



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

POSGRADO EN GEOGRAFÍA  
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS  
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA  
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN DE TIERRAS EN EL CULTIVO DE AGUACATE TACÁMBARO,  
MICHOACÁN, MÉXICO.

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRÍA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:  
ALMA GUADALUPE BARAJAS ALCALÁ

TUTORES  
DR. FRANCISCO BAUTISTA ZÚÑIGA  
Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental-UNAM  
MTRO. LUIS MIGUEL MORALES MANILLA  
Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental-UNAM

MÉXICO, D. F. FEBRERO DE 2015



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedico esta tesis a mi mamá que es la única que lee mis tesis por más de cinco veces.

¡Te amo má!

## **PRÓLOGO**

El presente proyecto de tesis se aproxima a la realidad por medio de mapas, la finalidad: realizar una evaluación de tierras. Los ejes de desarrollo de esta evaluación son: la atracción del terreno para el cultivo de aguacate, las funciones ambientales de los suelos que desempeñan bajo diferentes usos y la aptitud agrícola.

Cabe mencionar que ha sido un reto integrar la información en una secuencia lógica, ya que el ambiente conformado por los componentes: físico, económico y social (FAO, 1976) se representan en diferente tipo de dato (espacial, numérico, textual). También hay que mencionar que se abarca el contexto físico y social de la evaluación de tierras en el cultivo de aguacate (FAO, 1976); mientras que el contexto político y económico no se abarca en este estudio (FAO, 2007).

Aprovecho este apartado para agradecer a mi papá que siempre me llena de sabiduría con sus pláticas interminables compartiendo experiencias, a mi mamá que siempre me estimula a lograr todo lo que me propongo, a mi hermana Cynthia que siempre me regresa de la luna a la tierra, a mi hermana Melina que me hace ver las cosas más a la ligera, a mi hermano Víctor que siempre me ayuda en todo, y por su puesto a mis sobrinos que con su alegría y carisma me hacen distraerme y me recuerdan lo divertido y simple que es disfrutar estar vivo.

Quiero compartir en estas líneas que es una grata experiencia cubrir los requisitos para obtener el grado de maestra en Geografía, por una parte la constante motivación de mis padres, maestros y compañeros ha hecho de esta etapa de mi vida una trayectoria llena de satisfacciones.

Agradezco en especial por el último empuje de mi madre Eulalia Alcalá y de mi compañero de vida Cuauhtémoc Patiño.

También en este apartado quiero agradecer a mis compañeros que hicieron este proceso gozoso, lleno de convivencias, diversión, apoyo, solidaridad, en fin... ¡buena vibra! Gracias. En especial para Chivis, Memo y Emilia.

Aprecio y agradezco el apoyo incondicional de Lupita y Aurora.

Aprovecho este apartado para agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por otorgarme una beca mediante la Convocatoria de Becas Nacionales 2011 - 2012 Cuarto periodo. A la Universidad Nacional Autónoma de México por otorgarme el apoyo mediante la Convocatoria Becas Mixtas 2013 – Marzo 2014.

Dedico esta obra a todas las personas que estudian los suelos, en especial a la Dra. María Alcalá de Jesús, al Dr. Francisco Bautista Zúñiga y al Dr. Pavel Krasilnikov; quienes con su entusiasmo y dedicación me estimulan a seguir adelante e ir más allá de...

## ÍNDICE

Capítulo	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO CONCEPTUAL	3
2.1. Degradación del ambiente	3
2.2. Usos del terreno	3
2.2.1. Elementos del paisaje que influyen en el uso del terreno	4
2.3. Relaciones espaciales que influyen en el grado de atracción del terreno para el cultivo de aguacate	4
2.4. Funciones que desempeñan los suelos bajo diferentes condiciones de uso	5
2.4.1. La función ambiental de los suelos	6
2.4.2. La función agrícola de los suelos	6
2.5. Características y propiedades necesarias para evaluar las funciones de los suelos	7
3. ANTECEDENTES	10
3.1. Manuales, métodos, modelos y software utilizados para evaluar tierras	10
3.2. El cultivo de aguacate en Michoacán	16
4. OBJETIVOS	17
5. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	18
6. MATERIALES Y MÉTODOS	22
6.1. El modelo Agrilocal	23
6.1.1. Sistematización de datos espaciales	23
6.1.2. Procesamiento cartográfico de datos espaciales	23
6.1.3. Construcción del modelo Agrilocal	24
6.1.3.1. Relevancia de las relaciones entre elementos del paisaje y el cultivo de aguacate	24
6.1.3.2. Probabilidad de cultivo de aguacate en función de las relaciones relevantes entre elementos del paisaje y el cultivo de aguacate	27
6.1.3.3. Grado de influencia de las relaciones relevantes en la toma de decisiones de uso del suelo para el cultivo de aguacate	28
6.1.4. Aplicación del modelo Agrilocal	29
6.2. Las geoformas	30
6.3. Los suelos	31
6.3.1. Muestreo de suelos	31
6.3.2. Análisis de laboratorio de suelos	31
6.3.3. Clasificación de suelos	32
6.3.4. Cartografía de los suelos	32
6.4. Aptitud climática	33
6.5. Evaluación de las funciones de los suelos	34
6.5.1. Cartografía de las funciones de los suelos	34
6.6. Evaluación de tierras en el cultivo de aguacate	36
6.6.1. Estado ambiental	36
6.6.2. Estado productivo	36
7. RESULTADOS	37
7.1. Modelo Agrilocal: la atracción del terreno para el cultivo de aguacate	

7.1.1.	Relevancia de los elementos del paisaje en el establecimiento del cultivo de aguacate	37
7.1.1.1.	Relevancia de los elementos naturales del paisaje en el establecimiento del cultivo de aguacate	37
7.1.1.2.	Relevancia de los elementos antrópicos del paisaje en el establecimiento del cultivo de aguacate	40
7.1.2.	Preferencia de las relaciones relevantes entre los elementos del paisaje y el cultivo de aguacate	43
7.1.2.1.	Preferencia de la relación de coincidencia entre los elementos naturales del paisaje y el cultivo de aguacate	43
7.1.2.2.	Preferencia de la relación de proximidad entre los elementos antrópicos del paisaje y el cultivo de aguacate	44
7.1.3.	Forma de la función de probabilidad de las relaciones espaciales relevantes	48
7.1.3.1.	Probabilidad de cultivo de aguacate en función a los elementos del paisaje relevantes de 1974	48
7.1.3.2.	Probabilidad de cultivo de aguacate en función a los elementos del paisaje relevantes de 1995	52
7.1.3.3.	Probabilidad de cultivo de aguacate en función a los elementos del paisaje relevantes de 2011	53
7.1.4.	Grado de influencia de las relaciones relevantes en la toma de decisiones de uso del suelo para el cultivo de aguacate	54
7.1.5.	Aplicación del modelo Agrilocal: la atracción del terreno para el cultivo de aguacate	56
7.2.	Geoformas de Tacámbaro, Michoacán, México	62
7.3.	Los suelos de Tacámbaro, Michoacán, México	64
7.3.1.	Clasificación de suelos	64
7.3.2.	Mapa de los suelos	70
7.4.	Aptitud climática para el cultivo de aguacate	72
7.5.	Evaluación de las funciones de los suelos	74
7.5.1.	Cartografía de las funciones de los suelos	79
7.6.	Evaluación de tierras en el cultivo de aguacate	85
7.6.1.	Estado ambiental del cultivo de aguacate en Tacámbaro	85
7.6.2.	Estado productivo del cultivo de aguacate en Tacámbaro	89
8.	DISCUSIÓN	91
9.	CONCLUSIONES	95
10.	REFERENCIAS	96
11.	ANEXOS	104

## ÍNDICE CUADROS

Cuadro	Página
1. Desarrollo de los suelos dependiendo de su cubierta (propiedades editadas)	35
2. Relevancia de la pendiente del terreno en el cultivo de aguacate	38
3. Relevancia de la altitud (msnm) del terreno en el cultivo de aguacate	39
4. Relevancia de la proximidad a matorral-pastizal inducido en el cultivo de aguacate	40
5. Relevancia de la proximidad a cultivo anual en el cultivo de aguacate	41
6. Relevancia de la proximidad a caminos en el cultivo de aguacate	41
7. Relevancia de la proximidad a asentamientos humanos en el cultivo de aguacate	42
8. Funciones matemáticas en lenguaje geográfico	48
9. Influencia de las relaciones espaciales relevantes en el establecimiento de las huertas de aguacate en 1974, por peso estimado	54
10. Influencia de las relaciones espaciales relevantes en el establecimiento de las huertas de aguacate en 1995, por peso estimado	55
11. Influencia de las relaciones espaciales relevantes en el establecimiento de las huertas de aguacate en 2011, por peso estimado	55
12. Puntos de muestreo de acuerdo con la presencia y estadio del cultivo de aguacate	62
13. Funciones de los suelos bajo diferente cubierta y manejo de los suelos.	77

## ÍNDICE FIGURAS

Figura	Página
1. Ubicación de Tacámbaro, Michoacán México	18
2. Diagrama metodológico	22
3. Preferencia de la pendiente del terreno en valores de probabilidad en el establecimiento del cultivo de aguacate	43
4. Preferencia de la altitud del terreno en valores de probabilidad en el establecimiento del cultivo de aguacate	44
5. Preferencia de la proximidad a matorral-pastizal inducido en valores de probabilidad para el establecimiento del cultivo de aguacate	45
6. Preferencia de la proximidad a caminos en valores de probabilidad para el establecimiento del cultivo de aguacate	45
7. Preferencia de la proximidad a cultivo anual en valores de probabilidad para el establecimiento del cultivo de aguacate	46
8. Preferencia de la proximidad a asentamientos humanos en valores de probabilidad para el establecimiento del cultivo de aguacate	47
9. Función matemática que se ajusta a la distribución de la ubicación real del cultivo de aguacate con respecto a la pendiente del terreno para 1974	49
10. Función matemática que se ajusta a la distribución de la ubicación real del cultivo de aguacate con respecto a la altitud del terreno para 1974	49
11. Función matemática que se ajusta a la distribución de la ubicación real del cultivo de aguacate con respecto a la proximidad a matorral-pastizal inducido para 1974	50
12. Función matemática que se ajusta a la distribución de la ubicación real del cultivo de aguacate con respecto a la proximidad a cultivo anual para 1974	50
13. Función matemática que se ajusta a la distribución de la ubicación real del cultivo de aguacate con respecto a la proximidad a caminos para 1974	51
14. Función matemática que se ajusta a la distribución de la ubicación real del cultivo de aguacate con respecto a la proximidad a asentamientos humanos en 1974	51
15. Función matemática que se ajusta a la distribución de la ubicación real del cultivo de aguacate con respecto a la pendiente del terreno para 1995	52
16. Función matemática que se ajusta a la distribución de la ubicación real del cultivo de aguacate con respecto a la altitud del terreno para 1995	52
17. Función matemática que se ajusta a la distribución de la ubicación real del cultivo de aguacate con respecto a la pendiente del terreno para 2011	53
18. Función matemática que se ajusta a la distribución de la ubicación real del cultivo de aguacate con respecto a la altitud del terreno para 2011	53
19. Atracción del terreno para el cultivo de aguacate en 1974	57
20. Atracción del terreno para el cultivo de aguacate en 1995	59
21. Atracción del terreno para el cultivo de aguacate en 2011	61
22. Mapa geomorfológico de Tacámbaro, Michoacán, México	63
23. Clasificación de los perfiles muestreados 1, 2 y 3	66
24. Clasificación de los perfiles muestreados 4, 5 y 6	67
25. Clasificación de los perfiles muestreados 7, 8 y 9	68
26. Clasificación de los perfiles muestreados 10, 11 y 12	69
27. Mapa de suelos de Tacámbaro, Michoacán, México	71
28. Aptitud climática para el cultivo de aguacate	73
29. Funciones de los perfiles de suelo 1, 2, 3 y 4	74
30. Funciones de los perfiles de suelo 5, 6, 7, y 8	75



31. Funciones de los perfiles de suelo 9, 10, 11 y 12	76
32. Las funciones de los suelos bajo diferentes condiciones de uso en 1974	80
33. Las funciones de los suelos bajo diferentes condiciones de uso en 1995	82
34. Las funciones actuales de los suelos bajo diferentes condiciones de uso	84
35. Evaluación de tierras en términos ambientales 1974	85
36. Evaluación de tierras en términos ambientales 1995	87
37. Evaluación actual de tierras en términos ambientales	88
38. Evaluación de tierras en contexto productivo	89
39. Atracción, producción, cubierta y uso del suelo actual	90
40. Cambio de uso del suelo	104
41. Manejo intensivo en Luvisol(A); manejo intensivo en Andosol (B)	105
42. Manejo extensivo del cultivo de aguacate	105
43. Temporalidad de la capacidad del suelo para infiltrar fuertes lluvias bajo diferentes condiciones de uso	106
44. Temporalidad de las funciones de los suelos bajo diferentes condiciones de uso.	107

## RESUMEN

La evaluación de tierras consiste en generar información que permita conocer su estado ambiental y productivo. En Tacámbaro el cultivo del aguacate es la principal fuente de trabajo. El área con huertas de aguacate ha aumentado de forma acelerada; hasta la fecha se desconoce cuáles son los elementos del paisaje de origen antrópico y algunos de origen natural que determinan el uso de la tierra; además no se considera el impacto ambiental del cultivo en las funciones de los suelos. Por ello, se realizó la evaluación de tierras en el cultivo de aguacate para generar información actual que sirva para que los productores tomen mejores decisiones de uso de sus tierras y de esta forma evitar la degradación de las funciones ambientales de los suelos. Con base en el modelo Agrilocal se obtuvo el mapa de atracción del terreno para el cultivo de aguacate. Se describieron, muestrearon y clasificaron 12 perfiles de suelo. Se evaluaron sus funciones con el software Assofu para obtener un mapa por cada una de las funciones ambientales de los suelos. Con el fin de cotejar el estado ambiental y productivo del cultivo de aguacate integramos la información generada de los mapas de: geoformas, suelos y la aptitud climática. Se evaluaron los efectos ambientales y productivos de los diferentes usos del suelo. La atracción del terreno para el cultivo de aguacate se regía en 1974 por los elementos del paisaje de origen antrópico, en la actualidad el establecimiento de las huertas se determina por la pendiente del terreno. En general, los suelos que se utilizan para el cultivo de aguacate son Andosols, Umbrisols y Luvisols. Los Andosols y Umbrisols con cubierta de cultivo de aguacate tienen una muy alta función ambiental; en cambio, los Luvisols tienen una muy baja función ambiental. Las zonas con alta atracción para el cultivo de aguacate tienen una muy alta función agrícola. Sin embargo, estas zonas están ocupadas por cubierta de bosque. Las tierras con alta aptitud para el cultivo del aguacate ya están en uso. Andosols y Umbrisols son aptos para el cultivo del aguacate y conservan sus funciones ambientales. Los Luvisols son poco aptos para el cultivo del aguacate y pierden sus funciones ambientales (fijación de carbono, fertilidad, ciclo hidrológico) cuando su uso pasa de bosque a cultivo de aguacate.

**Palabras clave:** Funciones ambientales de los suelos, atracción del terreno para el cultivo del aguacate, modelo Agrilocal y software Assofu.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de tierras estima su potencial productivo; cuyo objetivo es generar información que permita tomar decisiones de uso del suelo prudentes en términos productivos y ambientales; esto con el afán de conservar y producir (FAO, 1976; FAO, 2007; Bouma, 2009; Lehmann y Stahr, 2010). Es decir, nos encontramos en una época donde cualquier uso de los recursos naturales debe considerar el impacto ambiental que genera, para mantener o disminuir lo menos posible el estado natural de los recursos, sin dejar de producir los artefactos y servicios que ocupa la humedad.

En general, las tierras se usan sin estudios previos, por lo tanto no se sabe cuál es el tipo de uso más adecuado y cuál es el efecto ambiental de los diferentes tipos de usos (Ludowski *et al.*, Jones *et al.*, 2005; 1997; IEMA, 2005; Blum, 2014).

Muchos usos de la tierra se realizan de forma y en lugares inadecuados; lo cual puede resultar en pérdida y/o degradación de recursos naturales, como los suelos y el agua, entre otros (Tugel *et al.*, 2004; Hassan *et al.*, 2005; Liang *et al.*, 2011).

En México año con año se pierden cubiertas de vegetación natural por la expansión de tierras agrícolas (Turner, 1990; Wood *et al.*, 2000; Hernández *et al.*, 2011; Krasilnikov *et al.*, 2013). La expansión de tierras de cultivo de aguacate (*Persea americana*) en Michoacán, México ha aumentado en 75% durante el periodo de 1980 a 2010 (INIFAP, 2009; Morales *et al.*, 2010; Chávez-León *et al.*, 2012).

Al igual que en diversas zonas de cultivo de aguacate en todo el mundo, en la franja aguacatera del estado de Michoacán, México, se han realizado diversos estudios para identificar los requerimientos edáficos y climáticos en el cultivo de aguacate (PRODUCE, 2004; INIFAP, 2009; Morales *et al.*, 2010; Burgos *et al.*, 2011; Morales y Cuevas, 2011; Burgos *et al.*, 2012; Morales y Cuevas, 2012; Dubrovina y Bautista, 2014).

La zonificación agroecológica (FAO, 1997) de la franja aguacatera en los últimos años se ha vuelto una herramienta básica para la evaluación de la producción agrícola y análisis del impacto ambiental (Sánchez-Tienda, 1999; Burgos *et al.*, 2011), ya que producir un cultivo en condiciones ambientales favorables abarata la producción e incrementa el rendimiento (Esqueda y Zetina, 2012; Dubrovina y Bautista, 2014).

La franja aguacatera del estado de Michoacán está comprendida por varios municipios. El municipio de Tacámbaro es uno de los principales productores con un rendimiento de 12 t

ha<sup>-1</sup> de aguacate al año (SIAP-SAGARPA, 2012; SE-DGIB, 2012). El cultivo del aguacate en Tacámbaro, Michoacán se ha expandido de forma acelerada; hasta la fecha se desconoce cuáles son los elementos del paisaje de origen antrópico y algunos de origen natural que determinan el uso del terreno para el cultivo; además se desconoce cuáles son las funciones ambientales que desempeñan los suelos bajo diferentes condiciones de uso.

Evaluar el impacto ambiental y el potencial productivo del cultivo de aguacate en Michoacán tiene la finalidad de asegurar la producción, y la conservación de los recursos naturales. Sin embargo, en Michoacán la toma de decisiones informada carece de estudios detallados que permitan identificar los mejores terrenos para la producción de aguacate. Por ello la presente investigación realiza la evaluación de tierras en el cultivo de aguacate con el fin de aportar información actual para que los productores aguacateros de Tacámbaro tomen decisiones de uso de sus tierras más informados y de esta forma evitar la degradación de las funciones ambientales de los suelos.

## CAPÍTULO 2. MARCO CONCEPTUAL

### 2.1. Degradación del ambiente

Las actividades humanas del estilo de la vida actual tienden a alterar los factores físicos en muchos ecosistemas. En particular, el uso agrícola de las tierras ha generado en los últimos años la degradación del ambiente; ya que con la finalidad de obtener un incremento en la producción de alimentos, se ha remplazado la vegetación natural por cultivos; esto contribuye a la degradación del ambiente, ya sea en forma de erosión, sequía, entre otros (Hulme, 1989).

El reemplazo de la vegetación natural tiene un efecto en el equilibrio del ambiente, por lo tanto los diferentes tipos de usos de la tierra actúan sobre el equilibrio ambiental. Cabe mencionar que no todos los usos de la tierra provocan la degradación del ambiente.

### 2.2. Usos del terreno

Existen varias clasificaciones de tipos de usos del terreno; de acuerdo con la FAO (2009) existen nueve grandes divisiones: 1) Agricultura (producción de cultivos); 2) Agricultura mixta; 3) Ganadería; 4) Forestal; 5) Protección de la naturaleza; 6) Asentamientos humanos o industria; 7) Área militar; 8) Otros usos del suelo; y, 9) Sin uso ni manejo.

El uso de la tierra influye en la dirección y en la tasa de formación del suelo. El tipo de uso de la tierra más adecuado depende de su ubicación en el relieve, las propiedades de los suelos y de las condiciones climáticas (FAO, 2009).

En general, el uso de la tierra tiene una relación directamente proporcional con la cubierta del suelo; sin embargo, la cubierta del suelo y el uso de la tierra son dos términos distintos.

La cubierta del suelo es la representación espacial del uso de la tierra, se delimita a partir del patrón, la textura y el color de la superficie de la tierra (Tyner, 2010).

La cartografía de la cubierta del suelo tiene como finalidad inventariar la ubicación geográfica del uso del suelo (Nizeyimana *et al.*, 2002).

Observar la cubierta del suelo en un periodo de tiempo permite cuantificar el uso del suelo en un terreno en particular. Cuando se cartografía en varios periodos de tiempo la cubierta del suelo es posible identificar algunos de los procesos que ocurren en la superficie de la tierra (Lambin *et al.*, 2001; Jankowski *et al.*, 2006; Morales, 2014); en este caso, la

cartografía de la cubierta del suelo generada para tres fechas para un periodo de tiempo de poco más de tres décadas nos permitió identificar cómo algunos elementos del paisaje que influyen en la atracción del terreno para el cultivo de aguacate en Tacámbaro, Michoacán, México.

### **2.2.1. Elementos del paisaje que influyen en el uso del terreno**

El uso del suelo está influenciado en alguna medida por las características de la superficie de la tierra, que aquí hemos denominado como los elementos del paisaje. Los elementos del paisaje que influyen sobre el uso del suelo se pueden diferenciar por su origen en: elementos naturales del paisaje y elementos antrópicos del paisaje (Shim *et al.*, 2002; Nizeyimana *et al.*, 2002; Buzai *et al.*, 2011; Kou *et al.*, 2011).

Los elementos naturales del paisaje son las características de la tierra de origen natural. Los elementos naturales que se abordaron en el presente proyecto de investigación son: la pendiente del terreno (cómo aproximación a la accesibilidad topográfica) y la altitud del terreno (cómo aproximación a las condiciones climáticas de temperatura del aire). Otros elementos naturales del paisaje pueden ser: la hidrología, la topografía, los grupos de suelos, entre otros elementos del paisaje siempre y cuando sean de origen natural (Nizeyimana *et al.*, 2002).

Los elementos del paisaje de origen antrópico que se estudiaron en el presente proyecto de investigación son: caminos, asentamientos humanos, cultivo anual, y matorral-pastizal inducido. Todos los elementos del paisaje de origen natural y antrópico influyen en la decisión de uso del terreno para el cultivo de aguacate aunque en grados diferentes; por las relaciones espaciales que sostienen con el cultivo de aguacate (Morales, 2014).

### **2.3. Relaciones espaciales que influyen en el grado de atracción del terreno para el cultivo de aguacate**

La ubicación de los elementos del paisaje crea relaciones espaciales con la superficie del cultivo de aguacate. Las relaciones espaciales se definen por la interacción, potencial o actual, entre los elementos del paisaje y el cultivo de aguacate. Existen varios tipos de relaciones espaciales, tales como: orientación, exposición, inclusión, coincidencia, conectividad y proximidad, entre otros (Morales, 2014). Hipotéticamente, las relaciones espaciales que se crean entre las zonas de cultivo de aguacate y la ubicación de los elementos del paisaje pueden ser de:

**Coincidencia.** Relación espacial que mantiene el cultivo de aguacate con los elementos naturales del paisaje a partir de la coexistencia, en tiempo y espacio, tanto de los elementos como del cultivo de aguacate (Ramírez, 2009; Adame, 2011; Morales, 2014).

**Proximidad.** La proximidad es una relación espacial que sostiene el cultivo de aguacate con los elementos antrópicos del paisaje a partir de la distancia, por ejemplo: distancia de los caminos al cultivo de aguacate. Esta proximidad puede tener influencia en la atracción del terreno para el cultivo de aguacate (Adame, 2011; Morales, 2014).

Las relaciones espaciales que determinan la atracción del terreno para el cultivo de aguacate generan en las tierras una presión de uso, condición relacionada con el uso de la tierra y las funciones de los suelos.

#### **2.4. Funciones que desempeñan los suelos bajo diferentes condiciones de uso**

El uso de la tierra es la acción de utilizar el suelo para un fin; en cambio, las funciones de los suelos son los servicios que desempeña el suelo simultáneamente bajo un uso en particular (FAO, 2007; Bouma, 2009; Lehmann y Stahr, 2010).

Es decir, las funciones del suelo depende de sus propiedades (Karlen *et al.*, 2003; Bouma, 2009; Lehmann y Stahr, 2010) pero se relacionan con su uso. En algunos casos debido al uso del suelo inadecuado se restringen ciertas de sus funciones; por ejemplo, cuando el uso del suelo es urbano generalmente se cubre con asfalto las tierras perdiendo así el suelo la función de recarga de acuíferos (Lubowski *et al.*, 1997; Lehmann, 2010). También cuando hay un cambio abrupto en las propiedades físicas, químicas y morfológicas los suelos disminuyen o pierden sus funciones (FAO, 2007).

En general, las funciones de los suelos se relacionan con la producción de alimentos y biomasa; el medio ambiente; y, los asentamientos humanos (Rossiter, 1996; De la Rosa *et al.*, 2004; FAO, 2007; Lehmann *et al.*, 2008; Bouma, 2009). La diferencia entre funciones no las excluye, es decir, el suelo es multifuncional y puede desempeñar una función ambiental al mismo tiempo que desempeña una función agrícola (Schlichting 1972 citado en Lehmann, 2010; Bills y Gross, 2005); sin embargo, cuando el suelo desempeña una función agrícola es posible que una función ambiental se reduzca o pierda (Van Diepen *et al.*, 1991; FAO, 2007).

### 2.4.1. La Función ambiental de los suelos

Existen varias clasificaciones de las funciones ambientales del suelo. En este caso de acuerdo con Lehmann y colaboradores (2008) las funciones ambientales que desempeñan los suelos lo definen como medio de: a) Infiltración; b) Retención de humedad; y, c) Transformación de contaminantes orgánicos.

**El suelo como medio de infiltración.** Es una sección del ciclo hídrico la cual involucra al suelo en la calidad y la cantidad del agua que llega al manto freático. La evaluación de esta función permite conocer datos para prevenir la erosión del suelo, los movimientos en masa y las inundaciones (Lehmann *et al.*, 2008).

**El suelo como medio de retención de humedad.** El suelo actúa como una esponja que guarda agua, esta agua está disponible para las actividades del hombre en el subsuelo. La evaluación de esta función ambiental permite conocer datos para saber dónde hay agua en el subsuelo disponible para que ciertos cultivos tengan éxito o para decidir el establecimiento de zonas urbanas y de zonas de conservación (Lehmann *et al.*, 2008).

**El suelo como medio de transformación de contaminantes orgánicos.** La capacidad del suelo para descomponer y producir sustancias orgánicas, se evalúa con esta función. Las condiciones ambientales aptas para que la actividad de los microorganismos sea óptima es lo que se evalúa. En general, la producción de sustancias orgánicas tiene una relación directamente proporcional con la capacidad del suelo para capturar carbono (Lehmann *et al.*, 2008).

### 2.4.2. La Función agrícola de los suelos

**El suelo como medio de producción de alimentos y biomasa.** La función del suelo como medio de producción de alimentos y biomasa evalúa todos los sistemas productivos, como: la agricultura, la agricultura mixta, la ganadería, entre otros. El éxito de estos sistemas se basa en el sostén que brinda el suelo para poder desarrollar estas actividades (FAO, 2007).

Para evaluar las funciones de los suelos es necesario conocer las propiedades de los horizontes del perfil de suelo y las características del sitio donde se ubica dicho suelo (Lehmann *et al.*, 2008; Gallegos *et al.*, 2014).



## 2.5. Características y propiedades necesarias para evaluar las funciones de los suelos

**Temperatura media anual (°C).** Es la suma de las temperaturas medias mensuales entre el número de meses que tiene el año. Conocer cuál es la temperatura promedio al año es un dato base para elegir tierras de cultivo (Gobierno Bolivariano, 2008).

**Precipitación media anual (ml).** Es la suma de los promedios de las partículas de agua que caen desde la atmósfera hacia la superficie terrestre. El agua que cae del cielo es un recurso invaluable, la precipitación de una región permite prevenir sequías o elegir donde se puede poner una presa, entre otras muchas actividades se pueden elegir a partir de la precipitación (Gobierno Bolivariano, 2008).

**Pendiente del terreno en grados de inclinación.** La pendiente del terreno se refiere a la inclinación en grados de la superficie de la tierra alrededor del sitio donde se ubica el perfil de suelo; se mide usando un clinómetro. La pendiente del terreno es una característica del sitio que permite inferir procesos de erosión, riego y drenaje en un suelo (FAO, 2009).

**Nivel de aguas subterráneas (m).** Es la profundidad a la cual se encuentra el agua por debajo de la superficie del suelo a una presión igual o mayor que la atmosférica. La profundidad que se encuentra esta capa de agua permite analizar la función del suelo como medio de transformación de contaminantes orgánicos (Barioglio, 2006; Soil Science of America, 2008).

**Espesor de los horizontes del perfil de suelos (dm).** El espesor de los horizontes del suelo permite darse una idea de los procesos de formación del suelo dominantes. En algunos casos, el espesor muestra el impacto de las actividades humanas sobre los suelos (sobre pastoreo, exceso de arado, entre otros). Esta propiedad del suelo se mide en decímetros o centímetros desde la superficie del suelo hacia abajo (FAO, 2009).

**Estructura de los horizontes del perfil de suelos.** Un proceso básico y fundamental de todo suelo es la formación de su estructura. La estructura se forma por el acomodo de las partículas del suelo para generar terrones también nombrados agregados. La estructura del suelo tiene forma, tamaño y grado. Conociendo la forma y tamaño de la estructura se puede deducir la salud del suelo; además, a partir del grado de la estructura se puede inferir la estabilidad del suelo para un uso o manejo en particular (FAO, 2009).

**Volumen de fragmentos gruesos (%).** Los fragmentos gruesos son las partículas del suelo que miden 2 mm o más de diámetro, se ubican en o sobre el suelo y se describen de acuerdo con: porcentaje del volumen total del suelo, tamaño, forma, estado de intemperización y naturaleza. Los fragmentos gruesos influyen en el estado de los nutrientes del suelo, el movimiento del agua y, en algunos casos reflejan el origen y estado de desarrollo del suelo. La importancia de señalar el porcentaje de los fragmentos gruesos es porque muchas veces se ve restringido el uso del suelo por la excesiva cantidad de rocas o gravas (Soil Survey Staff, 1951; Siebe *et al.*, 2006; FAO, 2009).

**Profundidad de enraizamiento (cm).** Es la profundidad en el perfil de suelo a la cual se observan raíces bien desarrolladas. Esta propiedad del suelo se puede relacionar con el drenaje de los suelos y las limitantes para el desarrollo de cultivos (Siebe *et al.*, 2006; FAO, 2009).

**Porosidad (%).** Se describe el volumen de espacios ocupados por poros en un 1 dm<sup>2</sup> por horizonte. La porosidad del suelo permite inferir el drenaje y la aireación de un suelo (Soil Science of America, 2008; FAO, 2009).

**Grado de descomposición y humificación de la turba.** Se utiliza en color y el porcentaje de descomposición de tejidos vegetales en el horizonte superficial para calcular esta propiedad del suelo, la cual permite inferir la conservación de un suelo y su relación con el abastecimientos de nutrientes orgánicos para las plantas; así como la capacidad de un suelo para capturar carbono (FAO, 2009).

**Densidad aparente (g cm<sup>-3</sup>).** Es la cantidad de partículas (masa) que hay por unidad de volumen, se expresa en g cm<sup>-3</sup>. La densidad aparente de un suelo varía de acuerdo a su clase textural, profundidad, contenido de materia orgánica y uso del suelo. Cuando la densidad aparente de un suelo tiene valores bajos (menos de 0.9 g cm<sup>3</sup>) existe más espacio poroso en los agregados del suelo y esto favorece al crecimiento de las raíces de las plantas, a la infiltración de agua y a la retención de agua disponible para las plantas (Gandoy, 1991).

**Fracción de tierra fina (%).** La fracción de tierra fina son las partículas de 2mm de diámetro o menos. Los suelos están formados por partículas de distintos tamaños y formas. Hay partículas de 0.02 hasta 2 mm de diámetro conocidas como arenas, también hay partículas de 0.002 a 0.02 mm de diámetro conocidas como limos y las más pequeñas de menos de 0.002 mm de diámetro conocidas como arcillas. El contenido de cada una de

estas partículas en el suelo define la clase textural (Porta *et al.*, 1999; Salgado *et al.*, 2010).

**Contenido de arcillas (%).** La fracción de tierra fina esta compuestas por partículas de menos de 2 mm de diámetro. El contenido de partículas con 0.002 mm de diámetro o menos es el porcentaje de arcillas que tiene un suelo. Conocer el contenido de arcillas de un suelo ayuda a inferir limitantes por impermeabilidad de horizontes y/o desarrollo de raíces (FAO, 2009).

**Materia orgánica (%).** El contenido de materia orgánica se refiere al material animal o vegetal que está descompuesto y es parte del suelo (FAO, 2009). Es una de las variables para calcular el contenido de humus de un suelo (Lehmann *et al.*, 2008).

**Capacidad de intercambio catiónico CIC ( $\text{cmol kg}^{-1}$ ).** Es la medida de la capacidad que posee un suelo para absorber cationes intercambiables y es equivalente a la carga positiva del mismo. Se mide en  $\text{cmol kg}^{-1}$ . El punto es que los cationes intercambiables tienen que estar disponibles para que las plantas puedan aprovechar los nutrimentos del suelo, sin embargo, en algunos casos los coloides negativos del suelo retienen a los cationes intercambiables y quedan indisponibles para las plantas. La CIC tiene una relación directamente proporcional con el tipo de arcillas, el pH y las bases intercambiables de un suelo. En la agricultura la relación ideal de cationes intercambiables es 8:4:2:1 (Ca, Mg, K, Na) (Bonh *et al.*, 1993; Jaramillo, 2002; Salgado *et al.*, 2010).

**pH.** Expresa la actividad de los iones de hidrógeno en la solución del suelo. El valor del pH teóricamente va de 0 a 14, en la práctica los valores en los suelos varían de 4 a 9. El pH tiene una relación directa con el intemperismo químico, la degradación ambiental por acidez y la disponibilidad de nutrimentos (FAO, 2009; Salgado *et al.*, 2010).

## CAPÍTULO 3. ANTECEDENTES

La evaluación de tierras es una forma de clasificar el terreno. Desde la antigüedad (1500 a. C.) el ser humano ha clasificado sus tierras con base en su aptitud para producir alimentos (Williams y Ortiz, 1981; Ortiz y Gutiérrez, 1999; Toledo, 2005; Barrera-Bassols *et al.*, 2006; Gong *et al.* 2003; Bautista y Zinck, 2010; Barajas, 2012). En tiempos más actuales (de 1901 a la fecha), el ser humano ha desarrollado índices, modelos y métodos; para clasificar los terrenos por su aptitud para un uso en particular.

### 3.1. Manuales, métodos, modelos y software utilizados para evaluar tierras

Identificar la aptitud de la tierra para un uso en particular es objetivo de varios métodos, modelos, incluso software; por ello en este capítulo se describirán como antecedentes las herramientas (manuales, métodos, modelos y software) más utilizadas en la evaluación de tierras

**Clasificación de la capacidad de tierras.** El mapa de sondeo de suelos mejor conocido como *Soil Survey Map* (USDA, 1961), se diseñó desde 1901 hasta la actualidad con la finalidad de proveer información para solucionar problemas referidos a los suelos agrícolas. Sin embargo, en su origen el mapa sólo mostraba las diferencias básicas de los diferentes suelos, por ejemplo pH; por ello surge la clasificación de la capacidad de tierras, del inglés *“Land Capability Classification”* (USDA, *United States Department of Agriculture*).

La clasificación de la capacidad de tierras es reeditada en 1961 con la finalidad de orientar a los campesinos sobre el mejor uso de sus tierras. Permite interpretar los beneficios y las limitantes de uso del suelo. Los fundamentos de esta clasificación son las condiciones económicas, tecnológicas y ambientales.

Los parámetros evaluados para definir la capacidad de tierras son pendiente del terreno, clase textural del suelo, profundidad del perfil de suelo y drenaje natural del perfil. Los resultados que se obtienen se reportan en dos unidades: tierras aptas para el cultivo y tierras en general no aptas para el cultivo.

Las tierras aptas para el cultivo se clasifican a su vez en cuatro de las ocho clases de acuerdo a las limitantes de uso del suelo y de las medidas de conservación. Las cuatro clases restantes son para tierras no aptas para el cultivo pero pueden ser para uso

pecuario, forestal, agroforestal o recreacional. A su vez los suelos no aptos para el cultivo se clasifican en subclases por las limitantes que presentan, como: erosión, exceso de agua, profundidad de enraizamiento y condiciones climáticas.

La clasificación de la capacidad de tierras (USDA, 1961) ha sido utilizada ampliamente en todo el mundo especialmente por los Estados Unidos de América (Lubowski *et al.*, 1997; De la Rosa *et al.*, 2004), su aporte es facilitar la interpretación de los mapas (*Soil Survey Map*) mediante la diferenciación de suelos en clases. Además, de acuerdo a los problemas de uso y manejo que se enfrenta el campesino la clasificación permite generalizar el estado del suelo basado en sus potencialidades y limitantes (USDA, 1961).

**Índice de Storie.** El índice de Storie clasifica a los suelos en tres clases de aptitud para un uso en particular (baja, media y alta). Considera cinco factores que determinan la aptitud de la tierra: 1) Clima; 2) Profundidad y textura del suelo; 3) Permeabilidad del suelo; 4) Propiedades químicas del suelo; y, 5) Drenaje y escurrimiento. En el índice de Storie cada uno de estos factores tiene una ponderación porcentual que determina la clase de aptitud del suelo para un determinado uso. En general, este índice se ha utilizado en tierras de uso forestal (Storie, 1970).

**El marco de la evaluación de tierras.** El marco de evaluación de tierras (*The Land Evaluation Framework*) emitido por la FAO (*Food and Agriculture Organization*), surge en 1976 con la finalidad de disminuir la degradación de tierras (FAO, 1976). Se fundamenta en el uso potencial y el manejo óptimo de las tierras (FAO, 2007).

En 2007 se actualiza el marco de la evaluación de tierras para considerar los efectos al medio ambiente y los beneficios económicos que el hombre recibe al cambiarle el uso a los suelos; el eje central del marco actualizado es la sustentabilidad de uso del suelo.

La FAO (2007) reconoce que la evaluación de tierras se aplica para resolver problemas socioeconómicos y ambientales; y, enuncia que la solución a mencionados problemas no requieren cambios drásticos en el uso del suelo, sino que más bien se deben emplear ajustes a las condiciones de manejo.

El marco carece de un método puntual para realizar una evaluación de tierras, su alcance y aporte de este documento es dar a conocer los aspectos que se deben de considerar en una evaluación.

Para realizar la evaluación de tierras se deben de considerar: el relieve, los suelos, el clima y la vegetación.

El marco propone que los métodos de la evaluación de tierras combinen el levantamiento de información física, el modelado espacial y el conocimiento local (FAO, 2007).

**Zonificación agroecológica.** La zonificación agroecológica (FAO, 1997) es un método para trazar unidades de mapeo, a partir de zonas con el mismo potencial biofísico para la producción agrícola. Las zonas se definen a partir de los límites administrativos; el uso y la cubierta vegetal; la fisiografía; los grupos de suelos y las condiciones climáticas.

Un concepto clave basado en las condiciones climáticas es el periodo de crecimiento de los cultivos; ya que la diferenciación de zonas va dirigida a predecir la productividad potencial de varios cultivos de acuerdo a sus necesidades específicas de entorno y de manejo (FAO, 1997).

Los insumos requeridos para la zonificación agroecológica son: a) Uso del suelo: producto y producción, orientación sobre el mercado, intensidad de capital, intensidad de trabajo, fuente de energía, tecnología, infraestructura, tenencia de la tierra y nivel de ingresos; b) Clima: mapas topográficos, localización y elevación de estaciones climáticas, precipitación, temperatura máxima diaria, temperatura media diaria, temperatura mínima diaria, proporción de horas de sol y de nubes, humedad relativa, velocidad del viento y riesgos climáticos; c) Suelos: propiedades externas (pendiente del terreno o topografía), presencia e intensidad de inundaciones, accesibilidad y tránsito; propiedades internas régimen de temperatura, régimen de humedad, régimen de aireación, régimen de fertilidad natural, profundidad útil, textura, pedregosidad y toxicidad (FAO, 1997).

La zonificación agroecológica se ha aplicado en continentes, países y regiones (FAO, 1997; Nizeyimana *et al.*, 2002); lo cual ha generado variantes en su metodología de acuerdo a su aplicación y adaptación a las condiciones locales.

La variante nombrada zonificación ecológico-económica es una versión alternativa que contempla los mismos factores biofísicos de la zonificación agroecológica pero que además contempla los factores socioeconómicos. En general, la zonificación ecológico-económica no es descrita con la misma exactitud que la agroecológica; únicamente FAO (1997) expone que se comparan los factores biofísicos y socioeconómicos a través de

múltiples análisis, con la finalidad de alcanzar de forma consensuada por los interesados el uso óptimo de los suelos.

**Sistema automatizado de evaluación de tierras.** Mejor conocido como ALES de sus siglas en inglés *Automated Land Evaluation System* es un software diseñado a partir del marco para la evaluación de tierras (FAO, 1976) el cual permite al usuario generar sus propios modelos de evaluación de tierras (Rossiter, 1990).

Los interesados en evaluar los suelos construyen sus propios modelos, que son representaciones de sus ideas sobre la relación suelo y uso del suelo. Los objetivos y las condiciones de cada estudio en particular son el principio para el desarrollo de ALES mediante árboles de decisión, se identifica la calidad de la tierra (Rossiter, 1996).

ALES no es un sistema experto en sí mismo, y no incluye ningún conocimiento específico acerca del suelo y su comportamiento. Por estas características no se puede estandarizar la sistematización de la evaluación, además las personas que utilizan este software se pueden quedar con la sensación de que sólo es una descripción jerarquizada de lo que ocurre en el suelo bajo un uso específico, por ello ALES es un medio para la enseñanza de la evaluación de tierras ya que no proporciona una solución ya acomodada, en cambio motiva al evaluador considerar todas las variables en la evaluación de tierras (Rossiter, 1990; Rossiter, 1996).

**Sistema de apoyo a la decisión sobre evaluación de tierras para la protección de suelos agrícolas.** El sistema mejor conocido por su abreviatura MicroLEIS del inglés *Microcomputer-based Land Evaluation Information System*, es un software con varios modelos que permiten evaluar los sistemas agrícolas desde el punto de vista agroecológico (De la Rosa, 1996).

La primera versión de MicroLEIS 1.0 se programó en 1990 y se actualizó continuamente hasta que en 1999 se volvió disponible en el Internet (versión MicroLEIS *on the web*); la versión actual se ha editado permanentemente para mejorar día con día los modelos de evaluación de tierras (De la Rosa, 1996; De la Rosa *et al.*, 2004).

MicroLEIS realiza varios modelos para evaluar los suelos agrícolas. A) Modelos de producción y ecosistemas: Terraza analiza las deficiencias bioclimáticas; Cervatana analiza la capacidad general de uso del suelo; Sierra analiza la aptitud relativa forestal; Almagra analiza la aptitud relativa agrícola; Alberio predice el rendimiento de cultivos; y,

Marisma analiza la fertilidad natural de suelos. B) Modelos de erosión y contaminación: Raizal analiza el riesgo a la erosión hídrica; Pantanal analiza el riesgo específico de contaminación; y, Arenal analiza el riesgo global de contaminación. C) Modelos tecnológicos y de ingeniería: Alcor analiza el riesgo de compactación de suelos agrícolas y Aljarafe analiza la plasticidad y manejabilidad del suelo. D) Modelos de simulación de impacto y respuesta: Impeiero analiza el riesgo de erosión, impacto y óptimo manejo de los suelos (De la Rosa *et al.*, 2004).

Una de las virtudes de MicroLEIS es la aplicación automática de los modelos mediante el ingreso de datos a la interfaz del software. El procesamiento de los datos es por métodos semi-cuantitativos y paramétricos. Los datos que se deben de ingresar son las condiciones climáticas, el sitio de muestreo del suelo, las propiedades de los suelos y el manejo de los suelos (De la Rosa, 1996).

Los datos de las condiciones climáticas (temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación) se ingresan de forma manual en los campos del software. En cambio, los datos del sitio de muestreo, las propiedades de los suelos y el manejo de los suelos se ingresan en general por la elección de opciones. Cabe mencionar que por esta característica se restringe el uso del software dado que las opciones que emite no siempre son aptas para todo el mundo.

De la Rosa y colaboradores (2009) señalan que MicroLEIS se diseñó para la región mediterránea de Sevilla, España; por ello los datos que se ingresan por elección de opciones son limitados y concuerdan a suelos de esa región. Por otra parte los datos que se ingresan en las propiedades de los suelos nada más tienen un campo disponible; es decir, no considera los horizontes de todo el perfil de suelos y los métodos de MicroLEIS no aclaran si es el dato promedio de los horizontes lo que se debe de considerar o si nada más se debe de considerar el dato del horizonte superficial.

**Técnica para la evaluación y categorización de los suelos.** La técnica para la evaluación y categorización de los suelos del inglés *–Technique for Soil Evaluation and Categorization*” se abrevia como TUSEC. Es un método que se basa en las propiedades de todos los horizontes del perfil de suelo (Lehmann *et al.*, 2008).

TUSEC mediante ecuaciones clasifica las funciones de los suelos. Los insumos de las ecuaciones son los datos de las propiedades morfológicas, físicas y químicas de los



suelos (en algunos casos los datos de los análisis de laboratorio no son necesarios) (Lehmann *et al.*, 2008).

Los resultados de la evaluación de las funciones de los suelos se reportan en cinco clases: muy baja, baja, intermedia, alta y muy alta (Lehmann *et al.*, 2008).

Con los resultados obtenidos de la evaluación, se pueden jerarquizar las funciones que desempeñan los suelos bajo un uso específico, en relación con los beneficios que brindan al ser humano. La jerarquía de las funciones se establece de acuerdo al uso del suelo y el interés de uso del suelo. El acomodo jerárquico de las funciones del suelo brinda la posibilidad de conocer mejor la funcionalidad del suelo, además permite valorar la multifuncionalidad del suelo bajo un uso específico (Lehmann *et al.*, 2008).

Cabe mencionar que TUSEC no es un manual ni una guía para la descripción de suelos, ni presenta un procedimiento esquemático para la clasificación de las funciones del suelo; sin embargo, con los resultados obtenidos de las ecuaciones de TUSEC y personal experto se puede obtener información para describir, analizar, clasificar, jerarquizar, representar y gestionar, el recurso suelo a partir de sus funciones que desempeña bajo un uso en particular.

**El modelo Agrilocal.** Agrilocal es un modelo que estima la atracción del terreno para la agricultura. Los parámetros del modelo son las relaciones espaciales que existen localmente entre las tierras de cultivo con los elementos del paisaje (Morales, 2014).

El modelo Agrilocal se basa en mapas de cubierta y uso del suelo de un periodo de tiempo. Se construye en tres etapas: 1) Identificación de las relaciones espaciales relevantes entre la agricultura y los elementos del paisaje del área de interés; 2) Definición de la preferencia de los valores de las relaciones espaciales identificadas como relevantes; 3) Determinación de los pesos de cada una de las relaciones relevantes en la decisión de usar el terreno para fines agrícolas (Morales, 2014).

Los resultados del modelo Agrilocal permiten obtener un mapa de la atracción del terreno para tierras de cultivo.

**El software Assofu.** Assofu de sus siglas en inglés *Assessment Soil Functions* es un software que evalúa las funciones de los suelos a partir de las ecuaciones del método TUSEC (Lehmann *et al.*, 2008). Es una herramienta que sirve como base de datos pero

que además sistematiza la evaluación de las funciones de los suelos facilitando su interpretación” (Bedolla-Ochoa *et al.*, 2013; Gallegos-Tavera *et al.*, 2014).

Los datos que necesita el Assofu para evaluar las funciones de los suelos son: a) la información del sitio de muestreo; b) las propiedades (morfológicas, físicas y químicas) de los horizontes del perfil de suelo; y, c) las propiedades (físicas y químicas) de la evaluación edafo-ecológica (Siebe *et al.*, 2006; Lehmann *et al.*, 2008; Gallegos-Tavera *et al.*, 2014).

El Assofu procesa la información ingresada calculando estimaciones y evaluaciones a nivel de perfil con base en los datos de los horizontes, provenientes de mediciones de campo y de laboratorio (Gallegos-Tavera *et al.*, 2014).

–El alto nivel de confiabilidad de Assofu se respalda con: (i) el control de caracteres; (ii) la inclusión de algoritmos para las evaluaciones; y (iii) el control de la base de datos. Es decir, los datos almacenados en Assofu se validan automáticamente durante su captura permitiendo la coherencia en la información al aplicar las ecuaciones de las funciones de los suelos” (Gallegos-Tavera *et al.*, 2014).

El Assofu es una herramienta que permite evaluar las funciones de los suelos de forma rápida, lo cual lleva a estudios más detallados.

### **3.2. El cultivo de aguacate en Michoacán**

Para cerrar los antecedentes de la evaluación de tierras se describirá de manera breve los estudios que se han desarrollado en torno al cultivo de aguacate, en Michoacán.

Las investigaciones realizadas en torno al cultivo de aguacate se han desarrollado desde finales de 1940 y principios de 1950; con la finalidad de conocer las condiciones del cultivo (Barrett, 1948; Cooper, *et al.*, 1957); la selección de las mejores variedades de árboles y la mejor ubicación (altitud y latitud) de las huertas para obtener altos rendimientos (Popenoe y Williams, 1948; Smoyer, 1948).

En general, el enfoque de las agrocencias fue y es la línea de investigación más atractiva en el cultivo del aguacate (Abou *et al.*, 1975; Arpaia *et al.*, 1996; Jiménez *et al.*, 2005; Rebolledo y Romero, 2011). Sin embargo, a la par también se desarrollaron y desarrollan estudios ambientales sobre el impacto del cultivo de aguacate (PRODUCE, 2004).

## **CAPÍTULO 4. OBJETIVOS**

### **General**

Evaluación de tierras de cultivo de aguacate en el Municipio de Tacámbaro, Michoacán, México.

### **Específicos**

- Identificar los criterios de ocupación del terreno utilizando el modelo Agrilocal.
- Evaluación de las funciones de los suelos con diferentes usos del suelo utilizando el modelo y software Assofu.
- Definición de la aptitud climática para el cultivo de aguacate.

## CAPÍTULO 5. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en el municipio de Tacámbaro, Michoacán, México; entre los paralelos 19°10' y 19°18' de latitud norte; y los meridianos 101°22' y 101°35' de longitud oeste. Pertenece a la provincia fisiográfica del eje neovolcánico transversal mexicano y la zonificación agroecológica de la franja aguacatera del estado de Michoacán, México. Tiene una altitud entre los 2400 y 1100 msnm (Figura 1).

**Hidrología.** Tacámbaro, Michoacán México pertenece a la vertiente del río Balsas; sus principales cauces perennes son de los ríos El Salto, Pedernales, Puente las Ánimas, San

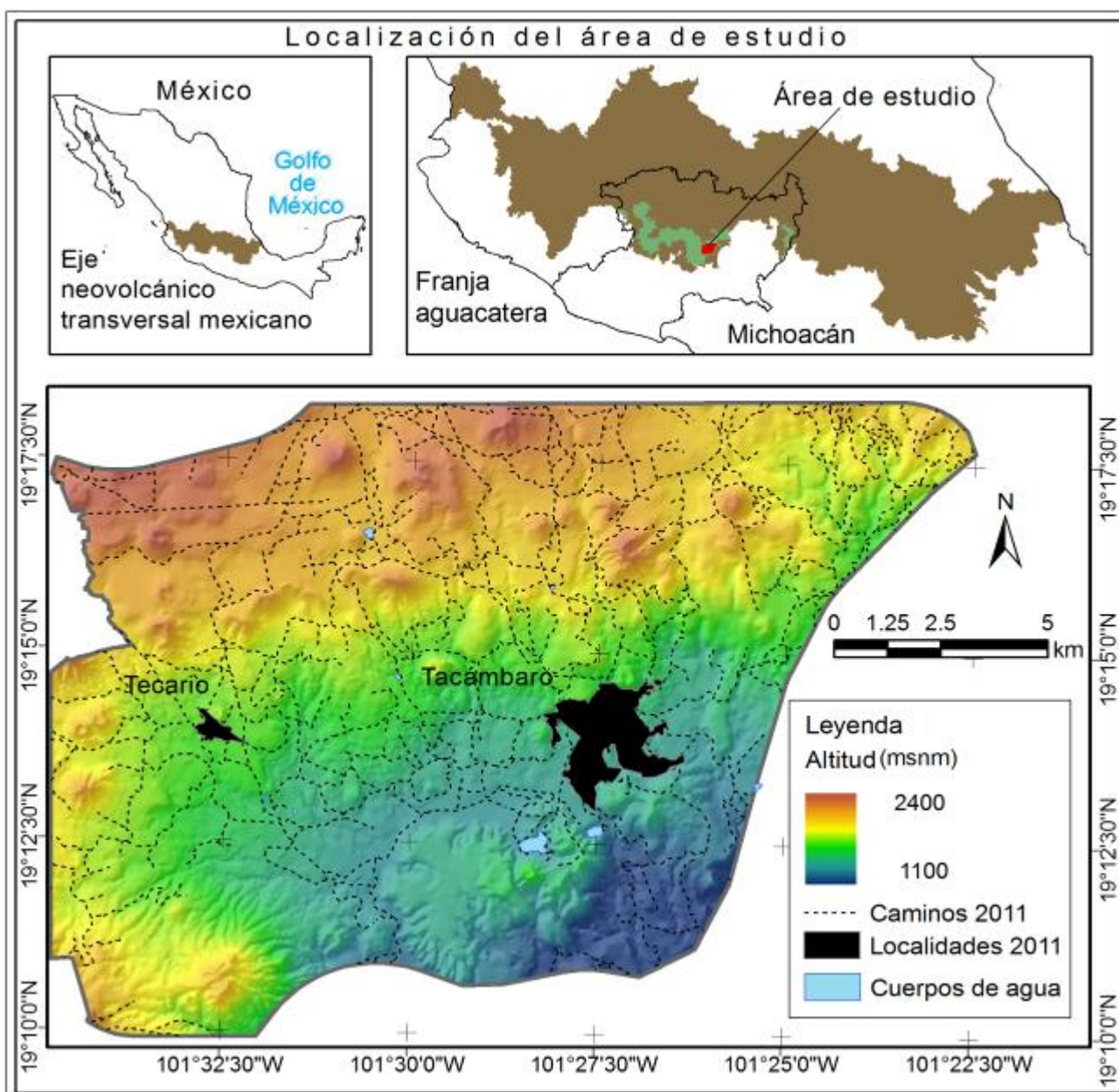


Figura 1. Ubicación de Tacámbaro, Michoacán, México.

Rafael, Turicato, Yoricostío, Arroyo Frío y Tacámbaro (CONAGUA, 2000; INEGI, 2009).

**Clima.** Las condiciones climáticas del área de estudio tienen una relación directamente proporcional con la altitud (msnm), por ello el tipo de clima de las partes más altas (de 1600 a 2400 msnm) es templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad ( $C(w_2)(w)$ ) y semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad ( $(A)C(w_2)(w)$ ); en cambio en las partes más bajas (de 1600 a 1100 msnm) el clima es semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media ( $(A)C(w_1)(w)$ ) y cálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media ( $Aw_1(w)$ ). La temperatura media anual es de 20.3 °C con precipitación media anual de 1800 mm (INEGI a, 1985; CONAGUA, 2000).

**Geología.** Toda el área de estudio tiene una alta influencia volcánica. Durante el Cuaternario el más reciente periodo de la era Cenozoica, se produjeron mediante continuas erupciones derrames de lava que al enfriarse y solidificarse originaron rocas ígneas extrusivas básicas, llamadas Basaltos, estas rocas se formaron en la superficie de la tierra y son de grano fino, ya que se enfrió rápidamente el magma lo cual hace que la roca solidifique muy deprisa y no da tiempo suficiente para que se formen cristales grandes (INEGI b, 1985; INEGI a, 1993; Tarbuck *et al.*, 2005; INEGI, 2009).

**Suelos.** Los grupos de suelos presentes en el área de estudio de acuerdo al INEGI (b, 1993) son:

- Andosoles: Suelos de origen volcánico, con cenizas o material volcánico intemperizado, tiene una densidad aparente menor a  $0.9 \text{ g cm}^{-3}$ . En general, tienen texturas franco limosas; en Tacámbaro son suelos con un contenido de carbono orgánico mayor a 5%; es decir, son fértiles con un contenido de 8.5% o más de materia orgánica.
- Cambisoles: Suelos con transformación del material parental en un horizonte subsuperficial diferente; el horizonte que subyace puede ser distinto en color, en tipo de estructura y/o en la clase textural respecto al que está abajo. En Tacámbaro los Cambisoles tienen una saturación de bases mayor a 50%; es decir, son fértiles. Otro calificador de los Cambisoles en el área de estudio es que son Crómicos, con una capa subsuperficial más rojiza que el resto.
- Luvisoles: Suelos que tienen un alto contenido de arcilla (mayor a 8%) en el horizonte subsuperficial o endopedón. Las arcillas que acumulan en su interior estos suelos

son de alta actividad, propiedad que se refleja en la capacidad de intercambio catiónico mayor a  $24 \text{ cmol kg}^{-1}$ . En Tacámbaro los Luvisoles se caracterizan por tener un horizonte Crómico con un hue Munsell más rojo que 7.5 YR.

**Cubierta vegetal y uso del suelo.** Tacámbaro se ubica en una zona de transición climática, por ello la vegetación natural es diversa. En las zonas templadas podemos encontrar bosque de pino y encino; mientras que en las zonas cálidas la vegetación natural es selva caducifolia, con especies de parota, cuéramo, ceiba y huisache. La vegetación natural ocupa el 22.8% de la superficie total del área de estudio. El cultivo de aguacate es la cubierta que ocupa casi la mitad de la superficie con 48.5% de extensión (INEGI, 2009).

El cultivo de temporal y el matorral-pastizal inducido ocupan el 13.7 y 12.1% de la superficie total respectivamente. Mientras que los cuerpos de agua y las zonas sin vegetación aparente ocupan cada una el 0.2% de la superficie municipal (INEGI, 2009).

**Aspectos sociales.** De acuerdo con el Censo de Población 2010 (INEGI) el municipio de Tacámbaro cuenta con una población total de 69,955 habitantes de los cuales 34,010 hombres y 35,945 son mujeres. El mayor volumen de la población tiene entre 11 y 59 años de edad. El 44.17% de la población tiene menos de 15 años de edad, 51% tiene entre 16 y 59 años de edad, y sólo el 4.8% tiene 60 años o más (INEGI, 2009).

El 55.9% de la población municipal habita en localidades rurales y el 44.1% restante habita en localidades urbanas. 49.3% de la población es derecho habiente a servicios de salud (INEGI, 2010). El 1.6% de hogares tiene familias migrantes (INEGI, 2009).

**Breve reseña histórica.** Con base en la descripción del Diario Oficial No. 45 (Martínez, 2012) Tacámbaro se originó en la época prehispánica cuyo nombre significa "lugar de palmas" o "donde hay palmas". En los tiempos prehispánicos fue un punto de enlace entre los pueblos de Tierra Caliente y los pueblos de la Meseta P'urhépecha. Al parecer, fue un lugar de descanso.

Entre 1523 y 1528 Don Cristóbal de Oñate conquistó las tierras de Tacámbaro dirigido por Hernán Cortés. Después de la conquista inició la evangelización con la llegada del fraile agustino Juan de San Román acompañado por Diego de Chávez. En 1538 se funda el Pueblo de Tacámbaro como lo conocemos en la actualidad. De 1545 a 1553 el párroco

misionero Fray Alonso de la Veracruz, fundó en Tacámbaro el primer Colegio de Estudios Mayores en Michoacán con la primera biblioteca del Estado.

Tiempo después, ya consumada la Independencia, en 1822, Tacámbaro se encontraba en ruinas, y en 1828 el gobernador José Salgado apoya y decreta la reconstrucción del pueblo con la denominación de la categoría de Villa, posteriormente el 10 de diciembre de 1831 Tacámbaro se constituye como Municipio. El título de ciudad lo obtuvo el 21 de septiembre de 1859, por decreto del entonces gobernador, el General Epitacio Huerta, denominándosele Ciudad de Codallos.

El 22 de mayo de 1922 se funda la Escuela Normal Mixta Regional; primera institución de este tipo en el país y en América. A lo largo de la historia Tacámbaro fue un pueblo lleno de académicos, artistas y catedráticos; inspiración de hombres ilustres (por ejemplo: José Rubén Romero).

Durante la Revolución, a finales de 1919, se declaró a Tacámbaro capital del Estado de Michoacán, siendo gobernador el General Gertrudis G. Sánchez, posteriormente en 1923 los poderes se trasladaron a la ciudad de Nocupétaro. En 2011, el Congreso del Estado de Michoacán de Ocampo, nombra a Tacámbaro como Heroica Tacámbaro de Codallos. En noviembre de 2012 Recibe la denominación de Pueblo Mágico.

## CAPÍTULO 6. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología se realizó siguiendo el diagrama de la figura 2. Los recuadros naranjas son los productos mientras que los recuadros morados son procesos.

Primero se estructura la investigación después se realizan análisis espaciales para obtener los mapas que permiten interpretar la expansión del cultivo de aguacate considerando los elementos naturales y antrópicos del paisaje; así como el componente físico del entorno y las funciones ambientales potenciales que desempeñan los suelos bajo diferente uso. Los principales insumos en esta investigación son los perfiles de suelos, y los mapas de cubierta y uso del suelo que a su vez también son un producto que muestra la historia de uso del suelo.

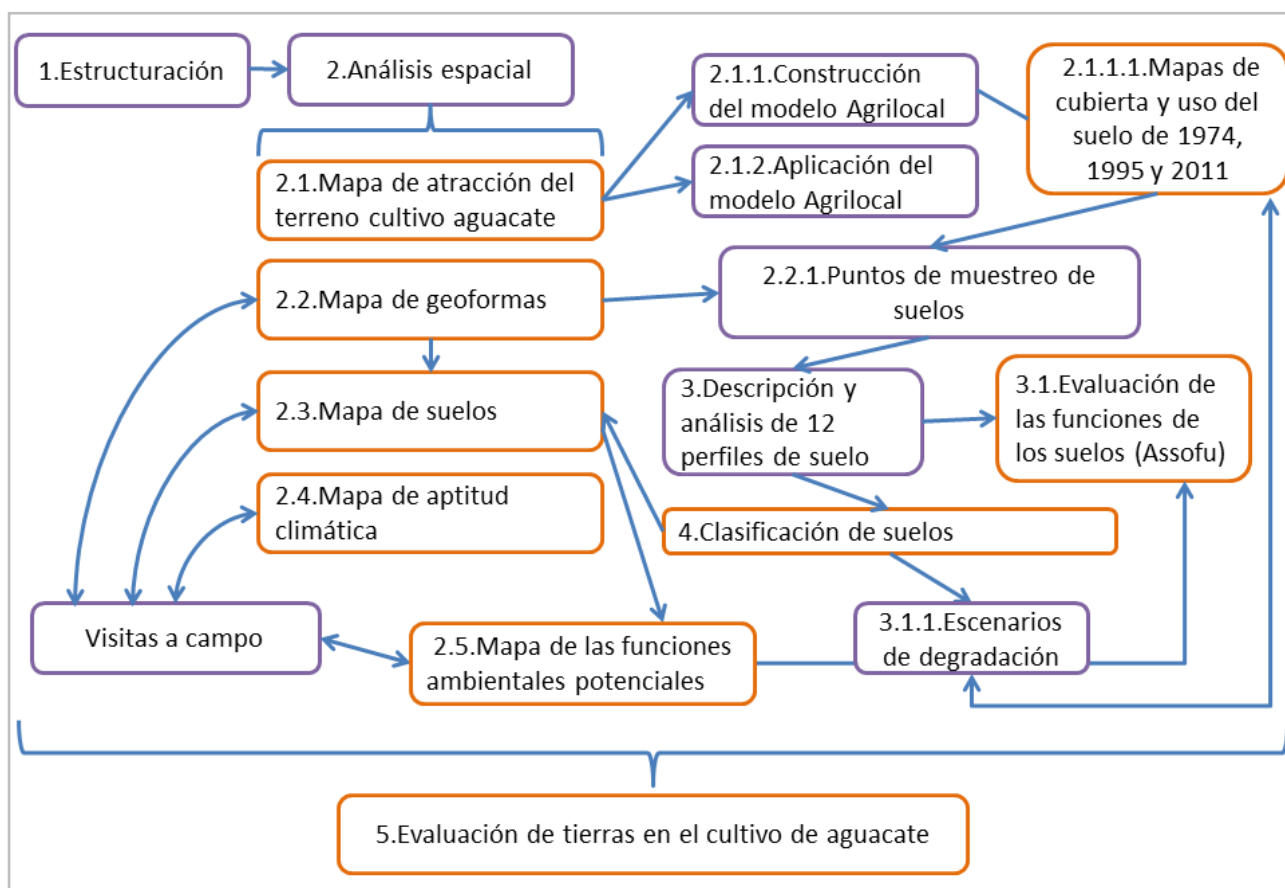


Figura 2. Diagrama metodológico.



## 6.1. El modelo Agrilocal

La metodología descrita a continuación describe el modelo Agrilocal (Morales, 2014), el cual nos permitió conocer la atracción del terreno para el cultivo de aguacate con base en la historia de uso del suelo.

Para considerar la información local en la evaluación de tierras, como lo enuncia la FAO (2007); se utilizó el modelo Agrilocal, lo que nos permitió saber cómo históricamente ocuparon sus tierras los productores aguacateros.

La construcción del modelo Agrilocal, basado en el procesamiento geográfico espacial, se realiza en tres etapas, descritas a detalle a continuación:

### 6.1.1. Sistematización de datos espaciales

Se definió la escala de trabajo (local, 1:20,000) y la escala de reporte de información (local: 1:50,000); la extensión del área de estudio se definió por la disponibilidad de información espacial, también se consideró la cubierta y el uso del suelo; posteriormente se estableció el sistema de proyección (WGS 1984 UTM zona 14N) y la unidad mínima cartografiable (1 km<sup>2</sup>). Se trazó un polígono de amortiguamiento, al exterior del área de estudio, de 3 km para evitar el efecto límite en el análisis de los datos.

### 6.1.2. Procesamiento cartográfico de datos espaciales

Se seleccionó un periodo de tiempo con tres fechas de datos para aplicar el modelo Agrilocal, los tiempos de análisis e información espacial corresponden a:

- 1974, fotografías aéreas.
- 1995, ortofotos.
- 2011, imágenes satélite de alta resolución *World View 2*.

Para cada uno de los tiempos de análisis se digitalizaron los mapas de la cubierta y uso del suelo utilizando *ArcMap 9.3*. Los pasos a seguir fueron: definición de leyenda e interpretación visual a escala constante de 1:20,000, lo cual permitió mantener homogeneidad en la cartografía durante los tres tiempos de análisis.

Los mapas de cubierta y uso del suelo en un periodo de tiempo nos permitieron analizar el cambio de uso del suelo en Tacámbaro (Anexo 1).

### 6.1.3. Construcción del modelo Agrilocal

El modelo Agrilocal permite analizar la relevancia, la preferencia y la influencia de los elementos del paisaje en la toma de decisiones de uso del suelo en un periodo de tiempo. Las relaciones espaciales entre los elementos del paisaje y las zonas de cultivo de aguacate analizadas fueron:

De origen natural

- Pendiente del terreno (en grados de inclinación de las zonas de cultivo de aguacate)
- Altitud del terreno (msnm de las zonas de cultivo de aguacate)

De origen antrópico

- Matorral-pastizal inducido (distancia en m a las zonas de cultivo de aguacate)
- Cultivo anual (distancia en m a las zonas de cultivo de aguacate)
- Caminos (distancia en m a las zonas de cultivo de aguacate)
- Asentamientos humanos (distancia en m a las zonas de cultivo de aguacate)

A continuación se describe el proceso de determinación de la relevancia de cada relación considerada.

#### 6.1.3.1. Relevancia de las relaciones entre elementos del paisaje y el cultivo de aguacate

Para identificar cuáles elementos del paisaje (naturales y antrópicos) influyen en la expansión del cultivo de aguacate, se determina primero cuál elemento y en qué año es relevante. La relevancia de cada uno de los elementos se calcula comparando la distribución real y la distribución aleatoria del cultivo de aguacate para cada relación.

#### **Relevancia de las relaciones entre los elementos naturales y el cultivo de aguacate.**

Para conocer la relevancia de cada relación se compara por medio de la relación espacial de coincidencia la distribución real y la distribución aleatoria del cultivo de aguacate para cada una de las relaciones en cada tiempo de análisis (1974, 1995 y 2011).

La distribución real del cultivo de aguacate se extrae del mapa de cubierta y uso del suelo para cada tiempo de análisis. La distribución aleatoria del cultivo de aguacate se obtiene

generando un mapa con ubicación aleatoria de la misma superficie en  $m^2$  de la distribución real del cultivo de aguacate para cada tiempo de análisis (1974, 1995 y 2011). La relevancia se determina aplicando los métodos estadísticos mencionados más adelante.

**Pendiente del terreno.** Para conocer la relevancia de la pendiente del terreno en la decisión de uso del suelo para cultivar aguacate para cada tiempo de análisis, se multiplican los mapas de la ubicación real y la ubicación aleatoria del cultivo de aguacate por el mapa de la pendiente del terreno en grados.

Los mapas resultantes de la coincidencia de la distribución real y la distribución aleatoria del cultivo de aguacate con la pendiente del terreno para los tres tiempos de análisis se clasificaron en las siguientes clases: 0-3; 3-6; 6-9; 9-12; 12-16; 16-23; 23-39; 39-59.

Los mapas clasificados de coincidencia de la distribución real y la distribución aleatoria con la pendiente del terreno se comparan por medio de análisis estadísticos mencionados abajo.

**Altitud del terreno.** La relevancia de la altitud del terreno se determina multiplicando los mapas de las distribuciones real y aleatoria del cultivo de aguacate por el mapa de la altitud del terreno (msnm).

Los mapas resultantes de la coincidencia de la distribución real y la distribución aleatoria del cultivo de aguacate con la altitud del terreno, para cada tiempo de análisis, se clasificará. La clasificación de la altitud del terreno utilizada para los tres tiempos de análisis es de cada 100 m de intervalo de clase, de 1000 a 2700 m de altitud.

Los mapas de coincidencia de la distribución real y la distribución aleatoria con la altitud del terreno clasificada se comparan por medio de los análisis estadísticos mencionados abajo.

**Relevancia de los elementos antrópicos en el cultivo de aguacate.** Los elementos antrópicos del paisaje sostienen en general relaciones geográficas de proximidad con el cultivo de aguacate, es decir, influyen en la toma de decisiones de uso del suelo a partir de la distancia que existe entre ellos y las zonas de cultivo de aguacate.

Para analizar la distancia de los elementos antrópicos con respecto al cultivo de aguacate, en términos más aproximados a la realidad, se crea una superficie de costo, la cual consideró los caminos como los lugares de costo mínimo de desplazamiento (incluyendo

su cruce con los ríos) y a los ríos de régimen hidrológico perenne, como los lugares de costo máximo o barreras. La superficie de costo se genera por tiempo de análisis, es decir, se obtienen tres superficies de costo en este caso:

- Superficie de costo 1974 basada en los caminos de 1974 y ríos perennes (fuente: INEGI).
- Superficie de costo 1995 basada en los caminos de 1995 y ríos perennes (fuente: INEGI).
- Superficie de costo 2011 basada en los caminos de 2011 y ríos perennes (fuente: INEGI).

Para conocer la relevancia de los elementos antrópicos en la decisión de uso del suelo se compara la distribución real y la distribución aleatoria del cultivo de aguacate para cada tiempo de análisis en relación con la distancia en metros a cada uno de los elementos antrópicos determinada por la superficie de costo.

Los mapas de distribución aleatoria del cultivo de aguacate generados para analizar los elementos naturales por tiempo de análisis se utilizan para analizar los elementos antrópicos.

La relevancia de las relaciones de proximidad de los elementos antrópicos se analiza en intervalos de 250 m. Las relaciones analizadas en los tres tiempos de análisis fueron:

- Distancia a zonas de matorral-pastizal inducido.
- Distancia a zonas de cultivo anual.
- Distancia a caminos.
- Distancia a asentamientos humanos.

Los mapas de proximidad con costo de los elementos antrópicos de la distribución real y la distribución aleatoria del cultivo de aguacate ya clasificados se comparan por medio de las pruebas estadísticas mencionadas abajo, con la finalidad de conocer su relevancia para el modelo.

**Análisis estadísticos para la prueba de relevancia de relaciones.** Los análisis consisten en la comparación de las distribuciones estadísticas de la ubicación real y la

ubicación aleatoria del cultivo de aguacate en su relación con cada uno de los elementos del paisaje para cada tiempo de análisis.

Cuando ambas distribuciones son normales (gaussianas) se aplican las siguientes pruebas estadísticas:

- Prueba-t de Student de comparación de medias.
- Prueba-F de Fisher de comparación de desviaciones estándar.

Cuando alguna de las dos o las dos distribuciones tienen una distribución no normal se aplican las siguientes pruebas estadísticas:

- Prueba  $W$  de Mann-Whitney de comparación de medianas.
- Prueba de Kolmogorov-Smirnov de diferencia máxima de las distribuciones acumuladas de dos muestras.

Con los resultados de estas pruebas estadísticas se determina si la relación analizada es relevante para decidir usar el terreno en el cultivo de aguacate, en los tres tiempos de análisis, a partir del valor  $P$  que indica si existe diferencia significativa entre la distribución real y la distribución aleatoria del cultivo de aguacate.

### **6.1.3.2. Probabilidad de cultivo de aguacate en función de las relaciones relevantes entre elementos del paisaje y el cultivo de aguacate.**

Las relaciones que resultan relevantes para el cultivo de aguacate por tiempo de análisis son los que regulan el cambio de uso del suelo para ese fin, pero es necesario determinar qué valores de dichas relaciones son las que prefieren los agricultores locales. Para conocer cuáles valores de cada relación prefieren los productores aguacateros se analizan los mapas de distribución real del cultivo de aguacate por tiempo de análisis.

Para este análisis, de los mapas clasificados de las distribuciones reales del cultivo de aguacate para las relaciones relevantes se excluye la información espacial de la zona de amortiguamiento de 3 km, es decir se toma solo la información de la zona de estudio original.

La función de probabilidad que describe la distribución de valores de cada relación relevante se determina a partir de la probabilidad empírica (basada en la frecuencia

normalizada de cada clase) de la distribución estadística de la relación y para cada tiempo de análisis.

Con las tablas de atributos de los mapas clasificados de cada uno de las relaciones relevantes por tiempo de análisis se calcula la probabilidad de presencia del cultivo de aguacate por clase. Los datos de la columna de probabilidad por clases y del valor de la distancia del límite superior del intervalo de cada clase de cada relación relevante se exportan al software *TableCurve2D v5.01*.

**Ajuste de las funciones de probabilidad.** Los datos de probabilidad del cultivo de aguacate en función de las relaciones relevantes, exportadas en el software *TableCurve2D v5.0*, permite explorar el ajuste de una curva a la distribución de valores de clase de cada relación y obtener su ecuación. La ecuación que mejor se ajusta se utiliza dentro del SIG para generar el mapa de probabilidad respectivo. El mejor ajuste es aquel que corresponde a un valor de  $R^2$  (ajustado por grados de libertad) cercano a 1.0 pero que además corresponda a una ecuación con un número de términos relativamente menor (de dos a cinco es adecuado), es decir se descartan las ecuaciones de forma compleja aunque su  $R^2$  ajustada sea la mejor. La ecuación se aplica en el software *ArcMap 9.3* con los datos de las funciones ajustadas en *TableCurve2D v5.0*.

La información geográfica espacial obtenida de las funciones se expresa en mapas que representan la probabilidad de que se cultive aguacate en función a las relaciones relevantes.

### **6.1.3.3. Grado de influencia de las relaciones relevantes en la toma de decisiones de uso del suelo para el cultivo de aguacate.**

Para conocer la influencia de cada uno de las relaciones relevantes para el cultivo de aguacate, por tiempo de análisis, se compara la distancia máxima de las distribuciones de frecuencia acumuladas de las distribuciones espaciales real y aleatoria de cada una de las relaciones relevantes por tiempo de análisis.

Estas distribuciones se someten a la prueba estadística Kolmogorov-Smirnov, lo cual permite observar, mediante el valor DN estimado, la distancia máxima entre las dos distribuciones de cada relación (real y aleatoria).

Los valores DN estimados constituyen el peso específico de cada una de las relaciones relevantes por tiempo de análisis, pero para conocer su contribución dentro del total de la

influencia dada por todas las relaciones simultáneamente, estos pesos se normalizan con respecto a la suma total de valores DN, con la finalidad de conocer la proporción en que cada relación ejerce influencia en la toma de decisiones de uso del suelo para cultivo de aguacate, por tiempo de análisis.

#### **6.1.4. Aplicación del modelo Agrilocal**

El modelo Agrilocal permite conocer históricamente la atracción del terreno para el cultivo de aguacate con base en el conocimiento local y la toma de decisiones de uso del suelo; condición que podría ayudar a mejorar o regular el cambio de uso del suelo y de esa manera mantener el equilibrio ambiental.

Conociendo cuáles elementos del paisaje regulan el cambio de uso del suelo (relevancia), cuáles valores de cada factor relevante prefieren los productores aguacateros (preferencia) y el peso que ejerce cada uno de los elementos en la toma de decisiones (influencia) es posible determinar los niveles de atracción del terreno para el cultivo de aguacate, según las relaciones espaciales locales estudiadas.

Con las ecuaciones obtenidas para cada relación relevante se construye un modelo de combinación lineal ponderada con el cual se crea un mapa que indica el grado de atracción (en términos de probabilidad de uso) que tiene el terreno para la expansión del cultivo de aguacate.

## 6.2. Las geoformas

La evaluación de tierras de acuerdo con la FAO (2007) debe de considerar la forma como los agricultores locales definen y clasifican los procesos que ocurren en sus terrenos, en este caso dicha información se obtuvo del modelo Agrilocal.

Sin embargo, la evaluación de tierras también debe considerar el contexto físico del terreno en cuestión; por ello la FAO (2007) enuncia que el relieve, los suelos, el clima y el agua; deben ser incluidos en la evaluación de tierras.

La metodología descrita a continuación detalla cómo se consideró el relieve en la evaluación de tierras de cultivo de aguacate en Tacámbaro a partir del mapa de geoformas.

**Mapa de geoformas.** Se digitalizaron las geoformas del área de estudio para planear el muestreo de suelos sistemáticamente. Primero se definió la leyenda y posteriormente se clasificaron visualmente las geoformas a escala 1:20,000. La información base para definir las geoformas fueron la pendiente del terreno, las curvas de nivel y la disección vertical (INEGI c, 1985).



### 6.3. Los suelos

Los suelos entran en el contexto físico base para realizar una evaluación de tierras (FAO, 2007); por ello se definió cuáles y en cuál extensión se encuentran los diferentes suelos.

Para conocer la extensión de los suelos de Tacámbaro se digitalizaron las unidades de los grupos de suelos, derivados de la clasificación de suelos (WRB, 2014) y por ende de los puntos de muestreo.

Este proceso se llevó a cabo en cuatro etapas descritas a continuación:

#### 6.3.1. Muestreo de suelos

Con base en el mapa de geoformas se definieron los puntos de muestreo de suelos.

Se seleccionaron 12 puntos de muestreo para representar las geoformas dominantes. Además se consideró la presencia y el estadio del cultivo de aguacate. Para ello se analizó el mapa de la cubierta y uso del suelo (1974, 1995 y 2011). Además de tomar muestras de suelo en la cubierta de cultivo de aguacate (10 perfiles descritos y muestreados), se muestreó la cubierta de bosque (1 perfil del suelo descrito y muestreado) y la de cultivo anual (1 perfil de suelo descrito y muestreado).

Para cavar las calitas en la cubierta de cultivo de aguacate se seleccionaron huertas con 5, 15 y 50 o más años de producción de aguacate. La calicata se elaboró en el área de los cajetes de los arboles a una profundidad de 1.5 m.

#### 6.3.2. Análisis de laboratorio de suelos

De acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2000) las muestras de suelo se secaron al aire y a la sombra; posteriormente se molieron y tamizaron para obtener la fracción de tierra fina (partículas de 2 mm de diámetro o menos). A las muestras de suelo tamizadas se les realizaron los siguientes análisis en laboratorio:

**Físicos.** Densidad aparente (Gandoy, 1991), clase textural (Okalebo *et al.*, 1993) y color en seco y en húmedo (Gandoy, 1991).

**Químicos.** pH (Lean, 1982), materia orgánica con bicromato de potasio (Nelson y Sommers, 1982), cationes intercambiables (Ca, Mg, Na y K) con acetato de amonio (USDA, 1996) y conductividad eléctrica (en una solución de 1:10 de suelo y agua medida por el conductímetro).

### **6.3.3. Clasificación de suelos**

Se clasificaron los 12 perfiles de suelos con la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB, 2014). Se designaron los grupos, los calificadores primarios y los calificadores suplementarios; a cada uno de los perfiles de suelo.

### **6.3.4. Cartografía de los suelos**

Con base en el mapa geomorfológico elaborado para realizar el muestreo de suelos, se digitalizó el mapa de suelos. Los grupos de suelos presentes en cada una de estas geoformas se definieron por los 12 perfiles de suelos descritos, muestreados y clasificados (WRB, 2014). Además de considerar las geoformas para definir el límite entre los grupos de suelo se consideraron 20 puntos de verificación en campo, los cauces de los ríos, el mapa de cubierta y uso del suelo (2011); y, las imágenes satélite de alta resolución (*World View 2*). Para realizar el mapa de suelos se siguió la metodología descrita en la WRB (2014).

#### 6.4. Aptitud climática

Con la finalidad de considerar el clima en la evaluación de tierras, se analizaron los requerimientos climáticos para el cultivo de aguacate. Posteriormente se digitalizó el mapa de aptitud climática para el cultivo de aguacate en Tacámbaro, Michoacán, México.

**Mapa de la aptitud climática para el cultivo de aguacate.** De acuerdo con información bibliográfica se definieron los intervalos de temperatura para conocer la aptitud climática en el cultivo de aguacate, siendo de 16.5 a 18.5 °C una temperatura muy apta, de 18.5 a 19.5 °C apta, de 15 a 16.5 °C medianamente apta y de 19.5 a 21 °C no apta para el cultivo de aguacate (Jiménez *et al.*, 2005).

Posteriormente con base en la información histórica de la temperatura media mensual (°C) frente a la altitud del terreno (msnm) se digitalizó el mapa de aptitud climática para el cultivo del aguacate en Tacámbaro, Michoacán, México. Los insumos utilizados fueron la base de datos de condiciones climáticas para el cultivo de aguacate realizada por Dubrovina y Bautista (2014).

Se trazó una gráfica con los datos de la altitud (msnm) correspondiente al área de estudio contra la temperatura media mensual (°C). Es decir, se consideraron nada más los datos de temperatura media mensual del intervalo altitudinal de 1100 a 2400 msnm (Dubrovina y Bautista, 2014).

La gráfica nos permitió observar la distribución de la curva de la temperatura media mensual (°C) con relación en la altitud del terreno (msnm). Se aplicó la prueba estadística  $R^2$  para llevar a información geográfica la relación altitud del terreno (msnm) con la temperatura media mensual. La ecuación obtenida de  $R^2$  se exportó a información geográfica. La ecuación se aplicó en el software *ArcMap 9.3* sustituyendo los valores de la ecuación y tomando el mapa de la altitud del terreno (msnm) como la variable X de la ecuación. Cabe mencionar que la precipitación en toda el área de estudio es uniforme por ello se consideró nada más la temperatura media mensual.

## 6.5. Evaluación de las funciones de los suelos

La FAO menciona en el Marco de Evaluación de Tierras (2007), se deben de comparar más de un sólo uso y/o servicio (función) del suelo; esto con el afán de que la evaluación de tierras permita cotejar los efectos ambientales y productivos de los diferentes usos del suelo.

Se introdujeron en el software Assofu los datos de campo y de laboratorio de los 12 perfiles de suelo descritos, muestreados y clasificados, para conocer sus funciones.

Con la finalidad de comparar las funciones agrícolas y ambientales de los suelos bajo diferentes condiciones de uso, se realizaron escenarios de degradación del suelo de acuerdo con el mapa de cubierta y uso del suelo.

Para predecir que ganan o que pierden en términos físicos los productores aguacateros al cambiar el uso del suelo con base en la información obtenida de las funciones de los perfiles de suelos procesados en Assofu se estimaron para cada una de las cubiertas y uso del suelo por tiempo de análisis las funciones agrícolas y ambientales potenciales que desempeñan los suelos dependiendo de su cubierta.

Dependiendo de la cubierta las propiedades de los suelos fueron editadas de acuerdo al desarrollo del perfil de suelo (Cuadro 1.):

Las funciones de los suelos analizadas en el software Assofu fueron:

**Funciones ambientales de los suelos.** El suelo como medio de: a) infiltración; b) retención de humedad; y, c) transformación de contaminantes orgánicos.

**Funciones agrícolas de los suelos.** El suelo como medio de producción de alimentos y biomasa.

### 6.5.1. Cartografía de las funciones de los suelos

Para comparar las diferentes funciones de los suelos con los diferentes usos del suelo se consideraron los diferentes grupos de suelos para ello se recurrió al mapa de suelos y el mapa de la cubierta y uso del suelo. Posteriormente se digitalizaron los mapas de las funciones potenciales que desempeñan los suelos por años (1974, 1995 y 2011) bajo diferentes condiciones de uso.

Los mapas de las funciones de los suelos obtenidos muestran al suelo como medio de: a) Infiltración; b) Retención de humedad (Retención); c) Transformación de contaminantes orgánicos (Transformación); y d) Producción de alimentos y biomasa (Producción).

Cuadro 1. Desarrollo de los suelos dependiendo de su cubierta (propiedades editadas).

Cubierta	Espesor (cm)	M.O. (%)	D.A. (g cm <sup>-3</sup> )	Penetrabilidad de raíces	Porosidad	Drenaje	Estructura
Bosque	15 cm más	0.4% más	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual
Matorral-pastizal inducido	Un horizonte menos y el segundo horizonte 10 cm menos	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual
Cultivo anual	20 cm Menos	0.4% menos	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual
Zona urbana	Igual	Igual	2	Muy mala	Ausente	Muy malo	Estabilidad muy alta. Tamaño muy grueso

M.O.= Materia orgánica; D.A.= Densidad aparente (Gallegos *et al.*, 2014).

## **6.6. Evaluación de tierras en el cultivo de aguacate**

La evaluación de tierras permite cotejar el estado ambiental y productivo de los diferentes usos del suelo mediante la integración de información del contexto físico, social y económico (FAO, 2007). En este caso sólo se integró el contexto físico y social para conocer el estado ambiental y productivo del cultivo de aguacate en Tacámbaro.

### **6.6.1. Estado ambiental**

En este caso para conocer históricamente el estado ambiental del cultivo de aguacate en Tacámbaro, se integró la información generada de: A) la atracción del terreno para el cultivo de aguacate; B) los suelos; C) la cubierta y uso del suelo; y, D) las funciones ambientales potenciales de los suelos.

### **6.6.2. Estado productivo**

Por otra parte para conocer históricamente el estado productivo del cultivo de aguacate se analizó la producción de aguacate en el Municipio con respecto al cambio de cubierta y uso del suelo.

Además integró la información generada de: A) El cambio de uso del suelo (mapas de cubierta y uso del suelo por año 1974, 1995 y 2011); B) Las geoformas; C) la aptitud climática; y D) los suelos. Además para conocer el estado productivo actual de tierras se integró la información de: A) la atracción del terreno para el cultivo de aguacate; B) las funciones agrícolas potenciales; y, C) la cubierta y uso del suelo.

## CAPÍTULO 7. RESULTADOS

### 7.1. Modelo Agrilocal: la atracción del terreno para el cultivo de aguacate

#### 7.1.1. Relevancia de los elementos del paisaje en el establecimiento del cultivo de aguacate

##### 7.1.1.1. Relevancia de los elementos naturales del paisaje en el establecimiento del cultivo de aguacate

Los productores aguacateros de Tacámbaro, Michoacán, México consideran los elementos naturales del paisaje en la toma de decisiones de uso del suelo, según se infiere del análisis realizado.

En los tres tiempos de análisis (1974, 1995 y 2011) la atracción del terreno para el cultivo del aguacate está aparentemente determinada por las relaciones de coincidencia entre los elementos naturales del paisaje considerados y las zonas de cultivo de aguacate. Específicamente, se puede establecer que la ubicación del cultivo de aguacate no se da al azar sino que está influenciada por la coincidencia con la pendiente del terreno (en grados de inclinación) y la coincidencia con la altitud de terreno (msnm).

#### **Relevancia de la coincidencia entre la pendiente del terreno y el cultivo de aguacate.**

En este caso, para los tres tiempos de análisis la pendiente del terreno resultó un elemento del paisaje relevante en la distribución del cultivo de aguacate.

Los resultados obtenidos de las pruebas estadísticas que comparan la ubicación real y la ubicación aleatoria del cultivo de aguacate con la pendiente del terreno clasificada; muestran que la forma de ambas distribuciones es normal o gaussiana.

Cuando, como en este caso, ambas distribuciones son normales, se aplican las pruebas estadísticas *t* de Student, para comparar tendencia central, y *F* de Fisher, para comparar dispersión con respecto a un valor central. El valor *P* de ambas pruebas nos permite conocer si la pendiente del terreno es un factor relevante en el cultivo del aguacate, cuando este valor está por debajo del límite de confianza establecido (usualmente  $\alpha = 0.05$ ) en al menos una de las dos pruebas la relación es relevante.

La prueba estadística *t* de Student compara las medias de la pendiente del terreno de la ubicación real y la ubicación aleatoria del cultivo de aguacate. El valor *P* de dicha prueba muestra la similitud entre ubicaciones, cuando el valor *P* es menor a 0.05 esto puede

interpretarse que la ubicación real del cultivo de aguacate es diferente con respecto a la ubicación aleatoria del cultivo de aguacate, por lo tanto la pendiente del terreno es un factor relevante en el establecimiento del cultivo de aguacate porque el cultivo no se da aleatoriamente sino que los productores aguacateros prefieren ciertas pendientes del terreno.

La prueba estadística F de Fisher también analiza la similitud entre la ubicación real y aleatoria del cultivo de aguacate, pero esta prueba en cambio compara la dispersión en las distribuciones (desviación estándar). El valor  $P$  de esta prueba muestra la similitud entre ubicaciones, cuando el valor  $P$  es menor a 0.05 el elemento del paisaje que se está analizando (en este caso pendiente del terreno) es relevante, pues esto significa que ambas distribuciones son estadísticamente diferentes en cuanto a su dispersión.

La pendiente del terreno es un elemento natural del paisaje relevante en el establecimiento del cultivo del aguacate. Para los tres tiempos de análisis (1974, 1995 y 2011) el valor  $P$  de las pruebas estadísticas tuvo valores menores a 0.05, al menos en una de las dos pruebas o en las dos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Relevancia de la pendiente del terreno en el cultivo de aguacate.

Tiempo	Ubicación del cultivo de aguacate	Distribución de la curva	Valor $P$ prueba t de Student	Valor $P$ prueba F de Fisher	Relevancia
1974	Real	Normal	0.998	0.044	Relevante
	Aleatoria	Normal			
1995	Real	Normal	0.265	0.003	Relevante
	Aleatoria	Normal			
2011	Real	Normal	0.019	$0.9^{-5}$	Relevante
	Aleatoria	Normal			

**Relevancia de la coincidencia entre la altitud del terreno y el cultivo de aguacate.** En términos generales la altitud del terreno (msnm) tiene una relación directamente proporcional con las condiciones climáticas, especialmente con la temperatura del aire y en menor medida con la precipitación, por lo tanto la altitud del terreno es un elemento natural del paisaje que permite inferir si las condiciones climáticas son relevantes en el establecimiento de las huertas de aguacate.

Los resultados obtenidos de las pruebas estadísticas que comparan la ubicación real y la ubicación aleatoria del cultivo de aguacate en su relación con la altitud del terreno (msnm);



muestran que en 1974 la distribución de ambas ubicaciones (real y aleatoria) es no normal. Para los tiempos de análisis de 1995 y 2011 la distribución de ambas ubicaciones (real y aleatoria) es normal.

En el tiempo de análisis de 1974, puesto que la distribución es no normal, se aplican las pruebas estadísticas  $W$  de Mann-Whitney y Kolmogorov-Smirnov. Valores  $P$  de estas pruebas menores a 0.05 significan que la altitud del terreno (msnm) es un elemento del paisaje relevante en el establecimiento de las huertas de aguacate.

Para los tiempos de análisis de 1995 y 2011, cuando las distribuciones comparadas son normales, se aplican las pruebas estadísticas  $t$  de Student y  $F$  de Fisher. Los valores  $P$  menores a 0.05 de estas pruebas nos permiten inferir que la altitud del terreno (msnm) es un factor relevante en el cultivo del aguacate.

En este caso, la altitud del terreno (msnm) es un elemento del paisaje relevante en los tres tiempos de análisis (Cuadro 3), puesto que basta que una de las pruebas estadísticas arroje un valor  $P$  menor a 0.05 para que la altitud del terreno sea un factor relevante en el establecimiento del cultivo de aguacate. Con estos resultados se puede inferir que las condiciones climáticas son un elemento natural del paisaje relevante en el cultivo de aguacate en Tacámbaro, Michoacán, México.

Cuadro 3. Relevancia de la altitud (msnm) del terreno en el cultivo de aguacate.

Tiempo	Ubicación del cultivo de aguacate	Distribución de la curva	Valor $P$ prueba $W$ Mann Whitney	Valor $P$ prueba Kolmogorov-Smirnov	Relevancia
1974	Real Aleatoria	No normal No normal	0.128	0.007	Relevante
Tiempo	Ubicación del cultivo de aguacate	Distribución de la curva	Valor $P$ prueba $t$ de Student	Valor $P$ prueba $F$ de Fisher	Relevancia
1995	Real Aleatoria	Normal Normal	0.992	0.048	Relevante
2011	Real Aleatoria	Normal Normal	0.063	0.000	Relevante

### 7.1.1.2. Relevancia de los elementos antrópicos del paisaje en el establecimiento del cultivo de aguacate

**Relevancia de la proximidad a matorral-pastizal inducido en la atracción del terreno para el cultivo de aguacate.** La relación de proximidad (en m) a matorral-pastizal inducido respecto a las zonas de cultivo de aguacate resultó relevante en 1974, mientras que en 1995 y 2011 no es relevante (Cuadro 4).

Las distribuciones de la ubicación real y la ubicación aleatoria del cultivo de aguacate son no normales en los tres tiempos de análisis. Los valores  $P$  menores a 0.05 de las pruebas estadísticas empleadas, muestran que la distancia a matorral-pastizal inducido (m) es una relación relevante en el establecimiento del cultivo de aguacate sólo en 1974. En cambio, como puede observarse en el cuadro 4, para los tiempos de análisis de 1995 y 2011 no es relevante, ya que la ubicación real y la ubicación aleatoria del cultivo de aguacate son similares en sus medianas (Valor  $P$  prueba  $W$  Mann Whitney) y su diferencia máxima (Valor  $P$  prueba Kolmogorov-Smirnov), es decir en la actualidad la existencia en proximidad de zonas con matorral-pastizal inducido no influye en la atracción de los terrenos para el establecimiento del cultivo de aguacate.

Cuadro 4. Relevancia de la proximidad a matorral-pastizal inducido en el cultivo de aguacate.

Tiempo	Ubicación del cultivo de aguacate	Distribución	Valor $P$ prueba $W$ Mann Whitney	Valor $P$ prueba Kolmogorov-Smirnov	Relevancia
1974	Real Aleatorio	No normal No normal	0.000	2.975 <sup>-7</sup>	Relevante
1995	Real Aleatorio	No normal No normal	0.557	0.734	No relevante
2011	Real Aleatorio	No normal No normal	0.565	0.904	No relevante

**Relevancia de la proximidad a cultivo anual en la atracción del terreno para el cultivo de aguacate.** La proximidad a cultivo anual para establecer un cultivo de aguacate es relevante en 1974, pero en 1995 y 2011 no es relevante. Para esta relación, la distribución de la ubicación real y la ubicación aleatoria del cultivo de aguacate es no normal en los tres tiempos de análisis; por ello se aplicaron las pruebas estadísticas  $W$  de Mann Whitney y Kolmogorov-Smirnov. Los valores  $P$  menores a 0.05 de las pruebas

estadísticas empleadas muestran que la distancia a cultivo anual (m) es una relación relevante en el establecimiento del cultivo de aguacate en 1974, pero no es relevante en 1995 y 2011 (Cuadro 5).

Cuadro 5. Relevancia de la proximidad a cultivo anual en el cultivo de aguacate.

Tiempo	Ubicación del cultivo de aguacate	Distribución	Valor P prueba W Mann Whitney	Valor P prueba Kolmogorov-Smirnov	Relevancia
1974	Real Aleatorio	No normal No normal	0.000	2.250 <sup>-7</sup>	Relevante
1995	Real Aleatorio	No normal No normal	0.214	0.112	No relevante
2011	Real Aleatorio	No normal No normal	0.781	0.361	No relevante

**Relevancia de la proximidad a caminos en la atracción del terreno para el cultivo de aguacate.** La proximidad a caminos es una relación que tiene un influencia directa en el acceso a los terrenos. Las distribuciones de la ubicación real y la ubicación aleatoria del cultivo de aguacate son no normales en los tres tiempos de análisis. Los valores *P* menores a 0.05 de las pruebas estadísticas empleadas muestran diferencia significativa entre la ubicación real y la ubicación aleatoria del cultivo de aguacate con la proximidad a caminos. En este caso, la distancia a caminos (m) es una relación relevante en el establecimiento del cultivo de aguacate en 1974, pero no es relevante en la actualidad (tiempos de análisis 1995 y 2011) (Cuadro 6).

Cuadro 6. Relevancia de la proximidad a caminos en el cultivo de aguacate.

Tiempo	Ubicación del cultivo de aguacate	Distribución de la curva	Valor P prueba W Mann Whitney	Valor P prueba Kolmogorov-Smirnov	Relevancia
1974	Real Aleatorio	No normal No normal	1.435 <sup>-9</sup>	0.000	Relevante
1995	Real Aleatorio	No normal No normal	0.214	0.249	No relevante
2011	Real Aleatorio	No normal No normal	0.377	0.699	No relevante

**Relevancia de la proximidad a asentamientos humanos en la atracción del terreno para el cultivo de aguacate.** La proximidad (m) a asentamientos humanos es una relación que ha determinado la expansión de tierras de cultivo en todo el mundo. En el

cultivo de aguacate en Tacámbaro, Michoacán, México es una relación relevante en su establecimiento para el tiempo de análisis de 1974; sin embargo, para tiempos más recientes (1995 y 2011) la proximidad a asentamientos humanos (m) ya no es una relación relevante en el establecimiento de huertas de aguacate.

La distribución de la ubicación real y la ubicación aleatoria del cultivo de aguacate en 1974 y 1995 es no normal, mientras que en 2011 es normal. Los valores  $P$  menores a 0.05 de las pruebas estadísticas empleadas muestran que la proximidad a asentamientos humanos (m) es una relación relevante en el establecimiento del cultivo de aguacate en 1974, pero no es relevante en 1995 y 2011 (Cuadro 7).

Cuadro 7. Relevancia de la proximidad a asentamientos humanos en el cultivo de aguacate.

Tiempo	Ubicación del cultivo de aguacate	Distribución	Valor $P$ prueba W Mann Whitney	Valor $P$ prueba Kolmogorov-Smirnov	Relevancia
1974	Real Aleatorio	No normal No normal	0.000	0.000	Relevante
1995	Real Aleatorio	No normal No normal	0.686	0.138	No relevante
Tiempo	Ubicación del cultivo de aguacate	Distribución	Valor $P$ prueba t de Student	Valor $P$ prueba F de Fisher	Relevancia
2011	Real Aleatorio	Normal Normal	0.766	0.146	No relevante

## 7.1.2. Preferencia de las relaciones relevantes entre los elementos del paisaje y el cultivo de aguacate

Las preferencias que tienen los productores aguacateros hacia cada relación relevante entre los elementos del paisaje considerados y el cultivo de aguacate se manifiestan en este caso en las clases de mayor frecuencia de la relación y los valores correspondientes de proximidad o coincidencia.

### 7.1.2.1. Preferencia de la relación de coincidencia entre los elementos naturales del paisaje y el cultivo de aguacate

La pendiente (°) y la altitud (msnm) del terreno tienen una relación de coincidencia con el cultivo de aguacate.

Según los resultados, la clase de pendiente del terreno que más prefieren los productores aguacateros para los tres tiempos de análisis es la de 3 a 6 grados de inclinación (Figura 3). Sin embargo, es necesario destacar que, como puede observarse en la figura 3, la preferencia por los terrenos con pendientes mayores a los de esa clase aumentó significativamente en el 2011 con respecto a las otras fechas. La explicación de estos cambios se discute en la sección correspondiente, más abajo.

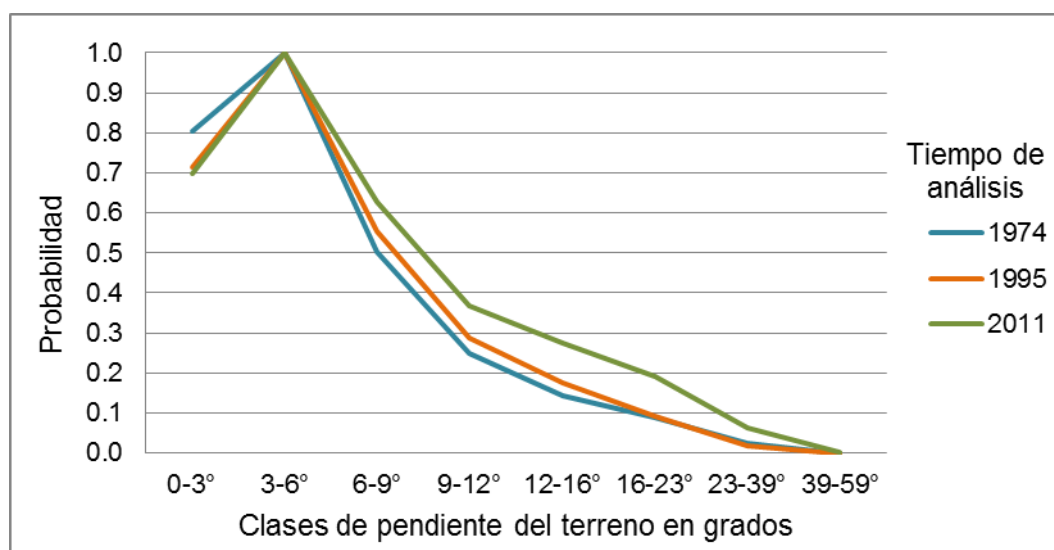


Figura 3. Preferencia de la pendiente del terreno en valores de probabilidad en el establecimiento del cultivo de aguacate.

La altitud (msnm) del terreno que prefieren los productores aguacateros para el establecimiento de sus huertas varía de acuerdo al tiempo de análisis. En 1974 los agricultores mayoritariamente preferían terrenos con una altitud de alrededor de 1700 msnm, mientras que para 1995 los terrenos alrededor de los 2000 msnm de altitud fueron

aparentemente los de mayor preferencia por los productores aguacateros; sin embargo, en el período de análisis más reciente se observa un cambio hacia los terrenos alrededor de 2100 msnm de altitud en la preferencia de los productores para el establecimiento de las huertas de aguacate en Tacámbaro, Michoacán, México (Figura 4). La explicación de estos cambios se discute en la sección correspondiente, más abajo.

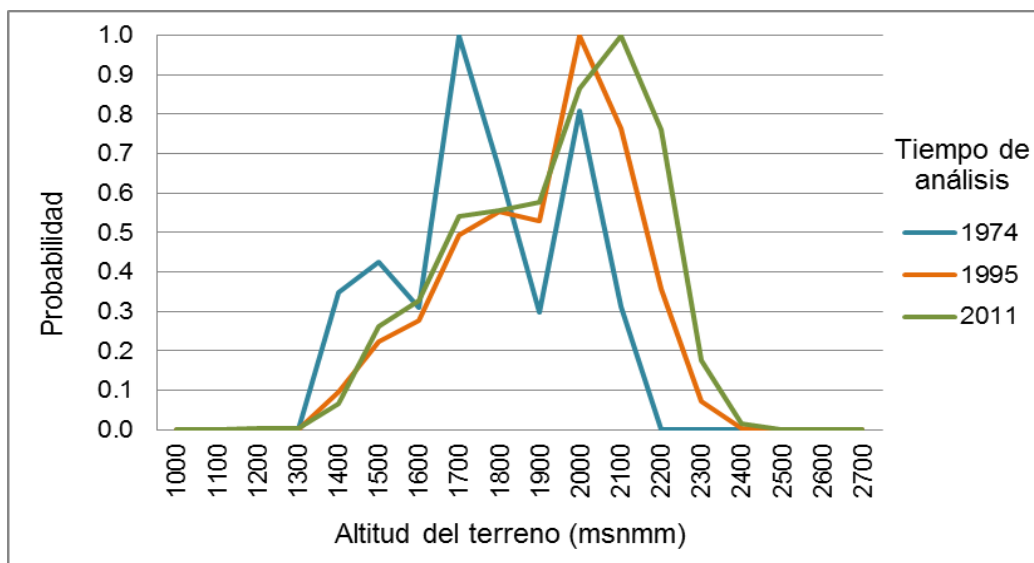


Figura 4. Preferencia de la altitud del terreno en valores de probabilidad para el establecimiento del cultivo de aguacate.

#### 7.1.2.2. Preferencia de la relación de proximidad entre los elementos antrópicos del paisaje y el cultivo de aguacate

La proximidad es una relación espacial que tiene el cultivo de aguacate con los elementos antrópicos del paisaje a partir de la distancia en metros que existe entre ellos. En este caso la proximidad a zonas de matorral-pastizal inducido, a caminos, y a zonas de cultivo anual se describen gráficamente en las Figuras 5, 6 y 7, respectivamente.

La preferencia de los productores aguacateros para usar terrenos con proximidad a matorral-pastizal inducido, para los tres tiempos de análisis (1974, 1995 y 2011) es de 0 a 250 m de distancia, pero conforme ha pasado el tiempo existe mayor probabilidad de que un terreno sea utilizado para el cultivo de aguacate a una distancia mayor, por ejemplo en 1974, un terreno ubicado a una distancia de 1250 a 1500 m de una zona de matorral-pastizal inducido tenía una probabilidad muy baja de ser usado por los productores aguacateros, mientras que en la actualidad la misma proximidad (de 1250 a 1500 m) determina que los terrenos ubicados a esa distancia tienen una probabilidad de 0.5 de ser

utilizada por los productores aguacateros para el establecimiento de sus huertas (Figura 5). La explicación de estos cambios se discute en la sección correspondiente, más abajo.

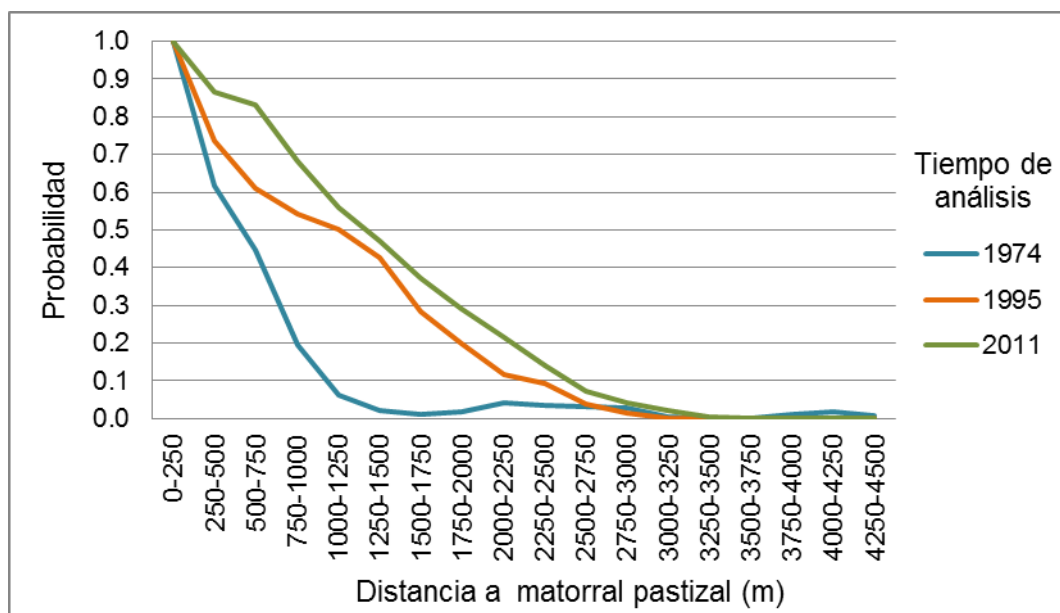


Figura 5. Preferencia de la proximidad a matorral-pastizal inducido en valores de probabilidad para el establecimiento del cultivo de aguacate.

La preferencia por la proximidad entre el cultivo de aguacate y los caminos, en los tres tiempos de análisis (1974, 1995 y 2011), se comporta de la misma forma, es decir los productores prefieren elegir un terreno para el cultivo del aguacate a una distancia de 500 m o menos de distancia a los caminos (Figura 6). Sin embargo no se observa un cambio significativo a lo largo del tiempo como ocurre con las relaciones anteriores. La explicación de esto se discute en la sección correspondiente, más abajo.

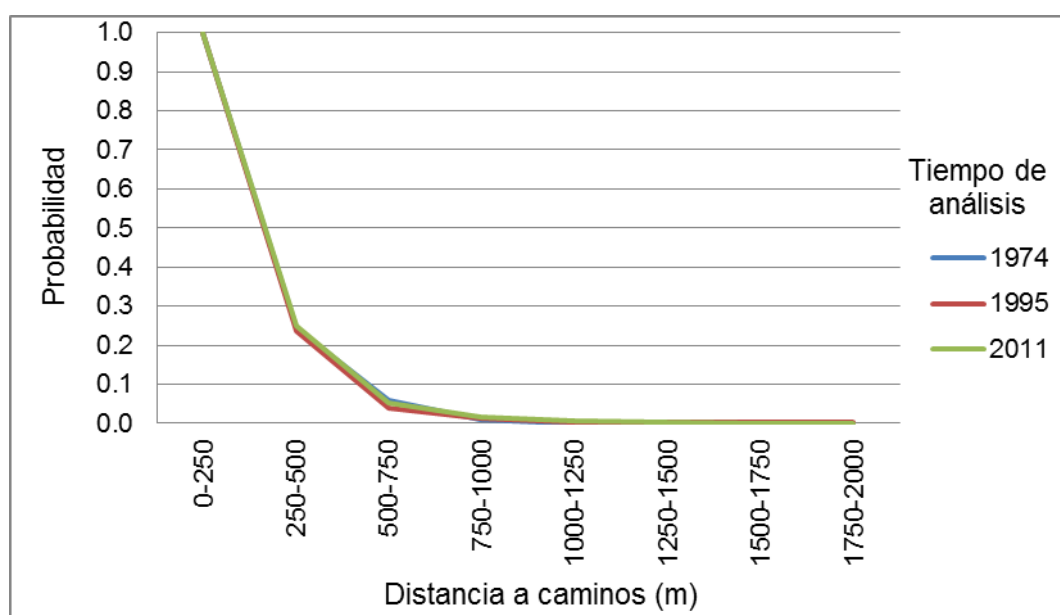


Figura 6. Preferencia de la proximidad a caminos en valores de probabilidad para el establecimiento del cultivo de aguacate.

Para la relación proximidad entre zonas de cultivo anual y zonas de cultivo de aguacate, la preferencia en las tres fechas de análisis es para las menores distancias, sin embargo es significativo el cambio manifestado sobre todo en la última fecha, en donde incluso para los terrenos ubicados entre 500 y 2000 metros de distancia, la preferencia de uso para cultivo de aguacate ha aumentado aparentemente (Figura 7). La explicación de estos cambios se discute en la sección correspondiente, más abajo.

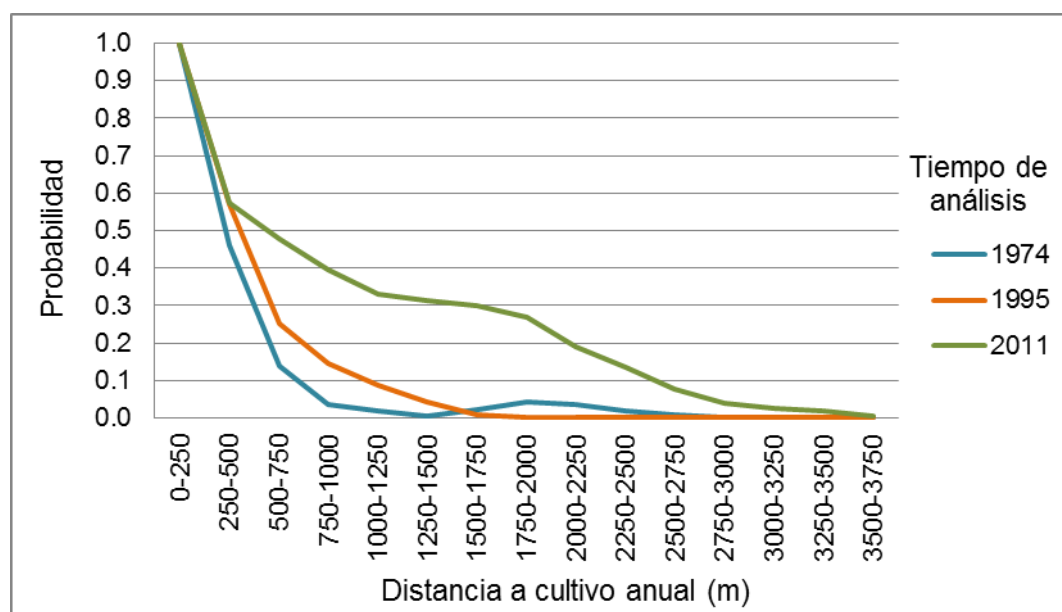


Figura 7. Preferencia de la proximidad a cultivo anual en valores de probabilidad para el establecimiento del cultivo de aguacate.

La preferencia que tienen los productores aguacateros hacia la proximidad a asentamientos humanos como elemento antrópico del paisaje varía dependiendo del tiempo de análisis; en 1974 los productores aguacateros preferían terrenos ubicados a distancias de alrededor de 1000 m de asentamientos humanos; sin embargo, aparentemente también tenían una preferencia significativa por los terrenos a 3250 m de distancia de asentamientos humanos, con una probabilidad de uso del terreno para el cultivo de aguacate de 0.4 (Figura 8). En la actualidad mientras más próximo se encuentren los terrenos a asentamientos humanos son más preferidos por los productores para el cultivo de aguacate. Estas variaciones aparentes en la preferencia se explican en la sección correspondiente, más abajo.



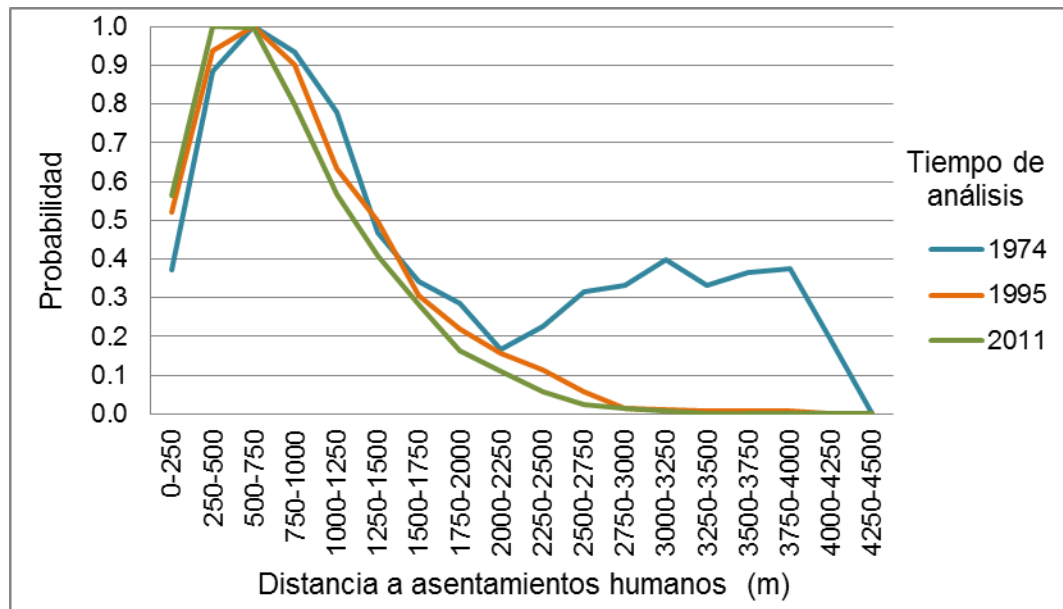


Figura 8. Preferencia de la proximidad a asentamientos humanos en valores de probabilidad para el establecimiento del cultivo de aguacate.

### 7.1.3. Forma de la función de probabilidad de las relaciones espaciales relevantes

La forma se obtiene de funciones matemáticas que se ajustan a la distribución de la ubicación real del cultivo de aguacate con respecto a cada uno de los elementos del paisaje relevantes para el cultivo (Cuadro 8).

En Tacámbaro, Michoacán, México, la función matemática de probabilidad de cultivo de aguacate se determinó sólo para las relaciones relevantes por tiempo de análisis, que son:

- En 1974 la coincidencia con la pendiente del terreno en grados de inclinación, la coincidencia con la altitud del terreno (msnm), la proximidad a matorral-pastizal inducido (m), la proximidad a cultivo anual (m), la proximidad a caminos (m) y proximidad a asentamientos humanos.
- En 1995 la coincidencia con la pendiente del terreno en grados de inclinación y la coincidencia de la altitud del terreno (msnm).
- En 2011 la coincidencia de la pendiente del terreno en grados de inclinación y coincidencia con la altitud del terreno (msnm).

#### 7.1.3.1. Probabilidad de cultivo de aguacate en función a los elementos del paisaje relevantes de 1974

**Coincidencia con la pendiente del terreno.** La forma de la distribución de la relación coincidencia entre la pendiente del terreno y el cultivo de aguacate para 1974 se ajustó a la función matemática  $y^{-1} = a + bx^{1.5} + cx^{2.5}$  con un  $R^2$  de 0.99 (Figura 9).

**Coincidencia con la altitud del terreno (msnm).** La forma de la distribución de la relación de coincidencia entre la altitud del terreno y el cultivo de aguacate para 1974 se ajustó a la función matemática que se muestra en la figura 10.

#### **Función matemática en lenguaje geográfico (ArcMap 9.3)**

- ProCAIt74 =  $\exp(-13.896144 + (0.00036226175 * ([MDE],1.5)) + (-2.3482648E-09 * ([MDE],3)))$
- ProCulPen74 =  $1 / (1.2021033 + (-0.10331157 * \text{pow}([Pendiente],1.5)) + (0.023447812 * \text{pow}([Pendiente],2.5)))$
- ProCulMat74 =  $\exp(0.0064731293 + (-0.001976399 * [DisCosMP74]) + (1.9481127E-7 * ([DisCosMP74],2)))$
- ProCulCA74 =  $1 / (1.0058654 + (1.6789953E-05 * \text{pow}([DisCA74],2)))$
- ProCulCM74 =  $1 / (1.000048 + (3.1304463E-06 * \text{pow}([DisCM74],2.5)))$
- ProCulAS74 =  $(0.49827042 + (0.0016957904 * [DisAH74]) + (-2.0248458E-06 * \text{pow}([DisAH74],2)) + (7.1274175E-10 * \text{pow}([DisAH74],3)) + (-7.8664031E-14 * \text{pow}([DisAH74],4)))$
- ProCulAlt95 =  $\exp(-638.93106 + (1.4387675 * [MDE]) + (-0.0012171409 * \text{pow}([MDE],2)) + (4.5717617E-07 * \text{pow}([MDE],3)) + (-6.422199E-11 * \text{pow}([MDE],4)))$
- ProCulPen95 =  $1 / (1.3517034 + (-0.26236726 * (\text{pow}([Pendiente],1.5)) + (0.11519093 * \text{pow}([Pendiente],2))))$
- ProCulAlt11 =  $(-0.048273936 + (0.0028790315 * \text{pow}([MDE],0.5)) + (-3.8470639E-05 * [MDE])) / (1 + (-0.043195859 * \text{pow}([MDE],0.5)) + (0.00046782103 * [MDE]))$
- ProCulPen11 =  $1 / (1.3978662 + (-0.466003 * [Pendiente]) + (0.19688173 * \text{pow}([Pendiente],1.5)))$

Cuadro 8. Funciones matemáticas en lenguaje geográfico.

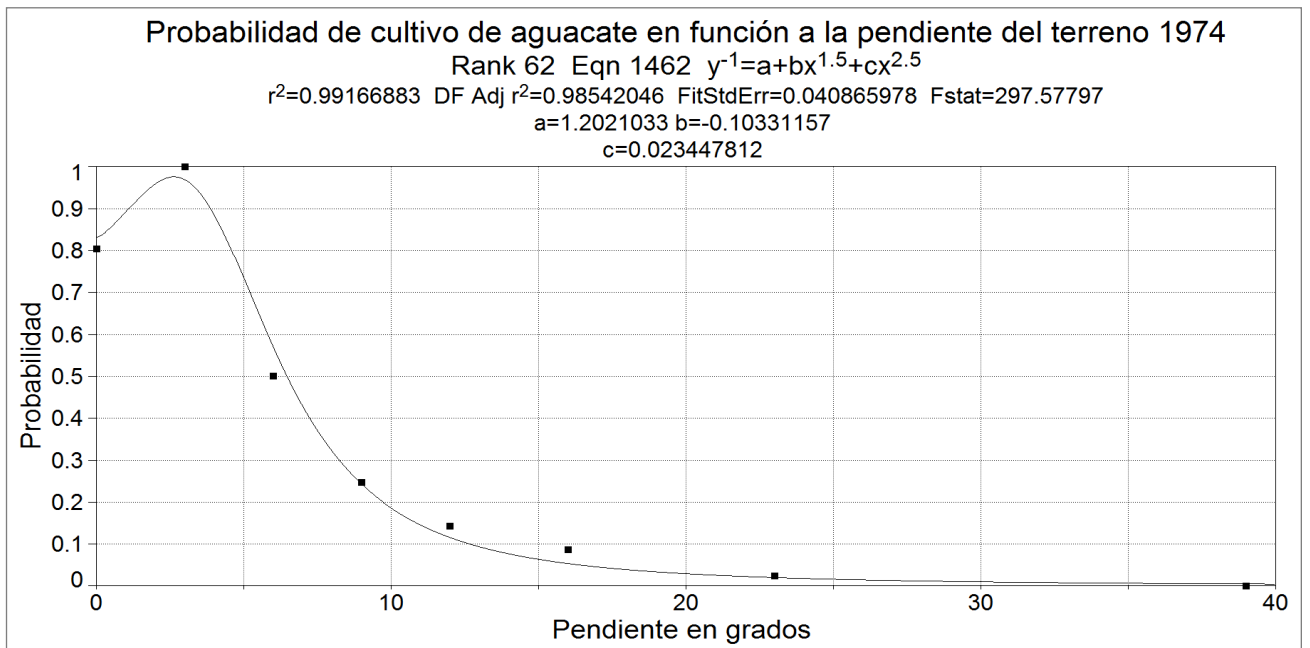


Figura 9. Función matemática que se ajusta a la distribución de la ubicación real del cultivo de aguacate con respecto a la pendiente del terreno para 1974.

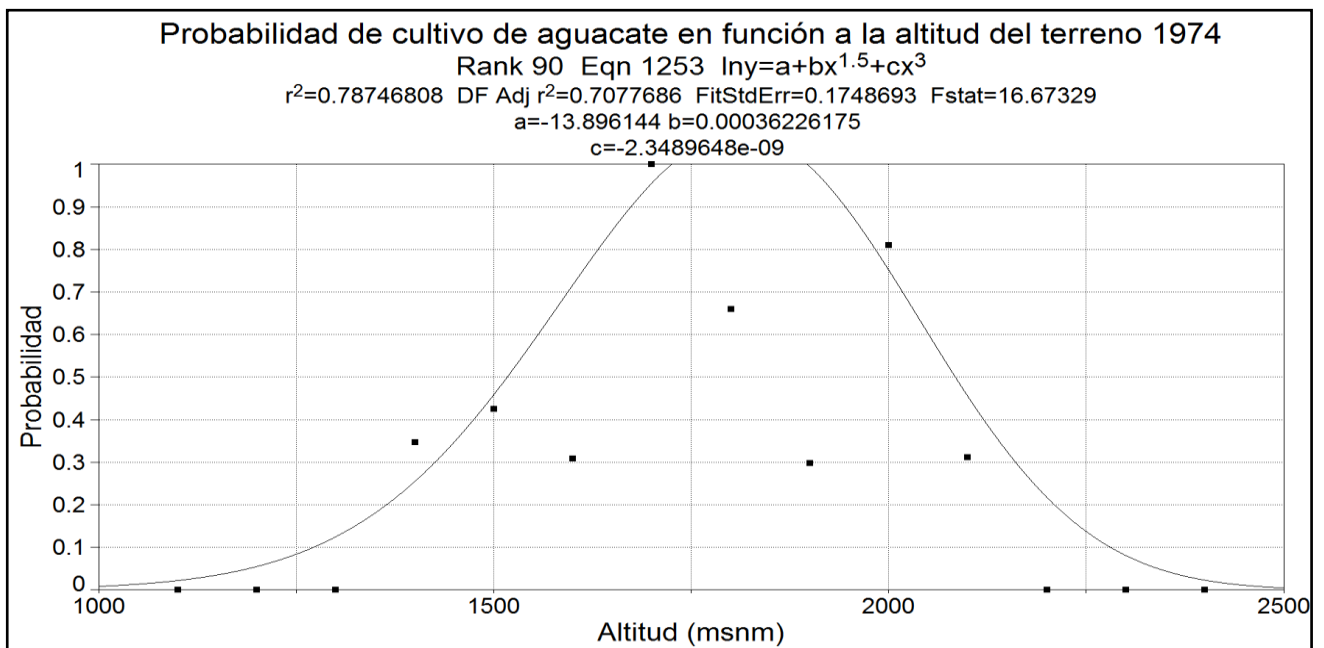


Figura 10. Función matemática que se ajusta a la distribución de la ubicación real del cultivo de aguacate con respecto a la altitud del terreno para 1974.

**Proximidad a matorral-pastizal inducido (m).** La función matemática que mejor representa la atracción del terreno por proximidad entre zonas de matorral-pastizal inducido y zonas de cultivo de aguacate para 1974, se muestra en la figura 11.

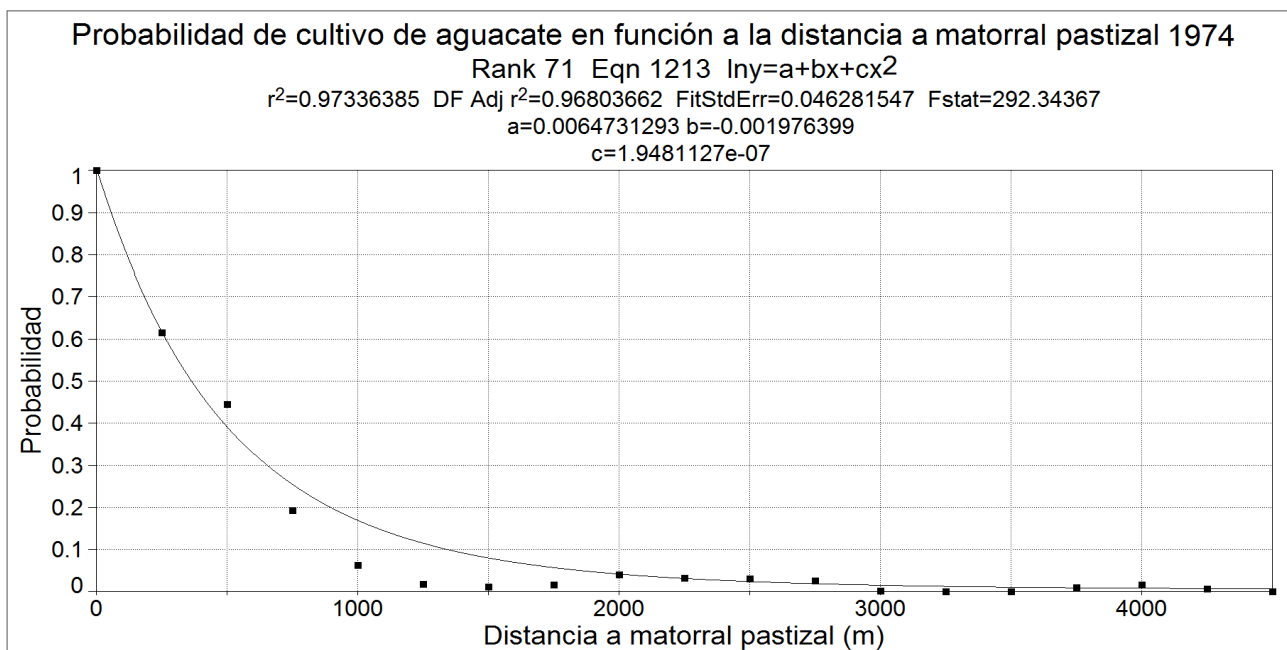


Figura 11. Función matemática que se ajusta a la distribución de la ubicación real del cultivo de aguacate con respecto a la proximidad a matorral-pastizal inducido para 1974.

**Proximidad a cultivo anual (m).** La forma de la proximidad entre el cultivo anual y el cultivo de aguacate para 1974 se ajustó a la función matemática  $y^{-1} = a + bx^2$  (Figura 12).

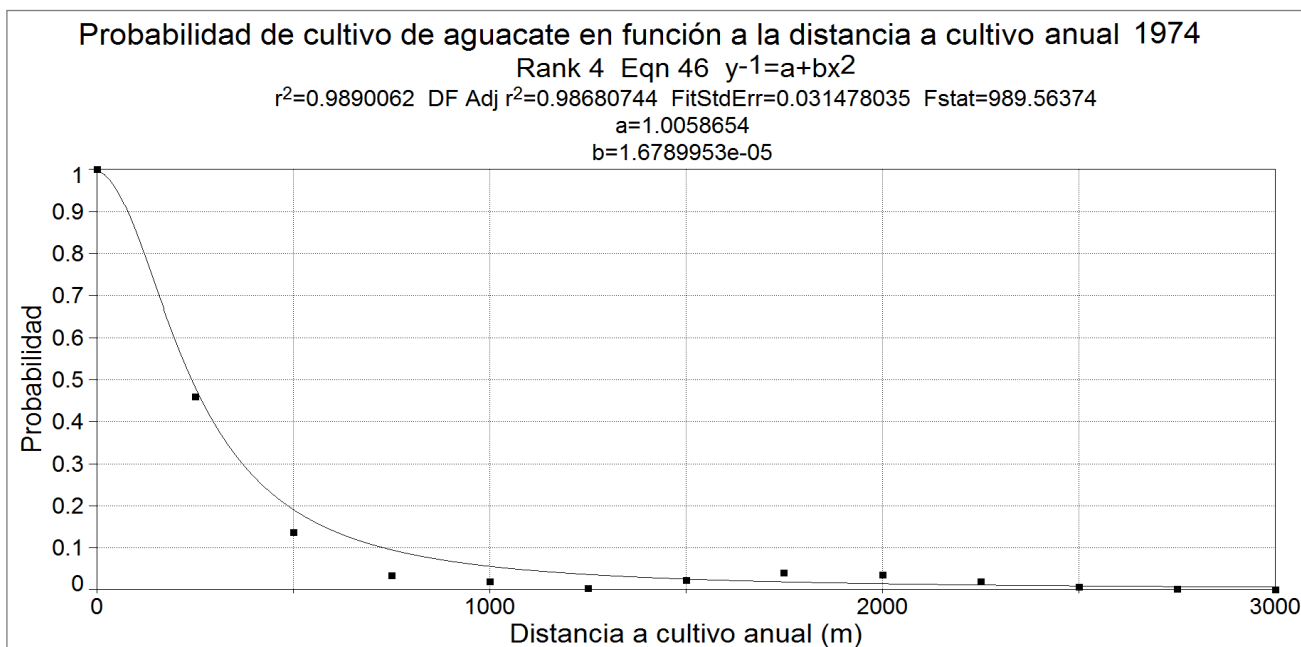


Figura 12. Función matemática que se ajusta a la distribución de la ubicación real del cultivo de aguacate con respecto a la proximidad a cultivo anual para 1974.

**Proximidad a caminos (m).** La función matemática que mejor se ajusta a la distribución del cultivo de aguacate en relación con la proximidad a caminos es  $y^{-1} = a+bx^{2.5}$ , observada en la figura 13.

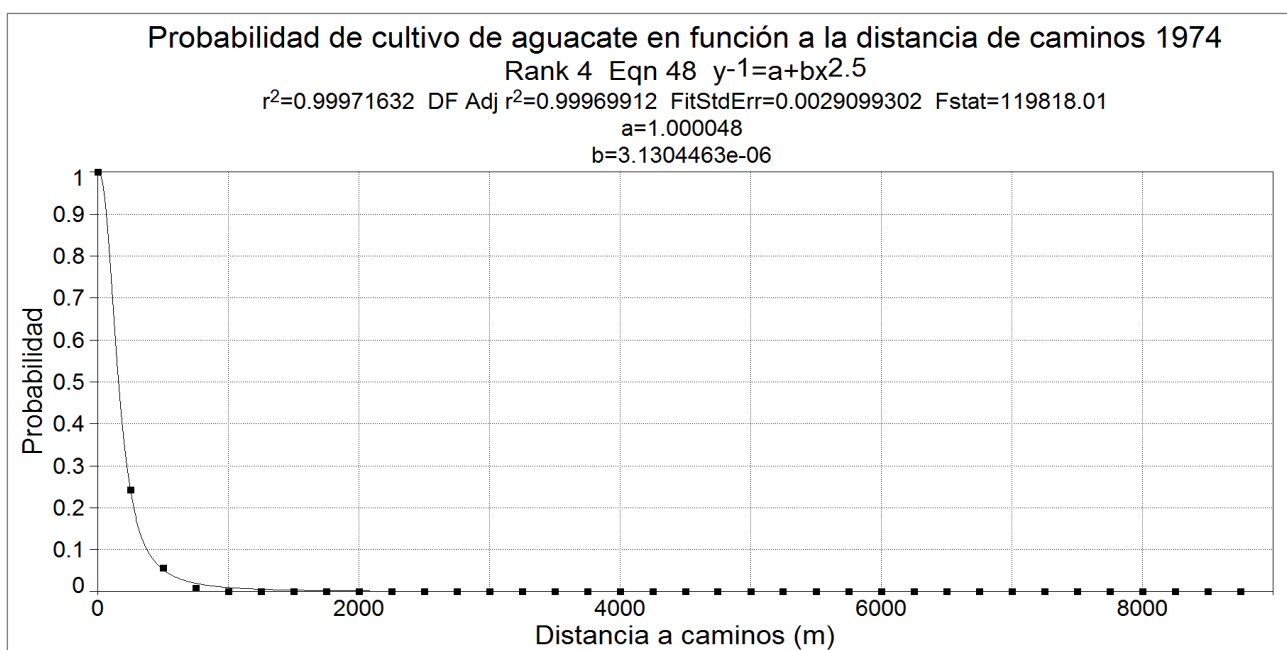


Figura 13. Función matemática que se ajusta a la distribución de la ubicación real del cultivo de aguacate con respecto a la proximidad a caminos para 1974.

**Proximidad a asentamientos humanos (m).** La función matemática que mejor representa la atracción del terreno por proximidad entre el cultivo de aguacate y los asentamientos humanos para 1974 se muestra en la figura 14.

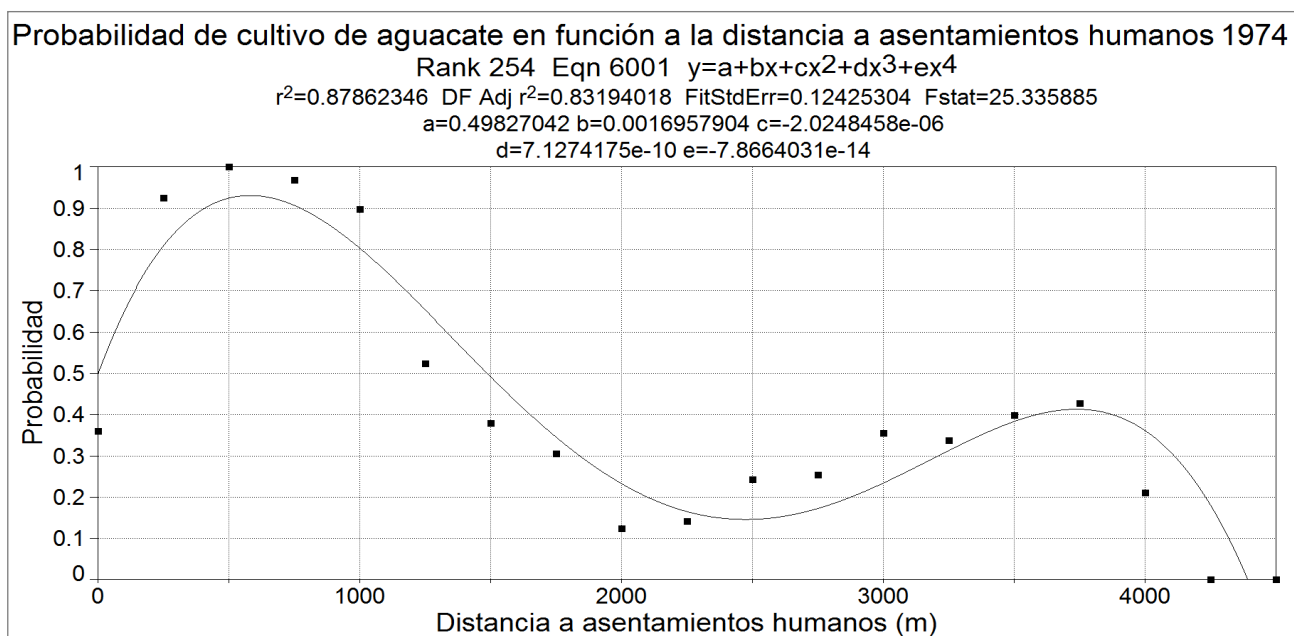


Figura 14. Función matemática que se ajusta a la distribución de la ubicación real del cultivo de aguacate con respecto la proximidad a asentamientos humanos en 1974.

### 7.1.3.2. Probabilidad de cultivo de aguacate en función a los elementos del paisaje relevantes de 1995

**Coincidencia con la pendiente del terreno.** La forma de la distribución de la relación de coincidencia entre la pendiente del terreno y el cultivo de aguacate para 1974 se ajustó a la función matemática  $y^{-1} = a + bx^{1.5} + cx^2$  con una  $R^2$  de 0.99 (Figura 15).

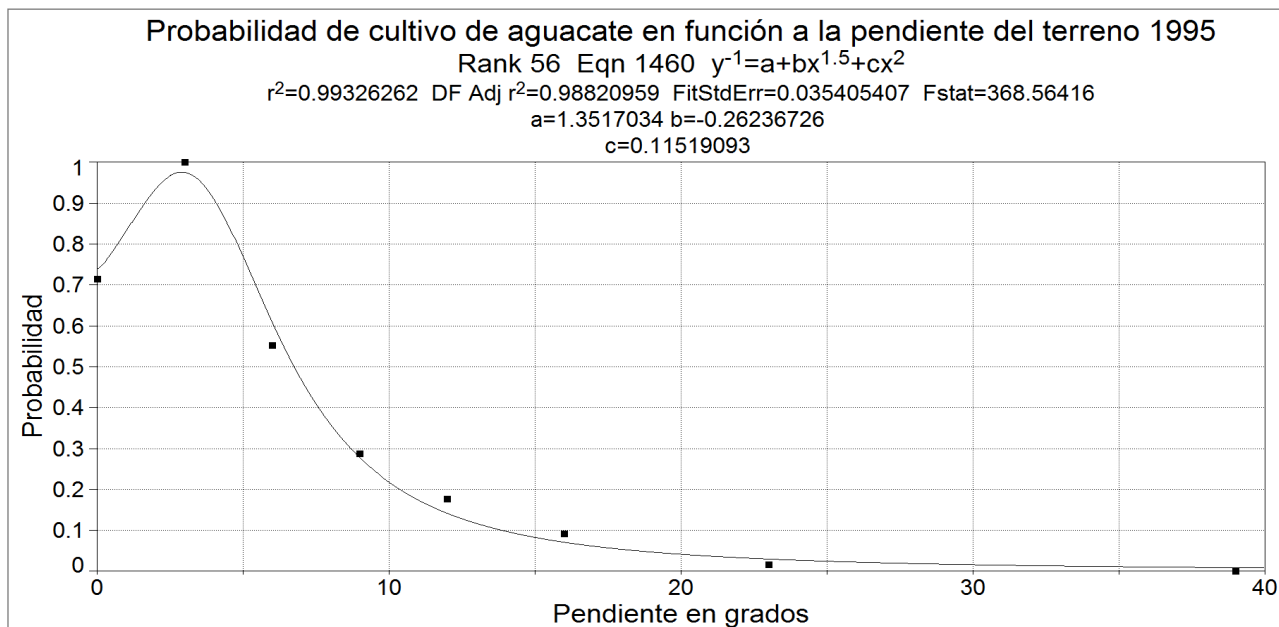


Figura 15. Función matemática que se ajusta a la distribución de la ubicación real del cultivo de aguacate con respecto a la pendiente del terreno para 1995.

**Coincidencia con la altitud del terreno (m).** La forma de la distribución de la ubicación real del cultivo de aguacate con respecto a su coincidencia con la altitud del terreno (msnm) en 1995 se ajustó a la ecuación de la figura 16, con una  $r^2$  de 0.95.

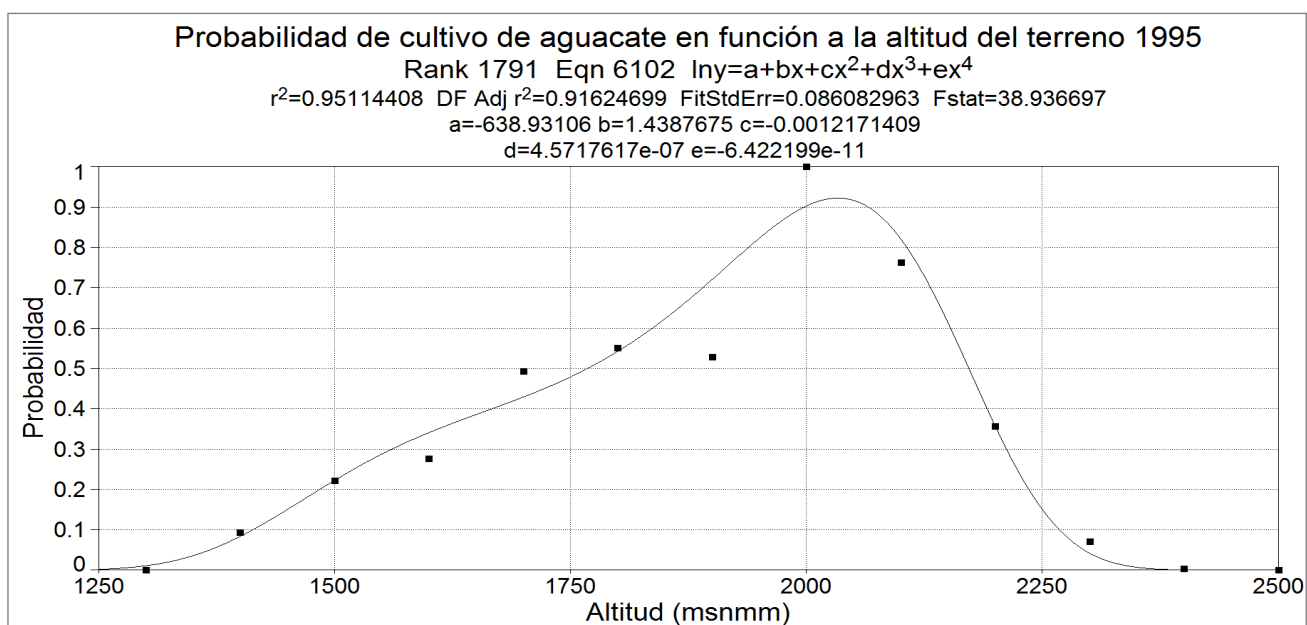


Figura 16. Función matemática que se ajusta a la distribución de la ubicación real del cultivo de aguacate con respecto a la altitud del terreno para 1995.

### 7.1.3.3. Probabilidad de cultivo de aguacate en función a los elementos del paisaje relevantes de 2011

**Coincidencia con la pendiente del terreno.** La forma de la coincidencia entre la pendiente del terreno y el cultivo de aguacate para 2011 se ajustó a la función matemática  $y^{-1} = a+bx+cx^{1.5}$  con una  $R^2$  de 0.99 (Figura 17).

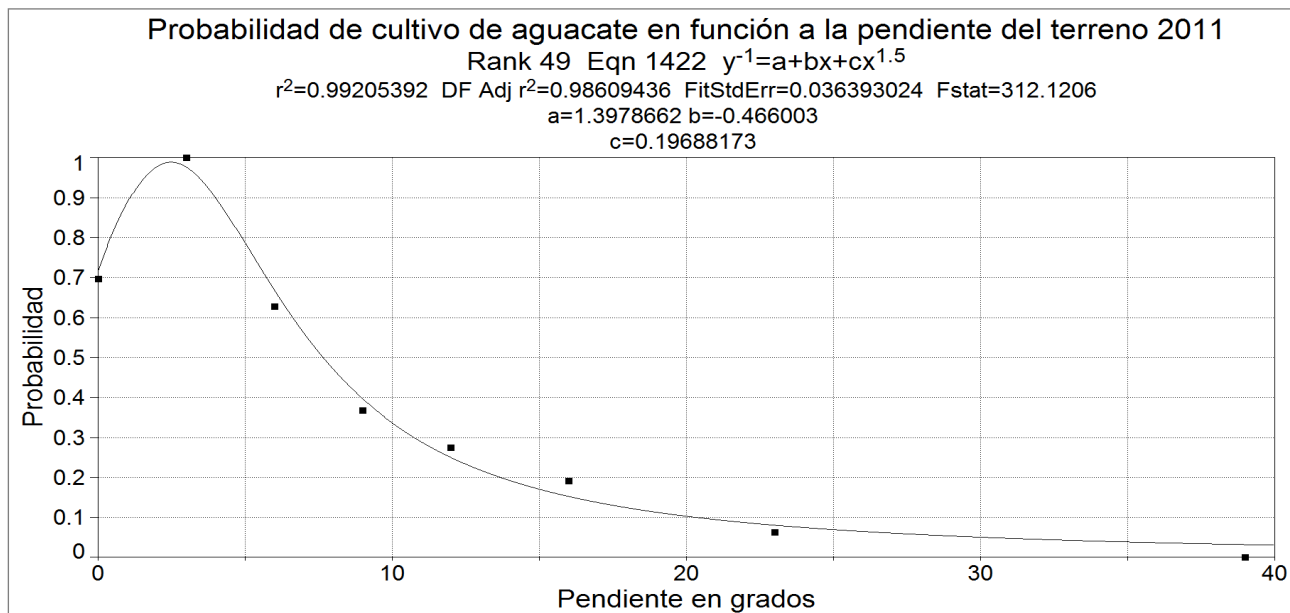


Figura 17. Función matemática que se ajusta a la distribución de la ubicación real del cultivo de aguacate con respecto a la pendiente del terreno para 2011.

**Coincidencia con la altitud del terreno (m).** La forma de la distribución de la ubicación real del cultivo de aguacate con respecto a la coincidencia con la altitud del terreno (msnm) en 2011 se adaptó a la ecuación de la figura 18, con una  $R^2$  de 0.92.

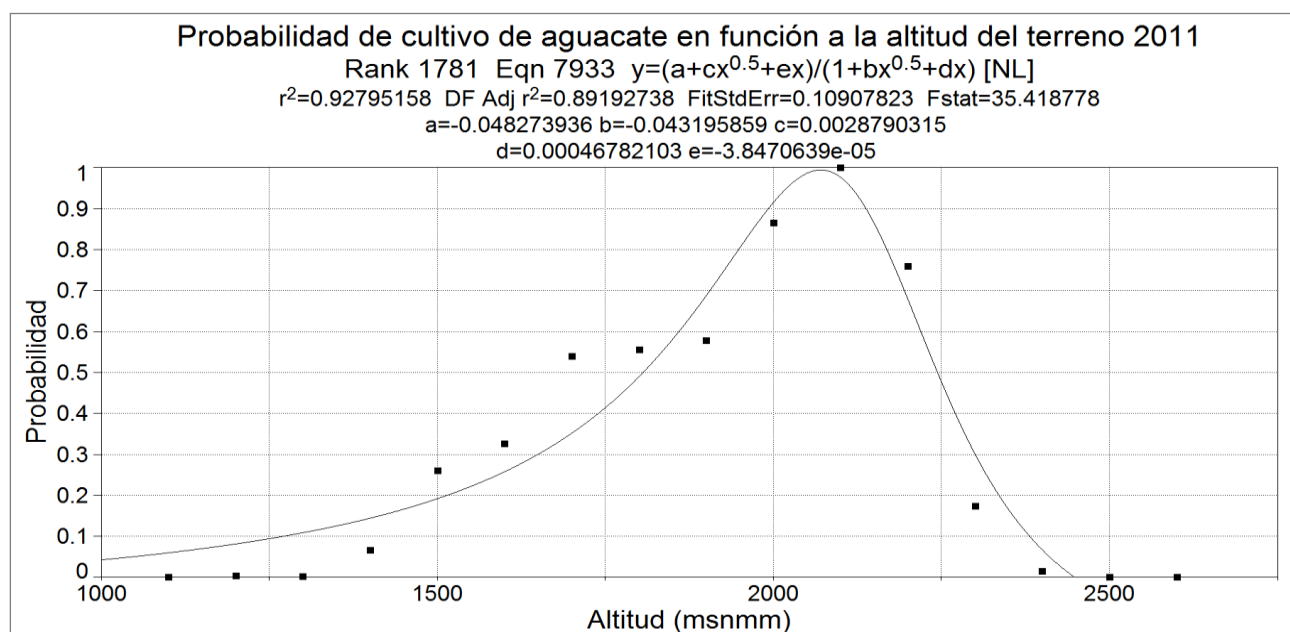


Figura 18. Función matemática que se ajusta a la distribución de la ubicación real del cultivo de aguacate con respecto a la altitud del terreno para 2011.

#### 7.1.4. Grado de influencia de las relaciones relevantes en la toma de decisiones de uso del suelo para el cultivo de aguacate

La influencia de cada una de las relaciones relevantes se estimó en forma de los pesos que tienen en la decisión de uso del terreno para el cultivo de aguacate. Los pesos de influencia de las relaciones relevantes entre los elementos del paisaje y el cultivo de aguacate se determinaron para cada tiempo de análisis, según la metodología descrita en la sección correspondiente.

En 1974 los pesos de influencia de las relaciones de proximidad relevantes entre zonas de cultivo de aguacate y los elementos del paisaje de origen antrópico son homogéneos, tienen valores en su peso normalizado alrededor de 0.16, excepto la proximidad a los caminos, que tiene el peso mayor en la influencia del uso del terreno para el cultivo de aguacate con un peso normalizado de 0.23 (Cuadro 9). En cambio, la relación de coincidencia entre los elementos naturales del paisaje y el cultivo de aguacate tienen menos influencia en la decisión de uso del terreno para el cultivo de aguacate en 1974 con un peso normalizado de 0.15 para la coincidencia con la altitud (msnm), y un peso normalizado de 0.13 para la coincidencia con la pendiente del terreno. Estas diferencias son fácilmente explicables y se mencionan en la sección de discusión correspondiente, más abajo.

Cuadro 9. Influencia de las relaciones espaciales relevantes en el establecimiento de las huertas de aguacate en 1974, por peso estimado.

Relación espacial	Elemento del paisaje	Peso específico	Peso total normalizado
Proximidad	Asentamientos humanos	0.62	0.16
	<b>Caminos</b>	<b>0.86</b>	<b>0.23</b>
	Cultivo anual	0.67	0.17
	Matorral-pastizal inducido	0.60	0.16
Coincidencia	Altitud	0.55	0.15
	Pendiente	0.50	0.13

Sin embargo, en 1995 las relaciones relevantes para el cultivo de aguacate son solamente la coincidencia con los elementos del paisaje de origen natural, siendo la altitud (msnm) del terreno la que más influencia tuvo para decidir usar el terreno para el cultivo de



aguacate con un peso normalizado de 0.51 y seguida muy de cerca por la influencia de la pendiente del terreno con un peso normalizado de 0.49 (Cuadro 10).

Cuadro 10. Influencia de las relaciones espaciales relevantes en el establecimiento de las huertas de aguacate en 1995 por peso estimado.

<b>Relación espacial</b>	<b>Elemento del paisaje</b>	<b>Peso específico</b>	<b>Peso total normalizado</b>
Coincidencia	<b>Altitud</b>	<b>0.39</b>	<b>0.51</b>
	<b>Pendiente</b>	<b>0.37</b>	<b>0.49</b>

Los elementos naturales del paisaje son relevantes en los tres tiempos de análisis, sin embargo, es hasta el 2011 que la coincidencia con la pendiente del terreno es la que más influencia en la toma de decisiones de uso del terreno para el cultivo de aguacate con un peso de 0.66, pasando a segundo lugar la coincidencia con la altitud del terreno (msnm) con un peso de 0.34. En 2011, se observa también por primera vez diferencias significativas en los pesos de la influencia de las relaciones relevantes (Cuadro 11). Estas diferencias se explican en la sección de discusión correspondiente, más abajo.

Cuadro 11. Influencia de las relaciones espaciales relevantes en el establecimiento de las huertas de aguacate en 2011 por peso estimado.

<b>Relación espacial</b>	<b>Elemento del paisaje</b>	<b>Peso específico</b>	<b>Peso total normalizado</b>
Coincidencia	Altitud	0.39	0.34
	<b>Pendiente</b>	<b>0.75</b>	<b>0.66</b>

### **7.1.5. Aplicación del modelo Agrilocal: la atracción del terreno para el cultivo de aguacate**

Conociendo la relevancia de las relaciones espaciales, la preferencia de los intervalos de cada una de las relaciones espaciales relevantes, la forma de la preferencia de las relaciones relevantes y la influencia de cada una de las relaciones relevantes en la toma de decisiones de uso del terreno para el cultivo de aguacate se obtuvo la atracción del terreno para identificar como han tomado sus decisiones de uso los productores a partir de su propia percepción (conocimiento) local.

Como se esperaba, la atracción del terreno varía dependiendo del tiempo de análisis. La figura 19 muestra el mapa de atracción del terreno para el cultivo de aguacate en 1974; en ese año tanto la coincidencia con los elementos naturales como la proximidad con los elementos antrópicos fueron relevantes, pero tuvo más influencia la proximidad a caminos en la decisión de uso del terreno para el cultivo del aguacate, por ello la atracción del terreno tiene los valores más altos cerca de los caminos (Figura 19).

En general, el terreno para el cultivo de aguacate en 1974 en la zona de estudio tiene una atracción de intermedia a alta, excepto en las montañas donde el acceso por caminos estaba restringido.

La proximidad a caminos en 1974 fue la relación espacial que más influyó en la decisión de uso del terreno para el cultivo de aguacate; sin embargo la proximidad a zonas de cultivo anual, a asentamientos humanos y a zonas de matorral-pastizal inducido también influyó en la toma de decisiones de manera significativa, resultado de ello es que encontremos terrenos próximos a los caminos pero que tengan una atracción para cultivo de aguacate baja, y eso ocurre porque tienen valores bajos de atracción en las demás relaciones espaciales relevantes.

La atracción del terreno para el cultivo del aguacate en 1995 ya solo depende significativamente de la coincidencia con la altitud y con la pendiente del terreno; siendo la altitud (msnm), con un peso de 0.51, el elemento del paisaje en influenciar en mayor medida la toma de decisiones de uso del suelo, y seguido por la influencia de la pendiente del terreno con un peso de 0.49, situación que no establece diferencia significativa entre la influencia de la altitud sobre la influencia de la pendiente del terreno en la toma de decisiones de uso del suelo.

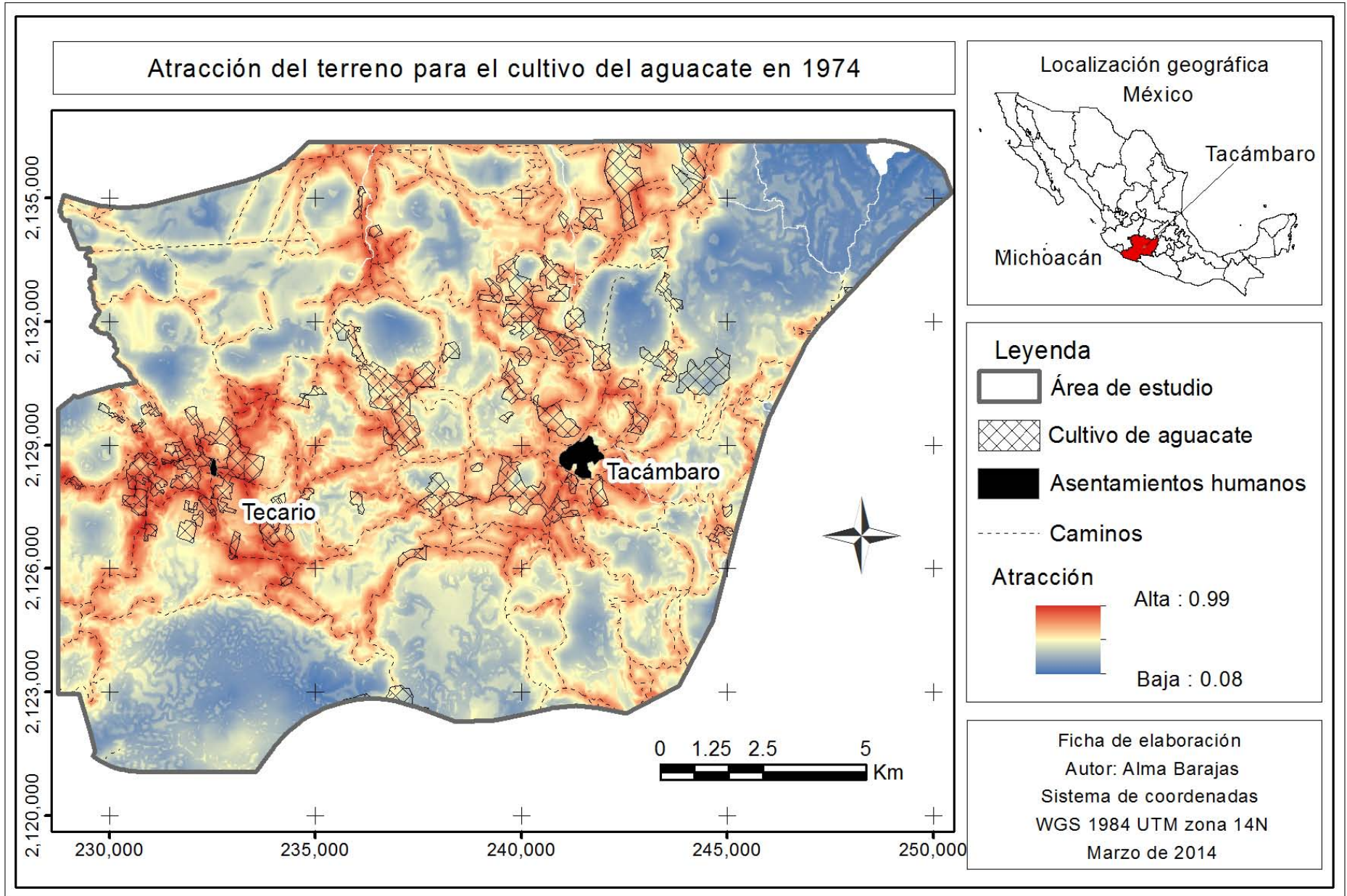


Figura 19. Atracción del terreno para el cultivo de aguacate en 1974.

Aun así, la coincidencia con la altitud (como proxy de la temperatura del aire) definía la mayor atracción del terreno para el cultivo de aguacate en 1995 (Figura 20), por lo que es claro este efecto en el mapa resultante de la aplicación del modelo Agrilocal para este año, al cual para mayor claridad de lo antes dicho se le han agregado las cotas de altitud de 1500, 1800 y 2100 msnm. Se observa, que en general la mayor atracción del terreno la tenían terrenos entre 1800 y 2100 msnm.

En general, para este año Tacámbaro, Michoacán seguía teniendo, con respecto a 1974 una atracción del terreno para el cultivo de aguacate de intermedia a alta. Como puede observarse en la figura 20 los terrenos a una altitud menor a 1500 msnm eran los menos atractivos para el cultivo de aguacate; sin embargo, donde el terreno era plano aunque estuviera alrededor de una altitud de 1500 msnm la atracción para el cultivo alcanzaba a ser todavía moderada, dada la influencia marcada del factor pendiente.

Como puede observarse en la figura 20 la preferencia dada por la pendiente del terreno en altitudes de alrededor de 1800 msnm también otorgaba una atracción moderada del terreno para el cultivo del aguacate, pero para las altitudes cercanas a la clase preferente (2100 msnm), la influencia conjunta de ambas relaciones dieron al terreno su máxima atracción.

En la actualidad, la atracción del terreno para el cultivo del aguacate es regulada por las mismas relaciones espaciales relevantes de 1995: coincidencia con la altitud del terreno y coincidencia con la pendiente del terreno. Sin embargo, en la actualidad la pendiente del terreno tiene una influencia mayor en la decisión de uso del terreno para el cultivo de aguacate con un peso de influencia de 0.66 lo cual difiere significativamente del peso de influencia de la altitud del terreno que tiene un valor de 0.34. Estas diferencias también pueden explicarse y se mencionan en la sección correspondiente, más abajo.

En general, para este período, puede decirse que la pendiente del terreno regula la atracción del terreno para el cultivo de aguacate en Tacámbaro, Michoacán. En comparación con las otras dos fechas, la atracción del terreno en la actualidad tiene alta o baja atracción; y muy pocas zonas tienen atracción intermedia para el cultivo del aguacate (Figura 20). Este efecto marcado en los niveles de atracción del terreno también puede explicarse más adelante en el apartado de discusión.

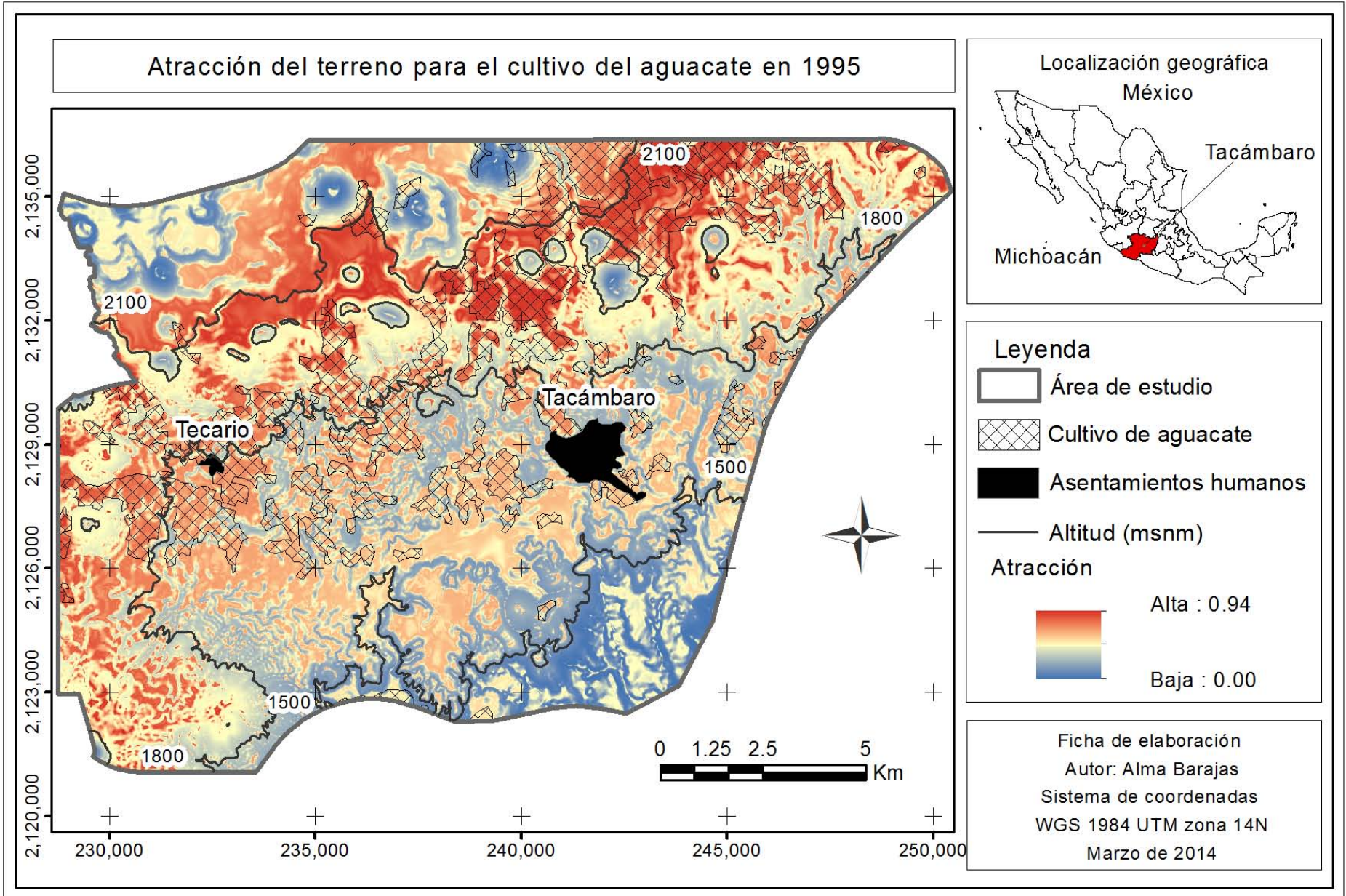


Figura 20. Atracción del terreno para el cultivo de aguacate en 1995.

Como puede observarse en la figura 21 los terrenos al norte del municipio de Tacámbaro, Michoacán son los más atractivos para el cultivo del aguacate por la influencia conjunta de la pendiente y la altitud (msnm); en cambio, la atracción del resto del terreno de Tacámbaro está influenciada de manera determinante por la pendiente del terreno, incluso es común ver que el límite entre la atracción baja y alta concuerda con las laderas de las montañas.

El modelo Agrilocal, basado en la percepción y/o el conocimiento local de los agricultores, plasmados en el uso y en el cambio del uso del suelo, nos permitió por medio de los mapas de atracción del terreno antes descritos conocer como han tomado históricamente los productores aguacateros sus decisiones de uso del terreno.

Para realizar una evaluación de tierras además de considerar el conocimiento local por medio del modelado espacial, es necesario realizar un levantamiento de información física de: el relieve, los suelos, el clima y el uso del suelo.

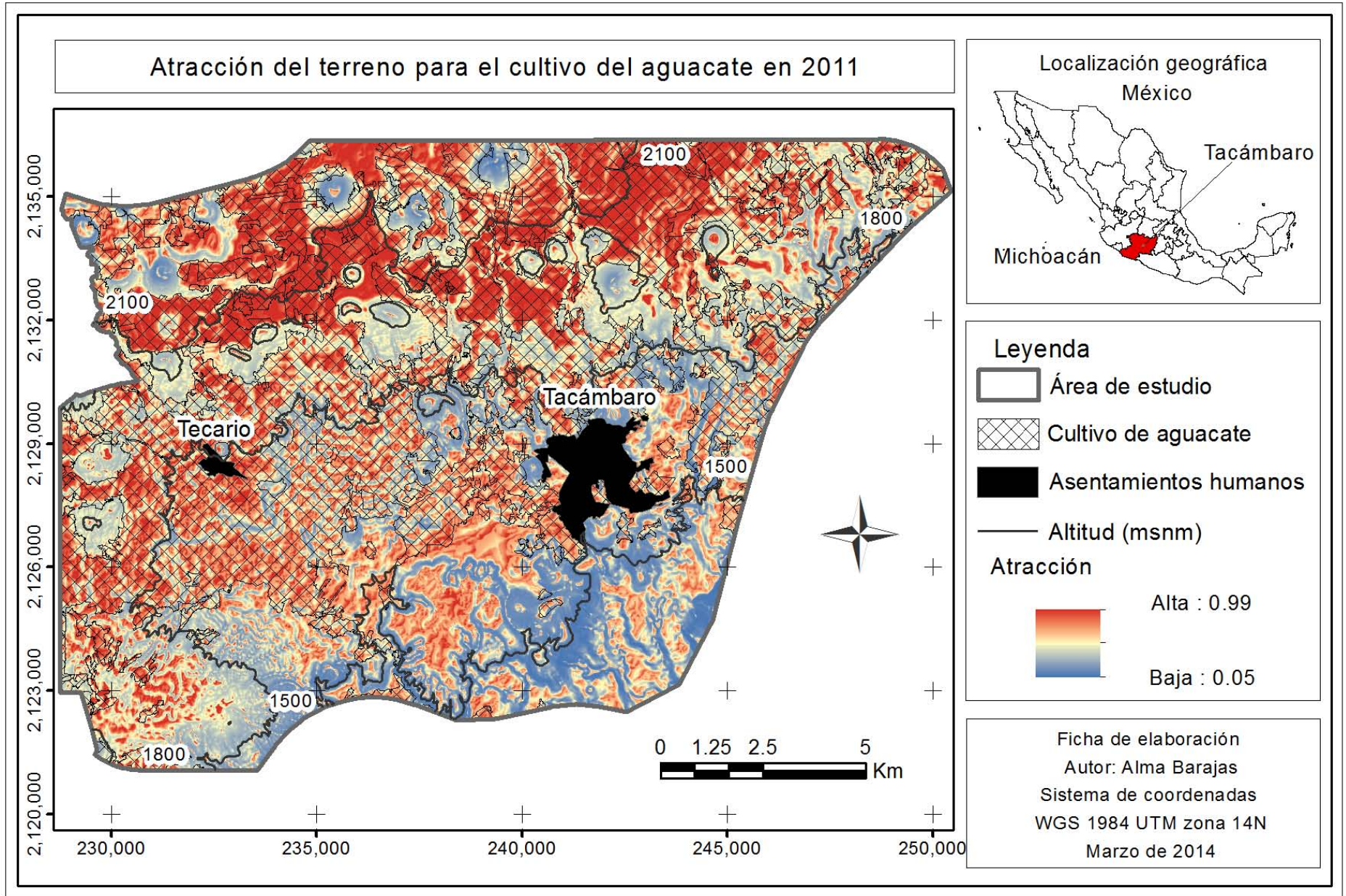


Figura 21. Atracción del terreno para el cultivo de aguacate en 2011.

## 7.2. Geoformas de Tacámbaro, Michoacán, México

De la superficie total del área de estudio (2,406.5 ha), 46.4% son montañas que están acomodadas de tal forma que generan pequeñas cordilleras que diferencian al área de estudio en lomeríos, piedemonte y planicies del norte; y, lomeríos, piedemonte y planicies del centro. El piedemonte ocupa el 46% de la superficie total, mientras que la planicie y el lomerío ocupan nada más el 4.5 y 3% respectivamente.

Las geoformas se utilizaron para identificar los puntos de muestreo de los suelos de forma sistematizada. En general, los puntos de muestreo se encuentran en piedemonte (siete puntos) y en montaña (3 puntos). Sin embargo, también se muestrearon los suelos en planicie y lomerío (Figura 22).

Además de considerar las geoformas para muestrear los suelos se consideró la presencia y estadío del cultivo de aguacate. Como puede observarse en el cuadro 12 las huertas más antiguas con 50 años de cultivo de aguacate se encuentran en piedemonte y planicie; mientras que las huertas con 15 años de antigüedad están en piedemonte y lomerío. En cambio, las huertas de aguacate con menos de 5 años de antigüedad se ubican en montaña y piedemonte.

La presencia y estadío del cultivo de aguacate tiene una relación directamente proporcional con el desarrollo de los suelos; y, por ende con la clasificación de los suelos. El siguiente apartado describe con mayor detalle los suelos de Tacámbaro.

Cuadro 12. Puntos de muestreo de acuerdo con la presencia y estadío del cultivo de aguacate.

Punto de muestreo	Geoforma	Cubierta del suelo	Estadío del cultivo de aguacate en años
1	Piedemonte	Cultivo de aguacate	15
2	Piedemonte	Cultivo de aguacate	5
3	Piedemonte	Cultivo de aguacate	50
4	Piedemonte	Cultivo de aguacate	50
5	Montaña	Cultivo de aguacate	5
6	Piedemonte	Cultivo anual	0
7	Planicie	Cultivo de aguacate	50
8	Lomerío	Cultivo de aguacate	15
9	Montaña	Cultivo de aguacate	1
10	Piedemonte	Cultivo de aguacate	15
11	Montaña	Bosque	0
12	Piedemonte	Cultivo de aguacate	50



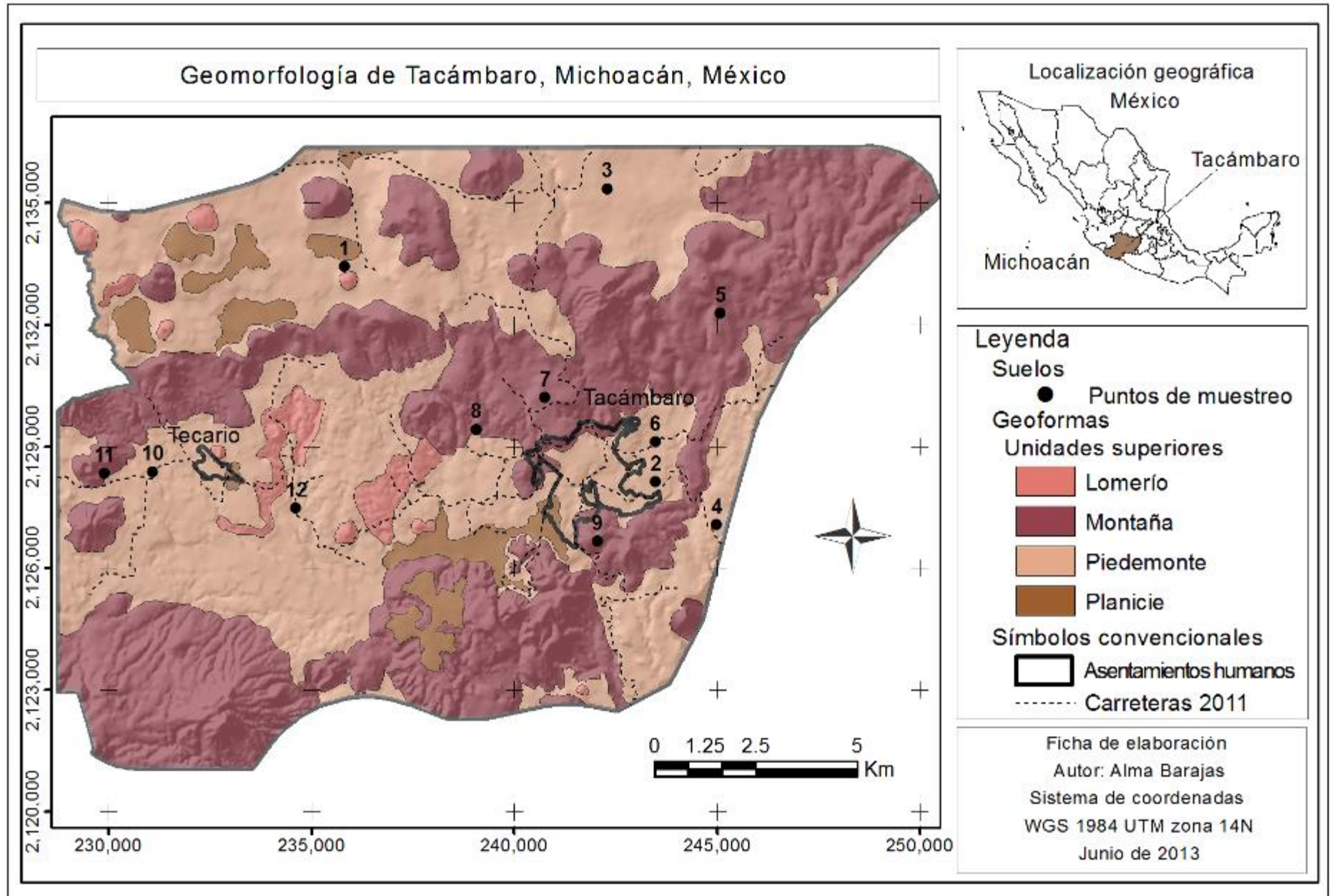


Figura 22. Mapa geomorfológico de Tacámbaro, Michoacán, México.

### 7.3. Los suelos de Tacámbaro, Michoacán, México

Para identificar el uso más adecuado de las tierras se deben de considerar las propiedades de los horizontes de los suelos. La clasificación de suelos nos permite conocer rápidamente cuáles son las propiedades más destacables de los suelos. Además, permite inferir el origen, desarrollo y uso del suelo.

#### 7.3.1. Clasificación de suelos

A grandes rasgos los grupos de suelos presentes en Tacámbaro son: Andosol, Umbrisol, Luvisol, Technosol y Regosol.

**Andosols.** Suelos de origen volcánico con una baja densidad aparente  $<0.9 \text{ g cm}^{-3}$ . Su desarrollo se da por la meteorización de material volcánico que forma complejos órgano-minerales ricos en alofano. Los Andosols son ricos en Al y Fe libres, los cuales retienen el fósforo en el suelo impidiendo que las plantas lo absorban. Los Andosols por su baja densidad aparente permiten el crecimiento de las raíces de las plantas y comúnmente tienen una alta capacidad de retención de humedad. Su uso principal es para la producción agrícola; sin embargo, los Andosols en terrenos con pendientes pronunciadas es mejor usarlos para la conservación de la naturaleza manteniéndolos con su vegetación natural.

**Umbrisols.** Suelos que se originan por la acumulación de materia orgánica en la superficie de un suelo mineral, el horizonte superficial conocido como Umbric tiene colores pardos oscuros con un contenido de carbono orgánico mayor a 0.6 %. Tienen una saturación con bases menor a 50%.

Para que se originen y desarrollen los Umbrisols es necesario el aporte continuo de materia orgánica de la vegetación, por ello el principal uso de estos suelos es para la conservación de la naturaleza por su relación directa con el almacenamiento y captura de carbono orgánico; sin embargo, los UM también se usan en la producción agrícola.

**Luvisols.** En este caso los Luvisols de Tacámbaro, Michoacán son originados por la intemperización de material volcánico por millones de años lo cual llevó a la migración de arcillas al horizonte subsuperficial formando el horizonte Argic, criterio de diagnóstico para identificar un Luvisols.

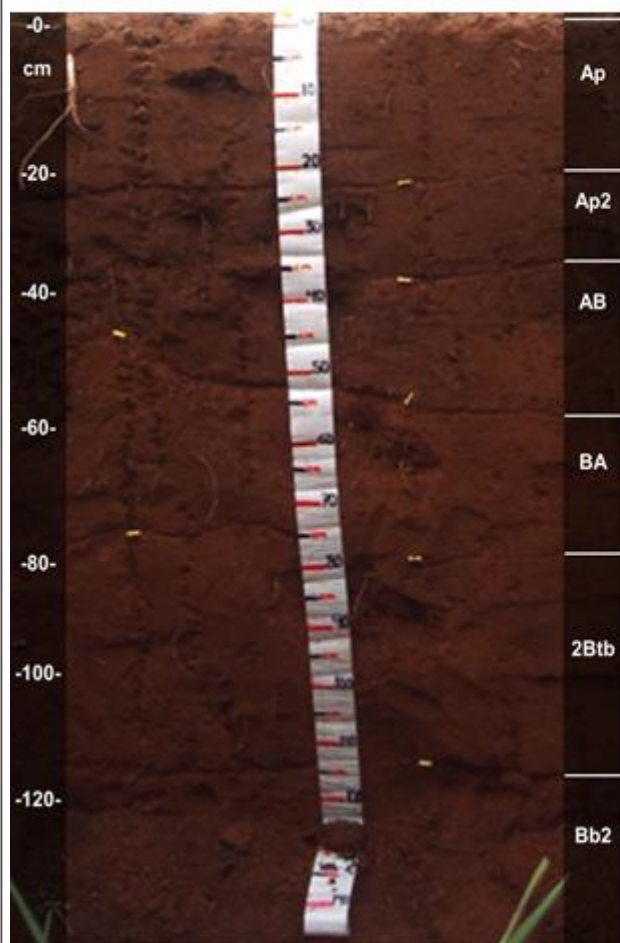
La mayoría de los LV son suelos fértiles para el cultivo de cualquier producto agrícola. Sin embargo, los Luvisols en pendientes pronunciadas requieren medidas de control de la erosión, además estos suelos se vuelven impermeables cuando se satura de agua el horizonte superficial.

**Technosols.** Suelos con una alta influencia humana en su desarrollo. Es decir, son suelos que pueden ser cualquier grupo de suelo de origen natural pero influenciado por las actividades antrópicas en su desarrollo. Son suelos que están formados por materiales que el hombre ha depositado; por ejemplo para pavimentar calles situación que vuelve a los suelos impenetrables, impermeables y sólo pueden ser utilizados para asentamientos humanos.

**Regosols.** Suelos relativamente poco desarrollados; es decir carecen de una propiedad u horizonte de diagnóstico distinguible. Lo cual no significa que no tengan aptitud agrícola, más bien este grupo de suelo tiene un desarrollo mínimo del perfil de suelo como consecuencia de edad joven y/o lenta formación del suelo. Los Regosols como la mayoría de los suelos son usados para la producción agrícola.

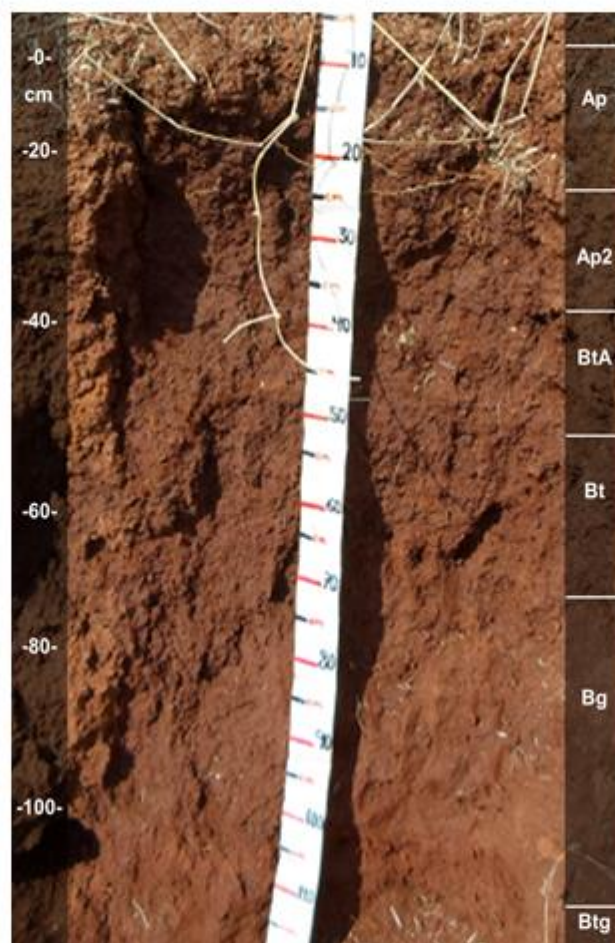
A mayor detalle cada uno de los perfiles de suelo se clasificó con sus calificadores principales y suplementarios (Figura 23, 24, 25 y 26).

### Clasificación de los perfiles de suelo muestreados



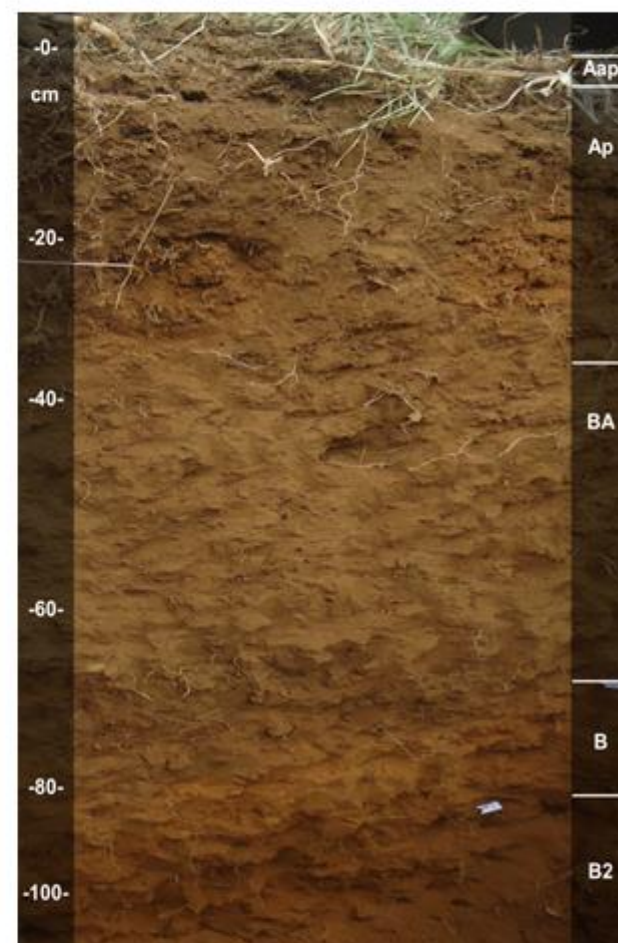
1

Umbric Andosol (Aric, Loamic)



2

Stagnic Nudiargic Chromic Luvisol  
(Cutanic, Aric, Clayic)

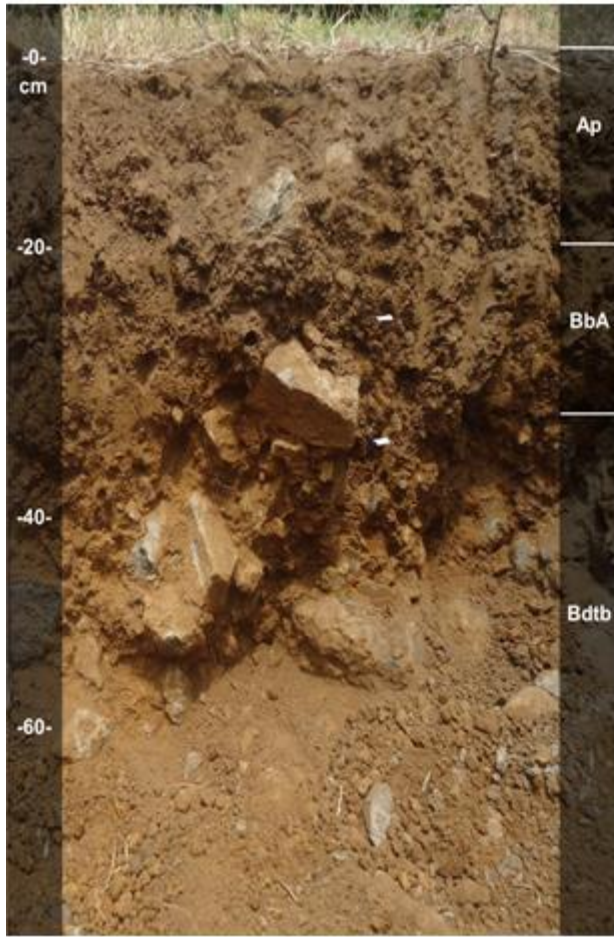


3

Someriumbric Andosol (Aric, Loamic)

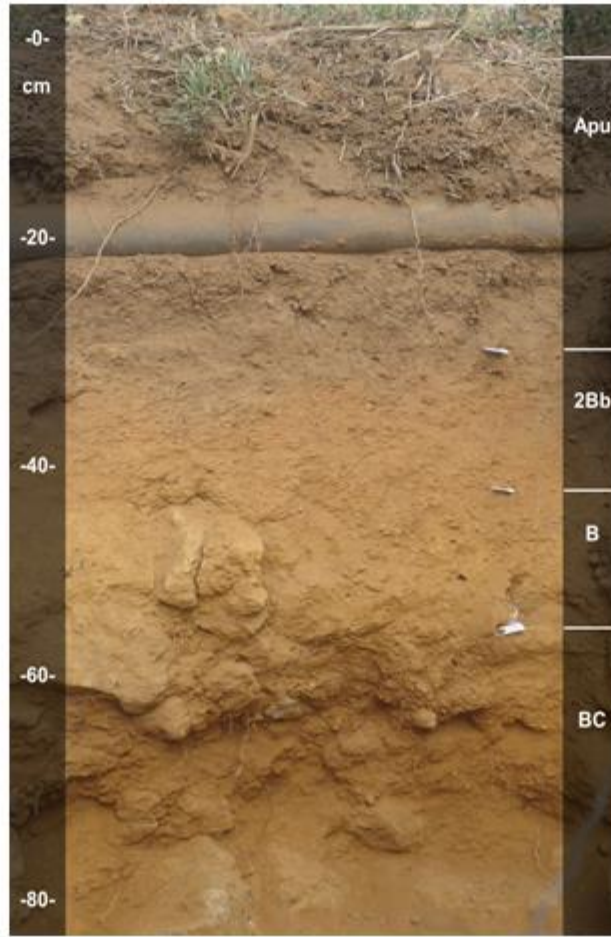
Figura 23. Clasificación de los perfiles muestreados 1, 2 y 3.

### Clasificación de los perfiles de suelo muestreados



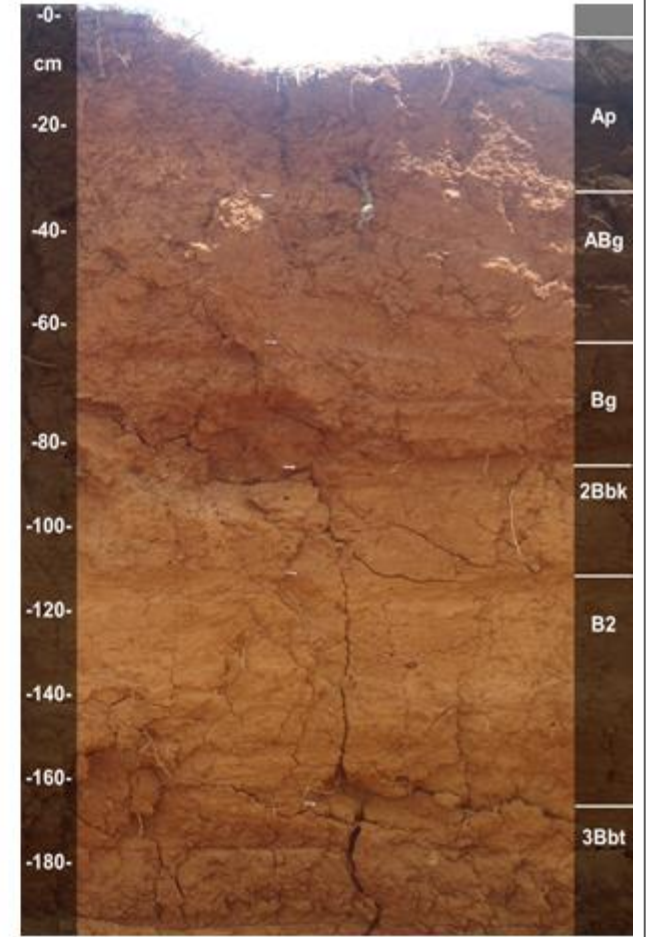
4

Leptic Skeletic Regosol (Ruptic, Aric, Clayic)



5

Umbric Skeletic Andosol (Aric, Siltic)

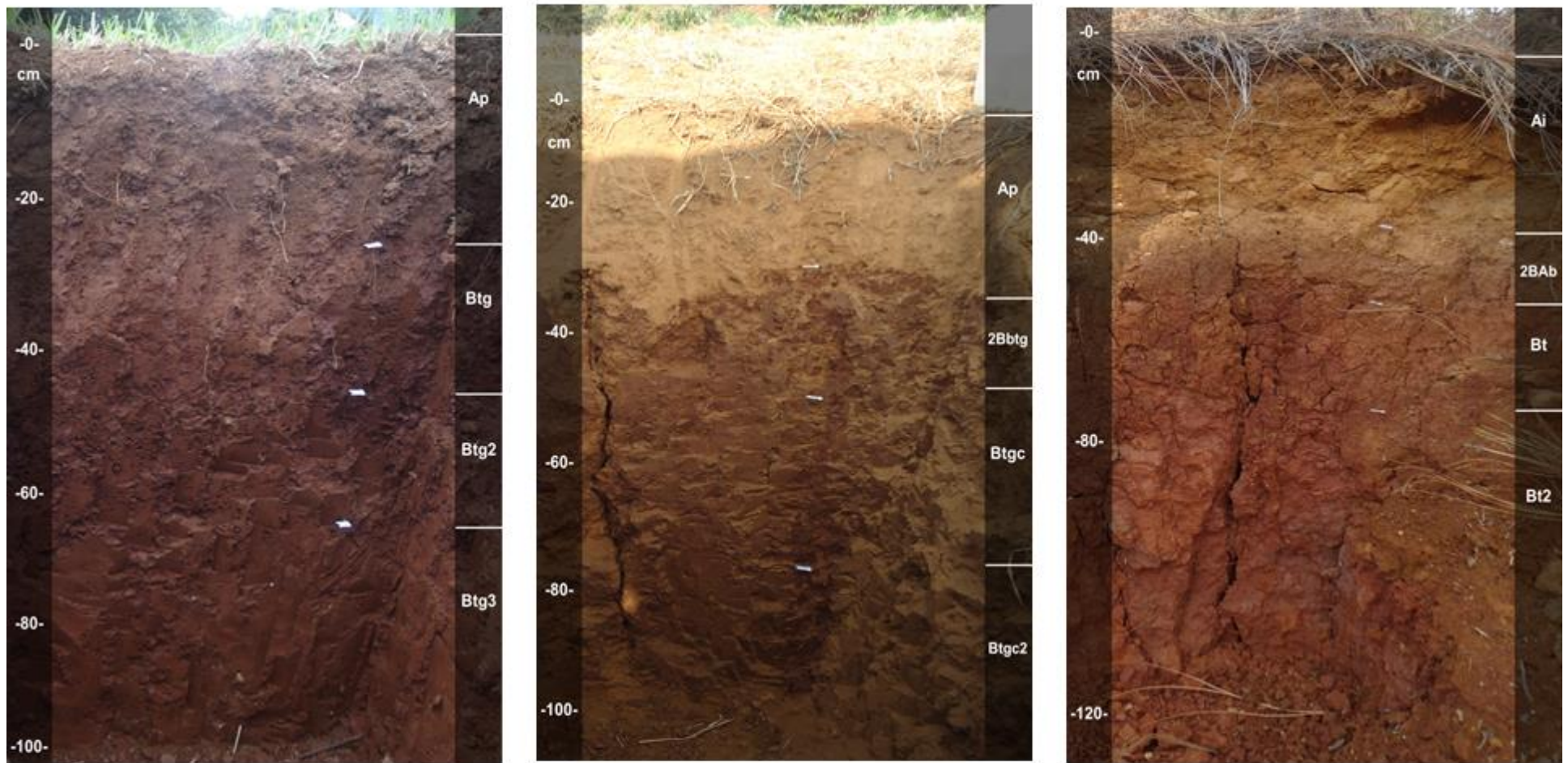


6

Chromic Luvisol (Ruptic, Cutanic, Aric, Clayic, Andic)

Figura 24. Clasificación de los perfiles muestreados 4, 5 y 6.

Clasificación de los perfiles de suelo muestreados



7

Hydragric Chromic Luvisol (Ruptic, Cutanic, Aric, Clayic, Andic)

8

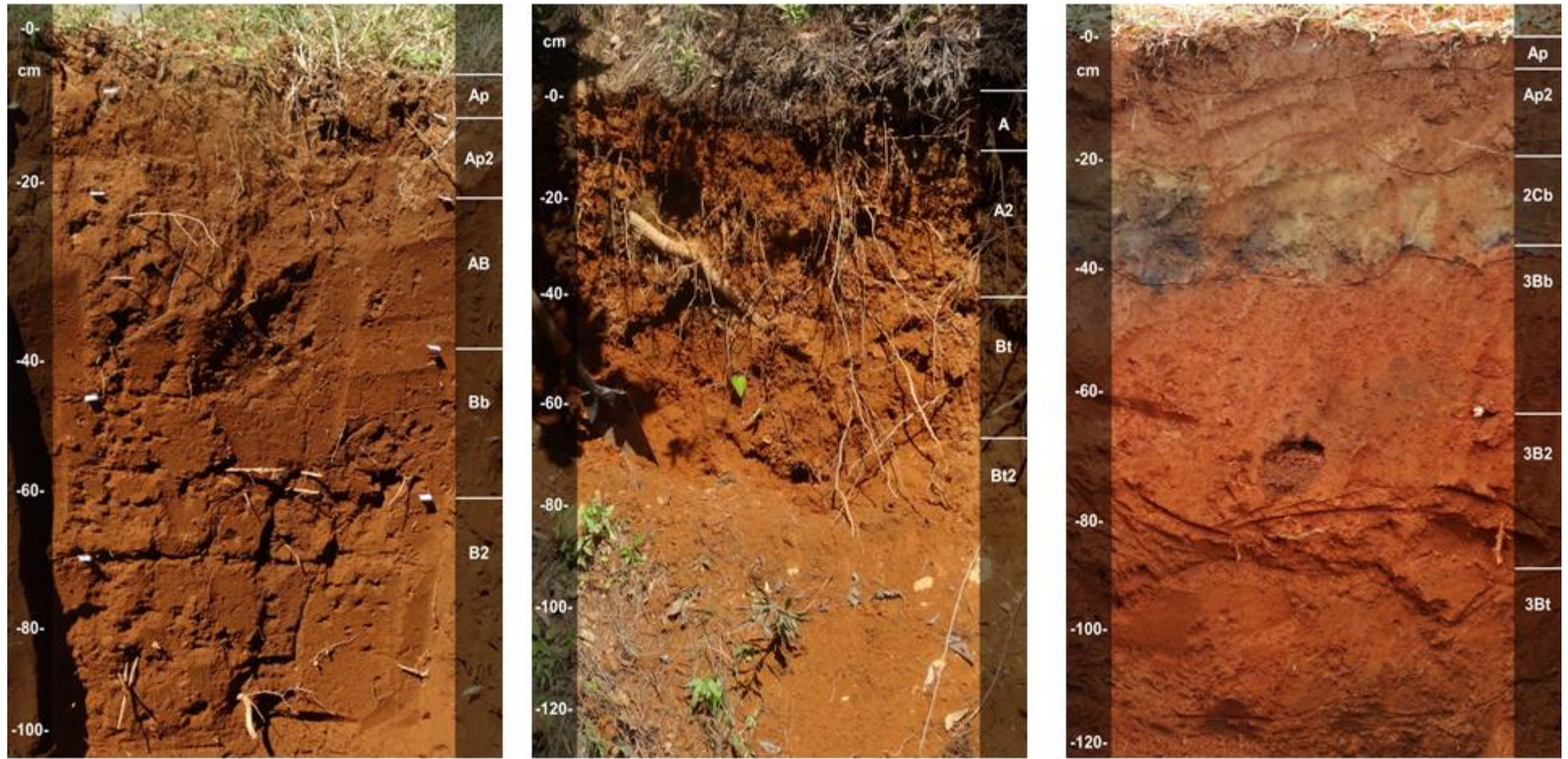
Vertic Chromic Luvisol (Loamicnovic, Densic, Aric, Clayic, Andic)

9

Vertic Chromic Luvisol (Loamicnovic, Epidystric, Clayic, Andic)

Figura 25. Clasificación de los perfiles muestreados 7, 8 y 9.

### Clasificación de los perfiles de suelo muestreados



10

Someric Umbrisol (Chromic, Aric, Loamic, Andic)

11

Chromic Luvisol (Loamic, Andic)

12

Someric Acric Umbrisol (Areninovic, Thaptochromic, Aric, Andic, Abruptic)

Figura 26. Clasificación de los perfiles muestreados 10, 11 y 12.

### **7.3.2. Mapa de suelos**

De acuerdo con los grupos de suelos presentes en Tacámbaro (Andosol, Umbrisol, Luvisol, Technosol y Regosol) y con la clasificación detallada de los perfiles de suelos se obtuvo la cartografía de los grupos de suelos (Figura 27).

El suelo Umbric Andosol tiene la mayor extensión del área ocupando 8928 ha; seguido por el Chromic Luvisol que ocupa 5111 ha; en tercer lugar por extensión de área está el Someric Umbrisol con 4281 ha; seguido por el Leptic Regosol con 2996 ha de área; mientras que el Urbic Technosol tiene un área de 593 ha y por último el Stagnic Luvisol con 57 ha.



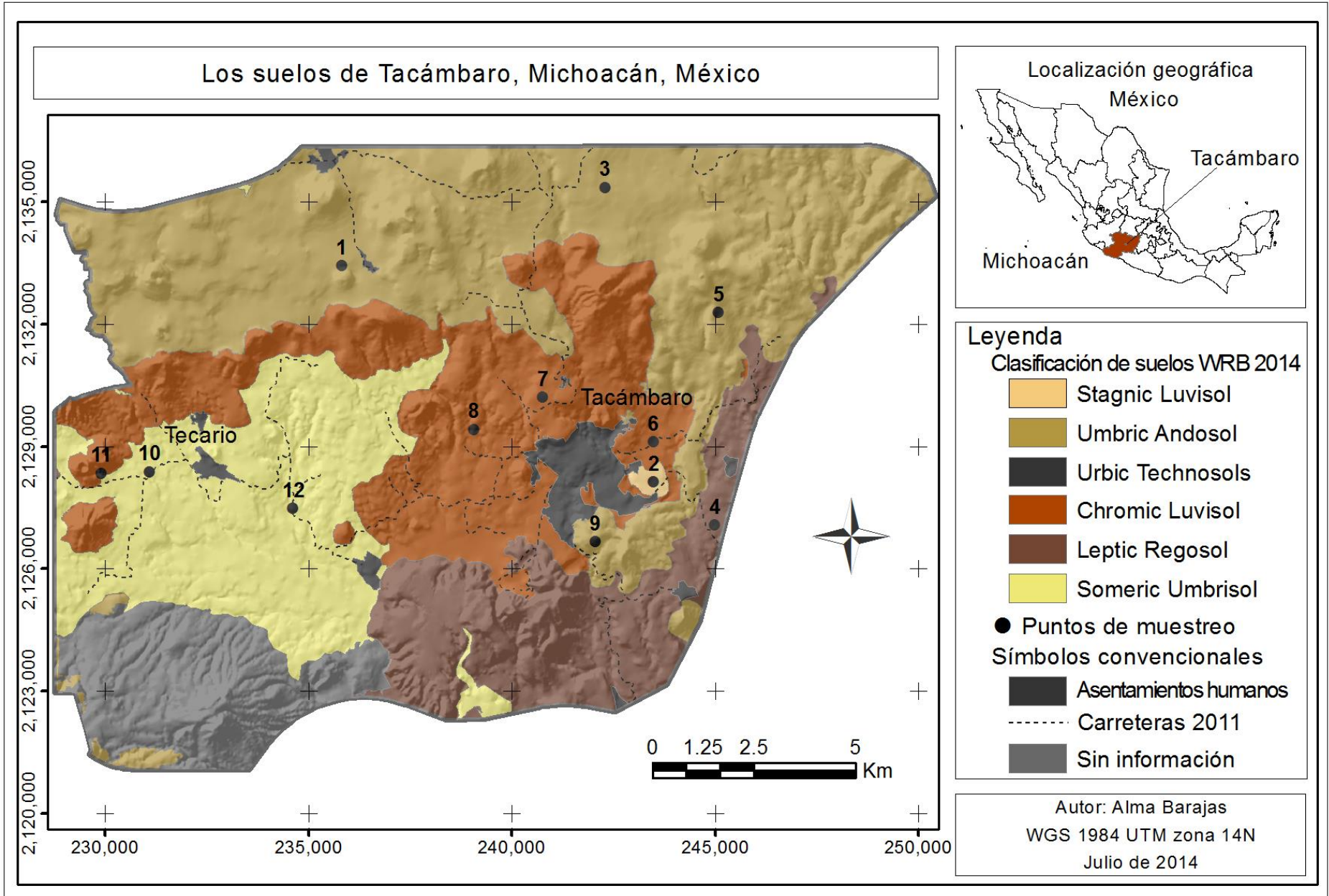


Figura 27. Mapa de suelos de Tacámbaro, Michoacán, México.

#### **7.4. Aptitud climática para el cultivo de aguacate**

En general la aptitud climática para el cultivo de aguacate en Tacámbaro, Michoacán es de apta a muy apta (Figura 28). Sin embargo, al sureste de Tacámbaro la aptitud climática no es apta para el cultivo; en cambio al noroeste las tierras son medianamente aptas para obtener altos rendimientos de aguacate con base en las condiciones climáticas.

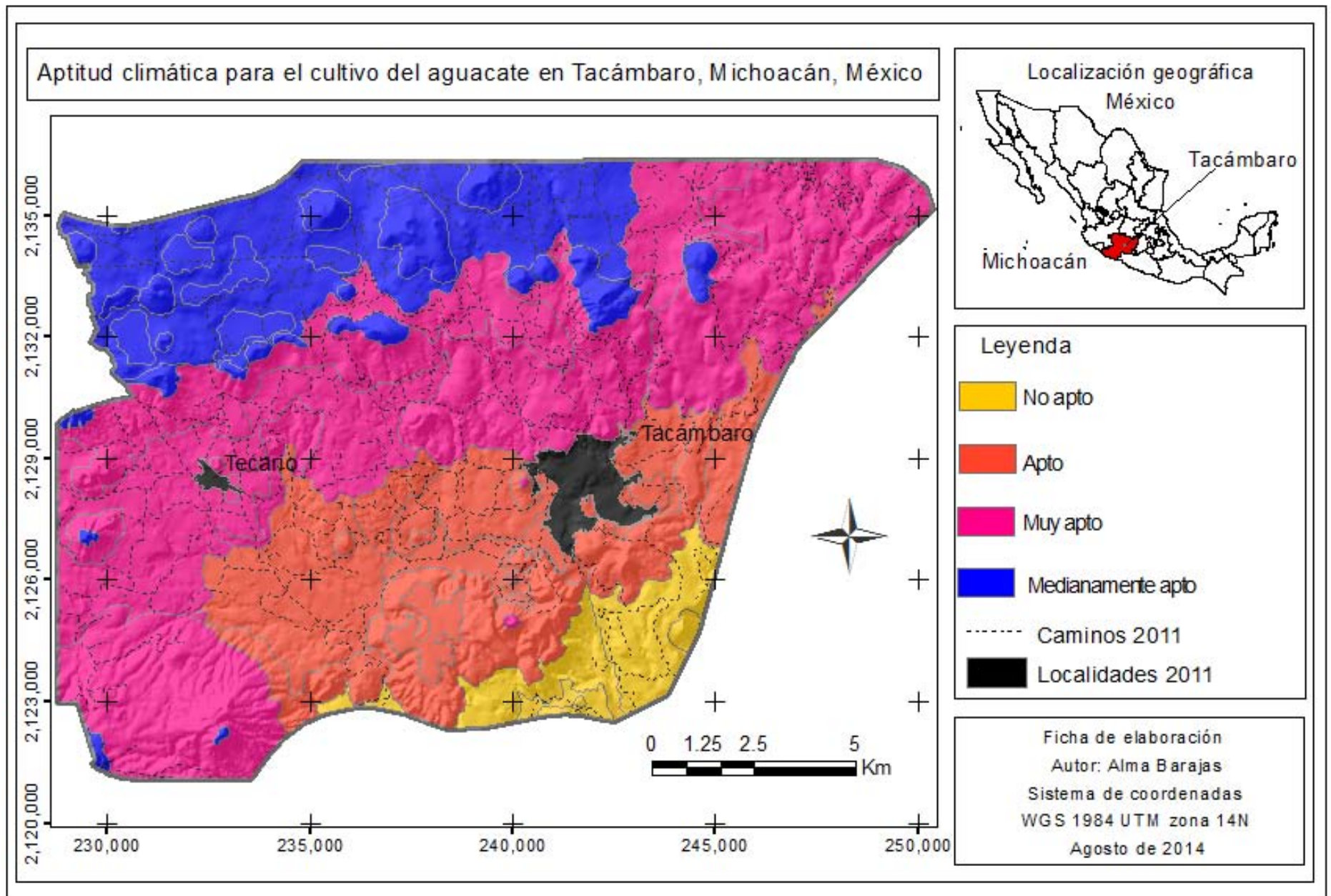


Figura 28. Aptitud climática para el cultivo de aguacate.

## 7.5. Evaluación de las funciones de los suelos

Las funciones de los suelos tienen una relación directamente proporcional con su clasificación (Figura 29, 30 y 31). En general, los Andosols realizan las mejores funciones agrícolas; mientras que los Luvisols, Umbrisols y Regosols, son más sobresalientes en las funciones ambientales.

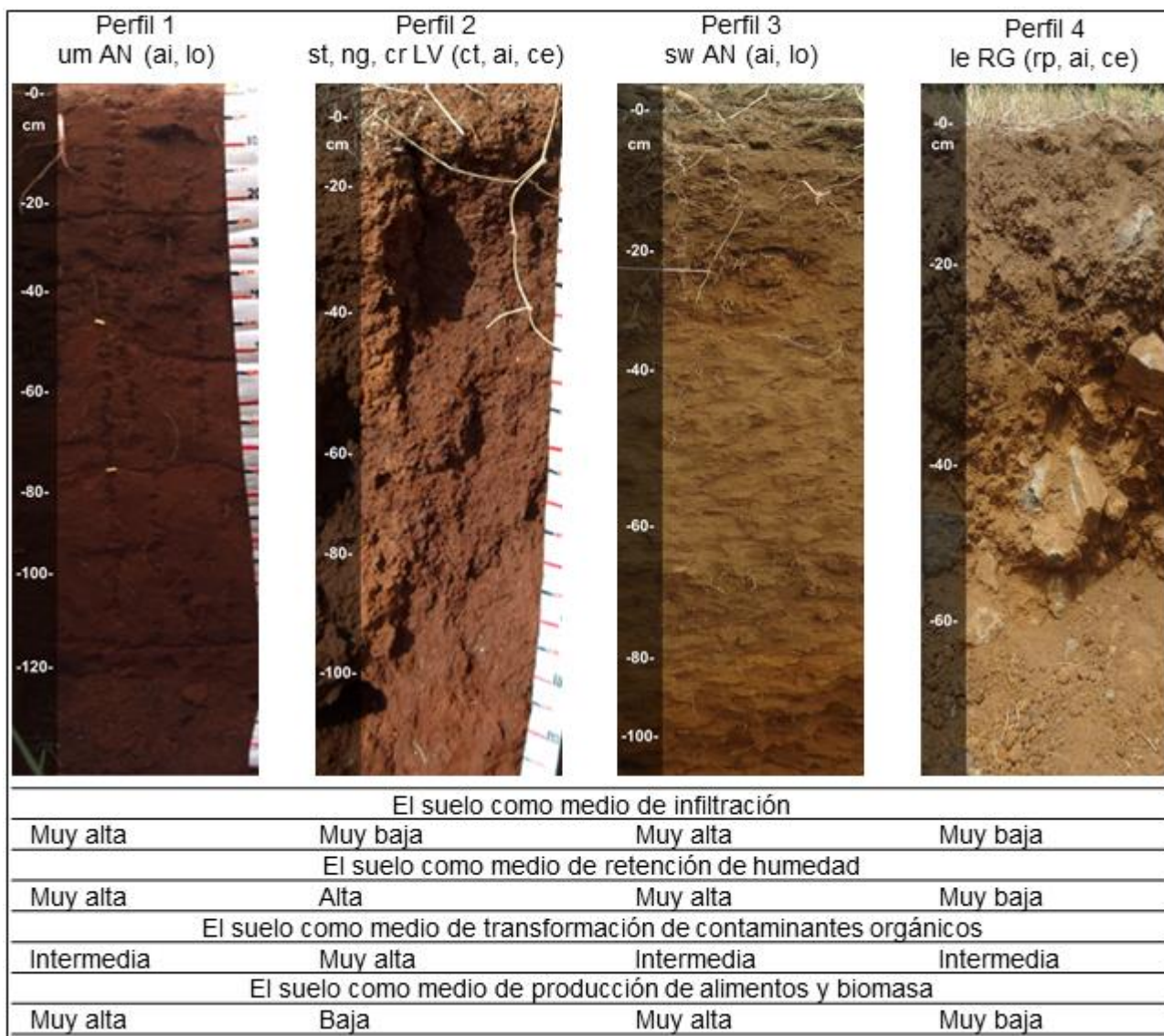


Figura 29. Funciones de los perfiles de suelo 1, 2, 3 y 4.

Los Luvisols tienen la función de transformar contaminantes orgánicos de muy alta a intermedia clase, de la misma forma que los Regosols que tiene una intermedia función para transformar contaminantes orgánicos. En este caso los LV son los suelos que mejor desempeñan esa tarea.

En cambio, los Umbrisols son suelos con muy alta función de infiltración y retención de humedad. Cabe mencionar que los Andosols también tienen una muy alta función del suelo como medio de infiltración y retención de humedad; sin embargo, los UM tienen una intermedia función del suelo como medio de producción de alimentos y biomasa, lo contrario a los AN que tiene una muy alta función agrícola; por ello es que la función sobresaliente de los UM es el suelo como medio de infiltración y retención de humedad.

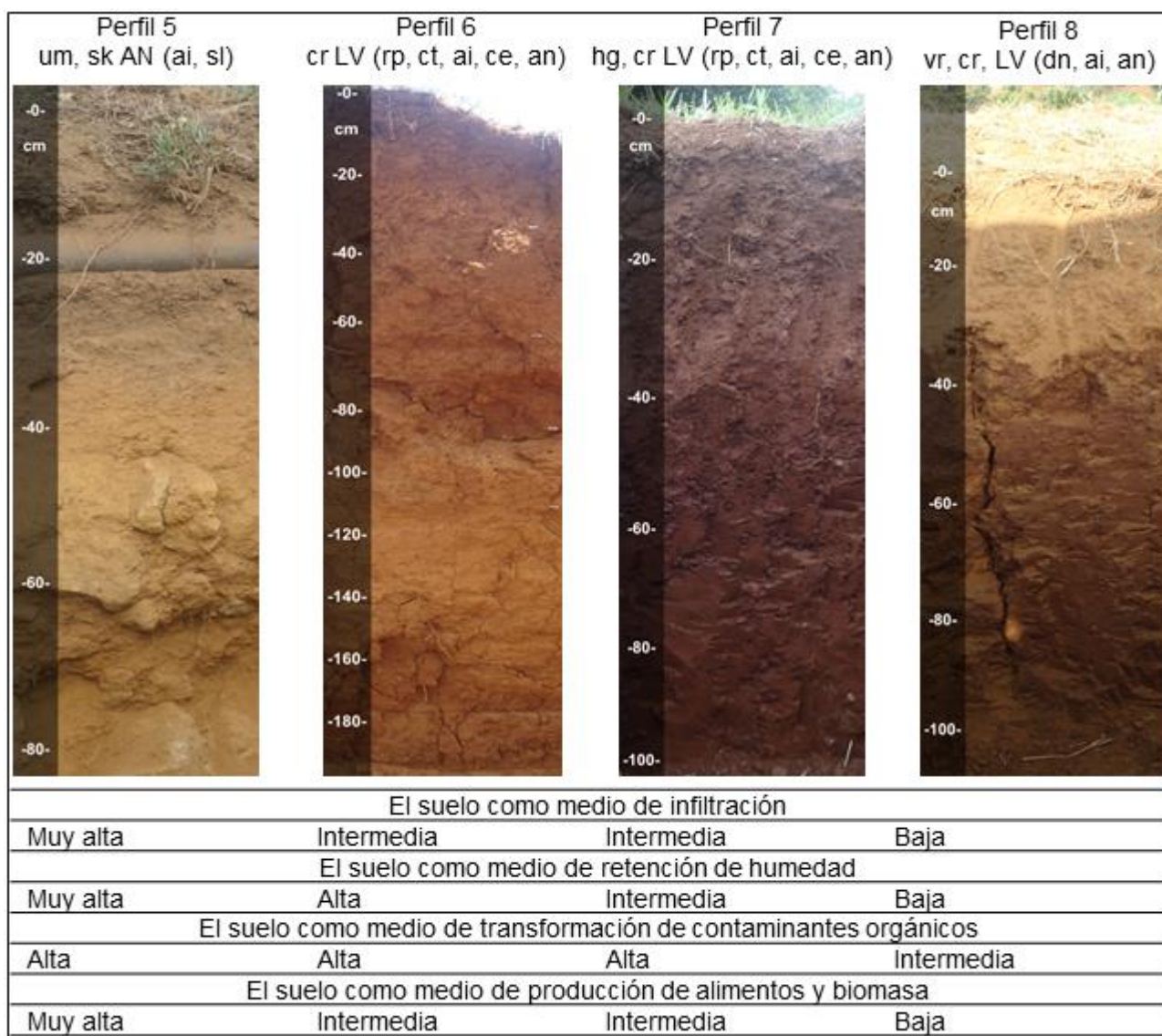


Figura 30. Funciones de los perfiles de suelo 5, 6, 7 y 8.

Las clases de las funciones de los suelos (muy baja, baja, intermedia, alta y muy alta) nos permiten identificar rápidamente cuales funciones desempeñan los grupos de suelos a grandes rasgos, sin embargo a detalle las funciones de los suelos tienen una relación

directamente proporcional con todas sus propiedades (morfológicas, físicas y químicas) y éstas están influenciadas por el uso y el manejo que se le da al suelo.

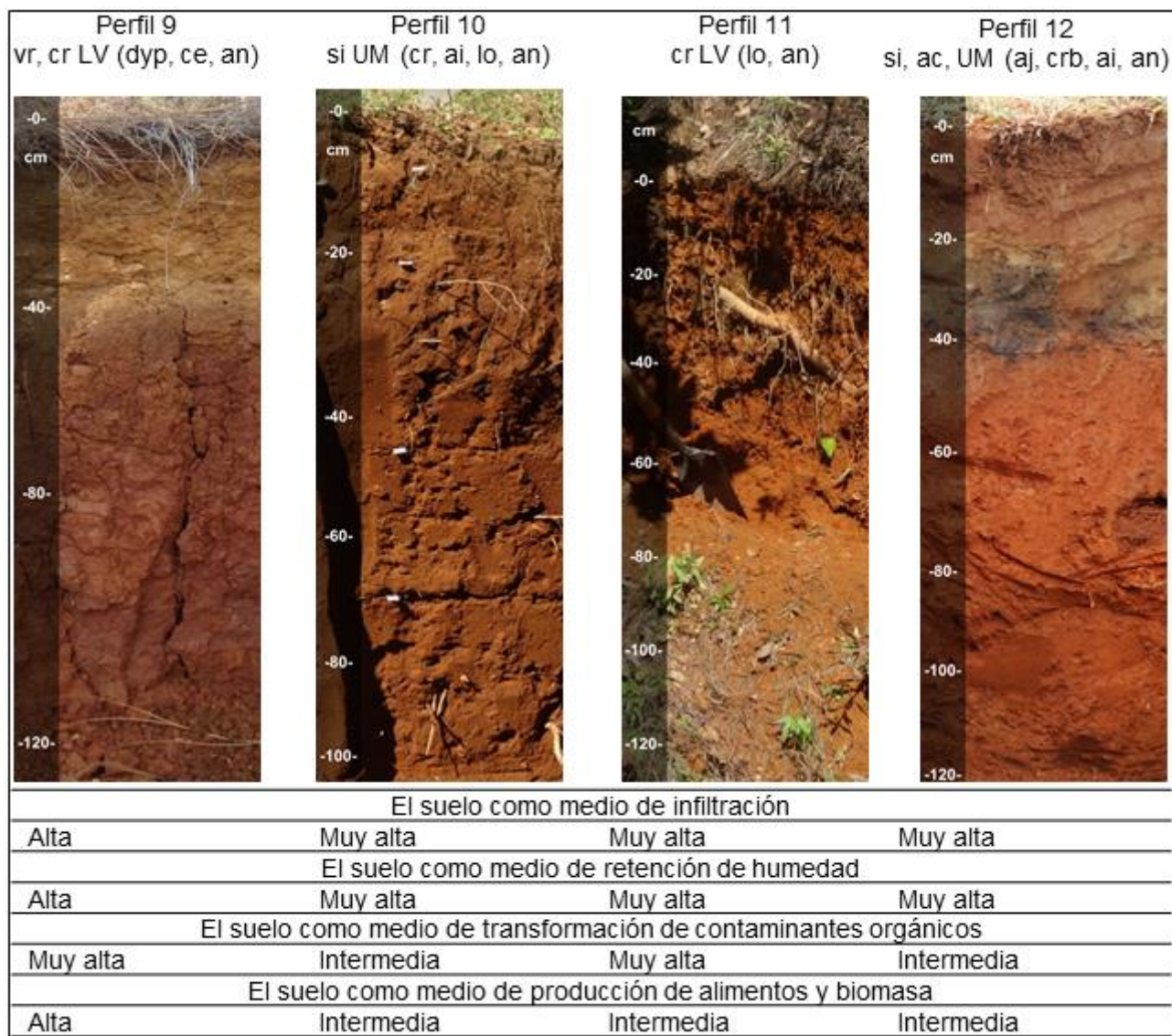


Figura 31. Funciones de los perfiles de suelo 9, 10, 11 y 12.

En general, los suelos con propiedades Ándicas tiene una función ambiental de retención de humedad más alta (de 137 a 318 L m<sup>2</sup>) sin importan cual sea su cubierta; a diferencia de los Luvisoles que con cubierta de bosque tienen una retención de agua de 318.05 L m<sup>2</sup> la cual disminuye a 95.49 L m<sup>2</sup> con cubierta de cultivo anual y a 106.14 L m<sup>2</sup> con cubierta de cultivo de aguacate (Cuadro 13).

Sin embargo, hay que mencionar que los Andosols con cubierta de cultivo de aguacate tienen una retención de agua menor o mayor dependiendo del manejo y la edad de la huerta. Las huertas de aguacate se nombran con manejo extensivo o intensivo

Cuadro 13. Funciones de los suelos bajo diferente cubierta y manejo de los suelos.

Perfil	Cubierta del suelo	Edad del cultivo de aguacate	Manejo de la huerta	Clasificación de suelos (WRB, 2014)	Retención de agua (Lm <sup>2</sup> )	Capacidad de intercambio catiónico efectiva (mol m <sup>-2</sup> )
1	Cultivo de aguacate	15	Extensivo	Umbric <b>Andosol</b> (Aric, Loamic)	213.12	151.43
2	Cultivo de aguacate	5	Intensivo	Stagnic Nudiargic Chromic <b>Luvisol</b> (Cutanic, Aric, Clayic)	106.14	106.09
3	Cultivo de aguacate	50	Extensivo	Someriumbric <b>Andosol</b> (Aric, Loamic)	243.17	205.95
4	Cultivo de aguacate	50	Extensivo	Leptic Skeletic <b>Regosol</b> (Ruptic, Aric, Clayic)	46.5	62.11
5	Cultivo de aguacate	5	Intensivo	Umbric Skeletic <b>Andosol</b> (Aric, Siltic)	172.01	112.24
6	Cultivo anual	0	n/a	Chromic <b>Luvisol</b> (Ruptic, Cutanic, Aric, Clayic, Andic)	95.49	417.11
7	Cultivo de aguacate	50	Extensivo	Hydragric Chromic <b>Luvisol</b> (Ruptic, Cutanic, Aric, Clayic, Andic)	137.39	122.6
8	Cultivo de aguacate	15	Extensivo	Vertic Chromic <b>Luvisol</b> (Loamicnovic, Densic, Aric, Clayic, Andic)	127.89	292.52
9	Cultivo de aguacate	1	Intensivo	Vertic Chromic <b>Luvisol</b> (Loamicnovic, Epidystric, Clayic, Andic)	164.46	439.28
10	Cultivo de aguacate	15	Extensivo	Someric <b>Umbrisol</b> (Chromic, Aric, Loamic, Andic)	219.18	310.92
11	Bosque	0	n/a	Chromic <b>Luvisol</b> (Loamic, Andic)	318.05	194.65
12	Cultivo de aguacate	50	Extensivo	Someric Acric <b>Umbrisol</b> (Areninovic, Thaptochromic, Aric, Andic, Abruptic)	176.26	493.34

dependiendo de varias características (insumos empleado, área), en este caso el manejo intensivo es cuando una huerta tienen una densidad de 250 o más árboles por hectárea (Anexo 2).

Las huertas de manejo intensivo con una edad de 5 años en Andosols tienen una retención de agua de  $172.01 \text{ L m}^2$ , a diferencia de las huertas con manejo extensivo con 15 años de edad tiene una retención de agua de  $213.12 \text{ L m}^2$  mientras que las huertas con manejo extensivo de 50 años de edad alcanzan una retención de humedad de  $243.17 \text{ L m}^2$  (Cuadro 13), aumentando de manejo intensivo a extensivo  $71.16 \text{ L m}^2$  de retención de agua en los suelos.

La función agrícola del suelo como medio de producción de alimentos y biomasa tiene una relación directamente proporcional con su capacidad para asimilar nutrientes y por ende con la capacidad de intercambio catiónico efectiva. En este caso la capacidad de intercambio catiónico efectiva ( $\text{mol m}^2$ ) en las huertas de manejo intensivo es alrededor de  $100 \text{ mol m}^2$ , sin embargo en la huerta más joven con 1 año de edad en Andosol tiene una CIC efectiva de  $439.28 \text{ mol m}^2$  casi igual a la de una huerta con manejo extensivo de 50 años de edad en un Umbrisol ( $493.34 \text{ mol m}^2$ ) o la de una cubierta de cultivo anual en Luvisol ( $417.11 \text{ mol m}^2$ ) (Cuadro 13).

Cabe mencionar que el suelo es multifuncional y no se puede subestimar una función ambiental por una agrícola y viceversa; por esa razón se realizó el mapa de las funciones de los suelos en un periodo de tiempo (1974, 1995 y 2011) para conocer el espacio y la temporalidad de las funciones de los suelos bajo los diferentes usos (Anexo 3).



### 7.5.1. Cartografía de las funciones de los suelos

**Funciones potenciales de los suelos en 1974.** *A grosso modo* en 1974 los suelos de Tacámbaro tenían una función ambiental potencial intermedia y una función agrícola potencial alta (Figura 32).

A detalle las funciones ambientales potenciales de los suelos en 1974 varían:

**El suelo como medio de infiltración.** Tiene clases de muy baja a muy alta función; sin embargo, el área más grande la ocupan los suelos con intermedia función de infiltración (Figura 32, A).

**El suelo como medio de retención de humedad.** Al igual que la infiltración la retención de humedad tiene clases de muy baja a muy alta función, y con la mayor área en la intermedia clase de función de retención de humedad (Figura 32, B).

**El suelo como medio de transformación de contaminantes orgánicos.** En general, los suelos de Tacámbaro tienen una baja función de transformación de contaminantes orgánicos. Sin embargo, el suelo también puede tener una muy alta función de transformación de contaminantes orgánicos dependiendo de su cubierta y uso (Figura 32, C).

Las funciones agrícolas de los suelos en Tacámbaro (**El suelo como medio de producción de alimentos y biomasa**) tienen clases de muy baja a muy alta función. En términos generales las áreas de las clases: muy baja, baja, intermedia y muy alta son homogéneas. Sin embargo sobresale el área del suelo con muy alta función como medio de producción de alimentos y biomasa (Figura 32, D).

Como puede observarse en la figura 32 en el patrón de los mapas, las funciones tanto ambientales como agrícolas de los suelos se definen por la relación grupo del suelo y uso del suelo (Ver figura 27 y anexo 1).

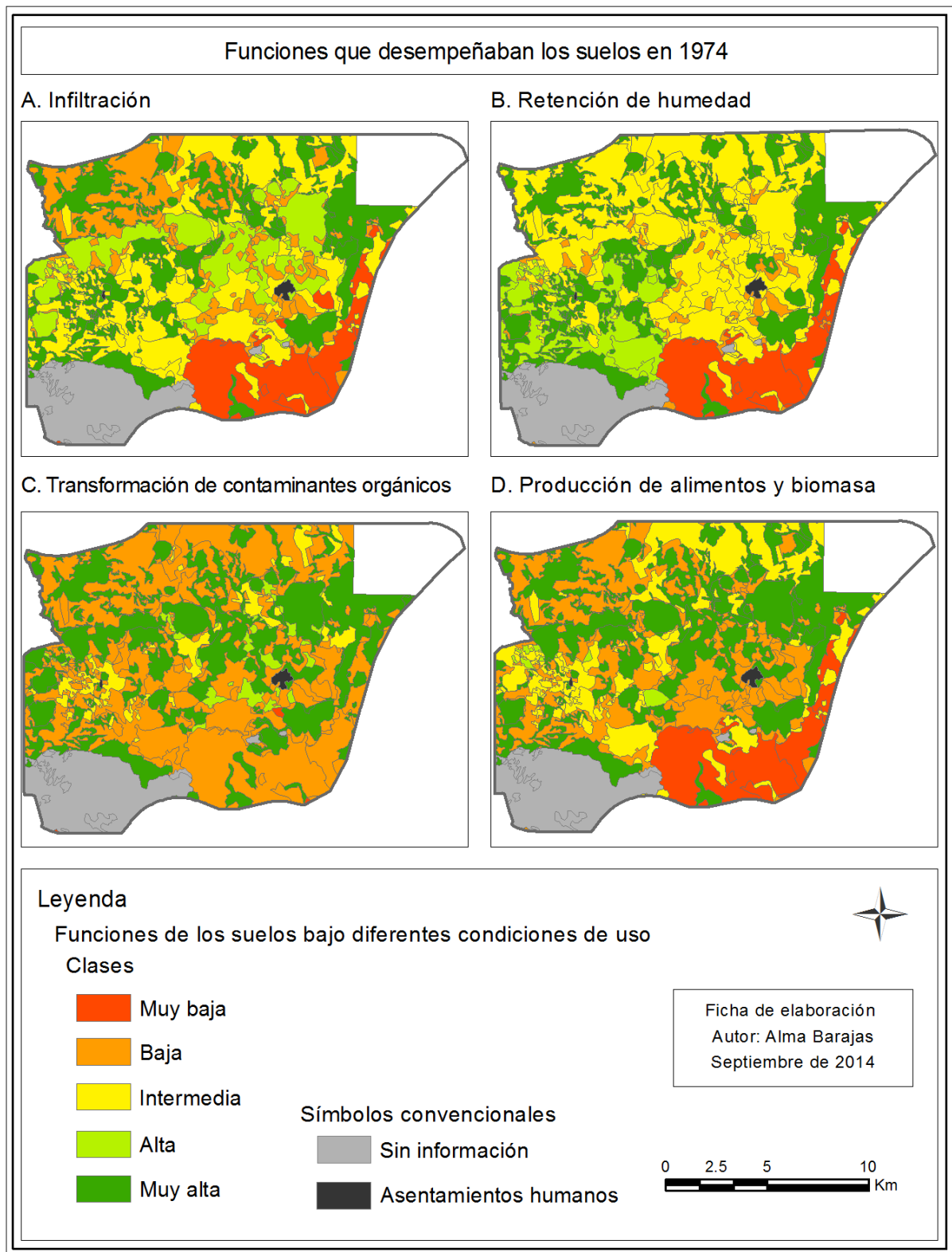


Figura 32. Las funciones de los suelos bajo diferentes condiciones de uso en 1974.

**Funciones de los suelos en 1995.** Como puede observarse en la figura 33 en 1995 los suelos tenían en general una muy alta función ambiental potencial. En cambio, la función agrícola potencial de los suelos era o muy alta o baja principalmente.

A detalle cada una de las funciones potenciales de los suelos en 1995 fue:

**El suelo como medio de infiltración.** Tiene clases de muy baja a muy alta función; sin embargo, el área más grande la ocupan los suelos con muy alta función de infiltración (Figura 33, A).

**El suelo como medio de retención de humedad.** La retención de humedad tiene clases de muy baja a muy alta función. Las clases muy alta e intermedia tienen la mayor área, seguidas por la clase muy baja (Figura 33, B).

**El suelo como medio de transformación de contaminantes orgánicos.** Principalmente tiene clases baja y muy alta. Sin embargo, también hay áreas con intermedia y alta función para transformar contaminantes orgánicos (Figura 33, C).

**El suelo como medio de producción de alimentos y biomasa.** Tiene clases de muy baja a muy alta función. En términos generales las áreas de las clases: muy alta y baja sobresalen. Sin embargo, las clases restantes: muy baja, alta e intermedia función también tienen áreas con una extensión considerable (Figura 33, D).

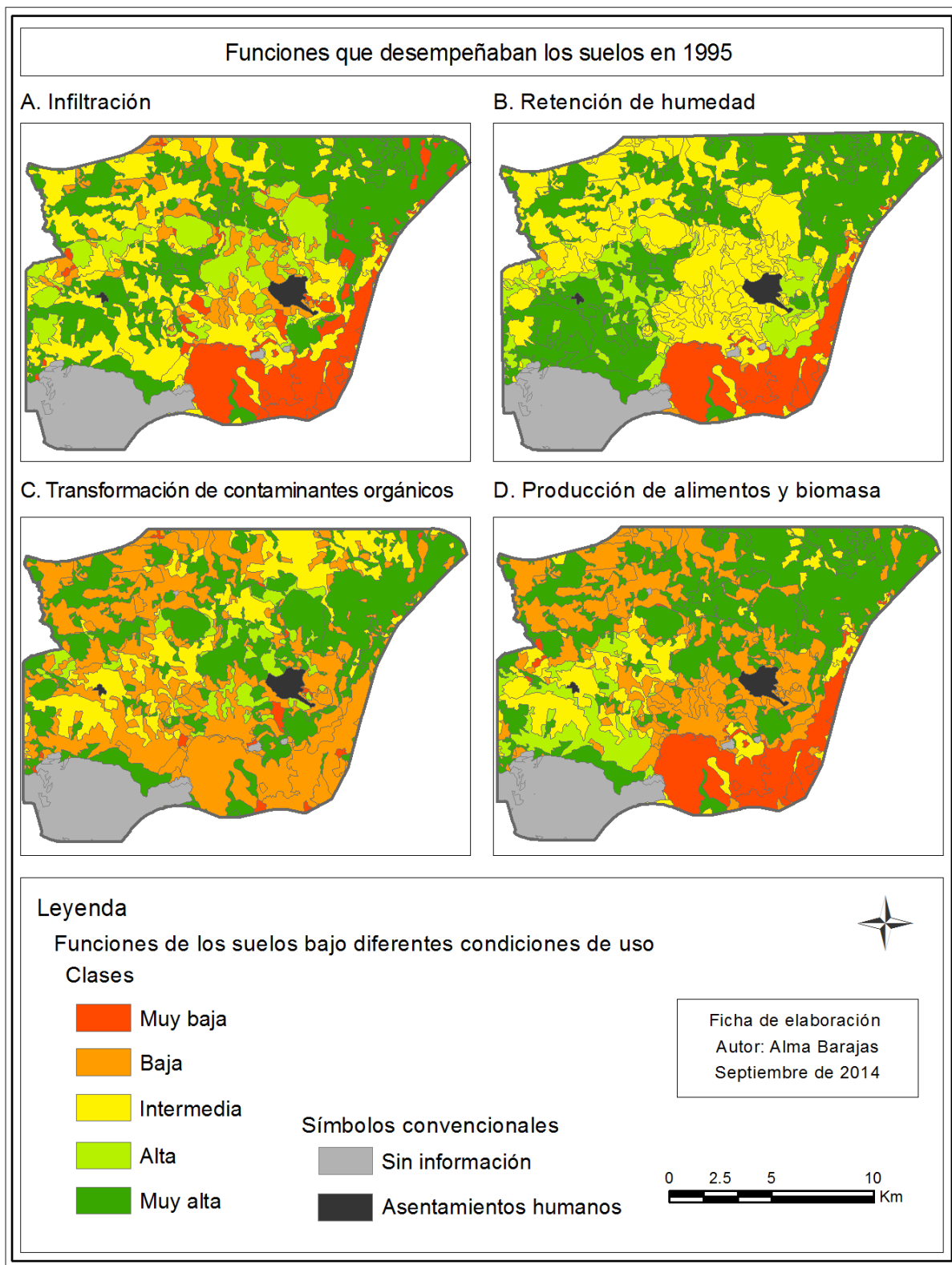


Figura 33. Las funciones de los suelos bajo diferentes condiciones de uso en 1995.

**Funciones de los suelos en la actualidad.** En la actualidad los suelos tienen una muy alta función en el sistema hídrico; mientras que la función agrícola de los suelos es principalmente o intermedia o muy alta (Figura 34).

A detalle cada una de las funciones potenciales de los suelos que desempeñan en la actualidad son:

**El suelo como medio de infiltración.** Tiene clases de muy baja a muy alta función; sin embargo, el área más grande la ocupan los suelos con muy alta función de infiltración (Figura 34, A).

**El suelo como medio de retención de humedad.** La retención de humedad tiene clases de muy baja a muy alta función. La clase muy alta es la que tiene el área mayor, seguida por la clase intermedia y la clase muy baja (Figura 34, B).

**El suelo como medio de transformación de contaminantes orgánicos.** Tiene clases intermedia y baja, generalmente. Sin embargo, también hay pequeñas áreas con patrón de cubierta de bosque, con una muy alta función de transformación de contaminantes orgánicos (Figura 34, C).

**El suelo como medio de producción de alimentos y biomasa.** Tiene clases de muy baja a muy alta función. En términos generales las áreas de las clases: intermedia y muy alta las que sobresalen. Sin embargo, las clases baja y muy baja también tienen áreas con una extensión considerable a diferencia de la clase alta que es poco visible (Figura 34, D).

Como puede observarse en la figura 34 las condiciones de uso del suelo tiene una gran influencia en las funciones potenciales de los suelos. Sin embargo, las propiedades de cada uno de los suelos presentes en Tacámbaro, Michoacán también influyen en las funciones (ambientales y agrícolas) que brindan los suelos (Figura 34 y Anexo 1).

En el caso de las funciones relacionadas con el ciclo hídrico (Figura 34, A y B) tienen una relación directamente proporcional con los grupos de suelos presentes en el área de estudio; condición evidente en la función del suelo como medio de retención de humedad. A diferencia del suelo como medio de infiltración tienen sus clases distribuidas por los grupos de suelo pero definidas por el uso del suelo (Figura 34, A y Anexo 1).

La evaluación de las funciones potenciales de los suelos permite distinguir el riesgo a la degradación ambiental por la modificación en el equilibrio ambiental; en este caso del ciclo

hídrico y la captura de carbono. Sin embargo, la evaluación de las funciones de los suelos no es una evaluación de tierras, se debe de integrar con más información, como con la aptitud climática, la preferencia de uso del terreno, entre otros.

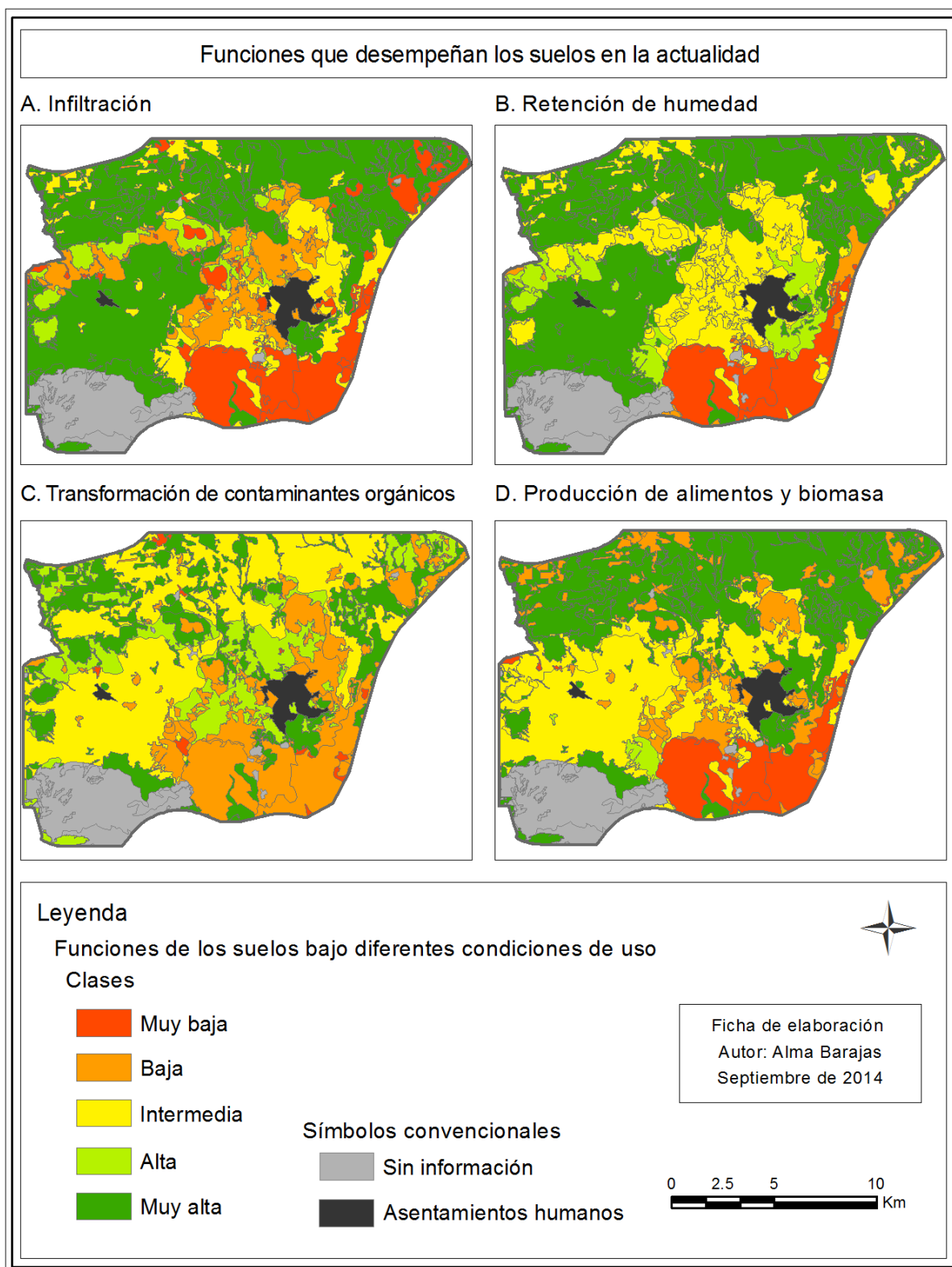


Figura 34. Las funciones actuales de los suelos bajo diferentes condiciones de uso.

## 7.6. Evaluación de tierras en el cultivo de aguacate

De acuerdo con la metodología empleada se logró conocer históricamente el estado ambiental y productivo del cultivo de aguacate en Tacámbaro, y por ello se cumplió una de las principales premisas en la evaluación de tierras según la FAO (1976, 2007).

### 7.6.1. Estado ambiental del cultivo de aguacate en Tacámbaro

La integración entre A) la atracción del terreno para el cultivo de aguacate; B) los suelos; C) la cubierta y uso del suelo; y D) las funciones ambientales potenciales de los suelos; nos permitieron evaluar como los productores aguacateros han modificado históricamente las funciones ambientales de los suelos, a partir de las decisiones de uso del terreno que han tomado de 1974 a la fecha (Figura 35, 36 y 37).

**Estado ambiental del cultivo de aguacate en 1974.** En 1974 los terrenos con mayor atracción para el cultivo de aguacate se ubicaban lo más próximo a caminos (Figura 35, A) y aunque el cultivo de aguacate tenía la menor área (Figura 35, C), las funciones ambientales potenciales de los suelos (D. El suelo como medio de infiltración; E. El suelo como medio de retención de humedad y F. El suelo como medio de transformación de contaminantes orgánicos) tenían una función entre intermedia y baja.

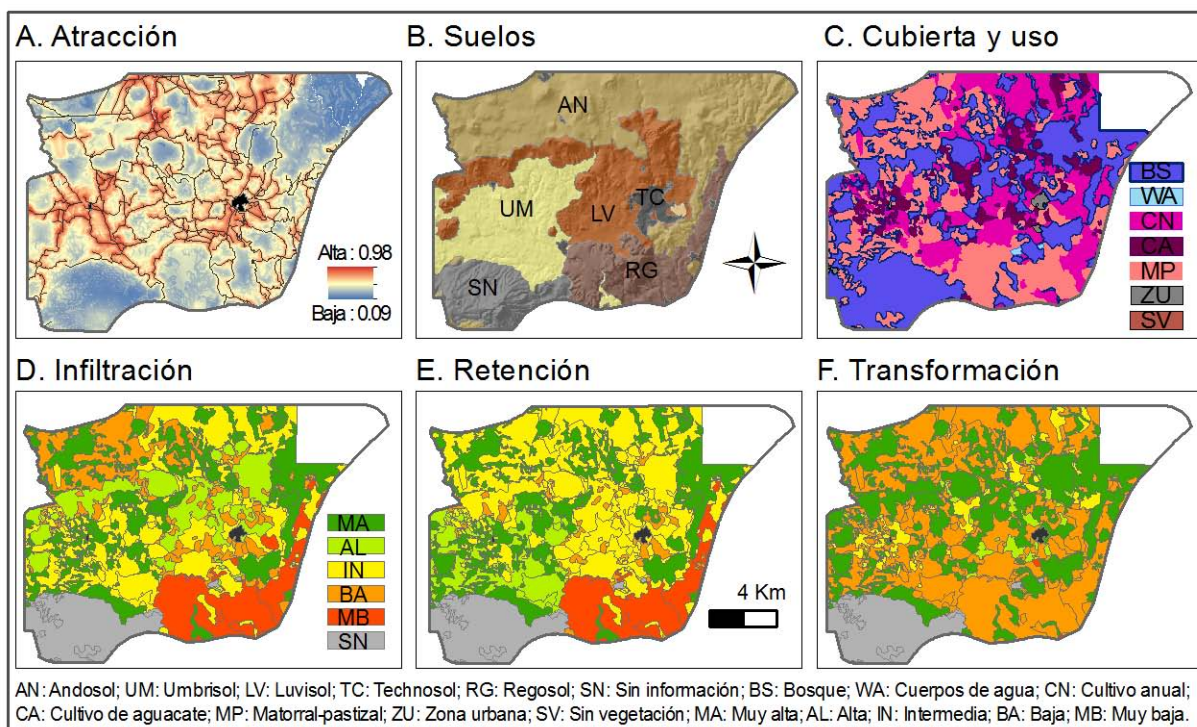


Figura 35. Evaluación de tierras en términos ambientales 1974.

Los sitios donde los suelos tenían una muy alta función ambiental concuerdan con las cubiertas de bosque (Figura 35, C, D, E y F). En cambio, los sitios con muy baja función ambiental en el ciclo hídrico concuerdan con los Regosols (Figura 35, B, D y E).

En el caso de los Luvisols (Figura 35, B), que son suelos con alto potencial de erosión, donde la cubierta era de cultivo anual y bosque (Figura 35, C); tenía el terreno una alta atracción para el cultivo de aguacate (Figura 35, A). A diferencia de los Andosols que tenían una alta atracción para el cultivo de aguacate en cubiertas de matorral-pastizal inducido y cultivo anual. Otro punto con alta atracción para el cultivo de aguacate concordaba con los Umbrisols en cubiertas de matorral-pastizal inducido, cultivo anual y el mismo cultivo de aguacate (Figura 35; A, B y C).

Conforme el terreno era más atractivo para el cultivo de aguacate era más posible que las funciones ambientales de los suelos se disminuyeran o cambiaran de alguna forma. El suelo como medio de infiltración en sitios con alta atracción para el cultivo de aguacate tenía clases de baja a muy alta función (Figura 35, A y D). El suelo como medio de retención de humedad en terrenos con alta atracción para el cultivo de aguacate tenía clases de intermedia a muy alta función. A diferencia del suelo como medio de transformación de contaminantes orgánicos que tenía una baja o muy alta función, en terrenos con alta atracción para el cultivo de aguacate (Figura 35, A, D, E y F).

**Estado ambiental del cultivo de aguacate en 1995.** En 1995 la atracción del terreno para el cultivo de aguacate más alta se ubicaba al noroeste de Tacámbaro en Andosols (Figura 36, A y B), con cubierta de cultivo anual, bosque y matorral-pastizal inducido (Figura 36, C).

En general, las funciones ambientales potenciales de los suelos en 1995 eran muy altas (Figura 36). Los suelos que tenían una muy alta función ambiental concuerdan con las cubiertas de bosque (Figura 36, C, D, E y F).

Los sitios con muy alta función ambiental en el ciclo hídrico concuerdan con los bosques en cualquier suelo y con el cultivo de aguacate en Andosols. Mientras que los sitios con muy baja función ambiental en el ciclo hídrico concuerdan con los Regosols (Figura 36, C, D y E). El suelo como medio de transformación de contaminantes orgánicos tiene clases muy altas en cubiertas de bosque. Sin embargo, en cubiertas de matorral-pastizal inducido y cultivo anual tiene baja función; mientras que los sitios con intermedia función ambiental



en la transformación de contaminantes orgánicos concuerdan con la cubierta de cultivo de aguacate (Figura 36, C y F).

En comparación con 1974 la atracción del terreno para el cultivo de aguacate en 1995 se centralizó en un área con un intervalo altitudinal de 2100 a 1800 msnm (Figura 36; A). Los terrenos con atracción intermedia para el cultivo de aguacate se ubicaban en una franja a los 1800 msnm en Luvisols, que tenían bosque y cultivo anual.

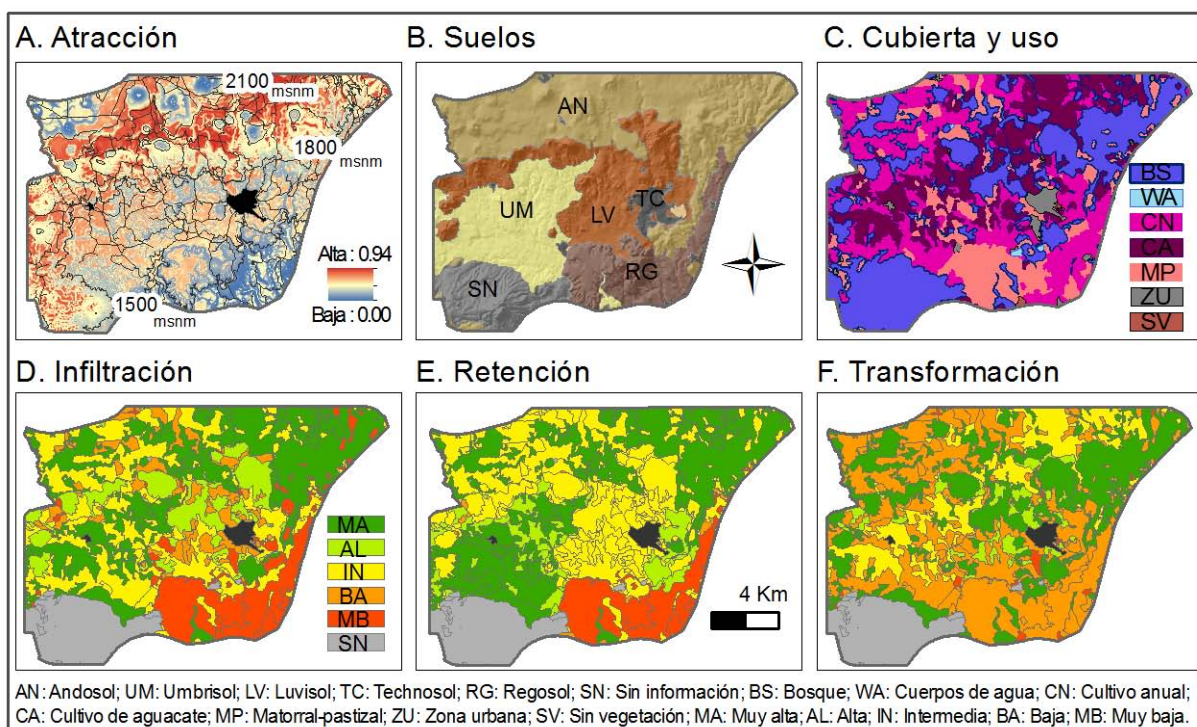


Figura 36. Evaluación de tierras en términos ambientales 1995.

En cambio, los terrenos con atracción baja para el cultivo de aguacate se encontraban a 1500 msnm o menos en: Andosols con cubierta de bosque; y, Regosols con cubierta de cultivo anual (Figura 36, A, B y C).

El proceso de expansión del cultivo de aguacate en Tacámbaro Michoacán en el periodo de 1974 a 1995 se aceleró considerablemente (aproximadamente 200% Figura 35, C y 36, C; Anexo 1). En general, las funciones ambientales potenciales involucradas en el ciclo hídrico aumentaron (Figura 35, D y E; Figura 36, D y E; Anexo 1). Sin embargo, la capacidad del suelo para la captura de carbono disminuyó (Figura 35, F y 36, F).

**Estado ambiental del cultivo de aguacate en la actualidad.** En la actualidad los terrenos con atracción alta para el cultivo de aguacate se ubican en todo el municipio de Tacámbaro. Sin embargo, a  $\geq 2000$  msnm es más atractivo el terreno para el cultivo de

aguacate, siempre y cuando no tenga más de 35° de inclinación. Cabe mencionar que a diferencia de la atracción histórica del terreno para el cultivo de aguacate, en la actualidad la atracción es o alta o baja, pero casi no hay terrenos con atracción intermedia para el cultivo de aguacate (Figura 37, A).

Los suelos con una muy alta función ambiental concuerdan con las cubiertas de bosque (Figura 37, C, D y E). Sin embargo, las funciones ambientales relacionadas con el ciclo hídrico también son muy altas en cubiertas de cultivo de aguacate (Figura 37, C, D y E). A diferencia del suelo como medio de transformación de contaminantes orgánicos que tiene una intermedia función en cubiertas de cultivo de aguacate (Figura 37, C y F).

Por otro lado los sitios con muy baja función ambiental en el ciclo hídrico concuerdan con cualquier cubierta en los Regosols; y, con la cubierta de matorral-pastizal inducido en cualquier suelo (Figura 37, B, D y E).

Como puede observarse en la figura 37 las funciones ambientales potenciales con clase baja y muy baja se presentan en cubiertas de cultivo anual y matorral-pastizal inducido; mientras que las clases alta y muy alta se encuentran en cubiertas de bosque y cultivo de aguacate (Figura 37, C, D, E y F).

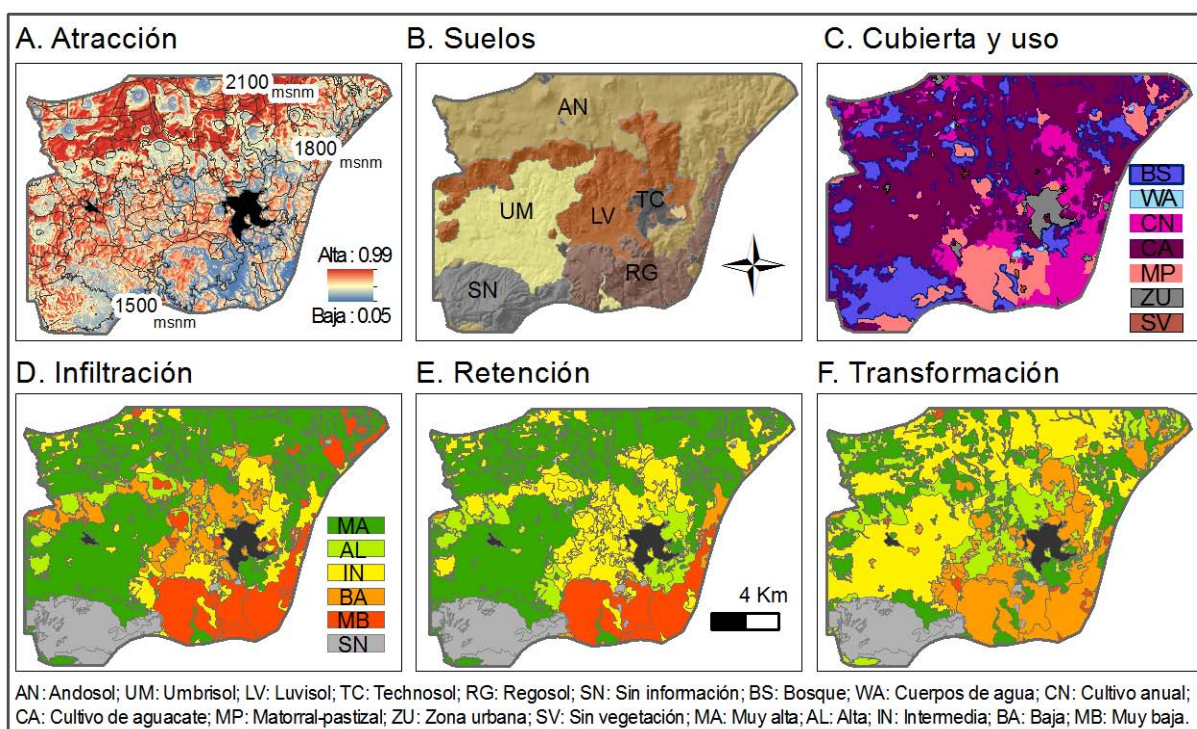


Figura 37. Evaluación actual de tierras en términos ambientales.

Además de considerar el contexto ambiental en la evaluación de tierras, se debe de incluir el contexto social, el contexto político y el contexto productivo. No obstante esta investigación se limita a desarrollar el contexto productivo nada más.

### 7.6.2. Estado productivo del cultivo de aguacate en Tacámbaro

El área plantada con el cultivo de aguacate en Tacámbaro ha aumentado de 1,662 a 11,752 ha (Anexo 1 y Figura 38). El proceso de expansión del cultivo de aguacate ha aumentado la producción en el Municipio, de producir 19,944 t a producir 141,024 t de aguacate al año. Considerando que el rendimiento promedio registrado en 40 años (de 1970 a 2010) es de 20 t ha<sup>-1</sup>.

Históricamente las huertas de cultivo de aguacate han aumentado el espacio que ocupan en el municipio (Figura 38, A, B y C). En 1974 las huertas se ubicaban en piedemonte y planicie principalmente, las condiciones climáticas para el cultivo de aguacate en general eran muy aptas. Los suelos que se aprovechaban eran los más aptos para la producción del cultivo de aguacate (Andosols y Umbrisols).

En cambio, en 1995 cuando el cultivo se fue expandiendo y fue ocupando a los lomeríos y las montañas; sin embargo, la mayoría de las huertas se seguían situando en piedemonte, condición relacionada con el área ocupada con esta geoforma (Figura 38, D). La aptitud

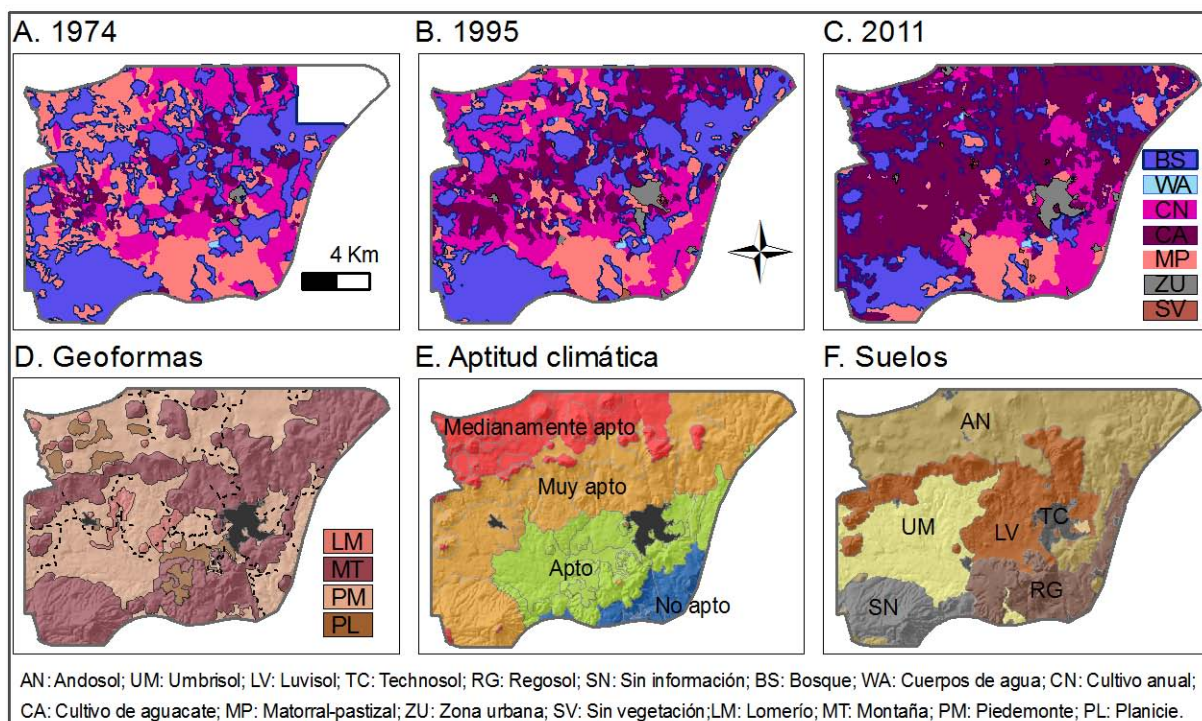


Figura 38. Evaluación de tierras en contexto productivo.

climática que dominaba en las huertas era muy apta (Figura 38, E), no obstante también ya había huertas en zonas medianamente aptas y aptas. En el caso de los suelos en 1995 se seguían usando principalmente los Andosols y los Umbrisols en el cultivo de aguacate (38, F).

El éxito de cualquier cultivo se rige por el clima y los suelos. En la actualidad, el cultivo del aguacate ocupa el 68% de la superficie de Tacámbaro (Anexo 1 y Figura 38, C). Los suelos más productivos se han ocupado casi en un 100%; y, como se puede observar en la figura 38, los terrenos que no se han utilizado en el cultivo de aguacate son por su inaptitud climática y edáfica (Figura 38, C, E y F).

En la actualidad las zonas con alta atracción para el cultivo de aguacate tienen una muy alta función agrícola (Figura 39, A y B). Sin embargo, son zonas donde ya se encuentra el cultivo de aguacate, y en donde todavía no se encuentra el cultivo de aguacate se encuentran los bosques (Figura 39, C).

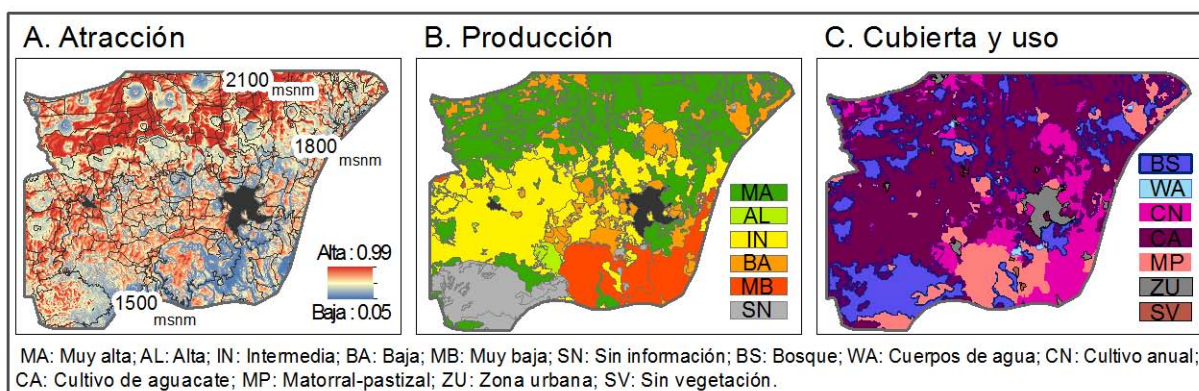


Figura 39. Atracción, producción, cubierta y uso del suelo actual.

Realizar la evaluación de tierras en el cultivo de aguacate en Tacámbaro nos permitió identificar su estado ambiental y productivo; a partir principalmente de la atracción de los terrenos para el cultivo de aguacate y las funciones potenciales de los suelos con diferente uso del suelo. Sin embargo, el área ocupada por el cultivo de aguacate en condiciones de producción apta (o muy apta) ya está ocupada, por ello la atracción del terreno ya no nos brinda información para la posible expansión del cultivo, habrá entonces que discutir si con los resultados obtenidos se pueden identificar cuales terrenos son los primordiales en la conservación de las funciones ambientales de los suelos, esto con el afán de conservar y producir.

## CAPÍTULO 8. DISCUSIÓN

El en caso de los suelos volcánicos de Michoacán pertenecientes al cinturón volcánico más grande del mundo tienen un desarrollo pedogenético muy variado dependiendo de la edad y composición del material volcánico que los forma.

Los principales grupos de suelos que se utilizan para el cultivo de aguacate en Tacámbaro son los Andosols, Umbrisols y Luvisols. El cultivo de aguacate ha mejorado las funciones ambientales de los suelos en el ciclo hídrico (Cuadro 12), cabe señalar que no se contempla la interacción huerta-árbol-suelo para llegar a estas aseveraciones; sin embargo si se considera la edad de la huerta (0, 5, 15 y 50 años de edad) y el manejo de está, también se consideran los horizontes del perfil de suelo a una profundidad de 1.5 m, ya que de acuerdo con Lehmann y Stahr (2008) para evaluar las funciones de los suelos (cualquiera que sea) se deben de considerar todos los horizontes del perfil de suelo en cuestión.

En el caso de los Andosols son suelos que mantienen o incluso aumentan las funciones ambientales cuando se les cambia de cubierta de bosque a cubierta de cultivo de aguacate siempre y cuando la huerta ya tenga una edad de 50 años o más y se maneje de forma extensiva. En cambio, los Luvisols pierden sus funciones ambientales cuando pasan de cubierta de bosque a cubierta de cultivo de aguacate, ya que en general estos suelos tiene 10 años o menos ocupándose para el cultivo del aguacate por lo que en su mayoría el manejo que se les da es intensivo, situación que puede resultar en eutricación, erosión, entre otras formas de degradación ambiental.

A diferencia de Bravo-Espinosa y colaboradores (2014) en esta investigación se puede llevar a la discusión de que el cultivo de aguacate siempre y cuando sea en Andosoles y con manejo extensivo las huertas contribuyen a mantener las funciones del suelo como medio de infiltración y retención de agua. Estos resultados de ambas investigaciones pueden variar por tres razones: 1.-El muestreo de suelos es diferente, Bravo muestrea el epipedón (de 0 a 5 cm y de 5 a 20 cm). 2.- Dada la fuente de información de suelos puede ser que en lugar de tratarse de Andosoles puede que sean más bien propiedades Ándicas. 3.-Los sitios de muestreo de Bravo son huertas con 15 años de edad o menos.

En este caso el análisis de las funciones de los suelos en un periodo de tiempo (1974, 1995 y 2011) nos permitió conocer la influencia del uso del suelo en sus propiedades. Es

decir, el contenido de materia orgánica (%), la densidad aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ ) y el espesor de los horizontes (cm); son propiedades que se están desarrollando dependiendo del uso del suelo; y, son las que influyen directamente en el ciclo hídrico de tierras del cultivo de aguacate en Tacámbaro, Michoacán, México. Cabe señalar que las propiedades de los suelos elegidas para ser analizadas en esta investigación tienen sustento en el análisis de las funciones de los suelos, en cambio en otros estudios se analizan de forma aislada las propiedades de los suelos lo cual puede ser confuso de interpretar (Siebe *et al.*, 2003; Bravo-Espinosa *et al.*, 2014).

Otra forma de hacer uso máximo de las propiedades de los suelos es clasificándolos. En concordancia con Siebe y colaboradores (sin año) si se identifican las funciones de los suelos por grupos se pueden identificar sus potencialidades para un uso específico.

Los Andosols y Umbrisols con cubierta de cultivo de aguacate tienen una muy alta función ambiental como medio de infiltración y retención de humedad; por ello en el contexto ambiental de la evaluación de tierras el cultivo de aguacate en Andosols y Umbrisols no representa un riesgo al equilibrio ambiental. En cambio el cultivo de aguacate en Luvisols tiene efectos negativos en el estado ambiental, ya que sus propiedades promueven la eutricación, el azolve, la erosión y la degradación de suelos.

Situación similar a los suelos de origen volcánico que se analizan en Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México; suelos que se diferencian por sus propiedades (contenido de ceniza volcánica: Andosols; Alto contenido de arcillas: Luvisols; Escaso espesor: Leptosols; horizonte superficial rico en materia orgánica: Umbrisols) y que tienen una relación directamente proporcional entre el grupo, la función y el uso del suelo (Siebe *et al.*, 2003; Pulido y Bocco, 2003; Bravo-Espinosa *et al.*, 2014).

En Tacámbaro también hay Luvisols y Regosols. Los Luvisols son suelos que tiene menos de 10 años utilizándose para el cultivo de aguacate. A diferencia los Luvisols en otras partes de Michoacán se usan sólo para uso forestal y en algunos casos para cultivo anual (Siebe *et al.*, 2003). Mientras que los Regosols conocidos como “malpaís” se ocupan por la cubierta vegetal natural (Alcalá *et al.*, 2009).

Por otra parte Liang y colaboradores (2011, 2014) aportan información para un desarrollo sostenible de la zona urbana en China basadas en las funciones de los suelos. De acuerdo a sus resultados obtenidos las funciones ambientales del ciclo hídrico tienen una relación directamente proporcional con los grupos de suelos, mientras que la función

ambiental del suelo como medio de transformación de contaminantes orgánicos tiene una relación directamente proporcional con el uso del suelo (Liang *et al.*, 2011). Condición similar a los suelos de Tacámbaro, que tienen una función ambiental en el ciclo hídrico proporcional con los grupos de suelos; sin embargo, el proceso de expansión del cultivo de aguacate de 1974 a la actualidad tiene influencia sobre las funciones del suelo en el ciclo hídrico dejando en segundo término los grupos de suelos. Por otra parte el suelo como medio de transformación de contaminantes orgánicos en Tacámbaro al igual que en China se rige por la cubierta y uso del suelo (Liang *et al.*, 2011).

En el contexto productivo los suelos de Tacámbaro son redituables para el cultivo de aguacate. El 68% de la superficie total del municipio está ocupada por huertas aguacateras (Anexo 1). El proceso de expansión del cultivo de aguacate al igual que en otras zonas de Michoacán se ha propagado hacia cubiertas de cultivo anual, matorral-pastizal inducido y bosque (Ramírez, 2009).

La expansión del cultivo de aguacate está influenciada en gran parte por la atracción del terreno para el establecimiento de las huertas. La atracción del terreno para el cultivo de aguacate en 1974 se definía por la proximidad a caminos; sin embargo, desde 1995 hasta la actualidad la coincidencia con la altitud y la pendiente del terreno; son los elementos del paisaje relevantes en la atracción del terreno. A diferencia de otros resultados obtenidos con el modelo Agrilocal en tierras agrícolas de la Meseta P'urhépecha; en donde dichas investigaciones demuestran que los elementos antrópicos son relevantes todo el tiempo y, además son los que generalmente más peso tienen en la atracción del terreno para uso agrícola por sobre el de los elementos naturales del paisaje (Adame, 2011), en Tacámbaro, esta relevancia se perdió entre los años 1974 y 1995, debido a que el aguacate tiene un alto valor de mercado a diferencia del maíz (en la Meseta P'urhépecha).

Las variaciones en la atracción del terreno para el cultivo del aguacate a lo largo de los tres tiempos analizados, se puede explicar de la siguiente manera:

- En 1974, los precios y los mercados para el producto eran mucho más reducidos que en la actualidad, por lo que los costos de transporte eran importantes en comparación con el valor de la producción, lo que explica en parte porqué los agricultores preferían las tierras cercanas a los caminos y a los asentamientos humanos, así como a las áreas de cultivo existentes, y esas relaciones eran las más influyentes. Además en ese entonces todavía había muchos terrenos con las características topográficas y de altitud ideales para el

cultivo en la cercanía de los caminos. Solo una pequeña porción de las áreas de cultivo de aguacate de aquel entonces se encontraba lejos de los caminos o de los asentamientos humanos, lo cual se puede ver en la gráfica de la figura 7 (en el segundo picó en azul de la curva correspondiente a 1974).

- Para 1995, se pierde la relevancia y la influencia de las relaciones del cultivo con los elementos antrópicos, porque los precios y los mercados se habían incrementado radicalmente, lo cual, aunado a que ya se habían ocupado muchos de los terrenos en cercanía a caminos o a otras zonas de cultivo y asentamientos humanos, hizo posible el establecimiento de huertas de aguacate relativamente lejos de estos tres elementos, ya que era económicamente redituable invertir ahora en la construcción de caminos específicamente para comunicar las nuevas zonas de producción de aguacate. Entonces, el requerimiento climático de temperatura tuvo una influencia más importante, incluso que la accesibilidad topográfica del terreno (pendiente), lo cual determinó que los lugares que estuvieran en el intervalo de altitudes preferido (mucho del cual tenía cubierta de bosque) comenzaran a ser usados para el cultivo de aguacate. De hecho se observa un corrimiento en las altitudes preferidas por los productores, ya que los terrenos cuyas altitudes eran más preferibles en 1974 fueron los primeros en ocuparse, quedando solo los terrenos de una altitud no tan adecuada como en 1974, pero todavía atractiva. Esto se observa en la figura 3.

- En 2011, las condiciones económicas de producción del cultivo son todavía de mayor beneficio para los productores, y este hecho establece que tanto la altitud como la pendiente del terreno sean los únicos determinantes territoriales de la ubicación de las zonas de cultivo de aguacate. Y la influencia de las relaciones se invierte con respecto a 1995, porque ahora la altitud (proxy de la temperatura del aire) ya no es tan determinante como la pendiente, debido a que existen nuevas tecnologías (físico-químicas) que posibilitan que crezca el cultivo (sobreviva el árbol en sus primeros 5 años) en áreas donde la temperatura del aire es demasiado fría en invierno bajo condiciones normales y ocurren heladas frecuentemente. Así pues, podríamos decir que solo la pendiente restringe la ocupación del terreno, pero incluso, como se aprecia en la figura 2 (línea verde), ya se usan más terrenos con pendientes moderadas que antes tenían una más baja probabilidad de uso o atracción. Desafortunadamente estos terrenos normalmente tienen cubierta de bosque, lo que ha ocasionado una pérdida forestal cada vez mayor.



## CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES

La evaluación de tierras de cultivo de aguacate en Tacámbaro, Michoacán, México nos permitió argumentar la historia de uso del suelo con base en la atracción del terreno. Sin embargo, las tierras con alta aptitud climática para el cultivo del aguacate y con muy alta función para la producción de alimentos y biomasa; ya están en uso. Por ello el aporte de esta investigación se enfoca en las funciones ambientales de los suelos.

A partir de los resultados obtenidos se puede predecir la degradación ambiental, ya que en general, los suelos de Tacámbaro, Michoacán tienen propiedades muy aptas para el cultivo de aguacate (Andosols y Umbrisols); sin embargo también hay suelos que necesitan manejo especial para mantener el equilibrio ambiental (Luvisols).

Evaluar las funciones de los suelos con diferentes usos del suelo utilizando el modelo y software Assofu nos permitió conocer el impacto ambiental real del cultivo de aguacate. Las deducciones resultaron interesantes ya que el cambio de cubierta de cultivo anual a cultivo de aguacate logra mejorar las funciones ambientales del suelo.

En general, las funciones ambientales de los suelos mejoraron de 1974 a la actualidad. Los Umbrisols en la transformación de cubierta de bosque a cultivo de aguacate pasaron de tener una muy alta función ambiental en 1974 a tener una alta función ambiental en 1995; sin embargo, en la actualidad los Umbrisols con cubierta de cultivo de aguacate ya tienen de nuevo una muy alta función ambiental. A diferencia de los Luvisols que siempre han tenido una intermedia-baja función ambiental sin importar su cubierta.

El contexto productivo de la evaluación de tierras se obtuvo de la evaluación de las funciones agrícolas. Los grupos de suelos en Tacámbaro tienen una relación directamente proporcional con la función del suelo como medio de producción de alimentos y biomasa. Los Andosols tiene una muy alta función; los Umbrisols y Luvisols tiene una intermedia función; mientras que los Regosols tiene una muy baja función.

Además de la evaluación de la función agrícola de los suelos se consideró la atracción del terreno para el cultivo de aguacate para integrar el contexto productivo de la evaluación de tierras. La atracción del terreno para el cultivo de aguacate en Tacámbaro, Michoacán, México se dirigía en 1974 por los elementos del paisaje de origen antrópico, mientras que en la actualidad el establecimiento de las huertas de aguacate se determina por la pendiente del terreno.

## CAPÍTULO 10. REFERENCIAS

- Abou A. B., Desouki I., & El-Tanahy M. M. (1975). Effect of nitrogen fertilization on yield and fruit oil content of avocado trees. *Scientia Horticulturae*, 3(89-94).
- Alcalá M., J., R. García R., J. J. Ramos G., y V. H. Garduño M. 2009. Tierras campesinas al sur de Morelia, Michoacán, México. pp. 16-21. In: C. Henríquez H. y M. Vindas S. (eds.). XVIII Congreso latinoamericano de la ciencia del suelo. Costa Rica.
- Arpaia M. L., Robinson P. W., Liu X., Mickelbart M. V., & Witney G. W. (1996). *Development of a phenological model for California 'Hass' avocado*. Paper presented at the 1996 Avocado Research Symposium, California.
- Barajas A. (2012). *Etnopedología en la reserva de la biosfera Zicuirán-Infiernillo, municipio de La Huacana, Michoacán, México*. Licenciatura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.
- Barioglio C. F. (Ed.) (2006) Diccionario de las Ciencias Agropecuarias. Argentina: Editorial brujas.
- Barrera-Bassols N., Alfred Zinck J. A., & Van Ranst E. (2006). Symbolism, knowledge and management of soil and land resources in indigenous communities: Ethnopedology at global, regional and local scales. *CATENA*, 65, 118-137.
- Barrett C. (1948). *The 1948 Pilgrimage to Mexico*. Paper presented at the California Avocado Society, California.
- Bautista F., & Zinck J. A. (2010). Construction of an Yucatec Maya soil classification and comparison with the WRB framework. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 6(7), 1-11.
- Bedolla-Ochoa C., Gallegos A., Barajas A., & Bautista F. (2013). Los suelos y sus funciones ambientales. *Gaceta de la Unión Geofísica Mexicana*, 3(10), 3-5.
- Bills N., & Gross D. (2005). Sustaining multifunctional agricultural landscapes: comparing stakeholder perspectives in New York (US) and England (UK). *Land Use Policy*, 22, 313-321.
- Bonh H., Mc Neal B., & O'Connor G. (1993). *Química del suelo*. México: Limusa, grupo noriega editores.
- Bouma J. (2009). Soils are back on the global agenda: Now what? *Geoderma*, 150, 224-225.
- Bravo-Espinosa M., Mendoza M. E., Carlón Allende T., Medina L., Sáenz-Reyes J. T., & R., P. (2014). Effects of converting forest to avocado orchards on topsoil properties in the trans-mexican volcanic system, Mexico. *Land degradation & development*, 25, 452-467.

Burgos A., Anaya C., & Cuevas G. (2012). Informe final. Impacto ecológico del Cultivo de Aguacate a nivel regional y de parcela en el Estado de Michoacán: Definición de una Tipología de Productores. México: Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental.

Burgos A., Anaya C., & Solorio I. (2011). Impacto ecológico del Cultivo de Aguacate a nivel regional y de parcela en el Estado de Michoacán: Definición de una Tipología de productores. México: Fundación Produce Michoacán. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental.

Buzai G., Baxendale C., Cacace G., & Dzendoletas M. (2011). *Análisis de usos del suelo urbano y regional. Localizaciones óptimas y conflictivas estudiadas con Sistemas de Información Geográfica*. Argentina: Departamento de Ciencias Sociales. Programa de Estudios Geográficos. Universidad Nacional de Luján.

Blum W. (2014). *Strategy of Land Utilization for Environmentally Sustainable Agriculture*. Paper presented at the Developing and sharing Agriculture Technology for Global Food Security and Welfare, Jeju, Korea.

Chávez-León G., Tapia L. M., Bravo M., Sáenz J. T., Muñoz H. J., Vidales I., Mendoza Cantú M. E. (2012). *Impacto del cambio de uso del suelo forestal a huertos de aguacate*. México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

CONAGUA. (2000). Servicio Meteorológico Nacional; Datos Climatológicos 1969-2000. <http://smn.cna.gob.mx/>

Cooper W. C., Peynado A., Maxwell N., & Otey G. (1957). Salt-Tolerance and Cold-Hardiness Tests on Avocado Trees. Rio Grande Valley Horticultural Society, 11, 67-74.

Adame R. L. (2011). *Identificación y caracterización de las condiciones del paisaje que determinan el uso agrícola de la tierra en tres municipios del estado de Michoacán*. Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

De la Rosa. (1996). MicroLEIS Version 4.1: Software + Documentation. España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

De la Rosa D., Mayol F., Diaz-Pereira E., Fernandez M., & De la Rosa D. Jr. (2004). A land evaluation decision support system (MicroLEIS DSS) for agricultural soil protection: With special reference to the Mediterranean region. *Environmental Modelling & Software*, 19(10), 929-942.

De la Rosa D., Anaya-Romero M., Diaz-Pereira E., Heredia N., & Shahbazi F. (2009). Soil-specific agro-ecological for sustainable land use - A case study by using MicroLEIS DSS in Sevilla Province (Spain). *Land Use Policy*, 26, 1055-1065.

Dubrovina I., & Bautista F. (2014). АНАЛИЗ ПРИГОДНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ГРУПП ПОЧВ И ТИПОВ КЛИМАТА ДЛЯ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ АВОКАДО В ШТАТЕ МИЧОАКАН (МЕКСИКА)\*. *АГРОХИМИЯ И ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВ*, 5, 611-624.

Esqueta A., & Zetina O. (2012). Potencial productivo de especies agrícolas de importancia socioeconómica en México. México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

FAO. (1976). *A framework for land evaluation*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO. (1997). *Zonificación agro-ecológica. Guía general*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

FAO. (2007). *Land evaluation. Towards a revised framework*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO. (2009). *Guía para la Descripción de Suelos*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Gallegos-Tavera A., Bautista F., & Álvarez O. (2014). Software para la evaluación de las funciones ambientales de los suelos (Assofu). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, Artículo aceptado 19 de junio, 2014*.

Gandoy W. B. (1991). *Manual de laboratorio para el manejo físico de suelos* (No. 22). México: Universidad Autónoma de Chapingo.

Gobierno Bolivariano D. V. (Ed.) (2008) Glosario de la Red Agrometeorológica. Venezuela. Revisado en: [http://agrometeorologia.inia.gob.ve/index.php?option=com\\_content&task=view&id=45&Itemid=58](http://agrometeorologia.inia.gob.ve/index.php?option=com_content&task=view&id=45&Itemid=58) el 11 de agosto de 2014.

Gong Z., X. Zhang, J. Chen & G. Zhang. (2003). Origin and development of soil science in ancient China. *Geoderma*, 115, 3-13.

Hassan R., Scholes R., & Ash N. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends* (Vol. 1). Lodon: Island Press.

Hernández A., B. J., Ascanio M., García J., Morales M., Borges Y. (2011). Cambio de la cobertura del suelo por influencia antropogénica: énfasis en las regiones tropicales. In Krasilnikov P. (Ed.), *Geografía de suelos de México*. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. .

Hulme, M. (1989) 'Is environmental degradation causing drought in the Sahel? An assessment from recent empirical research', *Geography* 74: 38–46.

IEMA. (2005). *Environmental management in organizations: the IEMA handbook*. USA: The Institute of Environmental Management and Assessment.

- INEGI, a. (Cartographer). (1985). Conjunto de Datos Geográficos de las Cartas de Climas, Precipitación Total Anual y Temperaturas Medias Anuales. Serie I. 1:1,000,000. Continuo Nacional. México.
- INEGI, b. (Cartographer). (1985). Conjunto de Datos Geográficos de la Carta Geológica. Serie I. 1:250,000. Continuo Nacional. México.
- INEGI, c. (Cartographer). (1985). Conjunto de Datos Geográficos de la Carta Fisiográfica. Serie I. 1:1,000,000. Continuo Nacional. México.
- INEGI, a. (1993). Guías para la interpretación de Cartografía Geología (2 ed.). México.
- INEGI, b. (1993). Conjunto de Datos Vectoriales Edafológico. Serie II. 1:250,000. Continuo Nacional. México.
- INEGI. (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Tacámbaro, Michoacán de Ocampo. México.
- INEGI. (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010*. México.
- INIFAP. (2009). *Impactos ambientales y socioeconómicos del cambio de uso del suelo forestal a huertos de aguacate en Michoacán* (Vol. 2). México.
- Jankowski P., Robischon S., Tuthill D., Nyerges T., & Ramsey K. (2006). Design Considerations and Evaluation of a Collaborative, Spatio-Temporal Decision Support System. *Transactions in GIS*, 10(3), 335-354.
- Jaramillo D. F. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Medellín.
- Jiménez R., Parra C., Pedrera B., Hernández L., Blanco M., Martínez F., & Álvarez J. (2005). *Manual práctico para el cultivo del aguacate en Cuba*: Unidad Científica Tecnológica de Base de Alquizar, Instituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical.
- Jones C., Baker M., Carter J., Jay S., Short M., & Wood C. (2005). *Strategic environmental assessment and land use planning: an international evaluation*. USA: Earthscan.
- Karlen D. L., Ditzler C. A., & Andrews S. S. (2003). Soil quality: why and how? *Geoderma*, 114, 145-156.
- Kou G., Shi Y., & Wang S. (2011). Multiple criteria decision making and decision support systems — Guest editor's introduction. *Decision Support Systems*, 51, 247-249.
- Krasilnikov P., & Gutiérrez C., A. R., Cruz-Gaistardo C., Sedov S., Solleiro-Rebolledo E. (2013). *The Soils of Mexico*. USA.

Lambin E. F., B.L. Turner, Helmut J. Geist, Samuel B. Agbolac, Arild Angelsen, John W. Bruce, Xu, J. (2001). The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11, 261-269.

Lean O. (1982). Soil pH and lime requirement. In Page A., Miller R. & Keeney D. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties* (pp. 199-224). Madison, WI: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America.

Lehmann A., David S., & Stahr K. (2008). TUSEC-Manual *Technique for Soil Evaluation and Categorization for Natural and Anthropogenic Soils*. Hohenheimer Bodenkundliche Hefte (86). Germany. 224 p.

Lehmann A. (2010). *Evaluation and importance of soil functions in cities considering infiltration and climatic regulation*. Paper presented at the 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, Australia.

Lehmann A., & Stahr K. (2010). The potential of soil functions and planner-oriented soil evaluation to achieve sustainable land use. *Global Change*, 10, 1092-1102.

Liang S., Lehmann A., Wu K., Stahr K. (2011). Planner-Oriented Soil Evaluation in China with TUSEC (Technique for Soil Evaluation and Categorization for Natural and Anthropogenic Soils). Paper presented at the Böden verstehen - Böden nutzen - Böden fit machen, Berlin.

Liang S., Lehmann A., Wu K., Stahr K. (2014). Perspectives of function-based soil evaluation in land-use planning in China. *Soils Sediments*, 14(SOIL ORGANIC MATTER DYNAMICS AND NUTRIENT CYCLING), 10-22.

Lubowski R., Bucholtz S., Claassen R., Roberts M., Cooper J., Gueorguieva A., & Johansson R. (1997). *Land Quality and Land-Use Change Environmental Effects of Agricultural Land-Use Change*. USA.

Martínez V. (2012). Plan de desarrollo municipal 2012-2015, *Diario Oficial*. No 45. Morelia, Michoacán, México.

Morales Manilla L. M. (2014). *The Definition of a Minimum Set of Spatial Relations*. Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Morales Manilla L. M., Cuevas García G., González Gutiérrez I., Terrazas González D. I., Mendoza Cantú M. E., & Valenzuela C. (2010). 2o Informe Trimestral del Proyecto: —Inventario 2008-2010 e impacto ambiental regional del cultivo del aguacate (Etapa I)". Michoacán, México: Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Fundación Produce Michoacán.

- Morales L. M., & Cuevas G. (2011). Informe Final. Inventarios 1974 – 2007, y evaluación del impacto ambiental regional del cultivo del aguacate en el estado de Michoacán. México: Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental.
- Morales L. M., & Cuevas G. (2012). Informe final etapa 2. Evaluación del impacto ecológico del cultivo de aguacate a nivel regional y de parcela en el estado de Michoacán. México: Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental.
- Nelsol D., & Sommers E. (1982). Total Carbon, Organic Carbon and Organic Matter. In Page A., Miller R. & Keeney D. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties* (pp. 535-577). Madison, WI: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America.
- Nizeyimana E., G. W. Petersen, & Looijen, J. C. (2002). Land use planning and environmental impact assessment using geographic information systems In A. Skidmore (Ed.), *Environmental Modelling with GIS and Remote Sensing* Londres.
- Ortiz C. A., & Gutiérrez M. C. (1999). Evaluación taxonómica de sistemas locales de clasificación de tierras. *TERRA Latinoamericana*, 17(04), 227-286.
- Okalebo R., Gathua K., & Woomer P. (1993). Laboratory Methods of Soil and Plant Analysis: A Working Manual. Kenya: KARI, SSEA, TSBF, UNESCO.
- Popenoe W., & Williams L. (1948). Mexican Explorations of 1948. *California Avocado Society*, 33, 54-58.
- Porta J. C., López-Acevedo M. R., & Roquero C. L. (1999). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. (2a ed.). España: Mundi-Prensa.
- PRODUCE M. (2004). Producción orgánica de aguacate: manejo sustentable del suelo. México: Fundación Produce Michoacán.
- Pulido J., S., y G. Bocco. 2003. The traditional farming system of a Mexican indigenous community: the case of Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México. *Geoderma* 111: 249-265.
- Ramírez Sánchez L. G. (2009). *Evaluación de tierras para el cultivo del aguacate de acuerdo con el conocimiento local del paisaje en la región del Pico de Tancítaro, Michoacán*. Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Rebolledo A., & Romero M. A. (2011). Avances en investigación sobre el comportamiento productivo del aguacate (*Persea americana* Mill.) bajo condiciones subtropicales. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria*, 12(2), 113-120.
- Rossiter D. G. (1990). A framework for land evaluation using a micro-computer. *Soil Use and Management*, 6, 7-20.

- Rossiter D. G. (1996). A theoretical framework for land evaluation. *GEODERMA*, 72, 165-202.
- Salgado S., Palma D. J., Lagunes L. C., Debernardi H., & Núñez R. (2010). El suelo y la nutrición de los cultivos. In Salgado S. & Núñez R. (Eds.), *Manejo de fertilizantes químicos y orgánicos*. México: Colegio de postgraduados, Mundi-Prensa.
- Sánchez-Tienda J. (1999). Uso consuntivo del cultivo aguacate: metodología Blaney y Criddle modificada relacionando fenología y precipitación. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 5, 201-207.
- Schlichting E. (1972). Böden puffern umwelteinflüsse ab. *Umschau in Wissenschaft und Technik*, 72, 50-52.
- SE-DGIB, Secretaría de Economía-Dirección General de Industrias Básicas. (2012). *Monografía del sector aguacate en México: situación actual y oportunidades de mercado*. México.
- SEMARNAT. (2000). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y Clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis (2 ed.). México.
- Shim J. P., Warkentin M., Courtney J. F., Power D. J., Sharda R., & Carlsson C. (2002). Past, present, and future of decision support technology. *Decision Support Systems*, 33(2), 111-126.
- SIAP-SAGARPA. (2012). *Rendimientos generales y recomendaciones para incrementar los rendimientos de los cultivos de una manera sustentable y económicamente aceptable para los productores*. México: Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Subsecretaría de Fomento a los Agro negocios, Dirección General de Estudios Agropecuarios y Pesqueros.
- Siebe C., Cram S., & Fernández N. (SA). Loss of soil functions and potentials by urbanization projects in Mexico-City: its importance for land use planning and decision making.
- Siebe C., Bocco G., Sánchez J., & Velázquez A. (2003). Suelos: distribución, características y potencial de uso In A, Velázquez, A. Torres & G. Bocco (Ed.), *Las enseñanzas de San Juan. Investigación participativa para el manejo integral de recursos naturales*. INE-SEMARNAT, México.
- Siebe C., Jahn R., & Starhr K. (2006). *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo* (2 ed.). Instituto de Geología. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Smoyer K. (1948). Can We Afford to Grow Avocados? *California Avocado Society*, 33, 124-130.



- Soil Science of America. (2008). *Glossary of Soil Science Terms 2008*. Soil Science Glossary Terms Committee, Washington.
- Soil Survey Staff. (1951). *Soil Survey Manual*. United States Department of Agriculture, Washington, D. C.
- Storie R. E. (1970). *Manual de evaluación de suelos*. Ed. Uteha. México.
- Tugel A. J., Herrick J. E., Brown J. R., Mausbach M. J., Puckett W., & Hipple K. (2004). Soil Change, Soil Survey, and Natural Resources Decision Making. *Soil Science Society of America Journal*, 69(3), 738-747.
- Turner B. L. (1990). *The Earth As Transformed by Human Action*. New York: Cambridge University Press. Tarbuck E. J., Lutgens F. K., & Tasa D. (2005). *Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física* (8 ed.). Madrid.
- Toledo V. M. (2005). La memoria tradicional: la importancia agroecológica de los saberes locales. *LEISA revista de Agroecología*, 20(4), 16-19.
- Tyner J. A. (2010). *Principles of Map Design*. New York.
- USDA. (1961). *LAND-CAPABILITY CLASSIFICATION* (No. 210). Washington.
- USDA. (1996). *Soil survey laboratory methods manual* (Vol. 42). Washington D. C.: United State Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center.
- Van Diepen C. A., Van Keulen H., Wolf J., & Berkhout A. (1991). Land evaluation: from intuition to quantification. In Stuart B. (Ed.), *Advances in Soil Science* (pp. 139-204). New York: Springer.
- Williams B., & Ortiz C. A. (1981). Middle American folk soil taxonomy. *Geographers* 71, 335-358.
- Wood S., Sebastian K., & Seherr S. J. (2000). *Pilot Analysis of Global Ecosystems. Agroecosystems*. United States of America: World Resources Institute.
- WRB. (2014). *World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps* (Vol. 106). World Soil Resources Reports. Roma: IUSS, ISRIC, FAO.

## CAPÍTULO 11. ANEXOS

### ANEXO 1

#### Cambio de uso de suelo (CUS).

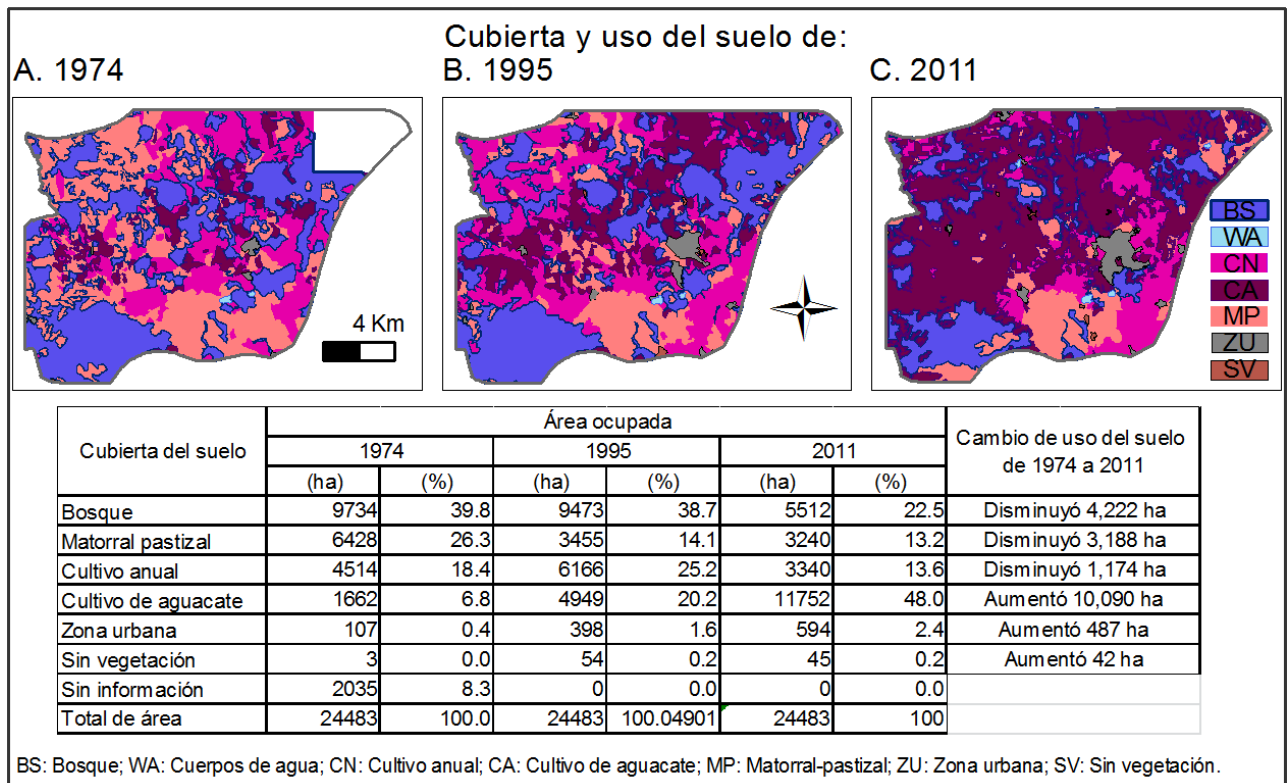


Figura 40. Cambio de uso del suelo.

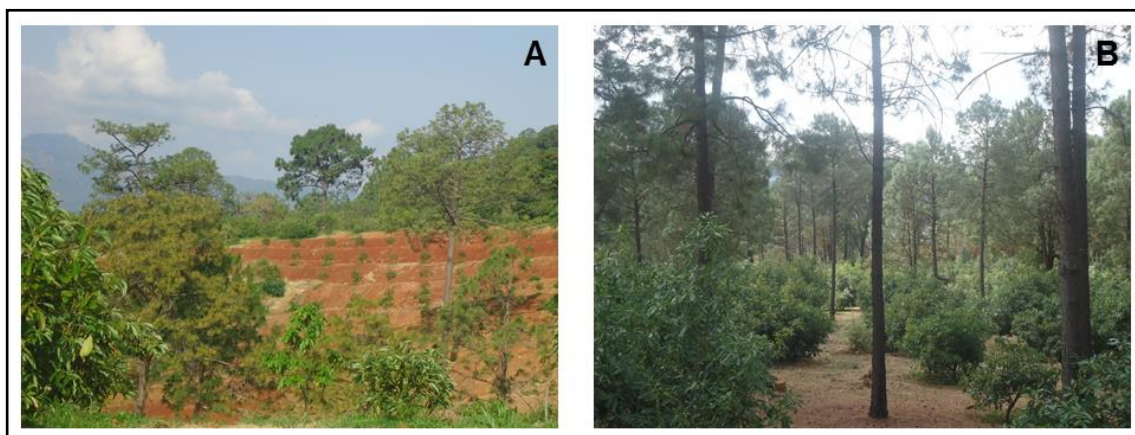
**ANEXO 2****Imágenes de manejo intensivo y extensivo en huertas de cultivo de aguacate.**

Figura 41. Manejo intensivo en Luvisol (A); manejo intensivo en Andosol (B).



Figura 42. Manejo extensivo del cultivo de aguacate.

### ANEXO 3

### Temporalidad de la capacidad del suelo para infiltrar fuertes lluvias bajo diferentes condiciones de uso.

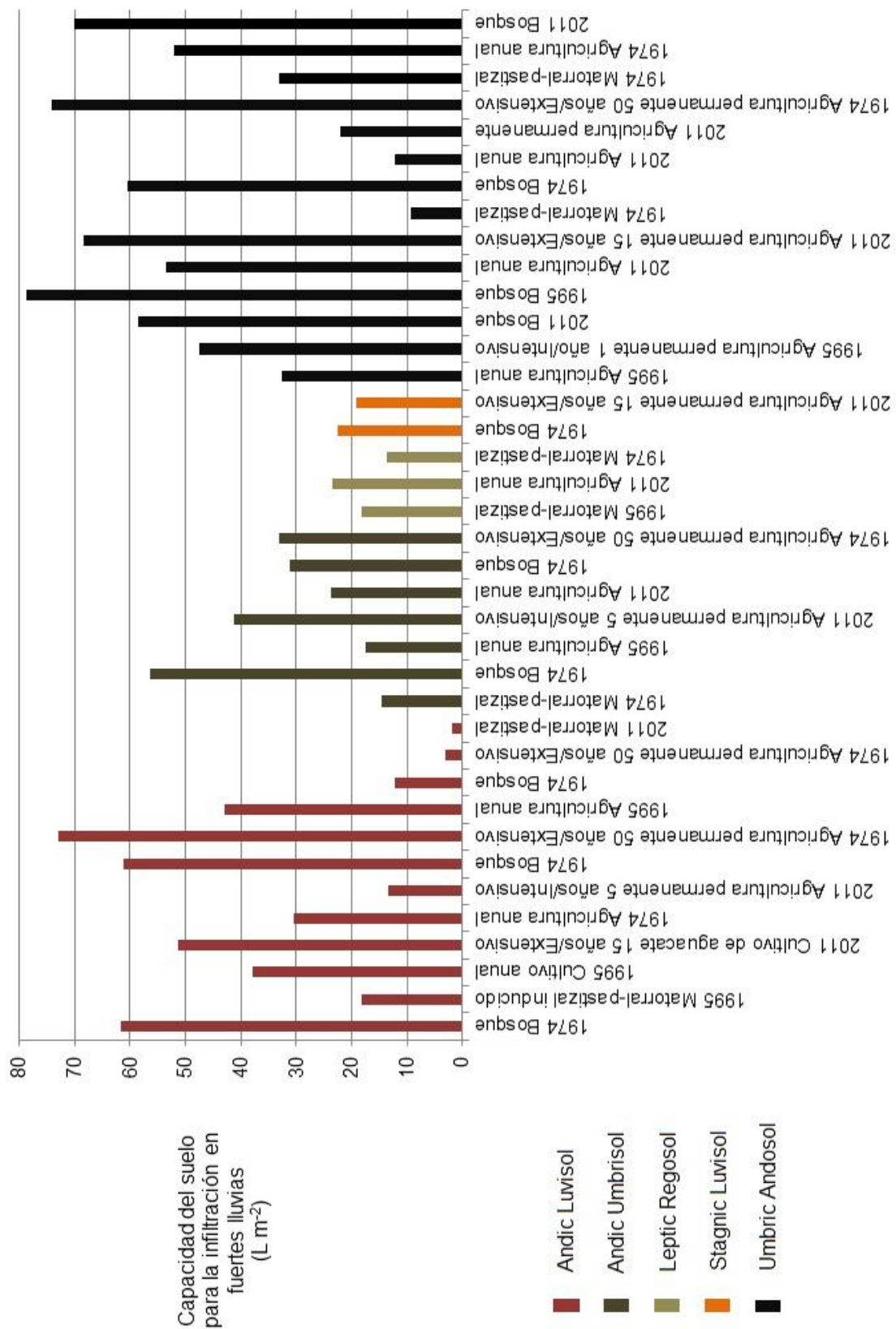


Figura 43. Temporalidad de la capacidad del suelo para infiltrar fuertes lluvias bajo diferentes condiciones de uso.

## Temporalidad de las funciones de los suelos bajo diferentes condiciones de uso.

Cubierta del suelo	Clasificación del suelo	Infiltración en fuertes lluvias (L m <sup>-2</sup> )	Clase de producción alimentos	Perfil
1974 Bosque	Umbric Andosol	61.64	5	
1995 Matorral-pastizal inducido	Umbric Andosol	18.14	2	1
1995 Cultivo anual	Umbric Andosol	37.88	2	
2011 Cultivo de aguacate 15 años/Extensivo	Umbric Andosol	51.46	5	
1974 Agricultura anual	Stagnic Luvisol	30.38	2	2
2011 Agricultura permanente 5 años/Intensivo	Stagnic Luvisol	13.32	2	
1974 Bosque	Umbric Andosol	61.3	5	
1974 Agricultura permanente 50 años/Extensivo	Umbric Andosol	73.08	2	3
1995 Agricultura anual	Umbric Andosol	42.90	4	
1974 Bosque	Leptic Regosol	12.25	3	
1974 Agricultura permanente 50 años/Extensivo	Leptic Regosol	3.15	3	4
2011 Matorral-pastizal	Leptic Regosol	1.95	1	
1974 Matorral-pastizal	Umbric Andosol	14.69	2	
1974 Bosque	Umbric Andosol	56.45	5	5
1995 Agricultura anual	Umbric Andosol	17.58	3	
2011 Agricultura permanente 5 años/Intensivo	Umbric Andosol	41.22	5	
2011 Agricultura anual	Andic Luvisol	23.81	5	6
1974 Bosque	Andic Luvisol	31.14	5	
1974 Agricultura permanente 50 años/Extensivo	Andic Luvisol	33.18	3	7
1995 Matorral-pastizal	Andic Luvisol	18.22	2	
2011 Agricultura anual	Andic Luvisol	23.52	2	
1974 Matorral-pastizal	Andic Luvisol	13.52	2	
1974 Bosque	Andic Luvisol	22.46	5	8
2011 Agricultura permanente 15 años/Extensivo	Andic Luvisol	19.11	2	
1995 Agricultura anual	Umbric Andosol	32.52	2	
1995 Agricultura permanente 1 año/Intensivo	Umbric Andosol	47.4	5	9
2011 Bosque	Umbric Andosol	58.56	5	
1995 Bosque	Andic Umbrisol	78.72	5	
2011 Agricultura anual	Andic Umbrisol	53.49	3	10
2011 Agricultura permanente 15 años/Extensivo	Andic Umbrisol	68.43	4	
1974 Matorral-pastizal	Andic Luvisol	9.20	1	
1974 Bosque	Andic Luvisol	60.39	3	11
2011 Agricultura anual	Andic Luvisol	12.14	2	
2011 Agricultura permanente	Andic Luvisol	21.94	3	
1974 Agricultura permanente 50 años/Extensivo	Andic Umbrisol	74.17	3	
1974 Matorral-pastizal	Andic Umbrisol	33.00	2	12
1974 Agricultura anual	Andic Umbrisol	52.00	4	
2011 Bosque	Andic Umbrisol	70.11	5	

Figura 44. Temporalidad de las funciones de los suelos bajo diferentes condiciones de uso.