



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DEPARTAMENTO DE SUELOS



MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA
PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

Zonificación agroclimática para el establecimiento de sistemas
silvopastoriles con *Paulownia elongata*

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
SECRETARIA DE EXAMENES PROFESIONALES

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

PRESENTA:

VIVIAN SILVANA BARON WILCHES

CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO

2013



**ZONIFICACIÓN AGROCLIMÁTICA PARA EL
ESTABLECIMIENTO DE SISTEMAS SILVOPASTORILES CON
*PAULOWNIA ELONGATA***

Tesis realizada por **Vivian Silvana Barón Wilches**, bajo la dirección del Comité Asesor indicado; aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERIA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

DIRECTOR:



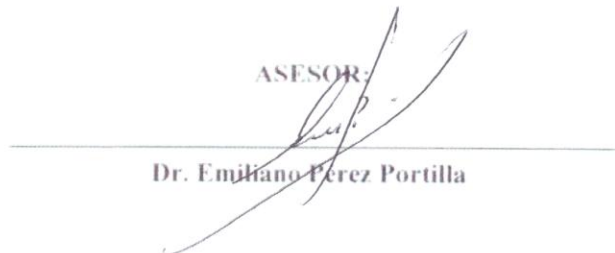
Dr. Rafferi Maldonado Torres

CODIRECTOR:



M.C. Juan Angel Tinoco Rueda

ASESOR:



Dr. Emiliano Pérez Portilla

DEDICATORIAS

A Dios por haberme brindado la oportunidad de realizar mis estudios de maestría y el permitirme conocer un hermoso país llamado México.

A mis padres Rosario Wilches y Nestor Barón, que a pesar de la distancia me mantuvieron en sus oraciones y me apoyaron en todo momento.

A mi hermana Adriana Barón, por su apoyo, compañía y buenos consejos.

A los regalos más preciados que puso Dios en mi camino, mi Hij@ y su padre Andrey Esguerra.

A la República Mexicana y especialmente a CONACYT ya que gracias a sus programas de apoyo a la educación superior me brindaron la oportunidad de realizar mi postgrado y permitirme desarrollar como profesional en esta gran institución educativa.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo por ser la gestora de mi crecimiento profesional, por los apoyos brindados y por su acogimiento.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología que apoyo económicamente mis estudios en este país y brindó la oportunidad para realizar esta Maestría.

A mi comité asesor, por su apoyo, paciencia y buen consejo; Dr. Ranferi Maldonado, MC Juan Ángel Tinoco y el Dr. Emiliano Pérez Portilla.

A la coordinación de la Maestría en Ciencias en Agroforestería de la Universidad Autónoma Chapingo; Dr. David Cristóbal.

DATOS BIOGRAFICOS

Vivian Silvana Barón Wilches, Colombiana, nació el 7 de Abril de 1982 en Bogotá D.C. de padre Casanareño, Néstor Barón y madre originaria de la Puerta de Oro de Colombia, Rosa Wilches. Recibió título de Bachiller Académica en el Colegio Stella Matutina Hnas. De Bethania en el año 1999

En el año 2001 inicia en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas sus estudios como Ingeniera Forestal, dónde se destaca por tener una participación activa en grupos académicos de investigación y en la Asociación Latinoamérica de Estudiantes de Ciencias Forestales, dónde ocupó el cargo de Secretaria General y Presidente; su gestión destaca por promover la movilidad estudiantil y el desarrollo de proyectos que impulsaron a la ingeniería forestal como carrera de gran importancia ambiental en América Latina.

Se desempeña como auxiliar de investigación en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas mediante la elaboración del proyecto dirigido a la identificación de perfiles y competencias para los actores de la Cadena Forestal Productiva de la Región Bogotá Cundinamarca.

Hacia el año 2009 ingresa a la Corporación Ambiental Empresarial CAEM de la Cámara de Comercio de Bogotá para desarrollar proyectos de restauración ecológica en conjunto con el Gobierno Distrital de la ciudad de Bogotá.

En el año 2011, se traslada a México país en el que inicia sus estudios de Maestría en ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible en la Universidad Autónoma Chapingo.

En el año 2012 en conjunto con un equipo de profesionales y amigos fundan la ONG Internacional Allpa Trawa, dedicada al desarrollo de proyectos del área ambiental.

En el año 2013 recibe su título como Maestro en Ciencias en la Universidad Autónoma Chapingo, México.

RESUMEN

Zonificación agroclimática para el establecimiento de sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata*

Barón-Wilches V.S.

Paulownia elongata es una especie vegetal de usos múltiples, idónea para la implementación en sistemas silvopastoriles. Se caracteriza por su rápido crecimiento, madera de buena calidad, producción de forraje para alimentación animal y para la captura de carbono. El *Paulownia Research Group Forest* de Beijing resalta que en muchos países del tercer mundo la explotación de los bosques nativos están generando graves problemas ambientales. Se menciona que una estrategia para combatir ésta situación es la de integrar árboles como la *Paulownia* en sus sistemas productivos tradicionales en arreglo silvopastoril. En México existen investigaciones cuyo objetivo ha sido el introducir la especie al país, sin embargo en la mayoría de los casos se han obtenido resultados poco favorables, entre los pocos de éxito se encuentra la plantación de *Paulownia* del CIATEJ ubicada en el estado de Michoacán. Por lo anterior, este proyecto tuvo como objetivo realizar una zonificación agroclimática para identificar las zonas aptas para el crecimiento y desarrollo de *Paulownia elongata* a nivel nacional. En perspectiva los resultados podrían fomentar la introducción de la especie en diferentes ámbitos del territorio nacional y generar novedosas y competitivas alternativas de producción.

El estudio fue realizado a escala del territorio mexicano. Este se ubica en la parte meridional de América del Norte, con un área de 1 972 550 km². Para el desarrollo del proyecto se utilizó el programa ARCGIS 10. Así mismo fue necesario adquirir información cartográfica en formato digital de uso de suelo, temperatura, precipitación y fisiografía, toda a escala 1:1,000,000. Para la elaboración de la zonificación

agroclimática también se tomaron en cuenta zonas de exclusión y aquellas con potencial ganadero. En la zonificación agro-climática del área de estudio se aplicó la metodología ZAE/SIG de la FAO, se elaboró una matriz de los requerimientos de la especie que se compiló mediante revisión bibliográfica, posteriormente considerando los requerimientos ambientales se hizo la caracterización del territorio nacional, la cual que sirvió como base para la elaboración de la zonificación. En la base de datos se hizo una compilación de las capas, las cuales se utilizaron para realizar algunos procesos geográficos y analíticos, que al final dieron lugar a la zonificación. Una vez determinadas las áreas del país óptimas para el establecimiento y desarrollo de la especie se diseñaron matrices que contienen datos de las principales actividades pecuarias, agrícolas y forestales

Como resultado del manejo de la información se obtuvo que la superficie nacional que cuenta con características óptimas para el establecimiento de *Paulownia elongata*, es de 146,811.2 km² lo que representa el 7.5% del territorio nacional. Los estados con mayor potencial son Sinaloa, Veracruz, Tamaulipas, Michoacán, Guerrero, Campeche y Yucatán, en cuanto a la integración de la especie como componente de algún sistema silvopastoril, se identificó que puede ser asociado o intercalarse con ganado bovino y con algunas especies de importancia agrícola como el maíz, caña de azúcar, frijol y sorgo entre otras.

Palabras clave: *Paulownia*, *Sistemas silvopastoriles*, *Sistemas de información geográfica*

ABSTRACT

Agroclimatic zoning for establishing silvopastoral systems with *Paulownia elongata*

Baron- Wilches, V.S.

Paulownia elongata is a multipurpose plant species, suitable for deployment in silvopastoral systems. It is characterized by rapid growth, good quality wood, fodder production for animal feed and for carbon sequestration. The Paulownia Beijing Forest Research Group notes that in many countries of the Third World exploitation of native forests are causing serious environmental problems. It is mentioned that a strategy to combat this situation is to integrate Paulownia trees in traditional production systems under silvopastoral principles. In Mexico there has been research aimed at introducing the species into the country, but in most cases, the results have not been very favorable. Among the few successes is the CIATEJ Paulownia plantation located in the state of Michoacan. In this project agroclimatic zoning was done nationwide to identify areas suitable for growth and development of *Paulownia elongata*. In perspective, the results could encourage the introduction of the species in different areas of the country and generate innovative and competitive production alternatives.

The study was conducted on a nationwide scale in Mexico, located in the southern part of North America, with an area of 1,972,550 km². For project development, ARCGIS 10 software was used. It was necessary to acquire digital cartographic information on land use, temperature, rainfall and topography, all at a 1:1,000,000 scale. For the preparation of agroclimatic zoning,

exclusion zones and those with potential livestock were also taken into account. In the agro-climatic zoning of the study area AEZ / GIS of FAO was applied, A matrix of the requirements of the species that was compiled through literature review. Then, considering environmental requirements, the national territory was characterized. This served as the basis for the development of zoning. In the database, a compilation of the layers was made to be used in some geographical and analytical processes, which ultimately led to the zoning. After determining the optimal areas of the country for establishment and development of the species, matrices containing data of major livestock activities, agricultural and forestry were designed.

As a result of processing this information, it was determined that the area of national territory having optimal characteristics for the establishment of *Paulownia elongata* is of 146,811.2 km² representing 7.5% of the country. The states with the greatest potential are Sinaloa, Veracruz, Tamaulipas, Michoacan, Guerrero, Campeche and Yucatan, in terms of integrating the species as a component of silvopastoral systems. It was observed that it can be associated or interspersed with cattle and with some species of agricultural importance such as corn, sugar cane, beans and sorghum, among others.

Keywords: Paulownia, silvopastoral systems, geographic information systems

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	9
2.	OBJETIVOS	12
3.	JUSTIFICACIÓN	13
4.	REVISION DE LITERATURA.....	15
4.1.	<i>Paulownia elongata</i> , requerimientos agroecológicos	15
4.1.1.	Características generales de <i>Paulownia elongata</i>	15
4.1.2.	Requerimientos climáticos	15
4.1.3.	Requerimientos edafológicos.....	16
4.2.	<i>Paulownia elongata</i> , importancia económica.....	16
4.3.	Sistemas de Información Geográfica	18
4.3.1.	Que es un Shapefile?	18
4.3.2.	Que es un Raster?.....	19
4.4.	Elaboración de Zonificaciones agroecológicas ZAE/SIG.....	22
4.4.1.	Metodología ZAE/SIG.....	23
4.4.2.	Pasos iniciales para el desarrollo de la ZAE/SIG:.....	24
4.5.	Sistemas silvopastoriles y su diseño	25
4.5.1.	Redes bayesianas (RB)	25
4.5.2.	D & D Diagnostico y Diseño.....	26
4.6.	Usos múltiples y servicios ambientales de <i>Paulownia elongata</i>	27
5.	MATERIALES Y METODOS	30
5.1.	Ubicación del área de estudio.	30
5.2.	Zonificación Agroecológica del área de estudio mediante uso de Sistemas de información geográfica	30
5.2.1.	Caracterización del área de estudio	32
5.3.	Zonificación Agroclimática	46
5.3.1.	Áreas de exclusión.....	47
5.3.2.	Identificación	48
5.3.3.	Proceso de Zonificación.....	48
5.3.4.	Propuestas de componentes para el diseño de sistemas silvopastoriles con <i>Paulownia elongata</i>	54
6.	RESULTADOS Y DISCUSION	69
6.1.	Matriz de requerimientos óptimos de la especie <i>Paulownia elongata</i>	69
6.2.	Zonificación agroecológica para la identificación de zonas aptas para el establecimiento de <i>Paulownia elongata</i>	70

6.2.1.	Cobertura topográfica	71
6.2.2.	Altitud óptima	72
6.2.3.	Temperatura óptima.....	72
6.2.4.	Precipitación óptima	75
6.2.5.	Suelos.....	76
6.2.6.	Áreas de exclusión.....	79
6.2.7.	Zonificación agroclimática.....	79
7.	CONCLUSIONES	85
8.	RECOMENDACIONES	87
9.	LITERATURA CITADA.....	88
10.	ANEXOS	94
	Anexo 1. Cobertura topográfica de México.....	94
	Anexo 2. Cobertura temperatura media de México	95
	Anexo 3. Cobertura precipitación media anual de México.....	96

LISTA DE CUADROS O TABLAS

Cuadro 1. Etapas de la metodología D&D (Reintree, 1990)

Cuadro 2. Ejemplo de Tabla final (Ver en la geodatabase el feature class “Zonificación Final”)

Cuadro 3. Ejemplo de Tabla Final

Cuadro 4. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Veracruz (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Cuadro 5. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Sonora (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Cuadro 6. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Sinaloa (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Cuadro 7. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Durango (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Cuadro 8. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Nayarit (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Cuadro 9. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Tamaulipas (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Cuadro 10. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de San Luis Potosí (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Cuadro 11. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Jalisco (SIAP,2013) (INEGI, 2013)

Cuadro 12. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Colima (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Cuadro 13. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Michoacán (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Cuadro 14. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Hidalgo (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Cuadro 15. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de México (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Cuadro 16. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Morelos y el estado de Puebla (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Cuadro 17. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Guerrero (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Cuadro 18. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Oaxaca (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Cuadro 19. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Chiapas (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Cuadro 20. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Campeche (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Cuadro 21. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Yucatán (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Cuadro 22. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Quintana Roo (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Cuadro 23. Resumen áreas de exclusión

Cuadro 24. Cuadro de calificación de áreas aptas y no aptas para el crecimiento y desarrollo de *Paulownia elongata*

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Aplicaciones básicas de la Metodología Zonificación Ageo-ecológica de la FAO
- Figura 2.** Ubicación geográfica de México, INEGI (2013)
- Figura 3.** Vegetación de México. Rzedowski (2006)
- Figura 4.** Ejemplo de información shape tipo línea.
- Figura 5.** Ejemplo de Generación del TIN
- Figura 6.** Ejemplo de Raster con tamaño de pixel de 500 m
- Figura 7.** Ejemplo de Imagen reclasificada
- Figura 8** Muestra de Herramienta identity
- Figura 9.** Matriz de requerimientos
- Figura 10.** Cobertura altitud óptima para el crecimiento y desarrollo de *Paulownia elongata*
- Figura 11.** Cobertura temperatura optima para el crecimiento y desarrollo de *Paulownia elongata*
- Figura12.** Cobertura precipitación óptima para el crecimiento y desarrollo de *Paulownia elongata*
- Figura13.** Cobertura pH óptimo para el crecimiento y desarrollo de *Paulownia elongata*
- Figura 14.** Cobertura áreas de exclusión del proyecto
- Figura 15.** Zonificación agroclimática
- Figura 16.** Zonas óptimas para el crecimiento y desarrollo de *Paulownia elongata* en México.

ANEXOS

Anexo 1. Cobertura topográfica de México

Anexo 2. Cobertura precipitación media anual de México

Anexo 3. Cobertura precipitación media anual de México

ABREVIATURAS USADAS

AGL	División de Fomento de Tierras y Aguas por sus siglas en inglés
CFC	Clorofluorocarbonos
CONAFOR.	Comisión Nacional Forestal.
FAO	Food and Agriculture Organization
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
INIFAP	Instituto Nacional de investigaciones forestales, Agrícolas y Pecuarias
LUT's	Tipos de Utilización de la tierra por sus siglas en Inglés
RB	Redes Bayesianas
SAGARPA.	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera
SIG	Sistemas de Información Geográfica
TIN	Triangulated Irregular Network
ZAE	Zonificación Agro-Ecológica

1. INTRODUCCIÓN

La *Paulownia elongata* es una especie de usos múltiples por lo que es ideal para usarla en sistemas agroforestales, es originaria de la China, donde existen más de 15 millones de hectáreas plantadas. Esta especie pertenece a la familia de las Schrophulariaceas. *Paulownia elongata* se caracteriza por sus grandes hojas (80 cm de largo y 50 cm de ancho), rápido crecimiento (puede alcanzar entre 1.8 a 2.5 cm de crecimiento vertical/día) que permite ser cosechada a los seis años de edad, madera de buena calidad y resistencia a medios adversos (soporta temperaturas de -15 °C). En China esta especie ha sido usada de forma tradicional como barreras rompevientos desde hace cientos de años en sistemas agroforestales con arroz y trigo, (Zhu Zhao-hua *et al.*, 1986) y como productora de forraje para alimentar cerdos, bueyes y conejos, principalmente.

La *Paulownia elongata* se ha convertido en una alternativa para la obtención de pulpa que se utiliza en la elaboración de papel, la cual es de mejor calidad que la producida por pino y eucalipto, para la producción de forraje por su alta concentración de proteína (20% de proteína y 60% de digestibilidad). También puede contribuir de manera importante a la captura de carbono (elimina 48 libras de CO₂/individuo/año y produce 13 libras de O₂/día) y a la producción de biocombustibles (producción de bio etanol y producción de energía). Según Marcos (2010) los sistemas agroforestales en los que se encuentra ésta especie son cada vez más estudiados y usados en el mundo, por lo que ahora se implementa para la comercialización de servicios ambientales y su uso en la mitigación o prevención de desastres naturales.

Dentro de estos sistemas, los árboles funcionan como sumidero de carbono, siendo la principal fuente de regulación y reducción de gases (CO₂, CH₄ y NO₂) de efecto invernadero (Fabeiro, 2008). Al mismo tiempo son una fuente eficiente para producir bienes y servicios como madera o alimento de alto contenido proteico para animales, que permite cebar ganadería bovina, principal actividad responsable de la destrucción de ecosistemas.

En México se han realizado proyectos silvopastoriles exitosos, entre los que se pueden citar, es el que se llevo a cabo en el municipio de Jilotlán de los Dolores, Edo. de México (Morales, 2006). En este proyecto se involucraron a 18 ganaderos que tenían altos costos de producción. La estrategia que se siguió fue la de implementar, un banco de proteínas con Guaje (*Leucaena leucocephala*) y Paulownia (*Paulownia tomentosa*) para elevar la calidad alimentaria de su ganado, además se optimizó el aprovechamiento del agua. En poco tiempo el proyecto terminó debido a la muerte de los árboles de *Paulownia tomentosa*, atribuida a las condiciones climáticas poco aptas para su desarrollo.

El Paulownia Research Group Forest de Beijing (1991) resaltan que en muchos países de América latina la explotación de los bosques nativos junto con la creciente demanda de madera y combustibles están generando graves problemas ambientales, económicos y sociales. Además, que una estrategia para combatir ésta situación es promover el uso árboles como *Paulownia elongata* en sistemas productivos tradicionales. En China se ha implementado con gran éxito ésta especie, dando buenos resultados en procesos de rehabilitación y conservación del suelo, en el aumento de la productividad y el abastecimiento de la demanda maderera. Otro de los beneficios del uso de *Paulownia*

elongata en sistemas agroforestales es la regulación de microclimas que benefician a los cultivos asociados provocando incrementos en la producción (Yu Shanqing *et al.*, 1987). Sin embargo, es hasta en la actualidad que *Paulownia spp.*, gana importancia en el sector forestal abriéndose así espacio en los mercados Asiáticos, Europeos y de América del Norte.

En México se han empezado a establecer plantaciones en Baja California Sur, Michoacán y Colima dónde han tenido resultados exitosos. La CONAFOR, el INIFAP y algunas empresas privadas no han tenido resultados satisfactorios en las plantaciones con fines de investigación y producción de madera ubicados en los estados de Querétaro y Veracruz. El problema recurrente es el deceso de los árboles y el bajo crecimiento, lo que se atribuye a una inadecuada calidad de suelos, las condiciones climáticas y la mala planificación para su establecimiento o manejo.

Por lo anterior, el presente proyecto tuvo como fin identificar las zonas de la República Mexicana que cumplan con los requerimientos agroclimáticos óptimos para el crecimiento y desarrollo de *Paulownia elongata*, lo que permitirá el establecimiento de proyectos silvopastoriles que tengan mayor viabilidad de acuerdo a las características cada región.

2. OBJETIVOS

Objetivo general: Identificar las áreas agroclimáticamente aptas para el crecimiento y desarrollo de *Paulownia elongata* mediante el procesamiento de información cartográfica digital, que contribuya al diseño de sistemas agrosilvopastoriles adecuadas a las diferentes regiones del país.

Objetivos específicos:

1. Generar un modelo cartográfico dirigido a la identificación de zonas aptas para el crecimiento y desarrollo de *Paulownia elongata* en México.
2. Formular propuestas que identifiquen las especies a considerar en el diseño de sistemas silvopastoriles en las zonas aptas para *Paulownia elongata*.

3. JUSTIFICACIÓN

La alta demanda de madera para obtención de productos como papel, cartón y muebles, sumado a la apertura de espacios para su producción y las actividades que esto conlleva, ha provocado la erosión y degradación de los suelos, la contaminación del aire, del agua y el deterioro de millones de hectáreas de Selvas o ecosistemas boscosos.

Al incluir un componente arbóreo de uso múltiple en un modelo productivo como los sistemas agroforestales, éstos se convierten en una alternativa que puede reducir la presión sobre algunos ecosistemas gracias a los bienes y servicios que ofrecen. Los árboles funcionan como sumidero de carbono, como productores de alimentos, materia orgánica; recuperación y protección del suelo que evitan la erosión hídrica y eólica.

Para que un sistema agroforestal cubra las expectativas de un productor y/o comunidad, en un marco ambientalmente sustentable, se considera necesario seleccionar especies arbóreas adecuadas y altamente productivas. *Paulownia elongata* es una especie que posee características deseables, de ésta se puede obtener madera fina (45 t/ha/año) en plazos muy cortos (8 años), leña, biocombustible, miel y flores. De acuerdo con Salazar (2011), esta especie sirve como forraje para ganado, ya que tiene alrededor de 20% de proteína cruda y 60% de digestibilidad. Tiene capacidad para capturar 10 veces más carbono que muchas especies, absorbiendo 21.7 Kg C/árbol/año y producir considerables cantidades de oxígeno (5.9 kg/árbol/día ó 6,486 kg/ha/año). Es por ello que se tiene la oportunidad de obtener recursos adicionales por pago por servicios ambientales, mientras se contribuye a la mitigación del cambio climático. También puede contribuir a la reducción de la presión sobre los bosques, soslayando la

ampliación de la frontera agrícola y generando sistemas de producción más amable con el medio ambiente.

Pese al auge que ha tenido la especie a nivel mundial, en México la especie no ha sido todavía bien evaluada. En algunas experiencias se han presentado decesos de los árboles, atribuibles a condiciones de temperatura, precipitación o humedad. Por ésta razón, se hace necesario identificar las zonas del país con potencial para el establecimiento de sistemas agroforestales en el que uno de los componentes sea *Paulownia elongata*.

4. REVISION DE LITERATURA

4.1. *Paulownia elongata*, requerimientos agroecológicos

4.1.1. Características generales de *Paulownia elongata*:

La *Paulownia* es el único género maderable de la familia de las Schropulariaceae (Castellanos-Hernández, 2006), es originaria de China, posee un rápido crecimiento (1.8 a 2.5 cm/día) (Zhu-zhao-hua, 1988), es de uso ornamental, agroforestal, maderable y prestadora de servicios ambientales. Se ha determinado que una hectárea de *Paulownia elongata* en condiciones de riego y fertilizada (2000 L por planta + 400 gr/planta de complejo NPK 15-15-15) puede capturar 11043.7 kg/ha de CO₂ total. La biomasa aérea de la especie oscila entre 62.5 a 67% y la biomasa subterránea entre 33 a 37.5 %. (Martínez, 2009).

4.1.2. Requerimientos climáticos:

Según Zhu zhao-hua (1988), *Paulownia* puede desarrollarse correctamente en altitudes de 0 a 1200 msnm, en una franja térmica que va desde los -15 °C a los 40 °C. Las heladas de invierno son benéficas para todas las especies de *Paulownia*; ya que acentúan el color y la textura de la madera. La precipitación óptima varía de 600 mm como mínima a 1500 mm como máxima, con 3 a 9 meses secos. Requiere de radiación solar media (sombra no mayor a 70%).

4.1.3. Requerimientos edafológicos

El árbol de *Paulownia elongata* tiene la capacidad para desarrollarse en suelos pobres o erosionados, siempre y cuando se le apoye con abono orgánico y con un sistema de riego; tolera una gran gama de suelos aunque prefiere suelos profundos (mínimo 50 cm), húmedos y bien drenados crece mal en suelos arcillosos e inundables, porcentaje de arcilla no mayor a 20%, (Vicedex 2007). Se considera que la *Paulownia elongata* puede desarrollar con manejo en suelos altamente salinos y pobres en nutrientes ya que tiene la habilidad para absorber Ca^{++} y Mg^{++} . Esta especie debe ser plantada preferentemente en lugares con suelos arenosos. La porosidad total del suelo debe ser superior al 50%, con aireación de más del 30% y el régimen de lluvia debe superar los 2000 mm.

El pH del suelo para el desarrollo de la *Paulownia* puede tener un máximo de 8.5 (Zhu zhao-hua, 1988) y mínimo de 5.0 (Kays, 1990). El riego necesario debe ser una vez a la semana, es importante su asociación con cultivos que presenten micorrizas en las raíces (hongos simbióticos).

La *Paulownia elongata* prefiere para su establecimiento suelos de zonas forestales ricos en materia orgánica y en zonas planas deben ser ricos en limo y con nivel freático debajo de los 2 m en temporada de lluvias.

4.2. *Paulownia elongata*, importancia económica

La madera de *Paulownia* es de muy buena calidad para la construcción en comparación con especies convencionales. Comercialmente se le conoce como madera de kiri, y puede ser utilizada para la industria del mueble, interiores de placards, molduras y

enchapados, donde la apariencia es más importante que la resistencia. (*Paulownia* SAS, 2011)

En años recientes se han cultivado bosques de *Paulownia* en Australia, Estados Unidos (Carolina, California, Indianapolis y Kentucky), Canadá, América Central y Sudamérica (Colombia). Según Alcaráz-Meléndez (2006), en el caso de Baja California México, la comercialización de esta planta está desarticulada ya que no existen empresas productoras de plantas de vivero, ni venta de madera. Actualmente, la madera que es utilizada en este estado es traída de otros estados o importada, lo que abre una amplia posibilidad de mercado. Gutiérrez (2009) menciona que la producción de *Paulownia* en México se destina principalmente para la fabricación de muebles, reduciendo el exceso de las importaciones. Una vez procesada la madera de esta especie, su precio oscila entre los 800 y 1200 USD/ m³ al mayoreo y es posible producir 166 m³ por hectárea/ año (CIATEJ, 2004). Desde el punto de vista económico, con esta especie se promueve el uso óptimo de los recursos disponibles, su capacidad de crecimiento es de las más elevadas del reino vegetal.

Alcaráz-Meléndez (2006), menciona que una de las más grandes ventajas de la especie *Paulownia* es su amplia capacidad para desarrollarse en zonas con importantes limitantes ambientales, donde es necesario combatir la deforestación, su uso puede ser similar al mezquite el cual es usado para la fabricación de carbón. De acuerdo con estudios realizados por Marcos (2010), la especie tiene un gran potencial para la producción de biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos, que permiten a su vez fijar carbono y crear nuevas alternativas de producción en zonas rurales.

4.3. Sistemas de Información Geográfica

Un sistema de información geográfica (SIG) integra un hardware, software y datos para capturar, gestionar, analizar y mostrar todas las formas de información geográficamente referenciada.

SIG permite ver, comprender, cuestionar, interpretar y visualizar datos de muchas maneras que revelan las relaciones, patrones y tendencias en forma de mapas, globos terráqueos, informes y gráficos. Un SIG ayuda a responder preguntas y resolver problemas al examinar sus datos de una manera que se entiende de manera rápida y fácil de compartir. Así mismo SIG se puede integrar en cualquier marco de sistema de información empresarial.

SIG es ampliamente utilizado en el área ambiental, industrial, construcción y económico con el objetivo de optimizar los programas de mantenimiento, manejo y uso de los recursos. (ESRI, 2013)

4.3.1. Que es un Shapefile?

Un shapefile es un formato sencillo y no topológico que se utiliza para almacenar la ubicación geométrica y la información de atributos de las entidades geográficas. Las entidades geográficas de un shapefile se pueden representar por medio de puntos, líneas o polígonos (áreas). El espacio de trabajo que contiene shapefiles también puede incluir tablas del dBASE, que pueden almacenar atributos adicionales que se pueden vincular a las entidades de un shapefile.

Todos los archivos con la extensión .txt, .asc, .csv, o .tab aparecen en “ArcCatalog” como archivos de texto por defecto. Sin embargo, en el cuadro de diálogo “Opciones”, se puede elegir cuáles de estos tipos de archivo se deben representar como archivos de texto y cuáles no se deben mostrar en el árbol de Catálogo. Cuando los archivos de texto contienen valores delimitados por comas o tabuladores, puede verse su contenido en la vista de tabla de “ArcCatalog” y vincularlos a entidades geográficas. Los archivos de texto se pueden eliminar, pero su contenido son de solo lectura en “ArcCatalog”.

Además se pueden vincular atributos almacenados en una tabla del “dBASE” o en un archivo de texto a las entidades de un shapefile en el cuadro de diálogo Propiedades de una capa, en la ficha Vínculos y Relaciones. Si una tabla contiene información que describe ubicaciones espaciales, tales como coordenadas x,y,z, o direcciones de calles, puede crear un shapefile que represente esas ubicaciones con las herramientas disponibles en “ArcCatalog”.

Además de los shapefiles y las tablas, un usuario SIG de ArcView trabaja con archivos de leyenda, archivos de proyecto y secuencias de comandos de Avenue. Si bien no puede trabajar directamente con estos elementos en ArcGIS, puede administrarlos con ArcCatalog. Para ver estos elementos en ArcCatalog, se debe agregar sus extensiones de archivo a la lista de tipos de archivo. (ESRI, 2013)

4.3.2. Que es un Raster?

En su forma más simple, un ráster consta de una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas (o una cuadrícula) en la que cada celda contiene un valor que representa información, como la temperatura. Los rásteres son fotografías aéreas digitales, imágenes de satélite, imágenes digitales o incluso mapas escaneados.

Los datos almacenados en formato ráster representan fenómenos del mundo real:

Los datos temáticos (también conocidos como discretos) representan entidades como, por ejemplo, el uso del suelo o los datos del suelo.

Los datos continuos representan fenómenos como la temperatura o elevación, o datos espectrales, entre ellos imágenes de satélite y fotografías aéreas.

Las imágenes incluyen mapas escaneados o dibujos y fotografías de edificios.

Los rústeres temáticos y continuos se pueden visualizar en el mapa en forma de capas de datos junto con otros datos geográficos, pero a menudo se utilizan como datos de origen para el análisis espacial con la extensión ArcGIS Spatial Analyst.

Los rústeres de imágenes suelen utilizarse como atributos en tablas: pueden visualizarse con datos geográficos y se utilizan para transmitir información adicional acerca de las entidades geográficas de mapas.

Si bien la estructura de datos ráster es simple, es excepcionalmente útil para una amplia variedad de aplicaciones. En un SIG, los usos de los datos ráster se pueden dividir en tres categorías principales:

Rásteres en forma de mapas base

Un uso común de los datos ráster en un SIG es en forma de visualización de fondo para otras capas de entidades. Por ejemplo, las ortofotografías que se visualizan debajo de otras capas ofrecen al usuario de mapas la garantía de que las capas de mapa se alinean espacialmente y representan tanto objetos reales como información adicional. Las tres fuentes principales de mapas base ráster son las ortofotografías de fotografías aéreas, imágenes de satélite y mapas escaneados.

Rásteres en forma de mapas de superficie

Los rásteres son apropiados para representar datos que cambian continuamente en un entorno (superficie). Ofrecen un método efectivo para almacenar la continuidad en forma de superficie. También proporcionan una representación de superficies con espacios regulares. Los valores de elevación que se miden desde la superficie de la Tierra son la aplicación más común de los mapas de superficie, pero otros valores, como las precipitaciones, la temperatura, la concentración y la densidad de población, también pueden definir superficies que se pueden analizar espacialmente.

Rásteres en forma de mapas temáticos

Los rásteres que representan datos temáticos se pueden derivar al analizar otros datos. Una aplicación de análisis común consiste en clasificar una imagen de satélite por categorías de cobertura de suelo. Básicamente, esta actividad agrupa los valores de datos multispectrales en clases (como tipo de vegetación) y asigna un valor categórico. También es posible obtener mapas temáticos a partir de operaciones de geoprocésamiento que combinen datos de varias fuentes como, por ejemplo, datos

vectoriales, ráster y de terreno. Por ejemplo, puede procesar datos por medio de un modelo de geoprocésamiento para crear un dataset ráster apropiado para una actividad específica. (ESRI, 2013)

4.4. *Elaboración de Zonificaciones agroecológicas ZAE/SIG*

La zonificación agroecológica contribuye a la planificación del uso de recursos rurales, delimita áreas con similares potencialidades y limitaciones para el desarrollo. (FAO, 1997). La metodología ZAE/SIG (zonificación agro ecológica con Sistemas de Información Geográfica) de la FAO, separa las zonas con base a las combinaciones de suelo, fisiografía, y clima. ZAE/SIG tiene aplicaciones que varían de acuerdo a las características de las tierras y a los tipos de usos como se puede observar en la figura siguiente:



Figura 1. Aplicaciones básicas de la Metodología Zonificación Agro-ecológica de la FAO

Para determinar la producción potencial, planificación del uso de la tierra y de las áreas cultivables que se definen a partir de los requerimientos climáticos y edáficos del cultivo o sistema de manejo bajo los que se desarrollan, es necesario establecer la combinación similar de limitaciones y potencialidades de cada zona para el uso de tierras, que sirve como punto de referencia para mejorar la situación existente de uso, ya sea incrementando la producción o limitando la degradación de los recursos. La mayoría de estudios de ZAE establecen los tipos de utilización de tierra (LUT's - Tipos de Utilización de la tierra por sus siglas en Inglés) con referencia a cultivos, o rango de cultivos, y niveles de insumos (FAO, 1997)

La zonificación agroecológica (ZAE en adelante), es una metodología dirigida a la evaluación de los recursos de la tierra que integra el uso de los sistemas de información geográfica, ha sido aplicada en varios países y la han adoptado como el método de evaluación de los recursos de la tierra. Es usada de manera integral en proyectos de planificación territorial a escala nacional y subnacional. Es una herramienta planteada por la metodología ZAE combinada con los Sistemas de Información Geográfica.

4.4.1. Metodología ZAE/SIG

La combinación de información biofísica y socioeconómica en el contexto de la ZAE/SIG ha sido útil para elaborar cartografía de la pobreza, gestión de desastres naturales, para delimitar zonas vulnerables y planificar la intervención. Esto incluye la necesidad de mejorar la capacidad para manejar la información, antes de la operación de

socorro, prevención y mitigación de desastres mediante una mejor ordenación del territorio, planificación para la producción y establecimiento de cultivos. (FAO, 2005)

En esta metodología se establecen tres pasos iniciales para desarrollar la zonificación mediante la aplicación de SIG.

4.4.2. Pasos iniciales para el desarrollo de la ZAE/SIG:

Herramientas de bases de datos. Estos incluyen información compilada en una base de datos sobre suelo, agua, clima, cultivos; así como bases de datos de uso del suelo entre otras que se crean con ayuda del software. Las bases de datos y las herramientas analíticas y de visualización, permite actualmente la rápida generación de productos de información.

Herramientas del modelo.

La FAO (1997) plantea diversas herramientas entre éstas:

- Modelos de crecimiento de los cultivos y la estimación de rendimientos potenciales y reales.
- Modelos para la estimación de riesgo de erosión y la evaluación de la degradación de la tierra.
- Los modelos de balance de agua de los cultivos y requisitos de riego.
- Modelos de balance de nutrientes para las plantas y sus requisitos de crecimiento
- Las técnicas de teledetección para caracterizar patrones de uso de la tierra, evaluación y monitoreo el suelo y los recursos hídricos.
- Sensores remotos

Además, se pueden hacer análisis con las capas de datos almacenados en un SIG, que conlleven a generar mapas sobre la condición de humedad del suelo o degradación de la tierra.

4.5. Sistemas silvopastoriles y su diseño

Los sistemas silvopastoriles intentan un manejo holístico de los recursos naturales, al asociar en un mismo terreno y de forma planeada especies herbáceas para la alimentación del ganado, con vegetación arbustiva y arbórea que pueda proveer impactos positivos sobre el ecosistema. (Musalem, 2001)

El sistema silvopastoril presenta opciones de producción pecuaria en donde los árboles interactúan con los cultivos tradicionales, que pueden ser herbáceas forrajeras y animales en la misma superficie, bajo un manejo integral. Su importancia radica en el aporte de técnicas para la alimentación animal, proporcionan una visión integral y sostenible de la actividad pecuaria, de su entorno ecológico y socioeconómico.

Para el diseño de sistemas silvopastoriles existen diversas metodologías:

4.5.1. Redes bayesianas (RB):

Según Salazar *et al.*, (2000) Las RB son un conjunto de nodos o grafos acíclicos dirigidos mediante flechas que reflejan una relación causal. La relación expresada por las flechas dirigidas entre un nodo y otro está representada mediante probabilidades condicionales. Las RB han sido utilizadas para modelar sistemas expertos en campos

como la medicina para sistematizar el conocimiento médico y poder inferir diagnósticos de enfermedades. En el campo de la agroforestería han incursionado con trabajos como el de Joshi (2001) y Villanueva *et al.*, (2003) donde se identificó mediante redes bayesianas y con información de productores los determinantes de la tala y el aprovechamiento forestal respectivamente.

4.5.2. D & D Diagnostico y Diseño:

Diagnóstico y diseño D&D, es una metodología para el diagnóstico de “problemas de manejo de la tierra y diseño de soluciones agroforestales”. Esta fue desarrollada por el ICRAF para ayudar a los investigadores agroforestales y a los productores para planear e implementar proyectos efectivos de investigación y desarrollo.

La lógica básica del descubrimiento de D&D es expuesta en el Cuadro1, el proceso puede ser subdividido en pequeños pasos y usado selectivamente para varios propósitos, pero la jerarquía lógica del D&D es bastante robusta y generalmente aplicable virtualmente a cualquier problema en diseño tecnológico. El anterior proceso es un paso opcional para la colección y procesamiento de la información requerida para responder las preguntas básicas. Reintree (1990) menciona “Si en cualquier momento usted siente que está perdido en los detalles, simplemente regrese al perfil de procedimientos básicos para su reorientación.

El proceso básico D&D es repetido a través de las etapas de implementación del proyecto para refinar la diagnosis original y mejorar el diseño tecnológico, en vista de la nueva información para la investigación de campo, mas rígidamente controladas en las

estaciones de investigación, y las pruebas finales de extensión en un rango más amplio de sitios.

Cuadro 1. Etapas de la Metodología D&D (Reintree, 1990)

Etapas del D&D	Preguntas básicas a responder	Factores clave a considerar	Modo de investigación
Pre diagnóstico	Definición del sistema de uso del suelo y selección del sitio. (¿En cuál sistema centrarse?) ¿Cómo trabaja el sistema? (¿Cómo está organizado? ¿Cómo funciona para alcanzar sus objetivos?)	Distintas combinaciones de recursos, tecnología y objetivos del productor. Objetivos y estrategias de producción, arreglo de componentes.	Ver y comparar los diferentes sistemas de uso del suelo. Analizar y describir el sistema.
Diagnóstico	¿Qué tan bien trabaja bien el sistema? (¿Cuáles son sus problemas, limitantes, restricciones, síndromes de generación de problemas y puntos de intervención?)	Problemas en el conocimiento de los objetivos del sistema (pequeñas caídas en la producción, problemas de sostenibilidad). Factores casuales, restricciones y puntos de intervención	Entrevistas de diagnóstico y observaciones directas en campo. Conciliación de problemas en subsistemas.
Diseño y evaluación	¿Cómo mejorar el sistema? (¿Qué se necesita para mejorar el desempeño del sistema?)	Especificaciones para la solución de problemas.	Diseño reiterativo y evaluación de alternativas.
Planeación	¿Qué hacer para desarrollar y diseminarlos sistemas mejorados?	Investigación y desarrollo de necesidades, extensión de necesidades.	Diseño de investigación, planeación de proyectos.
Implementación	¿Cómo ajustar la nueva información?	Retroalimentación para las estaciones de investigación, pruebas en campo y estudios especiales.	Rediagnosticó y rediseño en vista de la nueva información.

4.6. Usos múltiples y servicios ambientales de *Paulownia elongata*.

El cultivo de *Paulownia* ayuda en la reducción de gases con efecto invernadero, fija 10 veces más CO₂ que un árbol de otra especie, cada árbol captura 48 libras de dióxido de carbono por año (115,200 libras/acre/año) y libera alrededor de 13 libras de O₂ por día (31,200 libras/ acre/ día). En la ciudad de Chendou, la plantación intensiva de

Paulownia disminuyó la contaminación atmosférica alrededor de un 80%. (Gutiérrez Liñán, 2009)

La madera de *Paulownia* ha sido utilizada como sustituta del poliestireno, el cual es una fuente importante de clorofluorocarbonos (CFC) que destruyen la capa de ozono. Se ha probado que *Paulownia* se desarrolla bien cuando se riega con aguas residuales, esto se refleja en una mayor producción de biomasa. Un árbol de ocho años de edad presenta una producción de biomasa de aproximadamente 275.4 Kg de materia seca total. Por otro lado, las especies del género *Paulownia* pueden considerarse como fuente de materias primas alternativas a las maderas clásicas como el pino y eucalipto, de ella se puede obtener pasta de celulosa, con características parecidas a los residuos agrícolas (paja de trigo, tallos de girasol, sarmientos de vid, tallos de sorgo, podas de olivo, etc.).

Paulownia es un fito-remediador, incrementa la concentración de materia orgánica de los suelos degradados con la caída de sus hojas, procesa y filtra los contaminantes en su sistema vascular y emite oxígeno a la atmósfera, además tiene la capacidad de eliminar metales pesados en el suelo. Los árboles de la especie *Paulownia elongata* tienen la capacidad de recuperar suelos ecológicamente dañados y de ayudar en la repoblación de bosques después de un incendio.

Es usada para la recuperación de zonas forestales, aunque se podrían usar esquejes u otros sistemas de propagación vegetativa, se utiliza el sistema de micropropagación o división de meristemas. Con este sistema se clonan individuos seleccionados por su rapidez de crecimiento y se consigue de este modo homogeneidad en la nueva plantación. Además, incrementa la concentración de materia orgánica de los suelos

degradados con la caída de sus hojas, que se descomponen rápidamente y enriquecen el suelo de nitrógeno. (Gutiérrez Liñán, 2009)

5. MATERIALES Y METODOS

Para el desarrollo de este proyecto se utilizó equipo de cómputo y el programa de análisis geográfico Arcgis 10. Así mismo fue necesario adquirir la información de uso de suelo, vegetación, temperatura y precipitación a escala 1:1000000.

5.1. Ubicación del área de estudio.

El estudio fue realizado a escala de la Republica Mexicana, la cual se ubica en la parte meridional de América del Norte, entre las coordenadas 32°43'06'' latitud norte, 118°22'00'' Longitud Este, 86°42'36'' Longitud Oeste y 14°32'27'' Latitud Norte (Figura 2). Tiene un área de 1,972,550 km² y sus altitudes varían desde los -10 m (laguna salada) hasta los 5,715 m (Pico de Orizaba).

5.2. Zonificación Agroecológica del área de estudio mediante uso de Sistemas de información geográfica

Para el desarrollo del estudio, se realizó una base de datos o matriz de la especie, que se compiló mediante revisión bibliográfica, se consideraron los requerimientos ambientales de la especie, como es la precipitación, temperatura, pH del suelo y altitud. Según la literatura estos elementos del ambiente son importantes en el crecimiento y desarrollo de la *Paulownia elongata*.



Figura 2. Ubicación geográfica de México, INEGI (2013)

Posteriormente se realizó la caracterización ambiental del territorio mexicano, que es el otro componente de la zonificación agroecológica y en el que se contrastan los requerimientos agroecológicos de la especie. El contraste se hace en el ámbito de un Sistema de Información Geográfica que es donde se realizan varios procesos analíticos. Una de las operaciones que se utilizó fue la sobreposición de capas, que combinada con un procedimiento de categorización permitió separar áreas con similares potencialidades y limitaciones para el desarrollo de *Paulownia elongata*, con lo cual se obtuvo el mapa de zonificación agroecológica.

5.2.1. Caracterización del área de estudio

Geología

Según el instituto de Geología de la UNAM (2011), en el territorio mexicano se diferencian 34 unidades sedimentarias, nueve volcano-sedimentarias, 12 volcánicas, 10 intrusivas y 11 de carácter metamórfico. En ésta clasificación, resulta obvio el predominio de las unidades sedimentarias en México en cuanto a su origen, pero resalta también que de las 76 sean del Cenozoico, 28 del Mesozoico, 10 del Paleozoico y cinco del Proterozoico. En este caso, lo que destaca es la juventud de la geología expuesta del área de estudio, pues el 80% de las unidades estratigráficas se ubica en el Cenozoico o Mesozoico, y únicamente el 7% pertenece al Precámbrico, y de éste a su división más joven, que es el Proterozoico.

Así mismo el área de estudio está clasificada en 35 provincias clasificadas de acuerdo a su edad característica, así: dos del Precámbrico, tres del Paleozoico, 13 del Mesozoico, 16 del Cenozoico y una del Cenozoico-Mesozoico. Por su origen dominante, la distribución fue así: seis plutónicas, cinco volcánicas, diez sedimentario-marinas, cuatro sedimentario-continentales, cinco volcano-sedimentarias y cinco de origen complejo.

Geomorfología

La fisiografía de México está clasificada en las siguientes provincias: la llanura costera del Golfo de México, región montañosa de Coahuila, Cuenca de Parras, Sierra Madre Oriental, Sierra Madre Occidental, Meseta central, Zona de fosas tectónicas y vulcanismo reciente Sierra de Chiconquiaco, Zona Montañosa de la Costa del Sureste, Cuenca de Balsas, Zona montañosa de Guerrero, Oaxaca, Sierras de Chiapas, Sierras

frontales, Depresión Central, Sierra Cristalina, Zona desértica de Sonora cuyas características varían de acuerdo a la altitud y condiciones climáticas que marcan la tendencia en el uso del suelo.(UNAM, 2011)

Clima del área de estudio

México se encuentra en la parte septentrional del continente americano, es dividido por el trópico de cáncer, su posición latitudinal junto a factores de altitud y condiciones atmosféricas ocasionan que se presente un territorio con una gran variación climática. El comportamiento de algunos factores y elementos climáticos se describen a continuación:

Temperatura. Se ve afectada por varios factores entre los que se resalta la altitud. La carta de isotermas anuales muestra que al sur del paralelo 20° y a una altitud menor a 1,000 m la temperatura media anual es mayor a 24°C.

Por otra parte al norte de este la temperatura tiende a ser menor al norte del paralelo de 20°, las tierras comprendidas desde la orilla del mar hasta la altitud de 1,000 m tienen una temperatura media anual comprendida entre 20°C y 24°C. Debe considerarse como excepción el extremo norte de la Península de Yucatán, que a pesar de estar al norte del paralelo 20° tiene una media anual mayor a 24°C. En las zonas bajas tropicales, la temperatura es bastante uniforme, en el mes más frío, que es enero no se registran temperaturas medias menores a 18°C.

Por lo que hace a las zonas bajas extra tropicales en su mayor parte la temperatura no desciende de un valor mensual de 14°C y solo en las porciones más septentrionales, con altura superior a 200 m, baja hasta un promedio mensual de 12°C, en las partes altas

superiores de la zona tropical las temperaturas medias anuales que se observan se van reduciendo con la altura hasta llegar a valores de 16°C y , por excepción, en pequeñas áreas del Eje Neovolcánico donde se alcanzan promedios mensuales entre 8 y 12°C.

La porción alta extra tropical tiene en su mayor parte una temperatura media anual comprendida entre los 16° los 20°C que desciende en su mes más frío hasta la isoterma de 12°C.

En la porción noroeste de la altiplanicie septentrional en las cercanías de Zacatecas, la temperatura baja a valores entre 4°C y 8°C durante el mes enero. En algunos puntos se registran temperaturas extremas, esto se puede observar en la porción intertropical con temperaturas máximas de 40°C en altitudes no mayores a los 1500 m sobre el nivel del mar y se reduce a 36°C en mayores alturas como en la Sierra Madre Oriental y el Eje Neovolcánico.

Heladas. En México las zonas de baja altitud (< 1,000 m) o aquellas situadas dentro de la zona tropical, no registran fenómenos de heladas; en la mayor parte de la zona intertropical que posee una altura superior se presentan solo diez días al año. En las altiplanicies y en la Cordillera Neo volcánica, el fenómeno ocurre con más frecuencia, con máximos en los Llanos Apam, el Valle de Toluca y en los puntos culminantes de la Sierra Madre Occidental, en total se observan hasta ochenta heladas al año. Además de estas áreas, se suman los pequeños valles limitados por las serranías altas, esto ocurre

como consecuencia de las masas de aire continental que llegan del norte. En la porción noroccidental se registran hasta 100 heladas al año

Precipitación. En la carta de isoyetas anuales de México, la mayor cantidad de lluvias se registra en la zona costera del Golfo de México, en la porción comprendida entre Tampico y la ciudad de Campeche, desde la orilla del mar hasta alcanzar las cimas altas de la Sierra Madre Oriental, Sierra Madre de Oaxaca, Sierra Atravesada, Meseta Central de Chiapas, con valor medio de 1,100 mm y máximo de 3,000 mm.

En el resto de la costa del Golfo de México, las precipitaciones son de 800 mm anuales en la planicie costera y alcanza en sus altas cimas valores de 1,000 mm. En la Península de Yucatán, la precipitación, en general muestra valores mayores a 1,000 mm de lluvia media anual y amplias áreas tienen precipitación mayor de 1,200 mm al año.

En la costa del Océano Pacífico, la precipitación se mantiene en valores bajos, la que aumenta en algunos sitios por efecto de factores locales. En general en la planicie costera, la lluvia se mantiene debajo de 1,200 mm anuales; recorriéndola de sur a norte, estos valores se van reduciendo hasta llegar al noroeste de Sonora, donde desciende hasta 100 mm en la porción noroeste del Desierto de Altar.

En la mayor parte del centro del se registran valores inferiores a 1,000 mm al año, solamente en las altas serranías se observan valores de mayor importancia.

La precipitación en la Altiplanicie Meridional es notoriamente baja pues en la región del Salado que no excede a 700 mm con un promedio de 400 mm, precisándose algunas áreas donde se registran 300 mm al año. El descenso es todavía más acentuado en la Altiplanicie Septentrional, donde se observan valores máximos de 400 mm, con promedio general 300 mm y mínimo de 200 mm.

En la Península de Baja California la precipitación es ligeramente superior en la mayor parte de la superficie a 150 mm, y solo en pequeñas regiones comprendidas entre Tijuana y Ensenada se observan lluvias del orden de 300 mm y aun mayores en las cimas de las Serranías de las Palmas, la Giganta, la Laguna (más de 400 mm) y cerro de San Lázaro. De acuerdo a la carta de isoyetas de México el mes más lluvioso en el país es julio, sin embargo a fines de septiembre y principio de octubre se suele presentar en diversas partes de todo el país una temporada de lluvias ciclónicas conocidas como el cordonazo de San Francisco que a veces ocasionan grandes inundaciones.

En la mayor parte del territorio mexicano se presenta una temporada de lluvias de carácter general comprendida de junio a mediados de octubre, que ha sido llamada “lluvias de verano”, antecedido de un periodo de transición en el mes de mayo de lluvias irregulares y dispersas; hay un corto periodo de secas en el mes de agosto, que en algunos años se es conocido con el nombre de “canícula” que es factor importante para adoptar cualquier calendario de cultivos.

Se definen también algunas zonas con regímenes particulares:

La Sierra Madre Oriental desde el Trópico de Cáncer hasta el Pico de Orizaba, la vertiente norte de la Mesa Central de Chiapas y la porción sureste de la Sierra Madre de Chiapas, registran lluvias durante todo el año con valores totales elevados. Tienen la característica de presentarse distribuidas en la mayor parte del año y con montos importantes en el verano.

El declive Este de la Sierra Madre Oriental que va desde el paralelo que pasa por la ciudad de Tampico hacia el sur; siguiendo por las cimas altas de la Sierra Madre de Oaxaca; la vertiente norte de la Sierra Madre de Oaxaca y la Meseta Central de Chiapas incluyendo la Península de Yucatán, registran las lluvias generales ya señaladas, pero además lluvias de invierno, de manera que las secas solamente se extienden de marzo a mayo.

Forman grupo especial y característico el declive sur de la Sierra Madre de Chiapas, donde se observan intensas lluvias monzónicas de mayo a noviembre y en el resto del año se registra una temporada seca.

La porción noroeste de la Península de la Baja California y la vertiente oeste de las sierras de San Pedro Mártir y de Juárez, tienen una contra temporada de lluvias en invierno con bajo valor anual.

Las lluvias generales de mayo a octubre tienen reducido valor en la Altiplanicie Septentrional, un valor intermedio en la Altiplanicie Meridional, e importantes en las vertientes exteriores de cordilleras y en el resto de sierras altas.

Las lluvias tanto de verano como de otoño, son provocadas por la presencia de masas de aire húmedas que proceden de las masas marinas contiguas, movimientos de tipo

monzónico que junto con fenómenos de convección local ascendente, provocan la condensación de los vapores de agua que traen esas masas.

México posee una media anual es del orden de 717 mm, que lo coloca en la categoría de país con territorio de escasas lluvias; estas se presentan en forma violenta, tempestuosa, de gran intensidad, corta duración y frecuentemente acompañadas de granizo.

Humedad relativa. La humedad relativa es mayor en la costa del Golfo de México que en la del Océano Pacífico. En la costa atlántica es bastante elevada en la zona tropical, alcanzando un valor de 80% en la Península de Yucatán. En la planicie costera en su porción ístmica, de Sotavento y las Huastecas, que termina al norte en las cercanías de Soto la Marina, es de 70%. Valores de entre 70 a 80% se observa en la costa del Océano Pacífico, en Chiapas a lo largo de una angosta faja costera de Jalisco, Colima, Michoacán, Nayarit y parte de Sinaloa, que penetra en la parte montañosa de la Sierra Madre Occidental, en los estados de Durango Chihuahua.

En la Planicie Septentrional se observa un valor muy bajo comprendido entre 30 y 40% en la Altiplanicie Meridional se presenta baja humedad comprendida entre 40 y 50%. En la Península de Baja California se presenta una humedad relativa comprendida entre 60 y 70%.

Suelos

Debido a su ubicación geográfica, a su topografía y a sus climas, México posee una cantidad importante de tipos de suelos, al menos 15. Por su extensión destacan el Regosol, Litosol y Xerosol. (INEGI, 2011) Otros suelos importantes en el área de estudio son: Luvisol, Acrisol, Andosol, Solonchak, Gleysol y Planosol.

A continuación una breve descripción de los suelos de México (SEMARNAT, 1996):

Fluvisoles: Eutricos, Calcáricos, Dístricos, Mólicos, Umbricos y sálicos, son suelos depositados por el agua: ocurren generalmente en las márgenes de las corrientes. De las cuales reciben aportes de materiales de manera regular.

Glevsoles: Eutricos, cálcicos, Dístricos, Andicos, Mólicos, Umbricos, Tiónicos y Gélicos. Formados a partir de materiales no consolidados con horizontes moteados. Están saturados de agua la mayor parte del año, algunos de sus colores son grises, azulosos o verdosos. Se les puede encontrar principalmente en zonas de inundación: Tabasco. Son suelos delgados. Se les puede encontrar principalmente en zonas de inundación, están bien representados en el estado de Tabasco

Leptosoles: Eutricos, Dístricos, Rendzicos, Mólicos, Umbricos, Líticos y Gélicos. Son los suelos más abundantes del país. El material original puede ser cualquiera tanto rocas como materiales no consolidados con menos del 10 % de tierra fina. Aparecen fundamentalmente en zonas altas o medias con una topografía escarpada y elevadas pendientes. Se encuentran en todas las zonas climáticas y, particularmente, en áreas

fuertemente erosionadas. Campeche, Coahuila, Chiapas, Durango, Nuevo León Oaxaca, Puebla, Querétaro, Quintana Roo, San Luis Potosí, Tamaulipas y Yucatán.

Arenosoles: Cámbicos, Lúbricos, Ferrálicos, Albicos, Calcáricos y Gleyicos. Son suelos que tienen alto contenido de arena, encuentran generalmente en zonas costeras.

Andosoles: Háplicos, Mólicos, Umbricos y Vítricos. Glevicos y Gélicos. Suelos formados de cenizas volcánicas de color oscuro. Se localizan principalmente en el Eje Neovolcánico.

Vertisoles: Eutricos, Dístricos, Húmicos, Calcáricos, Crómicos, Vérticos, Ferrálicos, Glevicos y Gélicos. Suelos poco desarrollados aun con características semejantes al material de origen. De color claro presentan de estructura o consistencia debido a la intemperización. Tlaxcala.

Calcisoles. Háplicos, Lúbricos y Pétricos. Se encuentran principalmente en las zonas áridas y semiáridas de Coahuila, Chihuahua, Nuevo León, San Luis Potosí y Zacatecas.

Gvdsisoles: Háplicos, calcios lúbricos y pétricos, presentan un horizonte (Gudsico o Petrogudsico o ambos dentro de una profundidad de 125 cm a partir de la superficie).

Solonetz: Háplicos, Mólicos, Cálricos, Gupsicos, estancados y Glevicos. Son suelos con un alto contenido de sodio. Presentan una estructura prismática o columnar.

Solonchaks. Háplicos, Mólicos, Cálricos, Gupsicos, Sódicos, Glevicos, Gélicos. Suelos con alto contenido de sales solubles en alguna parte o todo el perfil son abundantes en las regiones áridas y semiáridas.

Kastanozems, Haplicos, Lúvicos, Cálcicos y Gupsicos. En general los *Kastanozems*. *Chernozem* y *Feozems* son prácticamente muy parecidos. Típicos de pastizales y su diferencia radica en el contenido de carbonatos y la intensidad del color.

Chernozem, Haplicos, Cálcicos, Lúvicos, Glósicos y Glevicos. Presentan una superficie de color negro, con un alto contenido de humus bajo vegetación de praderas. Presentan una superficie de color oscuro. Mas lixiviada que los *Kastanozems* y los *Chernozem*. Distrito federal, Guanajuato, Hidalgo Jalisco, Edo de México, Morelos y Querétaro.

Luvsoles: Haplicos, Férricos, Crómicos, Cálcicos, Vérticos, Albicos, Estancados y Glevicos. Son suelos de contenido mediano a alto de bases con horizontes arcillosos que evidencian un proceso continuo de lavado de bases. Se encuentran en zonas templado-cálidas a frías.

Planosoles. Eutricos, Dístricos, Mólicos, Umbricos, y Gélicos. Suelos con drenaje deficiente debido a que presentan en el subsuelo una capa de muy baja permeabilidad. Aguascalientes.

Feozems. Haplicos, Calcáricos, Lúvicos, Estancados y Glevicos. *Lixisoles*. Haplicos, Férricos, Plinticos, Albicos y Glevicos. Se encuentran en zonas tropicales y subtropicales.

Acrisoles. Haplicos, Férricos, Húmicos, Plinticos y Glevicos. Suelos sumamente intemperizados con horizontes arcillosos. Se encuentran en zonas templadas cálidas a frías

Alisoles. Ghaplicos, Férricos, Húmicos estancados y Glevicos. Se encuentran en zonas tropicales y subtropicales.

Nitisoles. Haplicos, Ródicos y Húmicos arcillosos. Poseen baja capacidad de intercambio catiónico de arcilla en horizontes.

Ferraisoles. Háplicos Xánticos, Ródicos, Húmicos Géricos y Plinticos. Presentan arcillas ricas en sesquióxidos. Se les considera como los suelos más desarrollados. Donde el lavado de bases ha sido excesivo

Plintisoles. Eutricos, Dístricos, húmicos y Albicos. Tienen un 25 % como mínimo en volumen de una mezcla de cuarzo arcilla y otros diluyentes ricos en hierro y pobre de humus.

Histosoles. Fólicos, Ferricos, Fíbricos Tiónicos y Gélicos. Son suelos orgánicos poseen 40 cm como mínimo de materiales orgánicos. Principalmente musgo.

Antrosoles. Aricos, Cumulicos, Fímicos y Urbicos. Suelos en las que las actividades humanas han provocado modificaciones profundas debido a la remoción y perturbación de los horizontes de superficie.

Regosoles. Eutricos, Calcáricos, Gypsicicos, Dístricos, Umbricos y Gélicos. Son suelos delgado, se consideran poco desarrollados sobre materiales no consolidados, se les encuentra en cualquier tipo de clima y generalmente sobre topografía accidentada: Colima, Guerrero, Michoacán, Nayarit, Sinaloa y Sonora.

Vegetación

En cuanto a la vegetación de México, el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) menciona: a los bosques, selvas, matorrales y algunas variantes de estos tipos de vegetación que se identifican por sus rasgos fisionómicos y florísticos, algunas variantes son: el chaparral, rosetófilo, sarcocaule, mesófilo de montaña, entre otros.

Según la clasificación de Koppen los principales tipos de vegetación en México son:

Bosque tropical perennifolio, Bosque tropical subcaducifolio, Bosque tropical caducifolio, Bosque espinoso, Matorral xerófilo, Pastizal, Bosque de *Quercus* Bosque mesófilo de montaña, Vegetación acuática y subacuática.

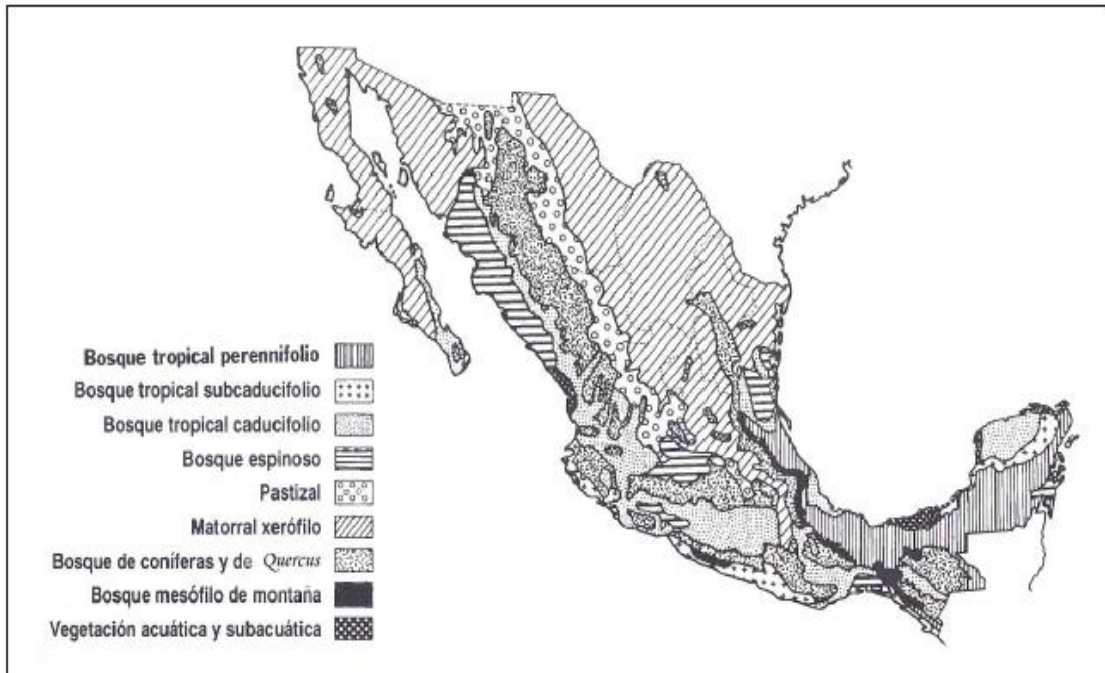


Figura 3. Vegetación de México. Rzedowski (2006)

Dentro de la clasificación de Koppen se pueden diferenciar otros tipos de vegetación como: Selva alta perennifolia, Selva mediana baja perennifolia, Selva alta o mediana subperennifolia, Selva alta o mediana subcaducifolia, Selva baja subperennifolia, Palmares, Sabana, Manglar, Popal, Selva baja caducifolia, Selva baja espinosa, Perennifolia, Selva baja espinosa caducifolia, Matorral espinoso con espinas laterales, Cardonales, Tetecheras, Izotales, Nopaleras, Matorral espinoso con espinas terminales, Matorral inerme o Subinerme parvifolio, Crasi-rosulifolios espinosos, Tulares, Carrizales, Pastizales, Zacatorrales, Agrupaciones de halófitos, Chaparral, Bosque de enebros, Pinares, Encinares, Bosque caducifolio, Bosque de abetos u oyameles, Vegetación de dunas costeras, Vegetación de desiertos áridos arenosos, Vegetación de Páramos de altura. A continuación una breve descripción de las formaciones más importantes:

Selva alta perennifolia. Es una Selva muy densa dominada por árboles altos, de más de 30 m., con abundantes bejucos y plantas epifíticas (que viven enraizadas sobre otras plantas), y que permanece verde todo el año, aunque a veces algunos árboles aparecen desnudos de follaje durante la fase de la floración.

Se desarrolla este tipo de Selva en las tierras calientes húmedas, con temperatura media anual superior a 20°C, precipitación media anual superior a 1,500 mm., y temporada seca nula o muy corta (con precipitaciones muy altas, de más 2,000 mm., la temporada seca puede ser algo más larga). Se encuentra en las vertientes y planicies del Golfo: Suroeste de Campeche, Tabasco, Norte de Chiapas, Veracruz (hasta la Huasteca

Potosina), Norte de Oaxaca, y sobre la vertiente del Pacífico en la región del Soconusco hasta Pijijiapan.

Selva mediana o baja perennifolia. Es Selva muy densa, pero menos alta. Se encuentra en las regiones elevadas (1,200 a 2,500 m.) de las serranías, en declives abruptos del Golfo o del Pacífico, y tiene en consecuencia poca extensión. Se desarrolla en clima fresco (temperatura media anual por debajo de 18° C), con escasa oscilación térmica, muy húmedo (precipitación anual media por encima de los 1,500 mm.), de temporada seca corta o nula y con nieblas muy frecuentes. Los árboles más abundantes pertenecen a géneros como *Billia*, *Clusia*, *Engelhardtia*, *Meliosma*, *Oreopanax*, *Podocarpus*, *Saurauia*, *Styrax*, *Symplocos*, *Weinmannia*, etc. Dado lo abrupto de los terrenos en que esta Selva se desarrolla, no existen generalmente cultivos ni lugares habitados en esas regiones.

Selva alta o mediana subperennifolia. Se caracteriza porque algunos árboles que la forman (alrededor de 25-50%) pierden sus hojas en lo más acentuado de la época seca. Este tipo de Selva cubre áreas extensas con clima cálido (temperatura media anual superior a 20°C) y subhúmedo (precipitación anual media poco superior a 1,200 mm.) con algunas lluvias en la temporada seca que es más marcada que en las zonas de Selva perennifolia.

Selva alta a mediana subcaducifolia. Alrededor del 50-75% de los árboles altos de esta clase de Selva pierden sus hojas durante lo más álgido de la época seca se encuentra principalmente en planicie y declives bajos de la vertiente del Pacífico, al Sur de Sinaloa

hasta Chiapas. Aunque hay zonas con este tipo de Selva en el Estado de Yucatán, en las planicies centrales de Veracruz y en la depresión central de Chiapas.

Sabana. Las sabanas están constituidas por praderas de gramíneas sin árboles o con árboles esparcidos. Se encuentran en partes de la Península de Yucatán (región de los Chenes y S. O. de Campeche, p. ej.) y son extensas en las planicies del Norte de Chiapas, Tabasco y Veracruz, depresión central de Chiapas y planicies y declives bajos del Pacífico desde la frontera de Guatemala hasta el Sur de Sinaloa.

Popal. Es un tipo de vegetación herbácea que se desarrolla en lugares pantanosos con agua permanente de alrededor de un metro de profundidad. Las plantas que componen el popal están enraizadas en el fondo, pero tienen grandes hojas, largas y anchas, que sobresalen del agua; crecen tan densamente que el agua apenas es visible.

Selva baja espinosa caducifolia. Se caracteriza por el predominio de leguminosas espinosas bajas (4 a 8 m.) y preponderantemente de hojas caedizas. Una de las fases características, indicadora de cierto grado de aridez, es aquella en que tiende a dominar el Mezquite verde, Palo verde o Mantecoso (*Cercidium spp.*), se desarrolla en climas subáridos.

5.3. Zonificación Agroclimática

Para realizar esta zonificación fue necesario recurrir a información secundaria proporcionada por el INEGI, disponible en su página web. Esta información se encontró en formato Shapefile y se utilizaron los siguientes componentes:

- Curvas de Nivel
- Área Natural Protegida
- Precipitación media anual
- Temperatura media anual
- Estados
- Corriente de agua
- Cuerpos de agua
- Suelos
- Uso del Suelo y Vegetación

Las imágenes digitales con extensión shapefile mencionados anteriormente sirvieron de base para los análisis que se indican a continuación.

5.3.1. Áreas de exclusión.

Están definidas como áreas en las que no se puede proceder a realizar el proyecto, ya sea por normativas ambientales o porque sus condiciones impedirían el desarrollo normal del proyecto. Para este caso y de acuerdo a la disponibilidad de la información y a la escala en la que se está trabajando se consideraron las siguientes: áreas naturales protegidas, cuerpos de agua, áreas urbanas, y bosques y selvas.

Para el caso de los corrientes de agua de agua se consideró como área de exclusión un buffer de 50 metros a los lados de las corrientes, de la misma manera los bosques y las selvas por su sensibilidad ambiental.

5.3.2. Identificación

En la matriz de requerimientos de *Paulownia elongata* se encuentran los parámetros climáticos, topográficos y fisiográficos que contienen los valores óptimos para su crecimiento y desarrollo. Los valores que se encuentran en la matriz son los que se consideraron ideales para el crecimiento y desarrollo de la especie.

5.3.3. Proceso de Zonificación

Basándose en la información contenida en la matriz de requerimientos se procedió a aplicar la metodología ZAE/SIG de la FAO.

La información de precipitación, temperatura y altura sobre el del mar se recuperó de imágenes que tienen representadas isolíneas (Figura 4), debido a esto fue necesaria la generación de un modelo TIN (Triangulated Irregular Network), utilizando el software ArcGis 10.

La aplicación TIN (Triangulated Irregular Network) es un método de interpolación lineal que se utiliza para la generación del raster a partir de las Isolineas base. Las imágenes raster permiten representar en intervalos de área, los valores considerados en la matriz de requerimientos ambientales de la especie (Figura 5).

Una vez generado el TIN, se procedió a exportarlo a formato Raster con un tamaño del pixel de 500m, que para la escala de trabajo se consideró adecuado (Figura 6)

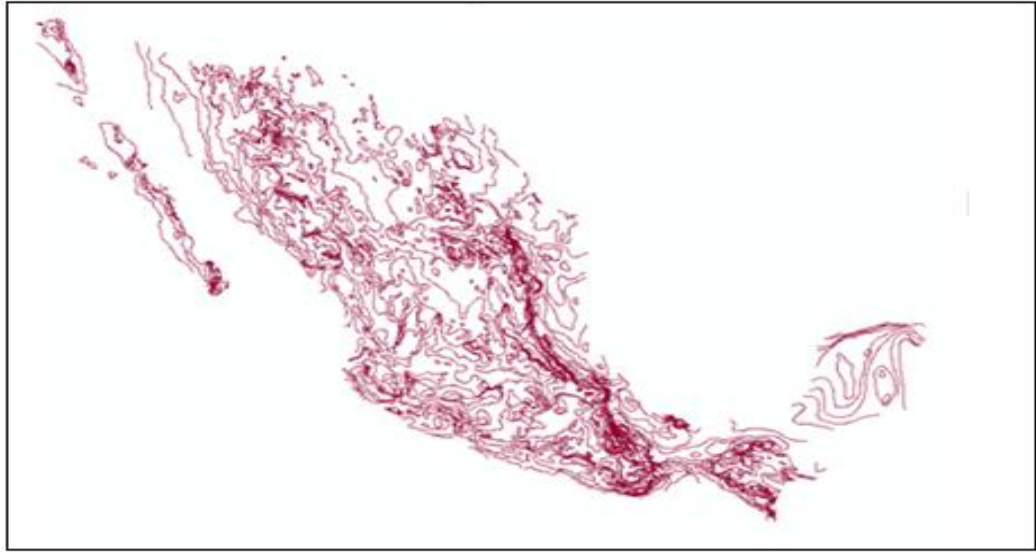


Figura 4. Ejemplo de información shape tipo línea.



Figura 5. Ejemplo de Generación del TIN

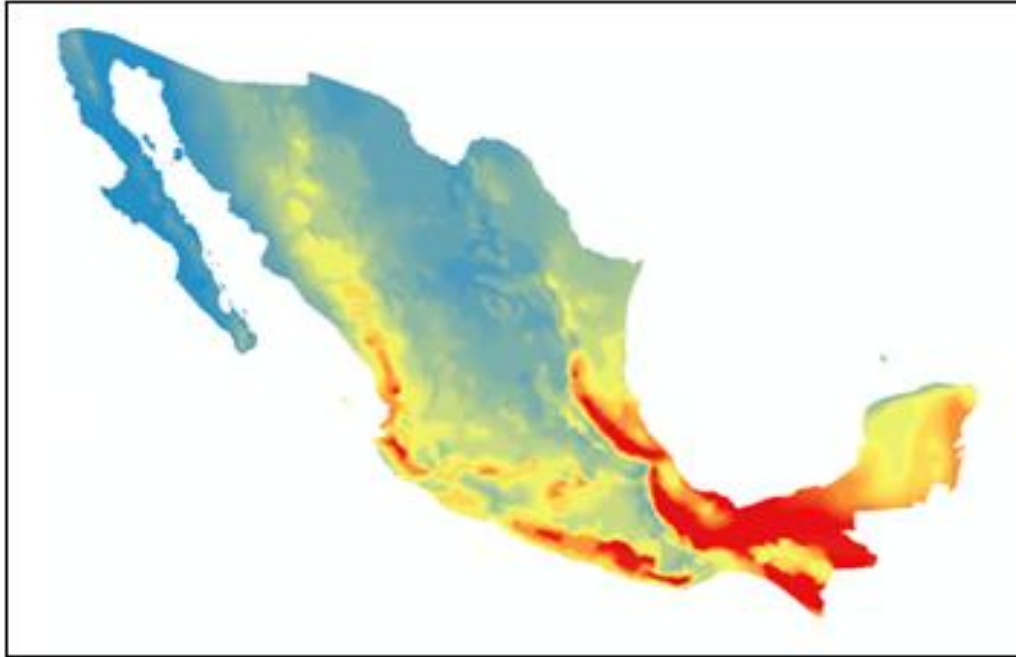


Figura 6. Ejemplo de Raster con tamaño de pixel de 500 m

Ya con las imágenes Raster generadas se procederá a reclasificarlas de acuerdo a los requerimientos agroecológicos, a las áreas aptas se les asignó el valor de 2 y a las no aptas el valor de 1. Para el caso de precipitación por ejemplo se reclasificó la imagen de acuerdo a los valores que se encuentran en la figura 7. De acuerdo a la matriz el intervalo óptimo de precipitación va de los 600 a los 1500 mm, a los píxeles dentro de este rango se les asignó el valor de 2 y a los demás el valor de 1. Como se observa en la Figura 7, los píxeles que representan el rango óptimo se encuentran de color verde y son las áreas con precipitación adecuada para *Paulownia elongata*. Por último en cada una de las capas se calcularon las áreas que son aptas y no aptas.

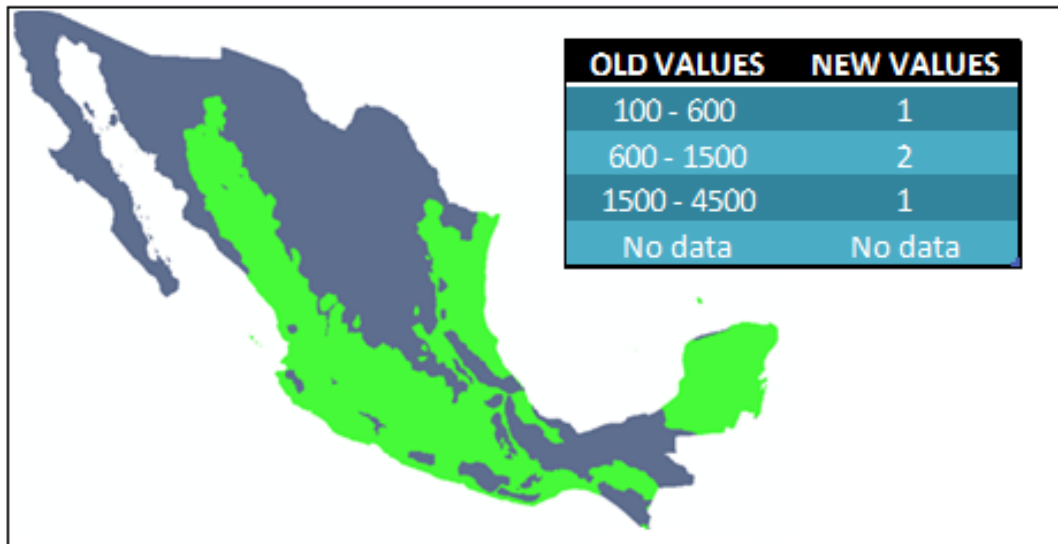


Figura 7. Ejemplo de Imagen reclasificada

Posteriormente los Raster se convirtieron a archivo vectorial, los cuales se utilizaron en la sobreposición de las capas en el proceso de zonificación final. Las capas que se emplearon son: precipitación, temperatura, altura y pH del suelo. El modulo que se utilizó fue ArcMap y la aplicación Identity (Figura 8). Como se sobrepusieron cuatro capas los valores con valores de 1 y 2, los resultantes de la adición variaron desde 1 hasta 8.

En el Cuadro 2 se presentan los valores de cada ítem y la suma de los cuatro valores producto de la sobreposición. Los polígonos que tienen valores de 8 son los que representan condiciones adecuadas para la especie.

En esta parte del proceso no se involucraron las zonas de exclusión. Por su carácter restrictivo estas zonas tendrán la peor calificación en la sumatoria total, por lo que se les asignó el valor 0 por defecto.

Por medio de la herramienta “Update” de ArcGis se sobrepone la capa de áreas de exclusión sobre la de zonificación (Figura 9) actualizando esta última con la geometría de la primera.

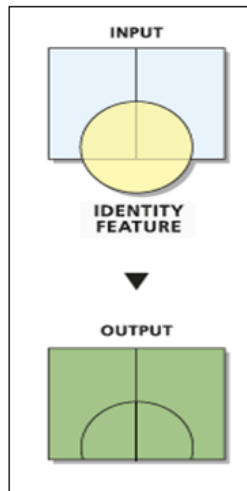


Figura 8. Muestra de Herramienta identity

Cuadro 2. Ejemplo de Tabla final (Ver en la geodatabase el feature class “Zonificación Final”)

P	T	E	pH	TOTAL
1	1	2	2	6
1	1	2	2	6
2	2	2	2	8
1	2	2	2	7
1	1	2	2	6
2	1	2	2	7
1	2	2	2	7
2	2	2	2	8
1	1	2	2	6
1	1	2	2	6
1	1	2	2	6
1	2	2	2	7
2	2	2	2	8

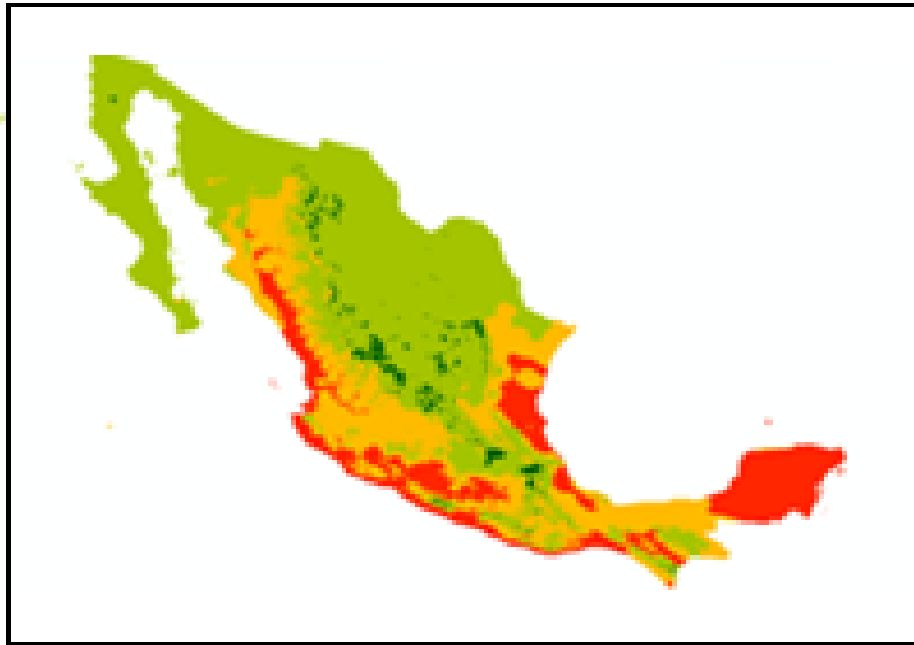


Figura 9. Ejemplo de Resultado de Zonificación (Las áreas rojas cumplen todos los requerimientos evaluados, la calificación total da 8)

En el cuadro 3, se muestran los valores resultantes en los que se toman las áreas de exclusión con su calificación de cero incluidas en la sumatoria total.

Cuadro 3. Ejemplo de Tabla Final

NOM_ENT	P	T	E	Ph	TOTAL
Aguascalientes	1	1	1	2	0
Aguascalientes	1	1	1	2	5
Aguascalientes	1	1	2	2	0
Aguascalientes	1	1	2	2	6
Aguascalientes	2	1	1	2	0
Aguascalientes	2	1	1	2	6

Una vez descartadas de la capa las zonas de exclusión, considerando los valores de cada área se hizo una reclasificación de éstas en las tres categorías siguientes: aptas, moderadamente aptas y no aptas.

5.3.4. Propuestas de componentes para el diseño de sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata*

El objetivo fue crear una base teórica para la futura elaboración de propuestas de investigación para el diseño de sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata*.

La especie por su rápido crecimiento, su capacidad fitoremediadora, su aporte de nitrógeno, alta producción de biomasa, estructura y en general por ser de uso múltiple, la postulan como una excelente opción a la hora de ser implementada en asociaciones agroforestales. De acuerdo a las referencias de algunos autores son pocas las investigaciones desarrolladas al respecto, sin embargo las asociaciones más conocidas son entre *Paulownia*/ Trigo, *Paulownia*/Arroz, *Paulownia*/Pastos/Animales y *Paulownia* como barrera rompevientos. Por lo anterior se hace necesario el desarrollo de investigaciones que permitan implementar a futuro en sistemas Agroforestales o Silvopastoriles una especie promisoriosa como lo es la *Paulownia elongata*.

La generación de las propuestas para el diseño de sistemas silvopastoriles para las áreas óptimas para el crecimiento y desarrollo se hizo mediante la aplicación de la metodología propuesta por Nair (1990) para lo cual se realizó una identificación de los

componentes aptos para los sistemas silvopastoriles de acuerdo a la información económica, entre ellos se identificaron componentes pecuarios, forestales y agrícolas. Para el presente estudio se determinó como componente arbóreo a *Paulownia elongata*.

Propuestas de componentes para estados con clasificación “óptima”

Sonora, Sinaloa, Durango, Nayarit, Tamaulipas, San Luis Potosí, Jalisco, Veracruz, Colima, Michoacán, Hidalgo, Estado de México, Morelos, Puebla, Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Campeche, Yucatán, Quintana Roo.

De acuerdo con Nair (1990) la distribución espacial que a futuro se implementarían basándose en la información aquí propuesta sería a nivel local y regional. La distribución temporal dependerá del diseño de cada uno de los sistemas silvopastoriles y de las especies que sean implementadas en cada una de ellas.

En las matrices se puede observar de acuerdo a la información económica y el potencial pecuario de las regiones aptas para el establecimiento de *Paulownia elongata* el tipo de productos podrían ser aplicados a futuro en sistemas silvopastoriles en interacción con la especie.

De acuerdo con el INEGI y el SIAP en el estado de Veracruz es factible el establecimiento de sistemas silvopastoriles con especies como el chayote, según la dirección general de investigación y extensión agrícola del ministerio de agricultura de costa rica (1991) este debe ser sembrado bajo condiciones favorables de viento ya que los frutos pequeños pueden verse afectados y generar pérdidas de producción, según Yu

Shanqing (1987) *Paulownia elongata* es usada de manera tradicional en la china como barrera rompe viento para la protección de cultivos de arroz y trigo por lo que sería favorable desarrollar investigaciones para evaluar los beneficios que podría proporcionar *Paulownia* en dicho aspecto, otros productos con los que se pueden plantear sistemas silvopastoriles o agroforestales según Altieri (2011) son: los cítricos como el limón, la naranja y la mandarina (como el caso de los estados de san Luis Potosí (Cuadro 10) y Tamaulipas (Cuadro 9) y Colima (Cuadro 12) y además de ellos la papaya, de estos sistemas ya existen antecedentes de aplicación en México. En el cuadro 4 se observan las actividades principales desarrolladas en el estado de Veracruz, allí se realizó una compilación de los productos primarios que juegan un papel importante en la economía de dicho estado y que tras evaluación podrían aplicarse en su momento a un sistema silvopastoril con *Paulownia*.

Cuadro 4. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Veracruz (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Actividades económicas principales	productos principales del sector primario	Actividad Pecuaria
<ul style="list-style-type: none"> • Agricultura, Ganadería , Aprovechamiento forestal, pesca y caza 	<ul style="list-style-type: none"> • Chayote • Naranja • Piña • Limon • Café 	<ul style="list-style-type: none"> • Aves • Bovinos • Ovinos

De acuerdo con los productos principales de Sinaloa (Cuadro 5), Sonora (Cuadro 6) y se recomienda el uso de trigo ya que este presenta comportamientos favorables en este tipo de sistemas productivos como es el caso mencionado por Plevich (2007), en el que se diseñó e implementó un sistema de silvopastoreo con *Pinus elliottii*. Según la FAO (2012) los árboles y arbustos fijadores de Nitrógeno pueden sembrarse simultáneamente con pasturas o con cultivos trimestrales en rotación de cereales como arroz seco, maíz (como el caso del Estado de México, cuadro 15) sorgo, mijo; oleaginosas como soya, maní, ajonjolí; legumbres como caupí o frijol de cabeza negra, canavalia, mungo, frijol de abono; o frutos como sandía o patilla (ver Jalisco cuadro 11), zapallo o ayote, cidra o chayote, melón, etc. De acuerdo con lo anterior productos como la sandía y el trigo podrían ser un componente alternativo para ser aplicado en sistemas silvopastoriles con *Paulownia*.

Cuadro 5. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Sonora (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Actividades económicas principales	productos principales del sector primario	Actividad Pecuaria
<ul style="list-style-type: none"> • Agricultura, Ganadería, Aprovechamiento forestal, pesca y caza 	<ul style="list-style-type: none"> • Trigo en grano • sandía • Calabacita • Garbanzo • Nuez 	<ul style="list-style-type: none"> • Porcino

Cuadro 6. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Sinaloa (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Actividades económicas principales	productos principales del sector primario	Actividad Pecuaria
<ul style="list-style-type: none"> •Agricultura, Ganadería , Aprovechamiento forestal, pesca y caza 	<ul style="list-style-type: none"> •Maíz grano •Jitomate •Pepino •Tomate verde •Calabacita •Garbanzo •Chile verde •Frijol •Sorgo grano 	<ul style="list-style-type: none"> •Pesquera •Caprinos

Según la GTZ (2007) es importante incluir en los sistemas agroforestales y/o silvopastoriles abonos verdes como el maní forrajero, la avena y el lupino para mantener su humedad, fertilidad y controlar malezas. En este aspecto el estado de Durango (Cuadro 7) y de Jalisco (Cuadro 11.) Poseen el potencial para la producción de dichos componentes por lo que sería importante proponer sistemas productivos en los que se asocien dichas especies con *Paulownia*.

Cuadro 7. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Durango (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Actividades económicas principales	productos principales del sector primario	Actividad Pecuaria
<ul style="list-style-type: none"> •Agricultura, Ganadería , Aprovechamiento forestal, pesca y caza 	<ul style="list-style-type: none"> •Avena forrajera •Maíz forrajero •Sorgo Forrajero •Frijol •Manzana 	<ul style="list-style-type: none"> •aves •bovinos (lacteos) •Caprinos (lacteos)

El tabaco *Nicotina tabacum*, según la FAO (1999) es aplicada con gran éxito en sistemas silvopastoriles en Cuba, su uso es principalmente en cercas vivas y barreras rompevientos. La *Paulownia elongata* presta al igual que el tabaco protección a cultivos. En Cuba se puede encontrar asociaciones de plantaciones de tabaco en cercas vivas con especies como *Anacardium occidentale* (marañón), *Citrus limón*, *Citrus sp.* (Naranja). El estado de Nayarit (cuadro 8) según la SAGARPA (2008) es el productor principal de tabaco en México con una producción del 82% , a pesar de que se busca un reconversión de dichos cultivos podría plantearse un proceso progresivo en el que estos sean reemplazados con *Paulownia elongata* en sistemas silvopastoriles o agroforestales con el objetivo de alimentar ganadería caprina o bien sea en asocio con aguacate *Persea americana* que tiene antecedentes muy exitosos como en el caso mencionado por Mendieta-Lopez (2007) en el que dicha especie ha sido de las más investigadas en cuanto a su aplicabilidad en sistemas agroforestales y donde juega un papel trascendental en dichos sistemas, la especie suele asociarse con cafetales y otros frutales, los estados que presentan este potencial son Michoacán e Hidalgo.

Cuadro 8. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Nayarit (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)



Cuadro 9. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Tamaulipas (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Actividades económicas principales	productos principales del sector primario	Actividad Pecuaria
<ul style="list-style-type: none"> • Agricultura, Ganadería , Aprovechamiento forestal, pesca y caza 	<ul style="list-style-type: none"> •Sorgo grano •Soya •Naranja •Mandarina •Cebolla •Cártamo 	<ul style="list-style-type: none"> •Pesquera •Bovinos

Cuadro 10. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de San Luis Potosí (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Actividades económicas principales	productos principales del sector primario	Actividad Pecuaria
<ul style="list-style-type: none"> • Agricultura, Ganadería , Aprovechamiento forestal, pesca y caza 	<ul style="list-style-type: none"> • Elote • Soya • Naranja 	<ul style="list-style-type: none"> • Bovinos • Caprinos • Ovinos

En México se conocen experiencias de sistemas silvopastoriles asociados con Maíz en aparcería alternados con *Brachiaria brizantha* y bovinos a media ceba (Quinto, L. *et al.*, 2009), los estados que se caracterizan por la alta producción de Maíz son San Luis Potosí (ver Cuadro 10), Estado de México (Cuadro 15) y Campeche (Cuadro 20). Según Muthuri *et al.*, (2005) *Paulownia* presenta un buen comportamiento en sistemas

agroforestales, en los que especies del genero aparecen intercaladas con otros cultivos agrícolas como el maíz o el trigo.

Cuadro 11. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Jalisco (SIAP,2013) (INEGI, 2013)

Actividades económicas principales	productos principales del sector primario	Actividad Pecuaria
<ul style="list-style-type: none">• Agricultura, Ganadería , Aprovechamiento forestal, pesca y caza	<ul style="list-style-type: none">• Maíz forrajero• Pastos• Frambuesa• Maíz grano• Sandía• Tomate verde	<ul style="list-style-type: none">• Aves• Bovino• Porcino• Apícola

Casierra-posada (2007) otro producto que puede ser aplicado en sistemas agrosilvopastoriles es la Guayaba *Psidium guajava* donde aproximadamente 1.768 has han sido cultivadas bajo este sistema que ha tenido resultados óptimos entre las altitudes de 400 a 600 m y donde el resultado más notable es el rápido crecimiento y fructificación de la Guayaba (aprox. a los dos años) de acuerdo con lo anterior estados como Michoacán (ver cuadro 13) e Hidalgo (cuadro 14) presentan las condiciones para desarrollar esta clase de sistemas productivos no solo con la Guayaba sino con el limón, el aguacate, el durazno y también cucurbitáceas como la calabaza (GTZ, 2007) muy apropiado para estados como Campeche (Cuadro 20) , Sinaloa y Sonora.

Cuadro 12. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Colima (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Actividades económicas principales	productos principales del sector primario	Actividad Pecuaria
<ul style="list-style-type: none"> • Agricultura, Ganadería , Aprovechamiento forestal, pesca y caza 	<ul style="list-style-type: none"> • Limón • Copra 	<ul style="list-style-type: none"> • Aves • Bovino • Ovino • Caprino

Cuadro 13. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Michoacán (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Actividades económicas principales	productos principales del sector primario	Actividad Pecuaria
<ul style="list-style-type: none"> •Agricultura, Ganadería , Aprovechamiento forestal, pesca y caza 	<ul style="list-style-type: none"> •Aguacate •Guayaba •Durazno •Melón •Limón 	<ul style="list-style-type: none"> •Aves •Bovino •Ovino •Caprino •Apicola

Cuadro 14. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Hidalgo (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Actividades económicas principales	productos principales del sector primario	Actividad Pecuaria
<ul style="list-style-type: none"> • Agricultura, Ganadería , Aprovechamiento forestal, pesca y caza 	<ul style="list-style-type: none"> • Limón • Aguacate • Guayaba • Jitomate 	<ul style="list-style-type: none"> • Aves • Caprino • Apicola

Otro tipo de intercalado que han dado resultados aceptables dentro de sistemas de silvopastoreo son el mencionado por Zaragoza (2012) la asociaciones maíz-frijol, maíz-

haba o maíz-veza, pueden aportar entre 50 y 100 Kg de N por ha al año. Estas estrategias manejadas conjuntamente pueden reducir la cantidad de N a emplear en un programa de fertilización y aumentar el contenido de materia orgánica en el suelo, lo que mejora la estructura del suelo, aumenta la capacidad de retención de humedad e incrementa las poblaciones de microorganismos benéficos para el sistema. Para el caso del Estado de México (cuadro 15) que es un productor importante de maíz y de haba se podría proponer un diseño agrosilvopastoril con *Paulownia elongata* en la que se aplique dichos componentes.

Cuadro 15. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de México (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Actividades económicas principales	productos principales del sector primario	Actividad Pecuaria
<ul style="list-style-type: none"> • Agricultura, Ganadería, Aprovechamiento forestal, pesca y caza 	<ul style="list-style-type: none"> • Haba verde • Avena • Maiz grano • Maiz forrajero 	<ul style="list-style-type: none"> • Ovino

El café es una especie que es sembrada bajo sol o bajo sombra, también es usada en asociaciones de café (*Coffea arabica*) + eucalipto (*Eucalyptus deglupta*) de cuatro, seis u ocho años de edad, café + poró (*Erythrina poeppigiana*), pasto brachiaria (*Brachiaria brizantha*) + mangium (*Acacia mangium*) Ávila (2001), en el caso de México y de manera específica en el estado de Veracruz (Cuadro 4) sistemas agroforestales de café-plátano, café-macadamia, café-cedro rosado, café-ganado ovino y café-chalahuite.

Espinoza-Domínguez (2013). Según Los árboles de sombrío en los cafetales permiten ejercer un control sobre la economía del agua lo que mitiga los efectos que los períodos de déficit hídrico imponen sobre la producción; también, contribuyen a mantener la fertilidad del suelo, ayudan a reducir la erosión, reciclan nutrientes y aportan gran cantidad de materia orgánica, además incrementan las poblaciones de plantas epífitas y aumentan la diversidad de las especies de aves, entre otros.

Cuadro 16. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Morelos y el estado de Puebla (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Actividades económicas principales	productos principales del sector primario	Actividad Pecuaria
<ul style="list-style-type: none"> •Agricultura, Ganadería , Aprovechamiento forestal, pesca y caza 	<ul style="list-style-type: none"> •Café cereza 	<ul style="list-style-type: none"> •Ovino •Bovino •Porcino •Caprino •Avicola •Apicola

No se conocen experiencias de asociaciones entre café y *Paulownia* sin embargo por los antecedentes de cada una de las especies en sistemas agroforestales podría proponerse el desarrollo de investigación que permitan desarrollar este tipo de asociaciones en los estados de Veracruz y Chiapas (ver cuadro 19)

Cuadro 17. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Guerrero (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Actividades económicas principales	productos principales del sector primario	Actividad Pecuaria
<ul style="list-style-type: none"> •Agricultura, Ganadería , Aprovechamiento forestal, pesca y caza 	<ul style="list-style-type: none"> •Copra •Jamaica •Mango •Melón 	<ul style="list-style-type: none"> •Bovino •Porcino •Caprino •Avicola •Apicola

Cuadro 18. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Oaxaca (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Actividades económicas principales	productos principales del sector primario	Actividad Pecuaria
<ul style="list-style-type: none"> • Agricultura, Ganadería , Aprovechamiento forestal, pesca y caza 	<ul style="list-style-type: none"> • Pastos • Piña • Ajonjoli • Papaya 	<ul style="list-style-type: none"> • Caprino

Anguiano (2012) menciona otras clases de combinaciones Por los altibajos en el precio de la fruta, los productores desarrollan diferentes combinaciones, lo que origina multiplicidad de sistemas agrosilvopastoriles. Combinaciones con frutales, como mango, limón, plátano; con cereales, como maíz y sorgo y con pastos nativos y mejorados, como guinea (*Panicum máximum*), Braquiaria (*Brachiaria brizantha*), estrella (*Cynodon plectostachyus*), entre otros, se realizan con fines ganaderos, aunque con bajos resultados productivos.

Cuadro 19. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Chiapas (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Actividades económicas principales	Productos principales del sector primario	Actividad Pecuaria
<ul style="list-style-type: none"> • Agricultura, Ganadería, Aprovechamiento forestal, pesca y caza 	<ul style="list-style-type: none"> • Platano • Cafe cereza • Palma africana • Papaya • Mango 	<ul style="list-style-type: none"> • Bovino

Cuadro 20. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Campeche (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Actividades económicas principales	Productos principales del sector primario	Actividad Pecuaria
<ul style="list-style-type: none"> • Agricultura, Ganadería, Aprovechamiento forestal, pesca y caza 	<ul style="list-style-type: none"> • Arroz • Calabaza • Zapote • Soya • Maiz grano semilla 	<ul style="list-style-type: none"> • Apícola

Propuestas para el componente de Forrajes y pasturas

Norte de México

Las praderas nativas prevalecen en áreas de altas precipitaciones, en planicies y en serranías suaves sobre suelos relativamente profundos.

Las especies más comunes son *Bouteloua gracilis*, *Bouteloua hirsuta*, *B. curtipendula*, *Distichlis spicata*, *Sporobolus airoides* e *Hilaria mutica*, *Muhlenbergia spp*, *Festuca*

spp., *Piptochaetium spp.*, *Bromus spp.*, *Poa spp.*, *Aristida spp.*, entre otras.

Cuadro 21. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Yucatán (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Actividades económicas principales	productos principales del sector primario	Actividad Pecuaria
<ul style="list-style-type: none">• Agricultura, Ganadería , Aprovechamiento forestal, pesca y caza	<ul style="list-style-type: none">• Brenjena• Henequen	<ul style="list-style-type: none">• Apícola

Cuadro 22. Matriz de componentes alternativos para su implementación en sistemas silvopastoriles con *Paulownia elongata* para el estado de Quintana Roo (SIAP, 2013) (INEGI, 2013)

Actividades económicas principales	productos principales del sector primario	Actividad Pecuaria
<ul style="list-style-type: none">• Agricultura, Ganadería , Aprovechamiento forestal, pesca y caza	<ul style="list-style-type: none">• Achiote	<ul style="list-style-type: none">• Bovino• Porcino• Caprino• Avícola

La capacidad de carga de estas praderas oscila entre 7 ha/ UA cuando están en condición excelente sobre planicies, tierras bajas y valles, y 30 ha/ UA en condición pobre sobre las pendientes de las sierras

Centro de México

La vegetación forrajera predominante son las praderas naturales se identifican las siguientes especies: *Bouteloua gracilis* y praderas bajo densidades variables de *Quercus spp.*, incluyendo especies de los géneros *Bouteloua*, *Muhlenbergia*, *Lycurus*, *Stipa*, *Piptochaetium*, *Aristida*, *Panicum*, *Setaria*, *Andropogon* y *Elyonurus*.

La capacidad de carga de estas praderas (entre 10 y 18 ha/ UA) es mayor que la de las praderas en el norte. Sin embargo, en áreas donde los restos de la vegetación nativa son escasos hay algunas partes con una alta densidad de población que fueron sometidas a agricultura intensiva antes de la llegada de los españoles (Mesa Central) y algunas otras partes fueron sometidas a agricultura intensiva en el último siglo (El Bajío).

Sur de México

La especie forrajera predominante son las pasturas sembradas de gramíneas. Se identifican especies como: *Digitaria decumbens*, *Panicum maximum*, *Cynodon plectostachyum*, *Pennisetum purpureum* y más recientemente *Brachiaria spp.*; en algunas otras partes esta vegetación ha sido reemplazada por praderas cortas de especies nativas (localmente conocidas como «gramas») dominadas por *Paspalum notatum*, *P. conjugatum* y *Axonopus*. Diferentes tipos de bosques caducos son característicos del trópico las gramíneas son raras en esta vegetación nativa, sin embargo hay poblaciones medianas de leguminosas como *Leucaena spp.*, *Desmodium spp.*, *Macroptilium spp.*, y *Centrosema spp.* Los sistemas de producción vacuna están basados en el pastoreo de i) vegetación nativa o pasturas sembradas de *Hyparrhenia rufa* en las áreas secas (producción de terneros que son terminados en la región tropical húmeda), o ii) pasturas

sembradas con *Panicum maximum* o *Cynodon plectostachyum* y más recientemente con *Andropogon gayanus* (sistema de doble propósito). Áreas de Veracruz, Puebla y Chiapas con una precipitación anual superior a 1,000 mm se caracterizan por bosques caducos de *Liquidambar styraciflua* como el principal árbol; en algunas partes el bosque ha sido reemplazado por pasturas de pasto Kikuyu (*Pennisetum clandestinum*) sobre las cuales se basan los sistemas de producción lechera y ovina; estos son más intensivos y productivos que los sistemas de rumiantes en otras partes de la región montañosa. (FAO, 2005)

6. RESULTADOS Y DISCUSION

6.1. Matriz de requerimientos óptimos de la especie Paulownia elongata

La matriz de requerimientos (Figura 9) se obtuvo mediante consulta bibliográfica, para ello se tomaron las variables sobre las cuales no se puede hacer manejo.

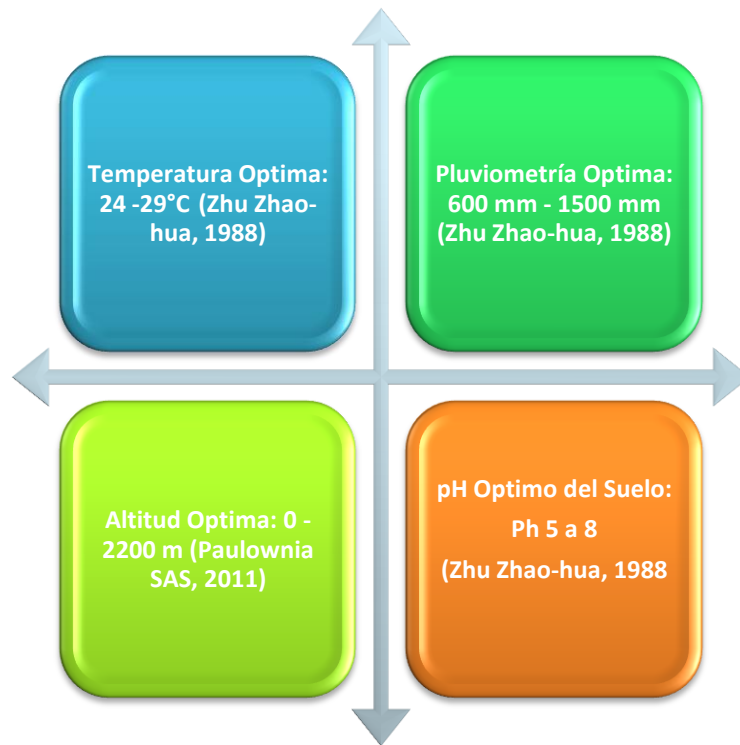


Figura 9. Matriz de requerimientos óptimos de la especie *Paulownia elongata*

6.2. Zonificación agroecológica para la identificación de zonas aptas para el establecimiento de *Paulownia elongata*

En el proceso de la elaboración de la zonificación se utilizaron diferentes formatos de información cartográfica. Toda la información generada (tanto las imágenes raster, los TIN y las coberturas finales) se almacenó en una base de datos geográfica.

A la vez con esta información base se generaron 10 mapas temáticos que contienen información sobre topografía del área de estudio (Figura 10), altitud óptima, temperatura media, temperatura óptima, precipitación media, precipitación óptima, suelos, áreas de exclusión, zonificación y áreas óptimas.

6.2.1. Cobertura topográfica

Esta cartografía se obtuvo a partir de un TIN (Triangulated Irregular Network), que es una red de triángulos que unen todos los puntos de un modelo que se utiliza para interpolar y generar un modelo digital de elevaciones (DEM). El mapa topográfico permite la interpretación de las formas y elevaciones de la tierra.

Los rangos altitudinales se clasificaron de 500 en 500 metros con un rango mínimo de 0 y un máximo de 5,000 m. Las zonas más bajas representadas en color verde y las más altas en color blanco (Anexo 1.)

6.2.2. Altitud óptima

De acuerdo con los requerimientos de *Paulownia elongata* el rango altitudinal óptimo para su desarrollo y crecimiento varía entre los 0 a los 2,200 metros de altitud, para lo que se fijaron dos intervalos el primero de cero a dos mil doscientos y un segundo de dos mil doscientos uno hasta los cinco mil. Con lo anterior se determinó que el 91,90% del área de estudio cuenta con las condiciones altitudinales óptimas para el establecimiento de la especie mientras que el 8,10% del territorio no es apto. (Figura 10)

6.2.3. Temperatura óptima

La cartografía de temperatura media (Ver anexo 2) muestra la variación de la temperatura media sobre el territorio nacional y en el que se definieron intervalos de 2,5 °C que varían desde los 2 hasta los 30°C. Esta cobertura se tomó como base para la elaboración de la cobertura de temperatura óptima.

La temperatura óptima (Figura 11) para el crecimiento y desarrollo de *Paulownia elongata* está entre los 24 a los 29°C a partir del dato anterior y teniendo en cuenta la cobertura de temperaturas medias de México se fijaron los siguientes intervalos:



Figura 10. Cobertura altitud óptima para el crecimiento y desarrollo de *Paulownia elongata*



Figura 11. Cobertura temperatura óptima para el crecimiento y desarrollo de *Paulownia elongata*

Un primer intervalo que corresponde a los valores óptimos que equivalen a un 25.11% del territorio nacional con un área de 491,256.85 km².

Un segundo intervalo con valores 0 a 23.9 y 29.1 a 35 que ocupa un área de 1,464,975.32 km² equivalente a un 74,89% del territorio nacional.

6.2.4. Precipitación óptima

La cobertura de precipitación media (Ver anexo 3) tiene una clasificación por intervalos de 500 mm, así se plantean 9 rangos que abarcan de los 100 a los 4,500 mm anuales. De acuerdo con la cobertura las zonas con menores precipitaciones se ubican en la zona norte del país mientras que la zona con mayor precipitación se encuentra de manera prevalente en el sur del país.

El rango de precipitación óptima (Figura 12) para el crecimiento y desarrollo de *Paulownia elongata* varía entre los 600 a los 1,500 mm anuales, para identificar las zonas del país que posean dichas condiciones se fijaron dos rangos el primero con los valores idóneos y un segundo con valores entre los 0 a 599 mm y de 1,501 a 4,500 mm anuales.

De acuerdo a la clasificación de las precipitaciones se obtuvo que el 41.68% del área de estudio es apta en términos de lluvias para el crecimiento de *Paulownia elongata* que corresponde a un área de 815,406.93 km² mientras que el 58.32% del territorio restante no cumple con las condiciones necesarias para ello.

Si se observa la cartografía se puede ver como la zonas con mayor potencial se ubican en la zona centro y occidental del país pero con un área importante ubicada en la península de Yucatán.

6.2.5. Suelos

La cobertura de suelos contiene únicamente valores de pH, en la cartografía ya que la información sobre aspectos como profundidad, textura y drenaje a nivel nacional en la cartografías usadas como base para le elaboración de estos mapas es incompleta lo que arrojaría resultados poco precisos y los cuales son manipulables mediante procesos de manejo de los suelos. Los datos de esta cartografía poseen 16 valores de pH que van desde los 5,2 a 8,6. (Figura 13)



Figura12. Cobertura precipitación óptima para el crecimiento y desarrollo de *Paulownia elongata*

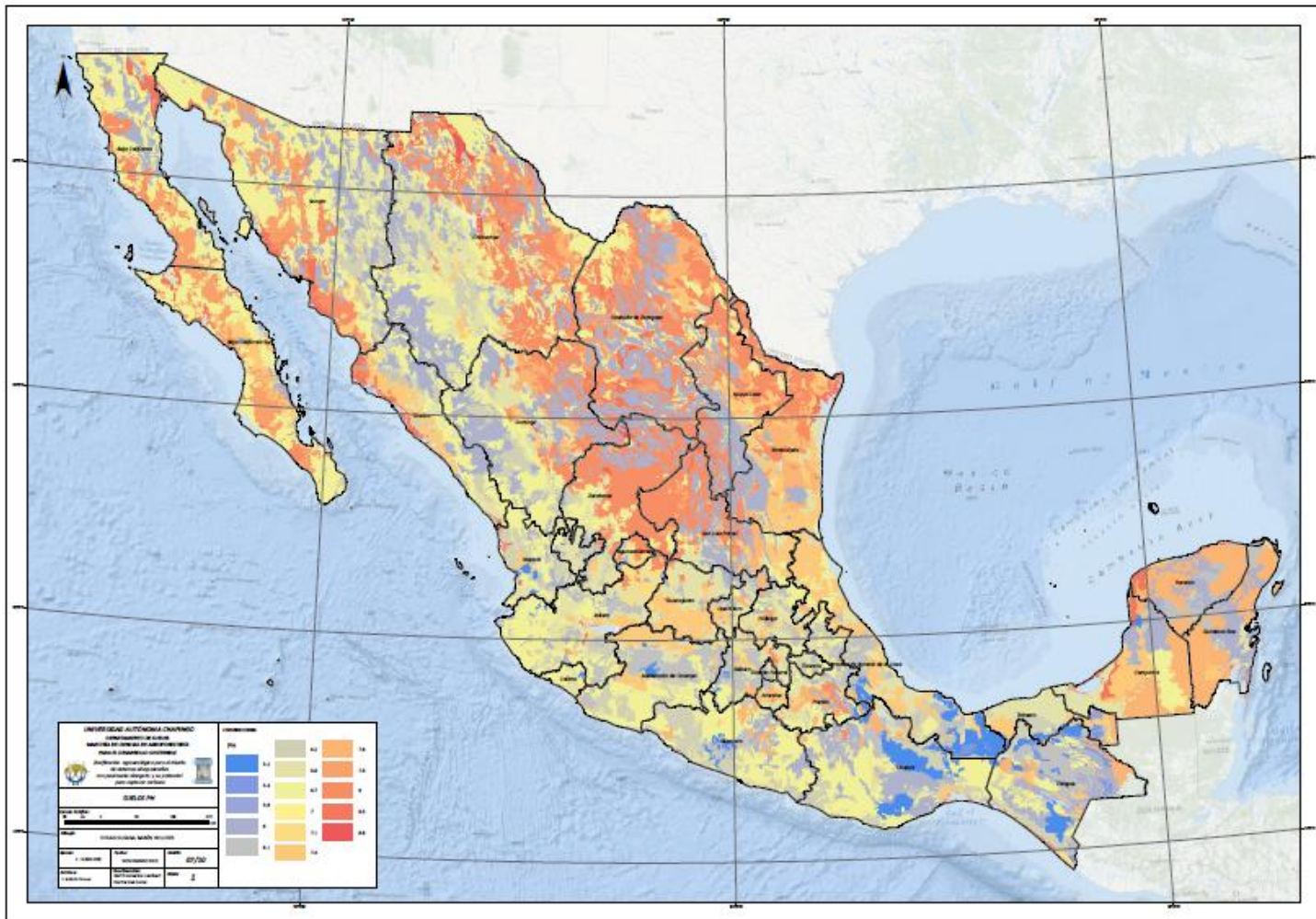


Figura13. Cobertura pH óptimo para el crecimiento y desarrollo de *Paulownia elongata*

6.2.6. Áreas de exclusión

Las áreas de exclusión son aquellas cuyas ubicaciones tienen condiciones especiales de flora, de fauna, zonas urbanas y/o cuerpos de agua que no son aptas para el establecimiento de *Paulownia elongata* por las características particulares de cada una de ellas. Para ello se determinaron 29 zonas. De acuerdo a lo anterior el total de áreas de exclusión equivale a un 37.89 % del territorio nacional ocupando un área de 741,163.68 km². (Figura 14)

6.2.7. Zonificación agroclimática

Con la metodología descrita anteriormente se obtuvo la cobertura de zonificación agroclimática, en esta cobertura se encuentra la unión de toda la información evaluada anteriormente. (Figura 15) Las áreas calificadas con 0 en su ponderación final son las de exclusión y estas equivalen al 35.93% del territorio nacional.

Las áreas con calificaciones de 5 a 7 no cumplen con todos los parámetros analizados. Por ejemplo encontramos áreas que cumplen con requerimientos de altitud (calificación 2), precipitación (calificación 2) y pH (calificación 2) pero no cumplen con los de temperatura (calificación 1); al sumar obtenemos un resultado de 7.

Por último encontramos las áreas con la puntuación de 8, las cuales cumplen todos los parámetros. Estas ocupan un área de 146.811,2 km² que representan el 7.5% del territorio nacional. En la Figura 16 se encuentran filtradas las áreas óptimas en las cuales es factible desarrollar el proyecto.

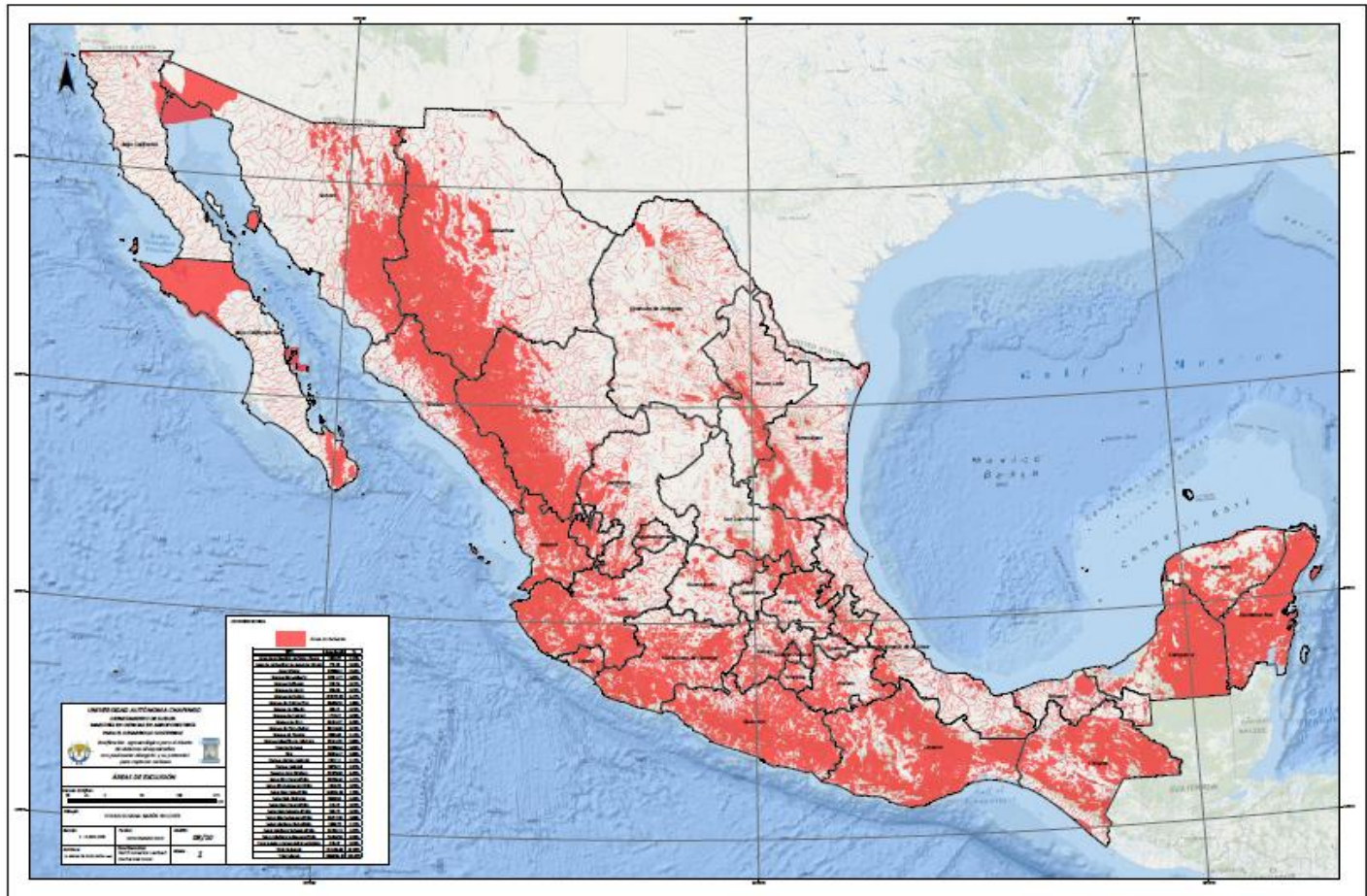


Figura 14. Cobertura áreas de exclusión del proyecto

Cuadro 23. Resumen áreas de exclusión

TIPO	Área (km²)	%
Área de protección de flora y fauna	1,900.25	0.10%
Área de protección de recursos natural	701.62	0.04%
Área Urbana	10,598.61	0.54%
Bosque Bajo-Abierto	12,811.27	0.65%
Bosque Cultivado	202.54	0.01%
Bosque de Cedro	359.83	0.02%
Bosque de Encino	107,072.00	5.47%
Bosque de Encino-Pino	36,426.55	1.86%
Bosque de Galería	480.21	0.02%
Bosque de Oyamel	1,715.07	0.09%
Bosque de Pino	64,131.97	3.28%
Bosque de Pino-Encino	98,116.66	5.02%
Bosque de Tascate	2,680.48	0.14%
Bosque Mesófilo de Montana	18,141.92	0.93%
Cuerpo de Agua	12,389.64	0.63%
Ríos	19,224.47	0.98%
Parque marino nacional	2,267.11	0.12%
Parque nacional	3,979.21	0.20%
Reserva de la Biósfera	67,478.68	3.45%
Selva Alta Perennifolia	28,709.46	1.47%
Selva Alta Subperennifolia	1,024.29	0.05%
Selva Baja Caducifolia	142,431.94	7.28%
Selva Baja Espinosa	8,349.56	0.43%
Selva Baja Perennifolia	410.27	0.02%
Selva Baja Subcaducifolia	590.73	0.03%
Selva Baja Subperennifolia	1,321.38	0.68%
Selva Mediana Caducifolia	1,939.78	0.10%
Selva Mediana Subcaducifolia	31,740.13	1.62%
Selva Mediana Subperennifolia	51,453.59	2.63%
Zona sujeta a conservación ecológica	618.47	0.03%
Total Exclusión	741,163.68	37.89%
Total México	1,956,239.18	100.00%

Cuadro 24. Cuadro de calificación de áreas aptas y no aptas para el crecimiento y desarrollo de *Paulownia elongata*

DESCRIPCIÓN	CALIFICACIÓN	AREA (KM ²)	%
Áreas de exclusión	0	702,965.20	35.93%
Áreas que no cumplen con todos los parámetros (calificación media)	5	25,918.63	1.32%
	6	810,777.71	41.45%
	7	269,766.42	13.79%
Áreas Óptimas	8	146,811.22	7.50%
	TOTAL	1,956,239.18	100.00%

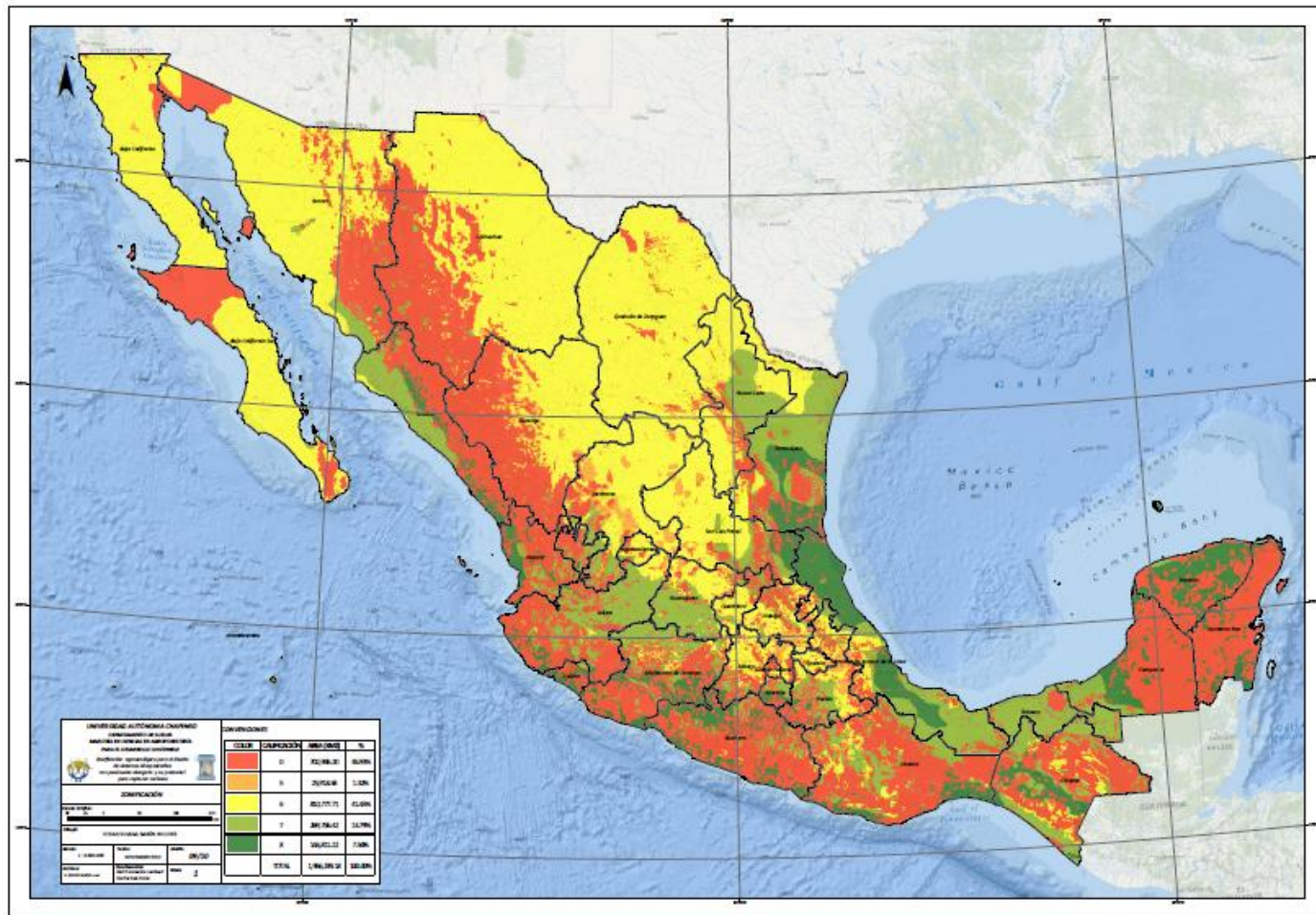


Figura 15. Zonificación agroclimática



Figura 16. Zonas óptimas para el crecimiento y desarrollo de *Paulownia elongata* en México.

7. CONCLUSIONES

México, cuenta con un potencial importante para el establecimiento de *Paulownia elongata*. El 7.5% del territorio nacional es considerado como áreas óptimas para su desarrollo y crecimiento, esto equivale a 146,811.22 km² que además poseen aptitud ganadera bovina, porcina, ovina y aviar, lo que da un valor agregado si se tiene en cuenta las posibilidades a nivel económico que ello representa para el país y para el productor, la *Paulownia* sin duda alguna puede ser explotada de manera exitosa en el país de forma que a futuro pueda competir con el continente asiático y americano siempre y cuando se contemplen actividades de nutrición forestal y manejo de suelos ya que dicho parámetro es muy variable de una zona a otra en cuanto a textura, profundidad, CIC, nivel freático y contenido de minerales

Altitudinalmente el territorio nacional cuenta con un área equivalente a un 91.90% de que poseen condiciones óptimas para el establecimiento de la especie mientras que el 8.10% del territorio no es apto.

Las zonas cuya temperaturas media cuenta con valores óptimos equivalen a un 25.11% del territorio nacional con un área de 491,256.85 km²

De acuerdo a la clasificación de las precipitaciones se obtuvo que el 41.68% del área de estudio es apta en términos de lluvias para el crecimiento de *Paulownia elongata* que corresponde a un área de 815,406.93 km²

Las áreas de exclusión equivalen a un 37.89 % del territorio nacional ocupando un área de 741.163,68 km².

La creación de matrices de componentes permite tener una base informativa de los posibles productos de importancia económica de una región para ser aplicados posteriormente en sistemas silvopastoriles no sin antes someterlos a investigación.

La elaboración de una zonificación agroclimática mediante sistemas de información geográfica juega un papel trascendental en el desarrollo de proyectos productivos a mediana y gran escala esto permite de manera precisa establecer y evaluar parámetros de los que depende el éxito o fracaso de una plantación forestal o de cualquier sistema productivo, por lo que se recomienda aplicar dicha metodología durante la planificación de un proyecto silvopastoril o productivo.

8. RECOMENDACIONES

Realizar un estudio y plan de manejo de suelos previo a la implementación de cualquier proyecto en el que se busque la introducción de *Paulownia elongata* como componente forestal en un sistema silvopastoril teniendo en cuenta los requerimientos para el crecimiento y desarrollo de la especie.

Formular proyectos de investigación relacionados al estudio del comportamiento de *Paulownia elongata* con especies de importancia económica para los estados cuyas características arrojaron una clasificación agroclimática óptima.

Fomentar la elaboración de zonificaciones agroclimáticas o agroecológicas mediante Sistemas de Información Geográfica para el desarrollo de proyectos agroforestales.

9. LITERATURA CITADA

- Alcaraz-Melendez, L., Duarte-Anaya, J.A. 2006. Perspectiva general de la industria maderera nación y propuesta de cultivo del árbol maderable *Paulownia* S.P. Revista mexicana agronegocios, vol. X, numero 018. Universidad Autónoma de la Laguna. Torreón, México. 15 p.
- Altieri, M.A. y C.I. Nicholls. 2011. El potencial agroecológico de los sistemas agroforestales en América Latina. Pautas para políticas y biodiversidad. LEISA Revista de agroecología. Vol 6, junio 2011. 32-35 p.
- Álvarez, M. 1961. Provincias fisiográficas de la republica Mexicana: Boletín de la sociedad Geológica Mexicana, V.14, 18 p.
- Ávila, G., Jimenez, F., Beer, J., Gómez, M., Ibrahim, M. 2001. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. Agroforestería en las Américas Vol. 8. No. 30. Costa Rica. 4 p.
- Casierra-Posada, F., Rivera, J.J. & Ocampo, L.A. 2007. Descripción del sistema agro pastoril Guayaba – pastos- Ganadería en el Tolima, Colombia. Revista ciencia y agricultura Vol. 5,2. P 51 – 62. ISSN 0122-8420. Colombia.
- Castellanos-Hernández, O.A.; Sahagún Rodríguez, A.; Rodríguez Domínguez, J.M.; Rodríguez Garay, B. 2006. Organogénesis indirecta y enraizamiento in vitro de *Paulownia elongata*. Revista E-Gnosis, Vol. 4. Universidad de Guadalajara, México. 13 p.
- CIATEJ. 2004. *Paulownia elongata*. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. Unidad de Biotecnología Vegetal. Jalisco, México. 17 p.
- COMUNIDAD ANDINA. 2007. Bosques y mercado de carbono potencial MDL forestal en la comunidad Andina. Secretaría general de la comunidad Andina, Programa de las Naciones Unidas PNUMA y Agencia española de cooperación internacional. Lima, Perú. 48 p.

- Dirección General de Investigación y Extensión Agrícola 1991. Aspectos técnicos sobre cuarenta y cinco cultivos agrícolas de Costa Rica. Ministerio de Agricultura y Ganadería. San José, Costa Rica. 158 p.
- Dunne, T. y L. Leopold. 1978. Water in Environmental Planning. Edit. W. H. Freeman Co. San Francisco, United States of América. 818 p.
- Environmental Systems Research Institute, ESRI. 2013. What is Gis? Top Five Benefits of GIS. Fecha de consulta: 3 de Mayo de 2013. <http://www.esri.com/> . California, USA.
- Espinoza-Domínguez, W. Krishnamurthy, L., Vázquez-Alarcón, A., Torres- Rivera, A. 2012. Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, vol. 18, núm. 1, enero-abril. pp. 57-70. Universidad Autónoma Chapingo Chapingo, México.
- Espinoza-Domínguez, William, Krishnamurthy, L., Vázquez-Alarcón, Antonio, Torres-Rivera, Antonio. Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente [en línea] 2012, 18 (Enero-Abril): [fecha de consulta: 9 de mayo de 2013] Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62924537005>> ISSN 2007-3828
- Estrada-Berg, J.B.; J.D. Gómez, J.W; A.I. Monterroso y J.A. Tinoco. 2008. El cambio climático en la República Mexicana, aplicaciones metodológicas en el manejo de suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. 134 p.
- Fabeiro, C.; Brasa, R. (2008) Agricultura y cambio climático en Castilla- La Mancha. Departamento de Producción Vegetal y Tecnología Agraria Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Albacete. Albacete, España. 18 p.
- FAO. 1997. Zonificación agroecológica guía general. Boletín de suelos de la FAO No. 73. Servicio de recursos, manejo y conservación de suelos Dirección de fomento de tierras y Aguas, FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. 78 p.
- FAO. 2005. Agroecological zoning and GIS applications in ASIA with special emphasis on land degradation assessment in drylands (LADA). Food and agriculture organization of the United Nations Regional office for Asia and the Pacific. Bangkok. Tailandia.137 p

- FAO. 2005. Perfiles por país del recurso pastura/forraje. Food and agriculture organization of the United Nations Regional office for Asia and the Pacific. Roma. 58 p.
- FAO; Botero, R.; Russo R. O. 2012. Utilización de árboles y arbustos fijadores de nitrógeno en sistemas sostenibles de producción animal en suelos ácidos tropicales. Escuela De Agricultura De La Región Tropical Húmeda San José de Costa Rica y Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO. Costa Rica, 7p.
- FAO; Renda, A.; Clazadilla, E. y Sánchez, J.1999. El silvopastoreo en Cuba Agroforestería para la Producción Animal en Latinoamérica. Instituto de Investigaciones Forestales. Cuba. 285 -307 pp.
- GTZ. 2007. Manual de Agroforestería. Proyecto Manejo sostenible de recursos naturales. Ed. Amenquai. San Lorenzo, Paraguay. 45 p.
- Gutiérrez Liñán J.L., Ocaña Delgado, R. 2009. Manual para el Cultivo de *Paulownia elongata*. Universidad Autónoma del Estado de México. Instituto literario No. 100. México. 20 p.
- INEGI. 2013. Cartografía de Recursos Naturales, <http://www.inegi.org.mx>
- J.M. Anguiano; J. Aguirre y J.M. Palma. 2012. Revista Cubana de Ciencia Agrícola, Tomo 46, Número 1, 2012. Establecimiento de *Leucaena leucocephala* con alta densidad de siembra bajo cocotero (*Cocos nucifera*) Universidad Autónoma de Nayarit México, CUIDA-FMVZ, Universidad de Colima. México. 5p.
- Joshi, L.; Wibawa, G.; Sinclair, F.L. 2001. Local ecological knowledge and socio-economic factors influencing farmers' management decisions in jungle rubber agroforestry systems in Jambi, Indonesia. School of Agricultural and Forest Sciences University of Wales. Bangor. 33p.
- Kays J. How to produce and market *Paulownia*. Region Extension specialist, Natural resources cooperative extension service University of Maryland. United States of América. 26 p.
- Marcos, F. 2010. *Paulownia* y Bosques sustentables. Programa Biomasa 2010: Oportunidad, cultivos energéticos y frontera agrícola. Santiago de Chile, 30 de junio de 2010.

- Martinez-Garcia, M.E.; Borja, M.L.; Abella, A.; López Serrano, F.R.; García - Morote, F.A. Candel Pérez, D. 2009. Adaptación de la especie del genero *Paulownia* spp. Para su uso como cultivos forestales en el ámbito mediterráneo. Instituto de investigación en energías renovables. Universidad de Castilla la Mancha. Castilla, España. 27 p.
- Mendieta-Lopez, M. Y Rocha-Molina, R.L. 2007. Sistemas Agroforestales. Universidad Nacional Agraria. Managua, Nicaragua. 117 p.
- Monterroso, A.I. y J.D. Gómez. 2003. Escenarios climatológicos de la República Mexicana ante el cambio climático Tomo 1. Comisión Nacional de Zonas Áridas y Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Morales J.G. 2006. Sistemas silvopastoriles en las comunidades de las higueras, el rodeo y el soyatal, municipio de jitotlan de los dolores, Jalisco. FAO y Universidad Autónoma Chapingo. 16 p.
- Muhammad Ibrahim; Alberto C.; Juan C. C. Y Hernan J A. 2012. Sistemas silvopastoriles en América central: experiencias de CATIE. Turrialba, Costa Rica.
- Musalem, S .M .A. 2001. Sistemas Agrosilvopastoriles: Una alternativa de desarrollo rural para el trópico mexicano Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo, México. p. 95.
- Muthuri, C. W. & Black, C.R. 2005. Tree and crop productivity in *Grevillea*, *Alnus* and *Paulownia*-based agro-forestry systems in semi-arid Kenya. Forest Ecology and Management 212: 23-39. Kenya.
- Paulownia* Research Group Forest Research Institute Chinese Academy of Forestry Wan Shou Shan .1991. Using *Paulownia* trees for intercropping. Greenstone Organization. China. 1p.
- Paulownia* S.A.S. 2011. Características de la *Paulownia*. Paulownia SAS. Antioquia, Colombia. 2p.
- Plevich, J. O.; Pereyra, T.; Barotto, O.M.; Pagliaricci, H. y J. Tavella .2007. Uso del agua y producción de biomasa forrajera de trigo bajo diferentes tratamientos de labranzas en un sistema silvopastoril en la llanura ondulada de Córdoba, Argentina. Departamento de Producción Vegetal, Departamento de Producción Animal,

Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto,
Argentina

- Quinto, L., Martínez-Hernández, P. A., Pimentel-Bribiesca, L., Rodríguez-Trejo, D. A. 2009. Planeación de un sistema silvopastoril en ladera en Huatusco, Veracruz aplicando el método Nezahualcōyotl. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, Vol. 15, Núm. 2, julio- diciembre, 2009, pp. 141-146. Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Reintree.1999. Manual de usuarios de D&D. Una introducción al diagnóstico y diseño agroforestal. Editado por J.B. Raintree Con la contribución del equipo multidisciplinario del Centro Internacional para la Investigación en Agroforestería. 54p.
- Rzedowski, J., 2006. Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- SAGARPA. 2008. Reconversión del cultivo de tabaco en México. Subsecretaría de Agricultura. México. 25 p.
- Salazar A, David B., Cristóbal V., Carlos C., Tamara B. 2000. Desarrollo metodológico de una herramienta tecnológica para el diseño de potreros con árboles multifuncionales. Nicaragua.
- Salazar R.D. 2011. 33 de las 101 razones para plantar *Paulownia*. Universidad Nacional de Manizales. Pereira; Colombia. 11 p.
- UNAM.2011. Geología de México. Instituto de geología. Universidad Autónoma de México. México. D.F. 147 p.
- Vicedex. 2007. La *Paulownia* como base de los cultivos energéticos. España. 5 pág.
- Villanueva, c; Muhammad, I; Harvey, C; Fergus, L; Sinclair; Munoz, D. 2003. Decisiones claves que influyen sobre la cobertura arbórea en fincas ganaderas de Cañas, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*. 10(39-40):69-77
- Yu Shanqing, Wang Shuangshang, Wei Pinghe, Zhu Zhaohua, Lu XinYu, Fang Yaomin .1987. A Study on *Paulownia*-Tea Intercropping System - Microclimate Modification and Economic Benefits. Forestry Research Institute of Jiangshu

Province, Research Institute of Forestry, CAF and Tonglin *Paulownia* Research Station. China.

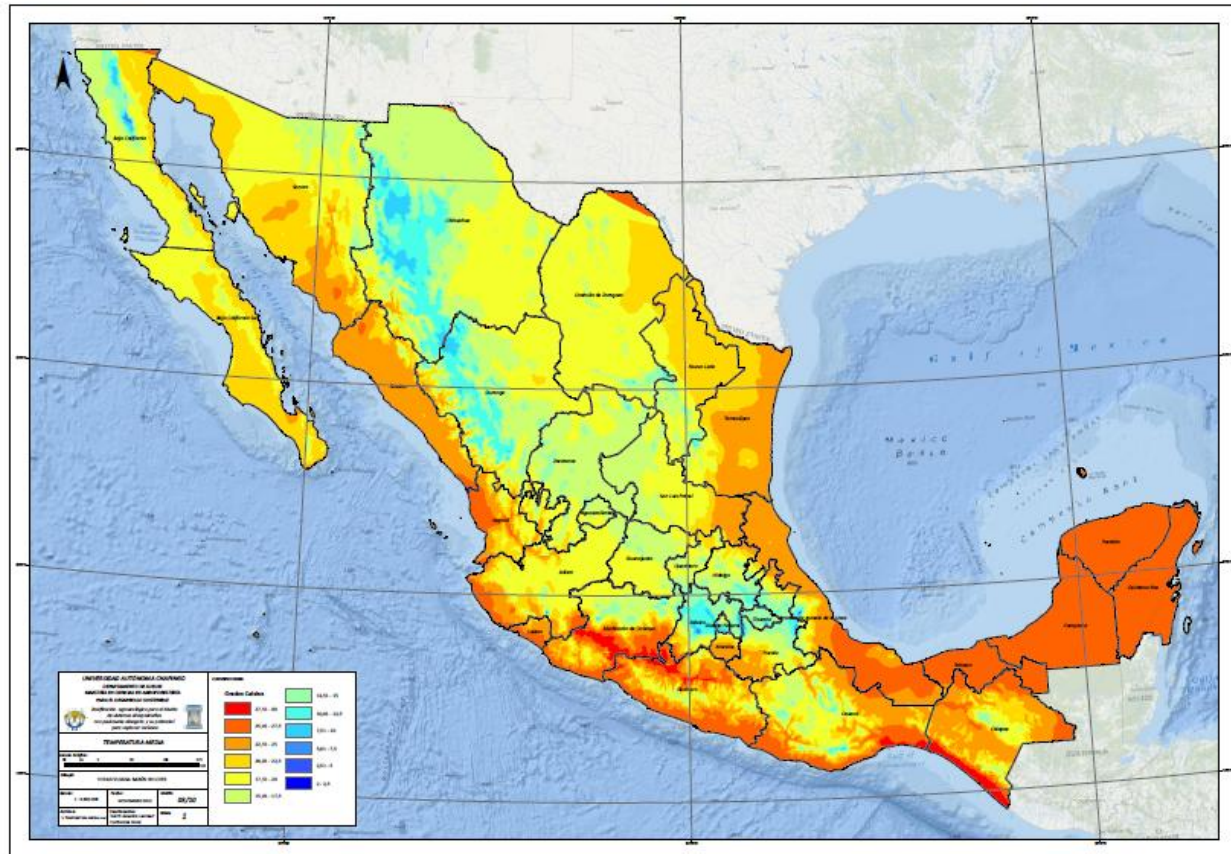
Zaragoza, J.L., SAGARPA. 2012. El sistema Agropastoril. Secretaria De Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural Pesca Y Alimentación, Subsecretaría de Desarrollo Rural, Dirección General de Apoyos para el Desarrollo Rural. México. 8p.

10. ANEXOS

Anexo 1. Cobertura topográfica de México



Anexo 2. Cobertura temperatura media de México



Anexo 3. Cobertura precipitación media anual de México

