	15.5
JESÚS MENDOZA ÁLVAREZ	-102.701056	19.0244	5.15
EJIDO EL PIRU URDERAL PASO DEL PIRU No.1	-102.650694	19.0618	36.45
EJIDO EL PIRU URDERAL PASO DEL PIRU No.2	-102.666944	19.0642	33.5
LEONEL MUÑIZ VALDEZ	-102.338833	18.9934	41.53
LÁZARO CÁRDENAS BATEL	-102.47975	19.0965	4.73
EJIDO CHIQUEHUITILLO POZO No. 2	-102.377333	18.9970	36.1
MARÍN MENDOZA MENDOZA	-102.686806	19.0162	5.87
ALFONSO GARCÍA BUENO	-102.231944	19.0358	41.1
JORGE FERREYRA INFANTE	-102.253611	19.2873	88.1
JAIME GALLARDO TAMAYO	-102.538833	19.1023	4.13
JOSÉ LUÍS OCHOA MUNGUÍA	-102.72475	19.0354	10.15
EJIDO SAN JUAN DE LOS PLÁTANOS	-102.467778	19.1330	12.26
ESTELA ORTÍZ DE ALARCÓN Y FAMILIA	-102.276139	19.2403	82.1
ROSALIO CEJA CARLON, JOAQUÍN JUÁREZ MALPICA	-102.298806	19.0853	39.41
MARCOS INFANTE CAUSOR	-102.512583	19.0655	2.07
EJIDO EMILIANO ZAPATA	-102.445472	19.2049	0
RUBEN RUEDA OCHOA	-102.339556	19.0731	15.64
EJIDO FELIPE CARRILLO PUERTO	-102.703861	19.1938	22.25
COMITÉ DE AGUA POTABLE EJIDO RAZO DEL..	-102.343556	19.3399	4.7
CONSUELO VEGA RINCON DE VALLEJO	-102.336889	19.0922	16.32
FRANCISCO J. MÚGICA	-102.373444	19.6357	43.8
URCERAL CHIMANACUARO POZO No.1	-102.303667	19.1467	48.8
EJIDO EL PORVENIR	-102.538556	19.0242	24.25
URCERAL PASO DEL PIRU	-102.25375	18.8575	22.8
SECUNDINO G. GUIZAR Y EVA DEL TORO DE O.	-102.367611	19.0753	3.49
MIGUEL A. MENDEZ VARGAS	-102.725694	19.5262	3.82
EJIDO EL AGUAJE GRUPO DE TRABAJO No.1	-102.728111	19.9408	2.87
ALEJANDRO PARDO ZALAZAR	-102.460583	19.0168	8.73
GABRIEL LOPEZ MENDOZA	-102.264167	19.0099	32.4
SALVADOR Y JESÚS BLANCO MORELOS	-102.409944	19.1257	21.78
ROBERTO ZERAFIN MAGAÑA	-102.722056	19.0311	5.38
JOSE ANTONIO UREÑA FIGUEROA	-102.543	19.0263	15.8
SOCIEDAD DE PRODUCCION RURAL HOMERO	-102.391306	19.0267	28.71
ELFECA MOLINA AGUIRRE	-102.468528	19.1363	18.75
EJIDO ZIRAPITIRO	-102.557083	19.1792	48.35
SOCIEDAD DE 8 PERSONAS MARCOS MENDEZ	-102.476139	19.6141	7.1

OCTAVIANO PAZ SANCHEZ	-102.587361	19.0591	17.15
SALVADOR DÍAZ GONZÁLEZ	-102.74075	18.9715	20.64
ROBERTO GARCÍA UREÑA	-102.354889	19.0881	29.23
DANIEL ESPINOZA CONTRERAS	-102.759944	18.9759	3.07
CALLETANO BENITO SOLÍS	-102.755611	18.9657	3.52
EJIDO FCO. I. MADERO	-102.686333	19.1934	36.67
JAVIER ARELLANO SOTO	-102.423861	18.9953	14.2
H. A. CONST. DE BUENAVISTA LOCALIDAD EL TERRERO	-102.64725	19.0517	11.08
EJIDO 18 DE MARZO	-102.721861	19.2383	103.74
ESPIRIDION VARGAS	-102.809167	18.8769	22.79
COMUNIDAD EL BULE	-102.688806	19.0462	8.45
SAABAD COVIAL	-102.111	19.0407	73.2
EJIDO EL LETRERO	-102.104389	18.9757	51.9
EJIDO	-102.146472	18.9261	18.5
ROBERTO IZAZAGA	-102.124528	18.9033	15.11
AGUA POTABLE	-102.355167	19.0773	31.78
BUENAVISTILLA	-102.605194	19.0831	37.83
VEINTE DE NOVIEMBRE	-102.250278	19.0801	58.6

Tabla 7.12 Profundidades al nivel estático de algunos aprovechamientos subterráneos del acuífero Apatzingán de los cuales se cuenta con registro

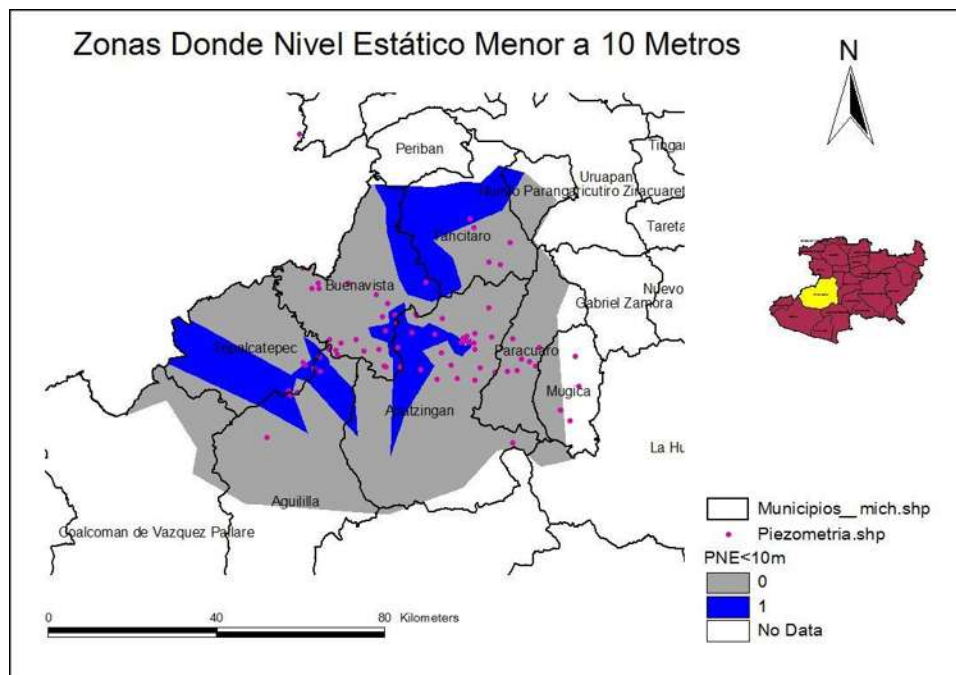


Figura 7.19 Zonas en el Acuífero Apatzingán donde el nivel estático se encuentra a menos de 10 metros de profundidad

Temporada	Uj (m)	Área (Has)	% según PNE	Volumen Evapotranspiración (Hm ³)
Lluvias	0.618	126300	0.5	390.245
Secas	0.573			361.640
Anual	1.191			751.885

Tabla 7.13 Volumen de evapotranspiración por niveles estáticos someros menores a 10 metros de profundidad para el Acuífero Apatzingán

En la tabla 7.12 se muestra un registro de la Comisión Nacional del Agua donde se especifica para algunos aprovechamientos subterráneos de los cuales se tiene registro el nivel estático, vemos que existen zonas comprendidas en el acuífero Apatzingán donde el nivel freático varía en profundidad, pero existen zonas donde este nivel es muy somero, lo cual provoca salidas de agua por evapotranspiración.

Estas zonas fueron calculadas con ayuda de sistemas de información geográfica (Figura 7.19), lo cual nos permitió conocer el área donde el nivel estático es menor a 10 m de profundidad, esta área resultó ser de 126,300 Has.

Una vez conocida el área calculamos el nivel estático medio en la zona, el cual nos resultó de 5 metros, con ese valor entramos a la gráfica de la figura 7.15, la cual nos dice que en la zona existe el 50% de evapotranspiración de la lámina anteriormente calculada con el método de Blaney Criddle explicado en el apartado 6.2.9, En la tabla 7.13 se muestra el cálculo de las salidas por evapotranspiración, el cual es del orden de 751.885 Hm³ anuales.

Para realizar una estimación más real del valor de la evapotranspiración, se tomará en cuenta únicamente la evapotranspiración del agua freática que se produce durante los meses de estiaje que es cuando el agua se transfiere del subsuelo a la atmósfera por el proceso de evapotranspiración, y durante el periodo de lluvias, el agua susceptible de evapotranspirarse es la que queda almacenada en la superficie, sobre todo en depresiones del terreno, antes de infiltrarse al subsuelo. Por lo que tenemos una salida por evapotranspiración de 361.64 Hm³ anuales. $Sev = 361.64 \text{ Hm}^3/\text{año}$

7.3.3. Cambio de almacenamiento

Se llegó a la conclusión de que existe una sobre explotación en la parte sureste de la ciudad de Apatzingán, debida a la concentración de pozos existentes en esa área, de tal forma que se puede clasificar como una sobreexplotación localizada. Por lo que se cree que el río Tepalcatepec constituye el nivel base del embalse subterráneo, el cual drena el exceso del flujo subterráneo del acuífero.

7.3.4. Balance

Aplicando la ecuación del balance tenemos lo siguiente:

$$\text{Entradas (Rt)} - \text{Salidas (Dt)} = \text{Cambio de Almacenamiento } (\Delta V_s)$$

$$\text{Entradas} = R_n + E_h + R_{rr}$$

$$\text{Entradas} = 883.09 + E_h + 40 = 923.09 + E_h \text{ Hm}^3$$

$$\text{Salidas} = S_m + S_b + S_{ev} + S_{fs}$$

$$\text{Salidas} = 264.61 + 273.82 + 361.64 + S_{fs}$$

$$\text{Cambio de almacenamiento} = (923.09 + E_h) - (900.07 + S_{fs})$$

Se estima que el acuífero Apatzingán se encuentra en balance, con poca disponibilidad para nuevos aprovechamientos, ya que no se cuenta con información de la evolución de los niveles piezométricos en pozos, tampoco se cuenta con las entradas y salidas por flujo horizontal.

7.4. APROVECHAMIENTO DE AGUAS EN EL ACUÍFERO COTIJA PARA LA AGRICULTURA

Balance Acuífero Cotija														
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual mapas	Uni
Precipitación	24.08	7.35	4.60	5.68	35.67	182.45	230.07	225.20	182.96	89.63	24.01	12.76	1002.61	mm
Escurrecimiento	0.10	0.01	0.00	0.00	0.20	6.61	10.69	9.83	7.18	1.67	0.10	0.03	202.64	mm
Infiltración	23.98	7.34	4.60	5.67	35.46	175.85	219.38	215.37	175.78	87.96	23.91	12.73	799.98	mm
Uso Consuntivo	29.03	38.90	62.25	88.65	118.98	135.87	128.54	111.30	87.43	72.20	53.19	38.21	964.54	mm
Recarga	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	36.49	86.03	99.11	84.33	18.12	0.00	0.00	324.08	mm
Precipitación	52.94	16.16	10.11	12.49	78.42	401.10	505.79	495.08	402.22	197.04	52.78	28.05	2252.19	Hm ³
Escurrecimiento	0.22	0.02	0.01	0.01	0.45	14.53	23.49	21.62	15.79	3.67	0.22	0.06	445.48	Hm ³
Infiltración	52.71	16.14	10.10	12.48	77.97	386.57	482.30	473.47	386.44	193.37	52.56	27.99	1806.71	Hm ³
Uso Consuntivo	63.82	85.52	136.85	194.88	261.56	298.69	282.60	244.68	192.22	158.72	116.93	84.00	2120.46	Hm ³
Recarga	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	74.66	190.08	218.93	185.88	26.71	0.00	0.00	696.26	Hm ³

Tabla 7.14 Balance Hídrico del Acuífero Cotija

En la tabla 7.14 se muestra la distribución de agua de lluvia en el acuífero Cotija, teniendo como resultados anuales que aproximadamente un 20% de esta se escurre superficialmente, esto genera un importante volumen de escurrecimiento de 445.48 Hm³ anuales, de los cuales un porcentaje importante es minuciosamente aprovechado para el riego agrícola; desviando este valioso recurso de los ríos hacia ollas de agua para su uso en tiempo de estiaje.

La infiltración juega un importante papel en el balance, ya que en esta etapa el agua puede formar parte de la recarga o del uso consuntivo de las plantas, si es que se encuentra en una zona de profundidad radicular de las mismas y que estas estén demandando agua a falta de un medio saturado; tal es el caso de la época de estiaje y parte de la época de lluvias, esto se explica de la siguiente forma: si nos enfocamos en la tabla 7.14 sobre las líneas de infiltración y uso consuntivo vemos que para los meses de Enero, Febrero, Marzo, Abril, Mayo, Noviembre y Diciembre la infiltración es menor que el uso consuntivo, esto significa que el total de agua que se infiltra en estos meses no es suficiente para satisfacer

ni el uso consuntivo de la cobertura vegetal mucho menos existirá recarga a los acuíferos en estos meses, aun así esta agua es tomada por las plantas para lograr un estado de supervivencia cayendo en estado de estrés hídrico e intentar sobrevivir a la época de sequía, ahora si se cuenta con reservas de agua almacenada proveniente del escurrimiento o de extracciones de agua subterránea, esta puede ser utilizada para complementar esa demanda hídrica y satisfacer correctamente el uso consuntivo de los diferentes cultivos, he aquí la importancia que tiene contar con reservas o fuentes hídricas para riego.

Ahora hagamos una analogía más específica al motivo de este estudio, tratándose esta de la relación infiltración-Usos Consuntivos que se tiene en la actual zona aguacatera, Para esto nos ayudaremos de la tabla 7.15.

Mes	Infiltración (mm)	Uj Aguacate (mm)	Infiltración - Uj (mm)
Enero	23.98	61.82	-37.84
Febrero	7.34	77.58	-70.24
Marzo	4.60	107.01	-102.41
Abril	5.67	148.88	-143.21
Mayo	35.46	166.6	-131.14
Junio	175.85	180.04	-4.19
Julio	219.38	181.05	38.33
Agosto	215.37	153.84	61.53
Septiembre	175.78	133.27	42.51
Octubre	87.96	111.14	-23.18
Noviembre	23.91	87.73	-63.82
Diciembre	12.73	68.53	-55.80
Lluvias	874.34	759.34	115.00
Secas	113.70	718.15	-604.45
Anual	799.98	1477.49	-677.51

Tabla 7.15 Infiltración contra uso consuntivo en la actual franja aguacatera en el Acuífero Cotija

En esta tabla se presenta en la segunda y tercera columna (de izquierda a derecha) los valores promedios de la Infiltración y el Uso Consuntivo específicamente para la zona aguacatera en el acuífero Cotija.

Analizando dichos datos en la columna cuatro, donde a la lámina de Uso Consuntivo para el aguacate restamos la de infiltración se obtienen valores negativos en los meses de Enero, Febrero, Marzo, Abril, Mayo, Junio, Octubre, Noviembre y Diciembre, estos valores

representan las láminas de agua faltante para satisfacer correctamente su uso consuntivo en estos meses, (ejemplo: si en el mes de enero se aplica una lámina de riego distribuida temporalmente a lo largo de todo el mes de 37.84 mm, entonces la demanda hídrica por uso consuntivo en el aguacate quedaría satisfecha en su totalidad evitando así el estrés hídrico o la muerte de la planta en su caso más extremo. Cubierto el uso consuntivo correctamente de los cultivos, en este caso aguacate, se obtiene como beneficio un óptimo aprovechamiento de nutrientes y un desarrollo natural de la planta, logrando así frutos sanos y de excelente calidad). Ahora para los meses de julio, agosto y septiembre se tiene valores positivos, esto significa que gracias a las abundantes lluvias en estos meses en la zona, el suelo contiene más agua de la que las plantas requieren por uso consuntivo; es decir el uso consuntivo está satisfecho en su totalidad y aun sobra agua en el suelo, entonces esta agua pasa a el subsuelo donde las raíces de las plantas ya no la alcanzan, penetrando cada vez más hasta llegar a contribuir a la recarga del acuífero, y la cantidad en la que recargan al acuífero son esos valores positivos de lámina de agua, es decir en la zona aguacatera solo existe la recarga en los meses de Julio, Agosto Y septiembre con valores de lámina de 38.33, 61.53 y 42.51 mm respectivamente, se puede entonces concluir que la lámina de recarga anual al acuífero dentro de la zona aguacatera es de 142.37 mm y la lámina faltante necesaria para cubrir correctamente el uso consuntivo anual en esta zona aguacatera es de 631.82 mm.

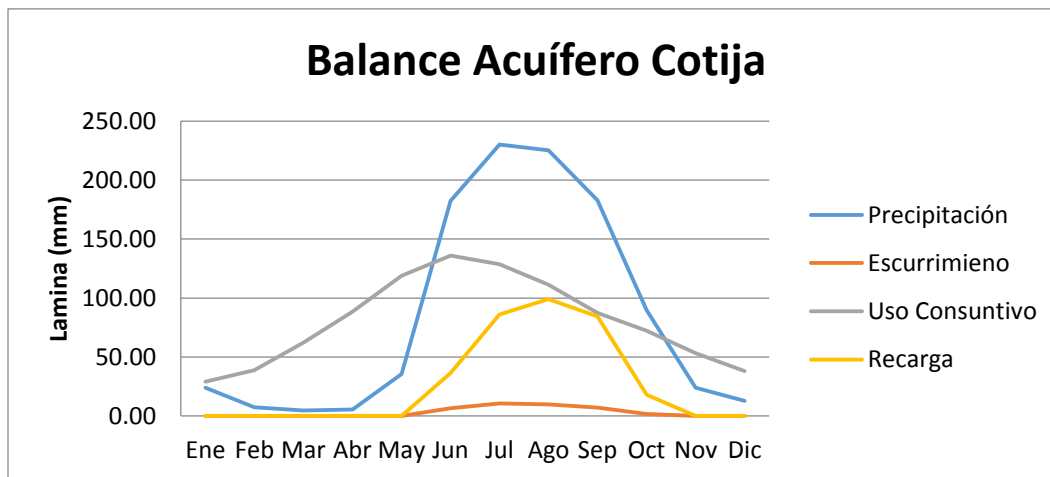


Figura 7.20 Balance del Acuífero Cotija

7.5. ESCENARIOS DE APROVECHAMIENTO DEL AGUA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA EN EL CRECIMIENTO DE LA FRANJA AGUACATERA EN EL ACUÍFERO COTIJA

Relacionando el análisis anterior con lo expuesto en la tabla 6.10, donde vemos que el acuífero Cotija puede llegar a ser ocupado en un 53.73 % por una futura franja aguacatera que cumple con las condiciones de Altitud, Temperatura, Precipitación mínima y Tipo de suelo. Vemos que las condiciones de disponibilidad hídrica superficial y subterránea hacen imposible este crecimiento desmesurado ya que las condiciones de disponibilidad de agua resulta ser la condición limitante de este crecimiento, teniendo como crecimiento permitido de la franja aguacatera la relación **$Ccp = (lamina\ de\ recarga + Lamina\ de\ escurrimiento) / lamina\ faltante\ de\ uso\ consuntivo$** , por otra parte sabemos que en el acuífero Cotija tenemos suelos con una excelente capacidad de mantener la humedad, tal es el caso de los Andosoles, en la tabla 5.5 se describe el porcentaje de área aguacatera que se riega por municipio, de la cual analizando los municipios que se encuentran en el acuífero Cotija se llegó a la conclusión de que el Coeficiente de crecimiento permitido (Ccp) puede ser incrementado por un Coeficiente de riego (Cr) en un 100%; ya que según la tabla 5.5 solo el 50% del área total de aguacatera se riega, pero para este estudio solo se utilizará un Coeficiente de riego (Cr) de 50%; este porcentaje considera que los suelos con la mejor capacidad de mantener la humedad ya están siendo ocupados por la franja aguacatera actual y que las condiciones climáticas pueden cambiar; por lo cual analizamos los siguientes escenarios basados en los estadísticos de uso del agua que se tienen registrados en el último estudio geohidrológico del acuífero Cotija, en el estado de Michoacán concluido en el año 2010, Conagua.

En la tabla siguiente se muestran los datos con los que se realizan los escenarios de crecimiento de la zona aguacatera, para el caso de la lámina de escurrimiento tenemos que para época de estiaje (nov-may) se cuenta con un acumulado de 24 mm y para época de lluvias (jun-oct) de 178 mm

Acuífero Cotija	
DATOS	
Escorrimento anual S=24,LL=178 mm	202
Recarga anual(mm)	142.37
Faltante de Uso Consuntivo (mm)	631.82
Aguacatera actual (Has)	24357.01
Futura Aguacatera (Has)	118124.72
Coeficiente de área por temporal	1.5

Tabla 7.16 Datos para formular escenarios de crecimiento de la franja aguacatera, acuífero Cotija

Escenarios	Uso lamina Superficial (%)	Uso Lámina Subterránea (%)	Ccp	Cr	Futura Aguacatera (Has)	Aguacatera actual (Has)	Crecimiento (Has)
1	100%	100%	0.55	1.50	96754.32	24357.01	72397.31
2	50%	50%	0.27		48377.16		24020.15
3	9%	50%	0.14		25077.60		720.59
4	6%	50%	0.13		23372.75		-984.26

Tabla 7.17 Escenarios de crecimiento de la franja aguacatera en función del agua superficial y subterránea disponible en la zona de estudio

Sabemos que el Acuífero Cotija tiene las condiciones de tipo de suelo, altitud, precipitación mínima y temperatura para albergar 118,124.72 Has de aguacate, lo cual representa el 53.73 % de la superficie total del acuífero, pero este crecimiento está limitado por la disponibilidad de agua en la zona, para lo cual se presentan los siguientes cuatro escenarios basados en suposiciones de uso del agua en la agricultura, así como de estadísticos de uso publicados en el último estudio geohidrológico del acuífero Cotija, en el estado de Michoacán concluido en el año 2010, Conagua.

- 1) En este escenario se supone se usa el 100% del agua superficial y el 100% del agua subterránea en la zona, con esta cantidad de agua sería posible producir 96,754.32 Has, Este escenario representa las condiciones límites de crecimiento y no puede ser factible, ya que el agua en la zona tiene otros usos y sería imposible captar toda el agua de escurrimiento y extraer toda el agua que recarga el acuífero.
- 2) Este escenario toma en cuenta el porcentaje de uso de agua superficial para uso agrícola expuesto en el último estudio geohidrológico del acuífero Cotija, en el estado de Michoacán concluido en el año 2010, Conagua, y supone se extrae el 50% del agua subterránea recargada anualmente, con esta cantidad de agua sería posible producir 48,377.16 Has.
- 3) El tercer escenario toma el 75% de la lámina de escurrimiento de la época de estiaje, que corresponde a 18 mm de lámina de escurrimiento, esta cantidad representa tan solo el 9% de la lámina de escurrimiento anual, el presente escenario representa condiciones cercanas a cómo opera el acuífero en dicha zona aguacatera, ya que en época de estiaje el agua de los escurrimientos naturales es llevada a ollas de agua para riego, también se extrae gran cantidad de agua por medio de pozos artesianos

y es en su mayoría para uso agrícola, de la misma forma es aprovechada el agua que surge de los manantiales.

- 4) Este escenario toma el 50% de lámina de escurrimiento de la época de estiaje, que corresponde a una lámina de 12 mm, y representa solo el 6% de la lámina de escurrimiento anual, toma el 50% de lámina de recarga. Con esta cantidad de agua y tomando en cuenta que el área se puede incrementar en un 50% debido a los suelos que permiten un cultivo de aguacate de temporal (no necesita riego en todo el año) se pueden cultivar 23,372.75, de las cuales ya se tiene 24,357.01 Has; es decir ya se sobrepasa el crecimiento permitido.

Como se ve en los escenarios anteriores, la franja aguacatera está en su límite de crecimiento bajo las condiciones en que opera el acuífero en esa zona, es decir; si solo se aprovecha los escurrimientos en época de estiaje para riego, la cantidad de hectáreas que se pueden producir son las que actualmente se tienen (24,357.01).

Pero si se aprovechara un porcentaje de lámina de escurrimiento mayor el número de hectáreas aumentaría, esto solo se puede lograr con infraestructura hidráulica, tal como presas.

Si se pretendiera una expansión de la franja aguacatera, esta solo podría tener lugar en un cambio de uso de suelo de agrícola de otro tipo a huertos de aguacate, lo anterior para no seguir afectando al bloque de cobertura forestal, ya que está claro la importancia de los bosques en la recarga de los acuíferos, purificación del aire, no erosión del suelo y en un equilibrio en general.

Por lo cual podemos concluir para condiciones actuales que la franja aguacatera está en su límite de crecimiento, ya que el agua en la zona tiene más usos que son indispensables satisfacer, si la franja aguacatera crece más, estos se verán afectados al igual que el balance del acuífero.

7.6. APROVECHAMIENTO DE AGUAS EN EL ACUÍFERO APATZINGÁN PARA LA AGRICULTURA

Para el acuífero Apatzingán se tiene lo siguiente. En la tabla 7.18 se muestra la distribución de agua de lluvia en el acuífero, teniendo como resultados anuales que el volumen precipitado anualmente oscila sobre los 4,762 Hm³, aproximadamente un 8% de ésta se

escurre superficialmente, esto genera un importante volumen de escurrimiento de 362.27 Hm³ anuales, el resto se infiltra, donde una parte es tomada por las plantas para satisfacer sus necesidades hídricas, podemos decir que la única época del año donde las plantas satisfacen completamente su necesidad de agua de forma natural es en los meses de julio, agosto y septiembre con un importante volumen acumulado de 2,113 Hm³, ya que en estos meses la infiltración es mayor que el uso consuntivo, de tal forma que es en estos meses donde se tiene la mayor aportación de agua por recarga natural al acuífero, tanto el agua superficial como el agua subterránea es usada minuciosamente para el riego agrícola en época de estiaje.

Balance Acuífero Apatzingán														
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual	Unidad
Precipitación	16.55	3.31	3.03	2.32	20.59	149.89	192.63	179.35	169.67	79.14	16.56	7.43	841.96	mm
Escurrecimiento	0.03	0.00	0.00	0.00	0.05	2.07	3.38	3.00	2.52	0.56	0.03	0.01	64.05	mm
Infiltración	16.53	3.31	3.03	2.32	20.54	147.82	189.26	176.36	167.14	78.58	16.53	7.43	777.91	mm
Uso Consuntivo	44.08	57.79	86.81	115.59	144.92	157.22	141.94	129.30	102.35	87.15	68.19	55.28	1190.63	mm
Recarga	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.21	47.67	47.28	64.19	12.94	0.00	0.00	180.29	mm
Precipitación	93.63	18.75	17.15	13.11	116.44	847.80	1089.55	1014.43	959.64	447.63	93.66	42.05	4762.18	Hm3
Escurrecimiento	0.15	0.01	0.01	0.00	0.26	11.69	19.09	16.95	14.26	3.18	0.16	0.03	362.27	Hm3
Infiltración	93.48	18.74	17.14	13.11	116.19	836.11	1070.45	997.48	945.39	444.44	93.50	42.02	4399.92	Hm3
Uso Consuntivo	249.34	326.88	491.01	653.78	819.70	889.24	802.83	731.36	578.89	492.95	385.68	312.67	6734.33	Hm3
Recarga	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.18	246.55	242.84	340.63	36.89	0.00	0.00	883.09	Hm3

Tabla 7.18 Balance Hídrico del Acuífero Apatzingán

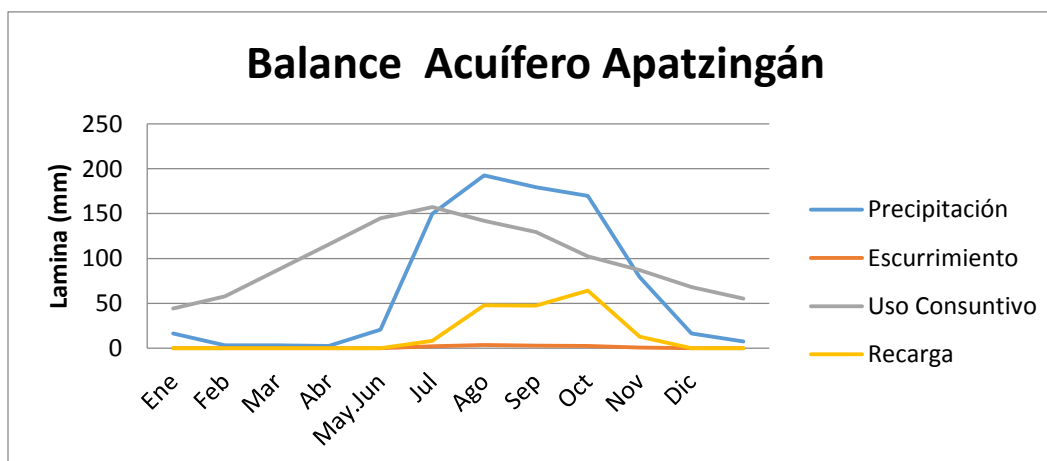


Figura 7.21 Balance del Acuífero Apatzingán

En la tabla 7.19 sobre las líneas de infiltración y uso consuntivo del aguacate vemos que para los meses de Enero, Febrero, Marzo, Abril, Mayo, Junio, Octubre, Noviembre y Diciembre la infiltración es menor que el uso consuntivo, esto significa que el total de agua que se infiltra en estos meses no es suficiente para satisfacer el uso consuntivo de la cobertura vegetal mucho menos existirá recarga al acuífero en estos meses, aun así esta agua es tomada por las plantas para intentar sobrevivir.

Mes	Infiltración (mm)	Uj Aguacate (mm)	Infiltración -Uj (mm)
Enero	16.5272	61.82	-45.29
Febrero	3.313	77.58	-74.27
Marzo	3.0311	107.01	-103.98
Abril	2.3176	148.88	-146.56
Mayo	20.5419	166.6	-146.06
Junio	147.8242	180.04	-32.22
Julio	189.2568	181.05	8.21
Agosto	176.3552	153.84	22.52
Septiembre	167.1447	133.27	33.87
Octubre	78.5778	111.14	-32.56
Noviembre	16.5313	87.73	-71.20
Diciembre	7.4289	68.53	-61.10
Lluvias	759.16	759.34	64.60
Secas	69.69	718.15	-713.24
Anual	828.85	1477.49	-648.64

Tabla 7.19 Infiltración contra uso consuntivo en la actual franja aguacatera en el Acuífero Apatzingán

Analizando dichos datos en la columna cuatro (de izquierda a derecha), donde a la lámina de Uso Consuntivo para el aguacate restamos la de infiltración se obtienen valores positivos para los meses de julio, agosto y septiembre, esto significa que gracias a las abundantes lluvias en estos meses en la zona, el suelo contiene más agua de la que las plantas requieren por uso consuntivo; es decir el uso consuntivo está satisfecho en su totalidad y aun sobra agua en el suelo, entonces esta agua pasa al subsuelo donde las raíces de las plantas ya no la alcanzan, penetrando cada vez más hasta llegar a contribuir a la recarga del acuífero, y la cantidad en la que recargan al acuífero son esos valores positivos de lámina de agua, es decir en la zona aguacatera solo existe la recarga en los meses de julio, agosto y septiembre con valores de lámina de 8.21, 22.52 y 33.87 mm respectivamente, se puede entonces concluir que la lámina de recarga anual al acuífero dentro de la zona aguacatera es de 64.6 mm y la lámina faltante necesaria para cubrir correctamente el uso consuntivo anual en esta zona aguacatera es de 713.24 mm.

7.7. ESCENARIOS DE APROVECHAMIENTO DEL AGUA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA EN EL CRECIMIENTO DE LA FRANJA AGUACATERA EN EL ACUÍFERO APATZINGÁN

Relacionando el análisis anterior con lo expuesto en la tabla 6.10, donde vemos que el acuífero Apatzingán puede llegar a ser ocupado en un 13.75 % por una futura franja aguacatera que cumple con las condiciones de altitud, Temperatura, Precipitación mínima y Tipo de suelo. Vemos que las condiciones de disponibilidad hídrica superficial y subterránea hacen imposible este crecimiento, ya que las condiciones de disponibilidad de agua resulta ser la condición limitante de este crecimiento, teniendo como crecimiento permitido de la franja aguacatera la relación **$Ccp = (lamina\ de\ recarga + Lamina\ de\ escurrimiento) / lamina\ faltante\ de\ uso\ consuntivo$** ; por otra parte sabemos que en la parte noreste del acuífero Apatzingán, en el municipio de Tancítaro existen zonas con suelos con una gran capacidad para mantener la humedad por lo cual incrementamos el coeficiente de crecimiento permitido (Ccp) en un 20% y analizamos los siguientes escenarios.

Acuífero Cotija	
DATOS	
Escorrimento anual S=6,LL=58 mm	64.05
Recarga anual(mm)	64.60
Faltante de Uso Consuntivo (mm)	713.24
Aguacatera actual (Has)	23,109.40
Futura Aguacatera (Has)	78,238.06

Tabla 7.20 Datos para formular escenarios de crecimiento de la franja aguacatera, acuífero Apatzingán

Escenarios	Uso lámina Superficial (%)	Uso Lámina Subterránea (%)	Ccp	Cr	Futura Aguacatera (Has)	Aguacatera actual (Has)	Crecimiento (Has)
1	144%	130%	0.25	1.20	23,173.53	23,109.40	64.13
2	100%	100%	0.18		16,934.54		-6,174.86
3	10%	50%	0.05		5,094.84		-18,014.56
4	5%	50%	0.05		4,673.29		-18,436.11

Tabla 7.21 Escenarios de crecimiento de la franja aguacatera en función del agua superficial y subterránea disponible en la zona de estudio

- 1) Este escenario supone se usa el 144% de la lámina de escurrimiento superficial y el 130% del agua subterránea en la zona, con esta cantidad de agua sería posible producir 23,173.53 Has. Este escenario toma en consideración que tanto en época de lluvias como de secas el agua que fluye como escurrimiento superficial es tomada y llevada a ollas de agua para su almacenamiento y uso en tiempo de estiaje, por otra parte el 44% extra del escurrimiento superficial se puede considerar como la cantidad de agua que es captada directamente de la lluvia por las ollas de agua, y el 30% extra de la lámina de extracción subterránea se traduce como una sobreexplotación localizada al acuífero. Este escenario supone condiciones semejantes a cómo opera el acuífero en esta zona.
- 2) Este escenario supone se usa el 100% del agua superficial y se extrae el 100% del agua subterránea recargada anualmente, con esta cantidad de agua sería posible producir 16,934.54 Has.
- 3) El tercer escenario toma el 100% de la lámina de escurrimiento superficial correspondiente a la época de estiaje, el cual representa solo el 10% del total anual y el 50 % de lámina de recarga, con esta cantidad de agua sería posible producir 5,094.84 Has.
- 4) Este escenario toma el 50% de lámina de escurrimiento de la época de estiaje, que corresponde al 5% de la lámina anual y el 50% de lámina de recarga, con este volumen de agua sería posible producir 4,673.29 Has.

Podemos concluir que la franja aguacatera sobrepasa su crecimiento permitido por las condiciones naturales de recarga y escurrimiento, pero en ésta región existen pequeñas zonas donde el tipo de arcillas almacenan tanta agua que prácticamente se necesita de pocos riegos para la supervivencia de las plantas de aguacate, tal es el caso de las rancherías como El Araparicuaro, El Zapote, Pucuario, La Cañada, El Chilar, El Cuate, Condémbaro, Zirímbo, todas ellas comprendidas en el municipio de Tancítaro.

Por otro lado la intervención del hombre para almacenar agua en época de lluvias juega un importante papel en la región, con ayuda de las ollas de agua los propietarios de las huertas de aguacate se ayudan a almacenar agua en tiempo de lluvias para posteriormente en época de estiaje usarla por medio de sistemas de riego tecnificado.

En el escenario 1 y 2 vemos que el porcentaje de agua superficial utilizada rebaza e iguala el 100% respectivamente, esto se traduce de la siguiente manera:

- a) En época de lluvias son aprovechadas casi en su totalidad las corrientes efímeras, es decir sobre los causes se construyen pequeñas represas donde por medio de mangueras o tuberías es llevada el agua hasta las ollas de agua.
- b) Las corrientes perenes son aprovechadas casi en su totalidad todo el año.
- c) Las ollas de agua son excavaciones a cielo abierto cubiertas con una geo membrana totalmente impermeable, lo cual provoca que el 100% del agua que precipite en su superficie sea almacenada (se pierde un porcentaje por evaporación), las ollas de agua varían en dimensiones de acuerdo a la necesidad, pudiendo estas tener superficies incluso mayores a 1 Has y de decena de metros de profundidad, lo cual en volumen acumulado de cientos o miles de ollas de diferentes capacidades, representan un importante volumen.

Por lo tanto el escenario 1 sería el que mayormente se acerca a la realidad de operación de esta zona aguacatera comprendida en el acuífero Apatzingán.

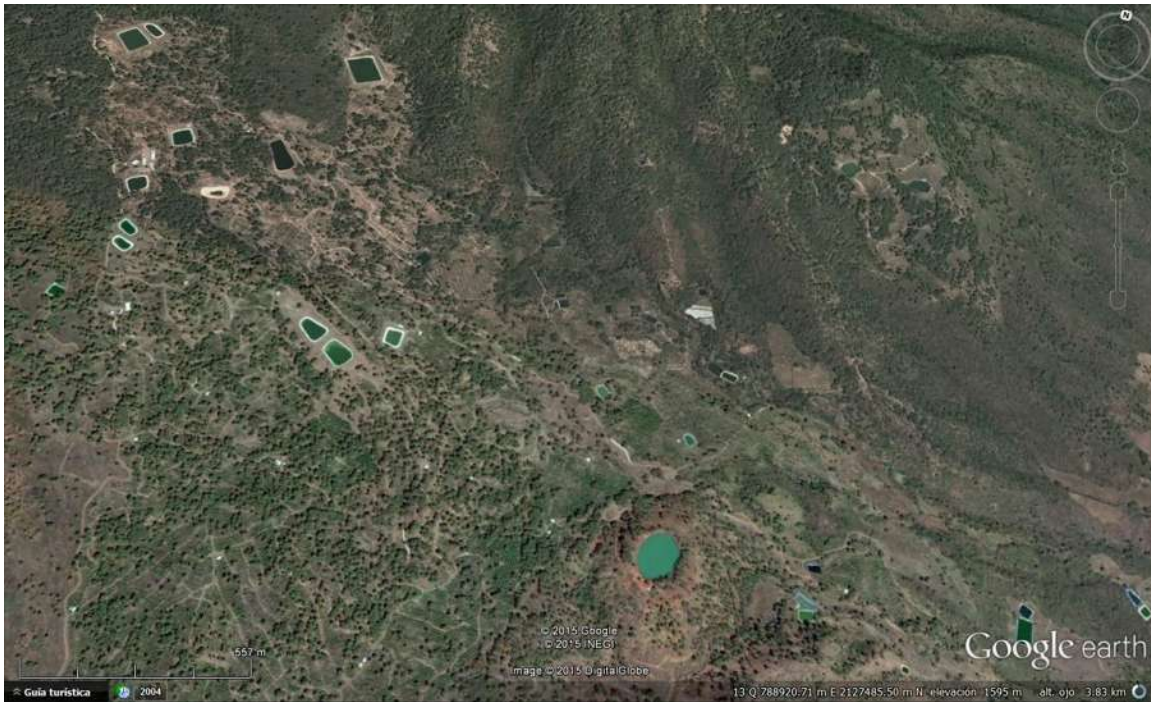


Figura 7.22 Imagen satelital de ollas de agua en la parte norte del acuífero Apatzingán, en el municipio de Tancítaro

En la imagen 7.22 se muestra una imagen satelital, donde se puede apreciar con claridad la densidad de ollas de agua en la zona, los propietarios de dichas huertas aprovechan los puntos topográficos altos para así regar por gravedad, tal es el caso del cerro que se aprecia en la imagen satelital, que debido a su forma de volcán se aprovechó como una enorme olla de agua.

La gran cantidad de ollas de agua debe causar un desequilibrio en el balance del acuífero, ya que el área acumulada de cientos de ollas o quizá miles representan un área totalmente impermeable donde el acuífero no puede recargar.

8. CONCLUSIONES

Para el acuífero Cotija concluimos que existe una importante recarga anual vertical del orden de 696.26 Hm^3 , esta se da solo en los meses de lluvias (junio-octubre), aunque para la zona aguacatera solo se presenta recarga en los meses de julio, agosto y septiembre (debido a los altos usos consuntivos de este cultivo), la recarga al acuífero se presenta desde el noreste hasta el sur, recargando principalmente al este del municipio de los Reyes y Peribán, al norte de Tancítaro y Tinguindín y con una pequeña zonas de recarga en el municipio de Cotija que pertenece a la presa San Juanico.

En el acuífero Cotija se genera un importante volumen anual de escurrimiento de 445.48 Hm^3 , los cuales son minuciosamente aprovechados principalmente para el riego agrícola, público urbano y servicios, este volumen ayuda a que no se extraiga demasiada agua subterránea.

Se analizó el crecimiento máximo de la franja aguacatera en función de los parámetros óptimos para este cultivo, los cuales fueron uso de suelo, temperatura, altitud y precipitación mínima, este crecimiento pasó a ser de $24,357 \text{ Has}$ a $118,124 \text{ Has}$, lo cual representa un crecimiento de 485% , pasando de ocupar el 11.08% a 53.73% de la superficie total del acuífero, posteriormente se volvió a realizar el balance hidrológico con el nuevo mapa de uso de suelo (con crecimiento máximo de franja aguacatera), obteniendo así el impacto hacia el acuífero, el cual se presentó de la siguiente manera: un incremento en el volumen de escurrimiento de 15% , incremento en el volumen de evapotranspiración de 24% y un decremento en el volumen de recarga de 33% .

Se llegó a la conclusión de que el crecimiento de la franja aguacatera está limitado por la disponibilidad de agua superficial y subterránea, ya que la demanda supera la oferta para un crecimiento máximo y que las condiciones de operación del acuífero se encuentran en un rango estable, donde no se está sobreexplotando el acuífero y donde las condiciones de operación se asemejan a usar el 50% de lámina de recarga y el 75% de lámina de escurrimiento de la época de secas, que representa solo el 9% del escurrimiento anual.

Se llegó a la conclusión de que debido a la gran capacidad del suelo para retener la humedad (suelos Andosoles), precipitaciones hasta de $1,400 \text{ mm}$ anuales (estación 16088, PERIBÁN), temperaturas medias de 17°C y elevaciones en un rango de 950 a $2,400 \text{ Msnm}$. El acuífero Cotija es y tiene potencial para seguir siendo número uno a nivel mundial en producción de aguacate tipo Hass.

Para el acuífero Apatzingán se concluye que tiene dos zonas importantes de recarga, las cuales están localizadas en la parte noreste y sureste, estas zonas pertenecen a la parte

centro del municipio de Tancítaro y Aguililla, oeste de Nuevo Parangaricutiro y noreste de Coalcoman, la recarga solo tiene lugar en el periodo de lluvias (junio-octubre), aunque en la franja aguacatera solo se presenta en los meses julio, agosto y septiembre de cada año. El río Tepalcatepec constituye una tercer zona de importancia para la recarga, ya que genera una recarga permanente.

El acuífero Apatzingán recarga un volumen total anual por el orden de 923 Hm³ y este es prácticamente igual al volumen de salida, por lo cual no cuenta con disponibilidad de agua subterránea para nuevos aprovechamientos.

Existe una sobre explotación en la parte sureste de la ciudad de Apatzingán, debida a la concentración de pozos existentes en esa área, de tal forma que se puede clasificar como una sobreexplotación localizada.

Se analizó el crecimiento máximo de la franja aguacatera en función de los cuatro parámetros iniciales anteriormente descritos, se llegó a la conclusión de que la zona aguacatera cuenta con una zona factible que pudiera pasar de 23,110 has a 78,238 has, se analizó el impacto hacia el acuífero con este crecimiento y se obtuvieron los siguientes resultados: incremento en el volumen de escurrimiento en un 44%, incremento en el volumen por evapotranspiración de un 7% y decremento en el volumen de recarga en un 27%.

Al analizar el crecimiento incluyendo la disponibilidad de agua superficial y subterránea, se concluyó finalmente que el acuífero Apatzingán no es apto para producir la cantidad de hectáreas que posee en la actualidad, ya que este solo podría albergar alrededor de 5,000 hectáreas de una forma sustentable y ya cuenta con 23,110, lo anterior ha sido posible con la implementación de técnicas para almacenar agua, como lo son las ollas de agricolas y con una sobreexplotación localizada al acuífero.

Se encontraron nuevas zonas factibles para cultivar aguacate al suroeste del acuífero, en los municipios de Coalcoman, Aguililla, Apatzingán y Tumbiscatio, las cuales se determinó serian zonas de riego todo el año.

De manera general para este estudio se concluye que las zonas boscosas son las que más recarga aportan a los acuíferos, que un cambio de suelo de bosque a agrícola es perjudicial para el balance hidrológico.

Es indispensable integrar un plan de largo plazo de transición hacia la sustentabilidad en la producción de aguacate que participe en el manejo adaptativo de los recursos del suelo, que promueva el uso de tecnologías agroecológicas con base a una agricultura sustentable.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera, M., Vidales, F., & Salazar, G. (2004). *Contenido nutrimental en suelos y hojas de aguacate en huertos establecidos en Micchoacán y comparación de métodos para interpretación de resultados*. Uruapan, Michoacán, México: INIFAP. CIRPAC. Folleto Técnico Núm. 2.
- Anguiano, Coria, Ruiz, Chávez, & Alcántar. (2003). Caracterización edáfica y climática del área productora de aguacate Persea americana cv. "Hass" en Michoacán México. V *Congreso Mundial de aguacate*, (págs. 146-147). Málaga, España.
- Aparicio, F. (2012). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México: Limusa.
- B.J.A., A. (2008). *Manual técnico del cultivo de aguacate "Hass" (Persea americana L)*. Honduras: FHIA.
- Campos Campos, O. (2012). *Zonificación Agroecológica del aguacate (Persea Americana Mill. Var. Hass) en la cuenca del río Duero*. México: Politécnico Nacional.
- CIGA. (2011). *UNAM Campus Morelia*. Obtenido de Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental: <http://www.ciga.unam.mx/>
- CONAGUA. (2009). *ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA SUBTERRÁNEA ACUÍFERO (1622) COTIJA ESTADO DE MICHOACÁN*. México: Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos.
- CONAGUA. (2009). *ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA SUBTERRÁNEA PARA EL ACUÍFERO (1620) APATZINGÁN ESTADO DE MICHOACÁN*. México: Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos.
- CONAGUA. (2009). *ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA SUBTERRÁNEA PARA EL ACUÍFERO (1620) APATZINGÁN ESTADO DE MICHOACÁN*. México: Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos.
- Cortes, M. A. (2014). *Impacto Ambiental de la Zona Aguacatera en el Acuífero Nueva Italia, Municipios Ario de Rosales y Salvador Escalante*. Morelia: UMSNH.
- FAOSTAT. (Julio de 2015). *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Dirección de Estadísticas*. Obtenido de <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/S>

- G.S., S., & Lovatt C.J. (1998). *Application alters flowering phenology of the "Hass"*. Society Horticultural Science .
- GEOCONSUL. (1993). *Estudio Geohidrológico de la Región Cotija*. México: Gobierno del Estado de Michoacán.
- GEOPESA. (1979). *Prospección Geológica y Geofísica en la zona de Tepalcatepec, Los Reyes*. Michoacán: contrato n° gza-79-9-ed.
- INEGI. (2015). *Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática* . Obtenido de <http://www.inegi.org.mx/>
- INIFAP. (2014). *SAGARPA*. Obtenido de Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias: <http://www.inifap.gob.mx/SitePages/default.aspx>
- INIFAP. (2015). *SAGARPA*. Obtenido de <http://www.inifap.gob.mx/SitePages/default.aspx>
- NOM-011-CNA. (2000). Conservación de Recurso Agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. *Diario Oficial de la Federación*. México: SEMARNAT.
- REPDA. (2014). *CONAGUA*. Obtenido de Registro Público de Derechos de Agua: <http://www.conagua.gob.mx/Repda.aspx?n1=5&n2=37&n3=115>
- REPDA. (2014). *CONAGUA*. Obtenido de Registro Público de Derechos de Agua: <http://www.conagua.gob.mx/Repda.aspx?n1=5&n2=37&n3=115>
- SIAP. (2015). *SAGARPA*. Obtenido de Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/>
- Tapia, Larios, Alcántar, & Anguiano. (2006). Determine el programa de riego eficiente a aplicar en su huerta de aguacate. *El Aguacatero* , 7-8.
- Whiley, & Winston. (s.f.). Effect of temperature at flowering on varietal productivity in some avocado-growing areas in Australia. *Yearbook. Preceedings of the World Avocado Congress. South African*. 10: 45-47.

ANEXOS

Estudio que se realiza en el software IMPRO v.4 que es una herramienta básica para la Evaluación de Impacto Ambiental de Proyectos.

El programa IMPRO4-EIA se ha diseñado expresamente para realizar el "Estudio de Impacto Ambiental" de un proyecto y sus alternativas de forma sistemática, ordenada y de acuerdo con el contenido que fija la legislación vigente.

El manejo del programa por el usuario sigue un proceso de tipo conversacional, de modo que permite simular distintas hipótesis de trabajo (cambiar criterios, valoraciones, juicios, etc.) obteniendo respuestas rápidas. Este procedimiento es de gran interés, dada la incertidumbre inherente a los estudios de impacto ambiental derivada, tanto de la complejidad y juicios de valor que contienen, como de su carácter predictivo.

El presente Estudio tiene por objeto la identificación, descripción y evaluación de los impactos generados por el cambio de uso de suelo en la Zona Aguacatera de los Municipios Tancítaro, Peribán y los reyes, tomando en cuenta las condiciones de disponibilidad de agua de los acuíferos, clima, temperatura, erosión hídrica y tipo de suelo, de la zona de cultivo. Basándonos en la variación de los factores antes mencionados, dependiendo del uso que se le está dando al suelo.

Es un hecho que la coincidencia de condiciones agroclimáticas ha ocasionado un acelerado cambio de uso del suelo forestal a plantación de aguacate, al grado de provocar un gran deterioro de los ecosistemas forestales del estado de Michoacán, que se manifiesta en un proceso de deforestación de 500 has anuales. Esto tiene implicaciones importantes, pues el bosque juega un papel fundamental en el balance hídrico a nivel de cuenca, el suministro de agua para diversos usos, la conservación del suelo y la provisión de servicios ambientales a la sociedad. Por ello, urge toma de decisiones que orienten hacia la ordenación territorial del cultivo, además de promover el manejo sustentable de los recursos, en beneficio de las generaciones futuras, incluyendo la conservación y restauración de áreas con vocación forestal.

Se propuso una ampliación tentativa para evaluar el impacto de la zona aguacatera en los municipios de Tancítaro, Peribán y Los Reyes en función de las variables y los escenarios de crecimiento expuestos en esta tesis, con un incremento del 20% de las áreas aguacateras actuales en estos municipios, lo cual representa un incremento de 4,320 Has para Tancítaro, 2,478 Has para Peribán y 754 Has para Los Reyes.

Las obras y actividades (árbol de acciones) incluidas en el estudio son:

Medio	factor	Sub-factor
Preparación	Ejecución de proyecto	Ubicación de la zona a plantación
		Desmante
		Retiro de residuos
		Perimetrado de la zona
		Construcción de ollas de agua
		Obras auxiliares (vías de acceso)
		Obras (baños cocinas etc, instalación de contenedores para basura en todo el área)
		Replanteo
		Excavaciones
		Trasplante
		Nivelación local del terreno (cajetes)
		Aplicación de fertilizantes y abonos orgánicos
		Instalación de sistema de riego
Funcionamiento	Utilización del proyecto	Limpieza de maleza
		Aplicación de fertilizantes y abonos orgánicos
		Poda de los arboles
		Riego
		Cosecha

Factores que sufrirán transformaciones son:

MEDIO	FACTOR	SUB FACTOR
Abiótico	Aire	Calidad
		Contaminación
		Ruido
	Suelo	Calidad
		Cantidad
		Permeabilidad
	Agua	Calidad
		Escorrentía
		Infiltración
		Cantidad Superficial
		Cantidad Subterránea.
Biótico	Geomorfología	Forma del relieve
		Estabilidad
	Flora	Cobertura vegetal
		Diversidad
		Especies en status
	Fauna	Hábitat
		Diversidad
		Especies en status
		Movimientos locales

Socioeconómico	Ecosistema	Calidad
		Cantidad
		Efecto de borde
	Socio economía	Empleo
		Economía local
		Cambio de uso del suelo

A continuación se muestra la matriz de identificación de impacto ambiental:

			Preparación												Funcionamiento								
			Ejecución del proyecto												Utilización de proyecto								
Negativo significativo	Positivo significativo	No significativo	Ubicación de la zona a plantación	Desmonte	Retiro de residuos	Perimetrado de la zona	Construcción de riles de agua	Obras auxiliares (vías de acceso)	Obras (cocheras, baños, contenedores)	Reglato	Excavaciones	Trasplante	Nivelación local del terreno (casetes)	Aplicación de fertilizantes y abonos orgánicos	Instalación de sistema de riego	Limpieza de maquila	Aplicación de fertilizantes y abonos orgánicos	Poda de los árboles	Riego	Cosecha	Fumigación		
Ambiente	Abiótico	Aire	Contaminación	nº 1	nº 2													nº 56				nº 57	
		Calidad	nº 52																				
		Suelo	Calidad	nº 33				nº 34	nº 47	nº 35		nº 36				nº 3				nº 4		nº 41	
			Cantidad									nº 40											
		Permeabilidad						nº 5															
		Agua	Calidad							nº 38						nº 7					nº 48		
			Escorrentía	nº 58																			
			Infiltración	nº 59				nº 44									nº 45						
			Cantidad Superficial	nº 51																			
		Cantidad Subterránea	nº 53					nº 54									nº 55						
	Geomorfología	Forma de relieve							nº 42					nº 8									
		Estabilidad																					
	Biótico	Flora	Cobertura vegetal	nº 9								nº 37											
			Composición	nº 10												nº 48		nº 46					
			Especies nativas																				
		Fauna	Hábitat	nº 43	nº 11																		
			Composición							nº 12						nº 49							
			Especies nativas							nº 50											nº 13		
			Movimientos locales	nº 14						nº 39													
			Calidad								nº 15												
Ecosistema		Cantidad																					
		Efecto de borde																					
Socioeconómico	Socio-Economía	Empleo	nº 16	nº 17	nº 18	nº 19	nº 20	nº 21	nº 22	nº 23	nº 24	nº 25		nº 26	nº 27	nº 28	nº 29	nº 30	nº 50	nº 31			
		Economía local	nº 61	nº 62	nº 63	nº 64	nº 65	nº 66						nº 67	nº 68	nº 69	nº 70			nº 32			
		Cambio de uso de suelo																					

Nota Aclaratoria: El peso de los factores y el valor del impacto se hicieron cualitativamente con la participación de conocedores en el área.

Por último, se obtiene el Impacto Total del Proyecto por suma ponderada de todos los impactos sobre los diferentes factores afectados, multiplicados por el peso que se les haya atribuido. Como los pesos de los factores se ajustan a suma 1,000 y cada impacto varía entre 0 y 1, el impacto total de un proyecto estará siempre comprendido entre 0 y 1,000 unidades de impacto. Tomándose como aceptable una magnitud total menor a 500 (en sentido negativo), ya que con sus mitigaciones este proyecto podrá ejecutarse, y como no viable aquel proyecto cuyo valor de impacto total sea mayor a 500 ya que el daño sería severo y no reversible.

Nº DE IMPACTO	VALOR	PESO	VALOR FINAL
3. Calidad del suelo- Aplicación de Fertilizantes	-0.38	100	-38
4. Calidad del suelo- Aplicación de fertilizantes	-0.69	100	-69
6. Permeabilidad- Construcción de ollas de agua	-0.50	5	-2.5
7. Calidad del agua-Aplicación de fertilizantes	-0.60	100	-60
9. Cobertura vegetal-desmante	-0.77	200	-154
10. Composición-Desmante	-0.79	30	-23.7
11. Hábitat-Retiro de residuos	-0.10	5	-0.5
12. Composición- Obras de construcción	-0.30	5	-1.5
13. Especies status-Poda de arboles	-0.09	5	-0.45
14. Movimientos locales- Desmante	-0.64	5	-3.2
15. Calidad del ecosistema- Replanteo	-0.26	5	-1.3
33. Calidad del suelo- Desmante	-0.47	100	-47
34. Calidad del Suelo- Construcción de ollas de agua	-0.38	100	-38
35. Calidad del suelo-Obras de construcción.	-0.09	100	-9
37. Cobertura vegetal- Excavaciones	-0.06	200	-12
38. Especies Status-Obras de construccion	-0.15	5	-0.75
39. Calidad del agua- Obras de construcción	-0.04	100	-4

40. Movimientos locales-Obras de construccion	-0.22	5	-1.1
41. Forma de relieve-Obras de construcción.	-0.06	5	-0.3
42. Calidad del agua-Riego	-0.55	100	-55
43. Calidad del suelo-Riego	-0.22	100	-22
44. Hábitat-Desmonte	-0.71	5	-3.55
45. infiltración-construcción de ollas de agua	-0.64	20	-12.8
46. Infiltración-Instalación de sistemas de riego	-0.03	20	-0.6
47. Composición-Limpieza de Maleza	-0.25	30	-7.5
51. Contaminación del aire-Desmonte	-0.45	80	-36
53. Contaminación del aire-Aplicación de abonos organicos	-0.29	80	-23.2
54. Contaminación del aire-Fumigación	-0.22	80	-17.6
55. Calidad del aire-Desmonte	-0.26	100	-26
56. Escorrentia-Desmonte	-0.15	50	-7.5
57. Infiltración-Desmonte	-0.15	20	-3
58. Cantidad Superficial de agua-Desmonte	-0.18	70	-12.6
59. Cantidad de agua Subterránea-Desmonte	-0.40	70	-28
60. Cantidad de agua Subterraneas-Construcción de ollas	-0.40	70	-28
TOTAL PUNTUACIÓN:			-749.8

En la tabla anterior se muestran los resultados finales de evaluar la posibilidad de crecimiento de la zona aguacatera en los municipios antes mencionados, con un valor de -749.8 que hacen inviable el proyecto.