

USAC

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA
PROGRAMA DE EXPERIENCIAS DOCENTES CON LA COMUNIDAD -EDC-
SUBPROGRAMA DEL EJERCICIO PROFESIONAL SUPERVISADO -EPS-

INFORME FINAL DEL SEGUNDO EPS COMO OPCIÓN DE GRADUACIÓN DE
LA ESCUELA DE BIOLOGÍA
REALIZADO EN
INSTITUTO NACIONAL DE BOSQUES-INAB-, SEDE CENTRAL, CIUDAD DE GUATEMALA
DURANTE EL PERÍODO COMPRENDIDO
VEINTIOCHO (28) DE OCTUBRE DE DOS MIL DIECINUEVE (2019) AL VEINTICUATRO (24)
DE ABRIL DE DOS MIL VEINTE (2020)



PRESENTADO POR
SOFÍA MARÍA ROMERO FERNÁNDEZ
REGISTRO ACADÉMICO: 201119789
DPI: 2160725300101

ESTUDIANTE DE LA CARRERA DE
BIOLOGÍA

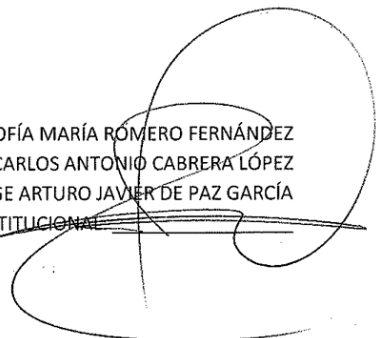
GUATEMALA, AGOSTO DE 2021

REF. SEGUNDO EPS. B2/2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS Y FARMACIA
PROGRAMA EXPERIENCIAS DOCENTES CON LA COMUNIDAD
SUBPROGRAMA DE EJERCICIO PROFESIONAL SUPERVISADO
CARRERA DE BIOLOGÍA

INFORME FINAL EPS II, PARTE II
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
“SITIOS POTENCIALES DE RESTAURACIÓN Y ESTABLECIMIENTO DE PLANTACIONES CON
***Swietenia macrophylla* King (CAOBA) Y *Cedrela odorata* L. (CEDRO) EN GUATEMALA”**
INSTITUTO NACIONAL DE BOSQUES -INAB-
9 DE AGOSTO DE 2020 – 4 DE AGOSTO DE 2021

SOFÍA MARÍA ROMERO FERNÁNDEZ
PROFESOR SUPERVISOR DE EPS: LIC. CARLOS ANTONIO CABRERA LÓPEZ
ASESOR INSTITUCIONAL: ING. JORGE ARTURO JAVIER DE PAZ GARCÍA
Vo.Bo. ASESOR INSTITUCIONAL



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS Y FARMACIA
PROGRAMA EXPERIENCIAS DOCENTES CON LA COMUNIDAD
SUBPROGRAMA DE EJERCICIO PROFESIONAL SUPERVISADO
CARRERA DE BIOLOGÍA

INFORME FINAL EPS II, PARTE II
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
“SITIOS POTENCIALES DE RESTAURACIÓN Y ESTABLECIMIENTO DE PLANTACIONES CON
***Swietenia macrophylla* King (CAOBA) Y *Cedrela odorata* L. (CEDRO) EN GUATEMALA”**
INSTITUTO NACIONAL DE BOSQUES -INAB-
9 DE AGOSTO DE 2020 – 4 DE AGOSTO DE 2021

SOFÍA MARÍA ROMERO FERNÁNDEZ
PROFESOR SUPERVISOR DE EPS: LIC. CARLOS ANTONIO CABRERA LÓPEZ
ASESOR INSTITUCIONAL: ING. JORGE ARTURO JAVIER DE PAZ GARCÍA
Vo.Bo. ASESOR INSTITUCIONAL: _____

ÍNDICE DE CONTENIDO

ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS.....	1
1. RESUMEN	2
2. INTRODUCCIÓN	4
3. ANTECEDENTES	5
3.1. Planteamiento del problema	5
3.2. Definición del problema	6
3.3. Marco teórico	7
3.3.1. Distribución de especies	7
3.3.2. Distribución potencial: reconocimiento de sitios potenciales de restauración y establecimiento de plantaciones.	8
3.3.3. Caoba	9
3.3.4. Cedro.....	11
4. JUSTIFICACIÓN	13
5. OBJETIVOS.....	14
5.1. General.....	14
5.2. Específicos	14
6. METODOLOGÍA.....	15
6.1. Área de Estudio: Guatemala.....	15
6.2. Encuestas: reconocimiento de variables a utilizar.....	16
6.3. Variables y parámetros específicos utilizados en cada método	17
6.4. Obtención y depuración de datos	18
6.4. Procesamiento y análisis de datos.....	18
6.4.1. Generación de mapas de sitios potenciales de restauración con caoba y cedro: análisis multicriterio/SIG (método I).....	18
6.4.2. Modelado de sitios potenciales de caoba y cedro: máxima entropía/maxEnt (método II).....	19
6.5. Equipo y materiales	21
7. RESULTADOS	22
7.1. Método I.....	22
7.2. Método II.....	32
8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	42
8.1. Método de análisis multicriterio/Método I	42

8.2.	Método con -MaxEnt- (algoritmo de máxima entropía) /Método II.....	43
8.3.	Comparación método I y II	45
9.	CONCLUSIONES	47
10.	RECOMENDACIONES	47
11.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48
11.1.	Libros:.....	48
11.2.	Revistas Científicas:	48
11.3.	Documentos Técnicos:.....	49
11.4.	Tesis:.....	50
11.5.	Artículos Científicos:.....	51
11.6.	Entrevistas:	51
11.7.	Páginas Web:	52
12.	ANEXOS	54
	Anexo No. 1:.....	54
	Anexo No. 2:.....	54
	Anexo No. 3: Clasificación de zonas de vida de Holdridge	55
	Anexo No. 4:.....	55
	Anexo No. 5:.....	56
	Anexo No. 6:.....	56
	Anexo No. 7:.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Mapa de los Departamentos de la República de Guatemala	16
Figura 2:	Mapa de sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con <i>Swietenia machophylla</i> King (caoba) en función a sus rangos óptimos de temperatura y precipitación	23
Figura 3:	Mapa de sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con <i>Cedrela odorata</i> L. (cedro) en función a sus rangos óptimos de temperatura y precipitación	23
Figura 4:	Mapa de sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con <i>Swietenia machophylla</i> King (caoba) en función a sus rangos óptimos de temperatura, precipitación y altitud	24
Figura 5:	Mapa de sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con <i>Cedrela odorata</i> L. (cedro) en función a sus rangos óptimos de temperatura, precipitación y altitud	25

Figura 6: Mapa de sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con <i>Swietenia machophylla</i> King (caoba) en función a sus rangos óptimos de temperatura, precipitación, altitud y drenaje	26
Figura 7: Mapa de sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con <i>Cedrela odorata</i> L. (cedro) en función a sus rangos óptimos de temperatura, precipitación, altitud y drenaje	26
Figura 8: Mapa de sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con <i>Swietenia machophylla</i> King (caoba) en función a sus rangos óptimos de temperatura, precipitación, altitud, drenaje y pendiente	27
Figura 9: Mapa de sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con <i>Cedrela odorata</i> L. (cedro) en función a sus rangos óptimos de temperatura, precipitación, altitud, drenaje y pendiente	28
Figura 10: Mapa de sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con <i>Swietenia machophylla</i> King (caoba) en función a sus rangos óptimos climáticos (temperatura y precipitación), fisiográficos (altitud), edáficos (tipo de drenaje de suelo) y extracciones	29
Figura 11: Mapa de sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con <i>Cedrela odorata</i> L. (cedro) en función a sus rangos óptimos climáticos (temperatura y precipitación), fisiográficos (altitud), edáficos (tipo de drenaje de suelo y pendiente) y extracciones	29
Figura 12: Gráfico que presenta la tasa de omisión y el área predicha en función del umbral acumulativo para <i>Swietenia macrophylla</i> King (caoba)	33
Figura 13: Gráfico que presenta la tasa de omisión y el área predicha en función del umbral acumulativo para <i>Cedrela odorata</i> L. (cedro)	33
Figura 14: Gráfico que muestra la curva operacional ROC y AUC. En la misma se presenta la sensibilidad vs. el área fraccionada pronosticada para <i>Swietenia macrophylla</i> King (caoba)	34
Figura 15: Gráfico que muestra la curva operacional ROC y AUC. En la misma se presenta la sensibilidad vs. el área fraccionada pronosticada para <i>Cedrela odorata</i> L. (cedro)	34
Figura 16: Mapa de sitios potenciales de restauración y establecimiento de plantaciones con <i>Swietenia macrophylla</i> King. en Guatemala con base al programa MaxEnt	35
Figura 17: Mapa de sitios potenciales de restauración y establecimiento de plantaciones con <i>Cedrela odorata</i> L. en Guatemala con base al programa MaxEnt	38
Figura 18: Mapa de coincidencia de sitios potenciales de restauración y establecimiento de plantaciones con <i>Swietenia macrophylla</i> King en Guatemala con base a la metodología de MaxEnt (algoritmo de máxima entropía) y metodología AMC	40
Figura 19: Mapa de coincidencia de sitios potenciales de restauración y establecimiento de plantaciones con <i>Cedrela odorata</i> L. en Guatemala con base a la metodología de MaxEnt (algoritmo de máxima entropía) y metodología AMC	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Rangos de condiciones óptimas en los que crece la caoba	11
Tabla 2: Rangos de condiciones óptimas en los que crece el cedro	13
Tabla 3: Variables y parámetros utilizados en el método I	17
Tabla 4: Variables y parámetros utilizados en el método II	17

Tabla 5: Área en hectáreas y porcentaje por departamento de los sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con <i>Swietenia macrophylla</i> King (caoba) en Guatemala.....	31
Tabla 6: Área en hectáreas y porcentaje por departamento de los sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con <i>Cedrela odorata</i> L. (cedro) en Guatemala	32
Tabla 7: Probabilidades en donde se muestra el tamaño del área en hectáreas de que <i>Swietenia macrophylla</i> King se encuentre en Guatemala.....	36
Tabla 8: Porcentaje de contribución e importancia de permutación para cada variable utilizada en el método II/MaxEnt con respecto a la caoba.....	36
Tabla 9: Probabilidad en donde se muestra el tamaño del área en hectáreas de que <i>Cedrela odorata</i> L. se encuentre en Guatemala	38
Tabla 10: Porcentaje de contribución e importancia de permutación para cada variable utilizada en el método II/MaxEnt con respecto al cedro	39
Tabla 11: Área en hectareas de traslape de los mapas realizados con las dos metodologías (SIG y MaxEnt), basados en la probabilidad de ocurrencia de <i>Swietenia macrophylla</i> King en Guatemala	40
Tabla 12: Área en hectareas de traslape de los mapas realizados con las dos metodologías (AMC y MaxEnt), basados en la probabilidad de ocurrencia de <i>Cedrela odorata</i> L. en Guatemala	41

ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS

INAB	Instituto Nacional de Bosques
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
DIF	Dirección de Investigación Forestal
UICN	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza
ONU	Organización de las Naciones Unidas
CONAP	Consejo Nacional de Áreas Protegidas
MAGA	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
CITES	Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres
SIG	Sistemas de Información Geográfica
MAG	<i>Generalized Additive Modeling</i> (modelado aditivo generalizado)
MLI	<i>Generalized Linear Modeling Domain</i> (dominio de modelado lineal generalizado)
GARP	<i>Genetic Algorithm for Prediction Rule set</i> (algoritmo genético para el conjunto de reglas de predicción)
DOMAIN	<i>Domain Modeling</i> (modelado de dominio)
AUC	<i>Area Under Curve</i> (área bajo la curva)
ROC	<i>Receiver Operating Characteristic</i> (característica operativa del receptor)
GTM	<i>Greenwich Mean Time</i> (Meridiano de Greenwich)
GBIF	<i>Global Biodiversity Information Facility</i> (servicio de información sobre diversidad biológica mundial)
LEA	Listado de Especies Amenazadas

1. RESUMEN

La caoba (*Swietenia macrophylla* King) y el cedro (*Cedrela odorata* L.) se encuentran dentro de las especies forestales prioritarias para aprovechamiento y conservación en Guatemala (INAB, 2014). A raíz de su aprovechamiento descontrolado, comercio ilegal, avance de la frontera agrícola, etc., la caoba se encuentra en el apéndice II de CITES y categoría 3 según el CONAP, y el cedro se encuentra en el apéndice III de CITES y categoría 2 de CONAP (CONAP, 2006); éstas dos son ecológicamente importantes en los bosques latifoliados (Vester & Navarro, 2003) ya que sirven de hábitat para la vida animal y otros organismos, ayudan en la captura de carbono; la caoba ayuda en la regeneración de campos abandonados aún bajo sombra (CONABIO, 2005) y el cedro es una fuente primaria de polen y fuente secundaria de néctar (Arce, H., 2001); también rinden la más alta producción de semilla (Cámara-Cabrales, L., 2005)

Es importante conocer la distribución potencial de las especies que se encuentran en los bosques, ya que se pueden tomar decisiones para el manejo de este, así como para predecir escenarios futuros, esto hace que sea más eficiente el uso de los recursos (Aceves, R., Méndez, G., García, A., & Nájera, L., 2018). La caoba y cedro son especies forestales con hábitos especialistas ya que tienen requerimientos para su crecimiento, los cuales son importantes para determinar su distribución potencial; esta se puede conocer relacionando los registros con las variables mediante el uso de modelos empíricos predictivos, con modelos estadísticos (Pliscoff, P., & Fuentes-Castillo, T., 2011; Bonet, G.F, 2007; Ávila, C., Villavicencio, G., & Ruiz, C., 2014). En esta investigación se utilizaron dos métodos: mediante la relación de rangos de variables específicas para cada especie y la geolocalización de ésta, por medio de SIG (método de análisis multicriterio), y mediante la generación de modelos a través del software MaxEnt (método de máxima entropía).

El presente estudio buscó reconocer los sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con *Swietenia macrophylla* King y *Cedrela odorata* L. en Guatemala, realizar los mapas necesarios para ello, evaluar y establecer una metodología replicable para el análisis de los sitios potenciales para el crecimiento de especies forestales de interés para el sector forestal de Guatemala. Para ello se planteó el primer método realizado (SIG), el cual utilizó registros (aunque no eran indispensables) de *Swietenia macrophylla* King y *Cedrela odorata* L. y variables que intervienen en la aptitud de las mismas.

Con el primer método realizado (SIG) se utilizaron registros de *Swietenia macrophylla* King y *Cedrela odorata* L. (aunque no eran indispensables) y variables que intervienen en la aptitud de la misma (temperatura, precipitación, altitud, drenaje del suelo, y pendiente); con este método se generaron 10 mapas, de los cuales, los últimos (Mapa Final) evidencia que los sitios potenciales en Guatemala donde se desarrolla *Swietenia macrophylla* King. con mayor porcentaje con base al área de sitios potenciales total del país son los departamentos de Petén con 45%, Alta Verapaz con 12%, Izabal con 11%, Escuintla con 6%, y con el mismo porcentaje están Quiché y Suchitepéquez con 5%; los departamentos que poseen los porcentajes más altos de área con sitios potenciales para caoba en base al área total del mismo son: Suchitepéquez con 80%, Retalhuleu con 63%, Escuintla con 61%, Izabal con 60%, Petén con 54%

Al realizar los mapas para *Cedrela odorata* L. se evidenció que los sitios potenciales en Guatemala donde se desarrolla bien la especie con base al área de sitios potenciales total del país son los departamentos de: Petén con 45%, Alta Verapaz con 14%, Izabal con 10%, Escuintla con 6%, y con el mismo porcentaje están Quiché y Suchitepéquez con 4%; y los departamentos que poseen los porcentajes más altos de área con sitios potenciales para caoba en base al área total del mismo son: Suchitepéquez con 79%, Retalhuleu con 64%, Escuintla e Izabal con 62%, y Alta Verapaz con 61%

Para el segundo método (MaxEnt) también se utilizaron los registros de caoba (estrictamente necesario), 19 variables bioclimáticas y las variables mencionadas en el método I; las áreas que muestran sitios potenciales para caoba en Guatemala de forma descendente son las siguientes: Petén, con una alta probabilidad en el centro del mismo, la Franja Transversal del Norte (Alta Verapaz y Quiché, exceptuando Huehuetenango), con la más alta probabilidad en los municipios de Ixcán y Cobán; noroeste del Caribe (Izabal), y el norte de la región Bocacosta. Se calculó que se tiene 9,221,842.49 hectáreas en donde la probabilidad que distribuya caoba es nula, con probabilidad muy baja se tiene 884,459.05 hectáreas, con probabilidad baja 332,106.05 hectáreas, con probabilidad media 170.817.96 hectáreas, con una probabilidad alta 96,380.50 hectáreas, y con una probabilidad muy alta se tiene 5,325.32 hectáreas. Las variables utilizadas son las que más contribuyeron en mayor medida al modelo elegido fueron la precipitación del cuarto más seco, isothermalidad, rango diurno medio y estacionalidad de temperatura.

En cuanto al cedro, con sus propios registros, pero las mismas variables (24) utilizadas con caoba, las áreas que muestran sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con cedro en Guatemala de forma descendente son las siguientes: centro de Petén y en probabilidades más bajas al este, parte de la Región Bocacosta y sur de los Valles de oriente y sur del Altiplano Central, parte de la Franja Transversal (este de Alta Vera, partes altas de la sur del Caribe. Existen 8,652,403.91 hectáreas en donde no podremos observar el cedro nunca, con probabilidad muy baja se tiene 1,203,957.54 hectáreas, con probabilidad baja 524,384.76 hectáreas, con probabilidad media 215,740 hectáreas, con una probabilidad alta 108,898.84 hectáreas, y con una probabilidad muy alta se tiene 56,872.38 hectáreas. Las variables ambientales que contribuyeron en mayor medida al modelo elegido para cedro fueron la isothermalidad, rango diurno medio, precipitación anual, y altitud.

Al traslapar los mapas realizados para *Swietenia macrophylla* King con las distintas metodologías, obtuvimos las áreas de coincidencia, en donde la probabilidad muy baja se traslapa 563,928.46 hectáreas, probabilidad baja se traslapa 189,677.56 hectáreas, probabilidad media se traslapa 144,684.06 hectáreas, probabilidad alta se traslapa 87,865.06 hectáreas, probabilidad muy alta se traslapa 53,917 hectáreas. En cuanto a *Cedrela odorata* L. se pudo observar que la probabilidad muy baja se traslapa 923,428.88 hectáreas, probabilidad baja se traslapa 402,300.70 hectáreas, probabilidad media se traslapa 170.446.40 hectáreas, probabilidad alta se traslapa 101,111.43 hectáreas, probabilidad muy alta se traslapa 55,326.72 hectáreas.

Se deben utilizar los dos programas para conocer la distribución potencial de una especie, la metodología II para realizar un mapa más preciso y concreto, y el programa SIG para complementar el mismo. Esto se debe a que la metodología de MaxEnt utiliza un conjunto modelos, métodos,

fundamentos, teoremas y funciones matemáticas/estadísticas que se relacionan estrechamente con la ecología de las especies; y el programa SIG nos ayuda a preparar las capas, conocer áreas, arreglar mapas, realizar cortes, entre otros, que para el programa MaxEnt es imposible de realizar.

La metodología más acertada para realizar mapas de distribución potencial (sitios potenciales) para cualquier especie es la metodología II utilizando MaxEnt (algoritmo de máxima entropía) ya que concuerdan en gran escala con el mapa de traslapes de las dos metodologías a diferencia de la metodología I utilizando un SIG (análisis multicriterio).

2. INTRODUCCIÓN

Guatemala es un país megadiverso y rico en recursos naturales, debido a que posee una composición biogeográfica única en el mundo; dentro de estos recursos se encuentran los bosques, los cuales son ecosistemas terrestres sumamente importantes ya que juegan un papel significativo en la protección del medio ambiente (FAO, 2015), a su vez, cuentan con alto potencial para su aprovechamiento y generación de beneficios económicos para quienes se dedican a las actividades forestales (Prado, Q., 2019). Los bosques regulan el clima, contrarrestan las emisiones de carbono que a la vez contrarresta los efectos del cambio climático, purifican el agua y ordenan las cuencas hidrográficas, protegen el suelo y los diferentes tipos de hábitat, son protectores genéticos, y su vez proporcionan una amplia variedad de bienes a nivel local, nacional y mundial (FAO, 2015).

La caoba (*Swietenia macrophylla* King) y el cedro (*Cedrela odorata* L.) son parte de las especies forestales prioritarias en Guatemala (INAB, 2014). A raíz de su aprovechamiento descontrolado, comercio ilegal, avance de la frontera agrícola, la caoba se encuentra en el apéndice II y el cedro en el apéndice III de CITES y categoría 3 y 2 (respectivamente) según el CONAP (CONAP, 2006); es ecológicamente importante en los bosques latifoliados y también ha sido una de las especies más relevantes en cuanto al desarrollo de la industria forestal en Latinoamérica (Vester & Navarro, 2003).

Es de gran importancia conocer la distribución potencial de las especies que se encuentran en los bosques, como los sitios potenciales para restauración o establecimiento de plantaciones, ya que estos pueden ayudar a la toma de decisiones para el manejo del mismo, así como para predecir escenarios futuros, esto hace que sea más eficiente el uso de los recursos (Aceves, R., Méndez, G., García, A., & Nájera, L., 2018).

Para conocer los sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con las especies, se puede relacionar los registros (coordenadas) con las variables mediante el uso de modelos empíricos predictivos, con modelos estadísticos (Pliscoff, P., & Fuentes-Castillo, T., 2011; Bonet, G.F, 2007; Ávila, C., Villavicencio, G., & Ruiz, C., 2014). En esta investigación se utilizarán dos métodos que relacionan variables bióticas y abióticas, y registros de la especie para conocer los

sitios potenciales de desarrollo de caoba y cedro, por medio de un software SIG, y mediante la generación de modelos a través del software MaxEnt.

En la presente investigación, con base en los registros de la caoba y cedro (coordenadas), variables bióticas y abióticas, bases de datos biológicas, herbarios y otros documentos científicos publicados; se realizaron mapas donde se muestran los sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con caoba y cedro. Se analizaron las diferentes metodologías planteadas y se sugirió utilizar los dos programas y la metodología más precisa (MaxEnt) para que sea replicable a otros procesos que realiza el INAB.

3. ANTECEDENTES

3.1. Planteamiento del problema

El territorio de Guatemala es de aproximadamente 108.889km² (PNUD, 2019; ONU, 2019), contando con más de la mitad de su territorio con vocación forestal (SIFGUA, 2019). Al hablar sobre la topografía se puede decir que es un país montañoso a excepción del área de la costa sur y las tierras del norte. Las diferentes áreas del territorio guatemalteco varían en cuanto al clima, la elevación y el tipo de paisaje; por ello hay contrastes dramáticos entre zonas bajas con un clima tropical, cálido y húmedo y las regiones altas con picos y valles (Lozano, V., et. Al. 1998). Por ello Guatemala es de los países más ricos a nivel de diversidad biológica y la flora se incluye en este contexto (CONAP, 2009). A partir de ello se ha considerado uno de los países a nivel mundial con la más amplia riqueza de recursos naturales (Salazar, M.R., 2007).

Los bosques son importantes para la protección del medio ambiente (FAO, 2015), cuentan con alto potencial para su aprovechamiento y generación de beneficios económicos para personas que realizan actividades forestales (Prado, Q., 2019), regulan el clima, contrarrestan las emisiones de carbono que a la vez contrarresta los efectos del cambio climático, purifican el agua y ordenan las cuencas hidrográficas, protegen el suelo y los diferentes tipos de hábitat, son protectores genéticos, entre otros, y su vez proporcionan una amplia variedad de bienes a nivel local, nacional y mundial (FAO, 2015).

Según CONAP e INAB, para el año 2012 en Guatemala existía una cobertura forestal de 3.7 millones de hectáreas, que equivale a un 34% del territorio nacional (CONAP-INAB, 2012; INAB, 2017). El 25% de éste es bosque latifoliado, y se encuentra en las Tierras Bajas del Norte de Guatemala, el 4.84% es bosque mixto y se ubica en el altiplano del país, el 2.76% corresponde al bosque de coníferas, el 0.23% es bosque de manglar y se ubica principalmente en el litoral del pacífico, el 3.81% es bosque seco, el 1.18% son humedales, el 0.51% es bosque de hule, el 1.13% son árboles dispersos, el 0.63% son plantaciones forestales, el 0.34% son bosques de galería, el 0.07% son humedales con bosque, el 57.71% es área no boscosa, y otros por 1.27% (INAB, 2017; INAB, 2016; CONAP-INAB, 2012).

En el pasado no se le ha dado la importancia necesaria a los efectos y el desbroce de la vegetación arbórea, lo cual ha dado como resultado la pérdida de millones de hectáreas de tierra productiva

(FAO, 2015). Además, dado que se siguen talando bosques sin medida sin su debida reforestación, exponiendo la tierra a la acción del viento, la erosión del suelo por las lluvias y la degradación de la tierra, entre otros, ha seguido disminuyendo la base de los recursos forestales (FAO, 2015).

Siendo la caoba y el cedro de las especies arbóreas más conocidas y aprovechada en Latinoamérica, ésta constituye un pilar del desarrollo de la industria forestal de la región y una de las fuentes de ingresos para un gran número de personas y de comunidades rurales (FAO, 2018). En las últimas décadas, las poblaciones de caoba y cedro se han visto afectadas y disminuidas debido a procesos de deforestación, a la fragmentación de sus poblaciones y al aprovechamiento selectivo de los mejores árboles de caoba (FAO, 2018); a pesar de ello no se tiene información sobre los sitios potenciales de restauración y establecimiento de plantaciones con caoba y cedro en Guatemala, para poder reconocer los lugares aptos para el crecimiento y aprovechamiento de ésta. Es por ello que la información generada sobre este tema es de gran valor para poder entender sobre las dinámicas de uso de la tierra y pérdida o ganancia forestal nacional (CONAP-INAB, 2012).

3.2. Definición del problema

El INAB tiene como visión la debida contribución al desarrollo sostenible del sector forestal en Guatemala (INAB, 2018) y según el Plan Estratégico 2017-2032 (INAB, 2017) el INAB tiene como misión la ejecución y promoción de instrumentos de política forestal nacional, facilitando el acceso a los servicios forestales que presta la institución a los actores del sector forestal, mediante el diseño e impulso de programas, estrategias y acciones, que generen un mayor desarrollo económico, ambiental y social del país (INAB, 2017). Prueba de ello, son los incentivos forestales, en los cuales el INAB entrega beneficios económicos del Estado a personas poseedoras de plantaciones forestales, bosques naturales para protección y conservación, entre otros (FAO, 2018; Prado, Q., 2019); estos han sido esfuerzos para frenar la deforestación y para que las personas estén motivadas a establecer plantaciones forestales y/o conservar el bosque natural (FAO, 2018; Prado, Q., 2019).

El DIF del INAB posee paquetes tecnológicos, los cuales son un conjunto integrado y secuencial de aplicaciones y conocimientos científicos y técnicos que permiten el aumento de la productividad de las plantaciones, bajo el marco de sostenibilidad y eficacia; este define y establece, las técnicas y metodologías para el correcto manejo de una especie (Arreaza, R. 2017), los mismos servirán también para realizar los mapas de sitios potenciales para restauración con caoba y con cedro. El DIF también tiene información sobre la evaluación y monitoreo de 31 especies forestales (Ver Anexo No. 1), de las cuales algunas son prioritarias debido a su importancia social, ecológica y económica/comercial (INAB, 2014). La caoba (*Swietenia macrophylla* King) y el cedro (*Cedrela odorata* L.) se encuentran dentro de las especies forestales prioritarias; la sostenibilidad de estas ha sido un tema de importancia para la industria de la madera y la comunidad ambiental. La UICN considera que las especies son vulnerables debido a un hábitat en declive o inadecuado y un nivel de explotación insostenible (Robbins, 2000).

A pesar de ello, no hay mapas que muestren sitios potenciales para establecer plantaciones forestales y restauración con especies basados en variables óptimas de las especies para poder guiar

su crecimiento efectivo. Se espera que esta información ayude a contrarrestar el problema de sobre explotación de cualquier especie, y en este caso de la caoba y el cedro. Al conocer los sitios potenciales de restauración y establecimiento de plantaciones, se podrá tener un compromiso en cuanto a los estados de las áreas de distribución relacionados con conservación y sostenibilidad de las mismas, lo cual es muy importante para tratar de prevenir la desaparición de las especies.

3.3. Marco teórico

3.3.1. Distribución de especies

Dependiendo de la historia y las capacidades de dispersión, los taxones pueden ocupar grandes extensiones de territorio o estar restringidos a pequeñas regiones (Juárez, M., 2017). Las actividades humanas han modificado constantemente las áreas de distribución de los taxones, creando y destruyendo hábitats, estableciendo barreras y corredores, y transportando accidental o voluntariamente a las especies a nuevos lugares (Juárez, M., 2017).

La biogeografía es una disciplina o rama de la biología comparada que estudia la distribución de los seres vivos; el análisis de los patrones de distribución de los organismos se puede llevar a cabo mediante diferentes métodos, dependiendo de la pregunta a responder (Hall, 1994). Independientemente del método utilizado, el punto inicial es conocer la distribución geográfica del grupo o grupos que se desean estudiar (Hall, 1994). La obtención de esta información puede provenir de diferentes fuentes como ejemplares depositados en colecciones científicas, como lo son herbarios y museos, de la literatura bien documentada, o bien de material recolectado por los mismos investigadores (Morrone, 2000).

Para tener éxito en las restauraciones y plantaciones forestales comerciales, debe asegurarse que los sitios seleccionados cumplan con los requerimientos ecológicos propios de las especies que se utilizarán, con lo cual se logrará que los individuos tengan una adaptación rápida al área donde se establezcan (Rueda, 1998). Es por ello que el conocer el sitio potencial de distribución (distribución potencial) de una especie es de suma importancia, ya que se pueden tomar decisiones para el manejo de la misma, así como para predecir escenarios futuros, con lo cual es más eficiente el uso de los recursos (Aceves, R., Méndez, G., García, A., & Nájera, L., 2018). También se ha aplicado en ecología, conservación de la biodiversidad, especies en peligro de extinción, en la evaluación del impacto del cambio climático sobre la distribución de los organismos, en fauna silvestre, en el área forestal para la detección temprana de enfermedades (Meentemeyer, R., Anacker, B., Mark, W. & Rizzo, D., 2008; García, A., Méndez, G., & Hernández, A., 2017), para la búsqueda de zonas afectadas por plagas forestales (Salinas, M., Ager, A., Vargas, C., Hayes, J., & Zúñiga, G., 2010; García, A. et al., 2017), para detectar nuevas áreas semilleras de especies amenazadas o en peligro de extinción (Shaily, M., Baharul, I., Choudhury, M., Latif, K., & Townsend, P., 2010; García, A. et al., 2017). Para la producción forestal es necesario, conocer cuáles son los sitios idóneos de determinada especie, según las condiciones óptimas de la misma con fines de potencializar la producción forestal y conservación de las especies (Prado, Q., 2019).

La presencia de una especie depende de factores abióticos como temperatura, precipitación, tipo de suelo, altitud, entre otros; como también depende de factores bióticos como lo es el alimento, interacciones con otras especies, depredadores, tipo de dispersión de semillas, entre otros (Gámez, P., 2011). El clima también suele ser un factor decisivo a la hora de modelar la distribución potencial de una especie, al utilizar este tipo de variables, los algoritmos que estiman la distribución potencial de las especies con registros de solo presencia, identifican áreas con características climáticas similares a los sitios en donde previamente han sido observadas las especies (Fischer, 2001; Plasencia, V., Escalona, S., & Esparza, O., 2014). Lo anterior es mucho más evidente en plantas, ya que, a diferencia de los animales, carecen de la posibilidad de desplazarse (Plasencia et al., 2014). Algunas especies son generalistas y otras especialistas, esto quiere decir que las primeras tienen requerimientos de hábitat generales y las segundas, requerimientos de hábitat restringidos. La caoba y el cedro son especies especialistas, debido a que tienen requerimientos para su crecimiento. Estos requerimientos para caoba y cedro son: temperatura media (22-28 y 20-28), altitud (1,000-6,000 y 1,200-5,000), precipitación (0-1,400 y 0-1,200 msnm), suelos francos y arcillosos, fértiles, con buen drenaje interno y externo, pH (4.5-7.7 y 5-7) y pendiente (0-60% para las dos especies) (INAB, 2019b; Fajardo, P., 2011; OFI-CATIE, 2014; Prado, M., 2006).

Al hablar de distribución se deben separar dos categorías, la real (ocurrencia), y la potencial; la distribución real se refiere a los sitios en los que se ha observado o se han colectado individuos, mientras la potencial hace alusión a las áreas que tienen condiciones ambientales muy similares a los sitios donde se encuentran las especies y que tienen muy altas probabilidades de ser ocupadas por las mismas (Gámez, P., 2011).

3.3.2. Distribución potencial: reconocimiento de sitios potenciales de restauración y establecimiento de plantaciones.

Se conocen dos alternativas para estimar los patrones de distribución geográfica de los taxa, ya sea de manera intuitiva o relacionando las localidades de los registros con las variables mediante el uso de modelos predictivos de distribución potencial, como por ejemplo BIOCLIM (Bonet, 2007; Ávila et al., 2014), otros modelos como MLJ, Domain, GARP y MAG, o MaxEnt (Ávila et al., 2014).

MaxEnt utiliza un modelo de máxima entropía, es un software con formulación matemática precisa (Reguerin, L., 2012), éste tiene la posibilidad de utilizarse con datos solo de presencia, es decir, cuando existen registros de donde está presente el taxón pero no se conoce si la “no presencia” es una ausencia verdadera o solo es resultado de que dicho taxón no fue buscado en el sitio (Margules, C. & Sarkar, S., 2009); otras de las ventajas es que puede utilizar tanto datos continuos como categóricos y puede incorporar interacciones entre distintas variables, utiliza algoritmos eficientes que han sido desarrollados para garantizar convergencia en una óptima (entropía máxima) distribución probabilística, la cual tiene una definición matemática concisa (Reguerin, L., 2012).

Otra de las ventajas que presenta MaxEnt es que permite la evaluación estadística de sus resultados, mediante los parámetros del ROC y el AUC (Plischoff & Fuentes-Castillo, 2011; Phillips, Anderson & Schapire, 2006). El índice ROC lo que hace es una caracterización del desempeño del modelo a todos

los posibles umbrales con un solo número y se obtiene proyectando la sensibilidad del modelo en el eje y, y 1-especificidad en el eje x; por otro lado, el AUC, es la comparación entre los algoritmos, lo cual provee una única medida para el desempeño del modelo y se obtiene conectando todos los puntos con líneas en un método conocido como trapecoide (Phillips et. al; 2006).

3.3.3. Caoba

3.3.3.1. Clasificación taxonómica de la caoba

- Reino: Plantae
- Filo: Tracheophyta
- Subfilo: Angiospermae
- Clase: Magnoliopsida
- Orden: Sapindales
- Familia: Meliaceae
- Género: *Swietenia*
- Especie: *Swietenia macrophylla*

(CONABIO, 2019)

3.3.3.2. Sinonimia de la caoba

El nombre científico de la caoba es *Swietenia macrophylla* King, el cual es el nombre aceptado por “The Plant List” “Tropicos”; los sinónimos de ésta son *Swietenia belizensis* Lundell, *Swietenia candollei* Pittier, *Swietenia krukovii* Gleason, *Swietenia macrophylla* var. *marabaensis* Ledoux & Lobato, *Swietenia tessmannii* Harms (Tropicos, 2019).

3.3.3.3. Nombres comunes de la caoba

Los nombres comunes que posee la caoba son chacalté (maya), caoba de Petén (Guatemala), caoba de hoja grande, caoba del sur, caoba del atlántico, cáguano (Centroamérica, México y Colombia), mongno, aguano, araputanga (Brasil), mahogany (Honduras), Acajou du Honduras (Guadalupe), oruba (Venezuela), mara (Bolivia), mahoni (Surinam) (Arreaza, R., 2017).

3.3.3.4. Descripción botánica de la caoba

Forma: árbol exótico, perennifolio o caducifolio, de 35 a 50 m (hasta 70 m) de altura con un diámetro a la altura del pecho de 1 a 1.8 m (hasta 3.5 m); el fuste es recto, libre de ramas en buena posición, cilíndrico. **Copa/Hojas:** copa abierta y redondeada con forma de sombrilla; el diámetro de la copa es de aproximadamente 14 m, presenta ramas gruesas de color castaño con muchas lenticelas; hojas alternas, paripinnadas o a veces imparipinnadas, de 12 a 40 cm de largo incluyendo el pecíolo; folíolos 3 a 5 pares, de 5 x 2 a 12 x 5 cm, lanceolados u ovados, muy asimétricos, con el margen entero. **Tronco/Ramas:** tronco derecho y limpio, ligeramente acanalado con contrafuertes bien formados hasta de 2 a 5 m de alto.; pocas ramas gruesas ascendentes y torcidas por arriba de los 25 m. **Corteza:** externa profunda y ampliamente fisurada con las costillas escamosas en piezas alargadas, pardo grisácea a moreno grisácea; corteza interna rosada a roja, fibrosa, de sabor amargo y astringente; grosor total: 10 a 25mm. **Flores:** flores pequeñas, verde amarillentas, reunidas en panículas axilares y subterminales glabras, de hasta 15 cm de largo; ambos sexos en la misma inflorescencia, las masculinas más abundantes que las femeninas, ambas dulcemente perfumadas;

flores actinomorfas, de 6 a 8 mm de diámetro; el cáliz tiene forma de copa; la corola tiene 5 pétalos ovales y cóncavos; las flores masculinas poseen 10 estambres formando un tubo cilíndrico, con dientes agudos o acuminados **Frutos:** cápsulas leñosas, ovoides u oblongas, de color moreno rojizo (grisáceo en ocasiones), de 12 a 18 cm de largo por 8 cm de ancho, dehiscentes desde la base y se abre en 4 ó 5 valvas; el número de semillas por fruto es de 40 a 60 y por lóculo 12. **Semillas:** (sámaras aladas) semillas numerosas de 1 cm de largo, irregulares, comprimidas de color canela, provistas de una prolongación en forma de ala de 6 a 7 cm de largo; las semillas son bastante amargas y astringentes y muy livianas. **Sexualidad:** monoica. (Standley, P.C. & Steyermark, J.A.; 1946; CONABIO, 2019c).

3.3.3.5. Importancia ecológica

Es una especie primaria. Catalogada como heliófila, regenera en campos abandonados aún bajo sombra. Como servicios al ambiente se puede decir que estabiliza bancos de arena, mejora la fertilidad del suelo, a la cobertura de hojarasca, conservación de suelo y control de la erosión; sirve como barrera rompevientos, sombra, refugio, como cerca viva en los agrohábitats y ornamental (CONABIO, 2019).

3.3.3.6. Distribución y condiciones óptimas (variables) de crecimiento de caoba

Comúnmente se localiza en las zonas de vida del bosque húmedo y muy húmedo subtropical (cálido) y tropical, en plantaciones y con un buen manejo puede crecer de entre los **0-1,400 metros de altitud**, con precipitaciones de **1,000-6,000 mm**, y con un rango de temperatura media promedio de **22-28°C** (INAB, 2019b; Fajardo, P., 2011; OFI-CATIE, 2014; Prado, M., 2006). También se conoce que su desarrollo óptimo ocurre en (textura) **suelos francos, franco arenosos a arcillosos**, fértiles, con **buen drenaje interno y externo**, pH entre 6.9 a 7.8, aunque cultivada el **pH puede ser desde 4.5 a 7.7**, siempre y cuando donde el manto freático no esté muy distante de la superficie y las raíces puedan alcanzar zonas húmedas durante todo el año (INAB, 2019b; Fajardo, P., 2011; OFI-CATIE, 2014), y se ha registrado con pendientes que van de **0 a 60%** (INAB, 2019b).

La caoba crece en los bosques latifoliados de elevación baja (hasta 600 msnm), en Guatemala se encuentran en la región norte, en los departamentos de Quiché, Alta Verapaz, Izabal y El Petén, y éstos se consideran un hábitat crítico para especies endémicas y amenazadas (Albizu, P., 2009). Las especies de mayor importancia en estos bosques son la Caoba y el Cedro, las cuales han sido muy demandadas en el mercado nacional e internacional y su existencia en los bosques naturales ha descendido notablemente (Melgar, W., 2003; Albizu, P., 2009)

Tabla 1: Rangos de condiciones óptimas en los que crece la caoba

Variables (condiciones óptimas)	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)	Altitud (msnm)	Drenaje	pH	Pendiente (%)	Textura
<i>Swietenia macrophylla</i> (caoba)	22-28	1,000-6,000	0-1,400	Drenaje excesivo, drenaje regular, buen drenaje y drenaje moderado	4.5-7.7	0-60	Suelos francos, franco arenosos a arcillosos

(INAB, 2019b; Fajardo, P., 2011; OFI-CATIE, 2014; Prado, M., 2006).

3.3.4. Cedro

3.3.4.1. Clasificación taxonómica del cedro

- Reino: Plantae
- Filo: Tracheophyta
- Subfilo: Angiospermae
- Clase: Magnoliopsida
- Orden: Sapindales
- Familia: Meliaceae
- Género: *Cedrela*
- Especie: *Cedrela odorata*

(CONABIO, 2019b)

3.3.4.2. Sinonimia del cedro

El nombre científico del cedro es *Cedrela odorata* L. el cuál es el nombre aceptado por “The Plant List” “Tropicos”. Los sinónimos del cedro son: *Cedrela adenophylla* Mart, *Cedrela brachystachya* (C. DC.) C. DC., *Cedrela brownii* Loefl, *Cedrela brownii* Loefl. ex Kuntze, *Cedrela caldasana* C. DC., *Cedrela ciliolata* S.F. Blake, *Cedrela cubensis* Bisse, *Cedrela dugesii* S. Watson, *Cedrela glaziovii* C. DC., *Cedrela guianensis* A. Juss, *Cedrela hassleri* (C. DC.) C. DC., *Cedrela huberi* Ducke, *Cedrela imparipinnata* C. DC., *Cedrela longipes* S.F. Blake, *Cedrela longipetiolutata* Harms, *Cedrela mexicana* M. Roem, *Cedrela mexicana* var. *puberula* C. DC., *Cedrela mourae* C. DC., *Cedrela occidentalis* C. DC. & Rose, *Cedrela odorata* var. *xerogeiton* Rizzini & Heringer, *Cedrela palustris* Handro, *Cedrela paraguariensis* Mart, *Cedrela paraguariensis* var. *brachystachya* C. DC., *Cedrela paraguariensis* var. *hassleri* C. DC., *Cedrela paraguariensis* var. *multijuga* C. DC., *Cedrela rotunda* S.F. Blake, *Cedrela sintenisii* C. DC., *Cedrela velloziana* M. Roem, *Cedrela whitfordii* S.F. Blake, *Cedrela yucatanana* S.F. Blake, *Surenus brownii* Kuntze, *Surenus glaziovii* (C. DC.) Kuntze, *Surenus guianensis* (A. Juss.) Kuntze, *Surenus mexicana* (M. Roem.) Kuntze, *Surenus paraguariensis* (Mart.) Kuntze, *Surenus velloziana* (M. Roem.) Kuntze. (Tropicos, 2019b).

3.3.4.3. Nombres comunes del cedro

Los nombres comunes que recibe el cedro son: cedro rojo o “yaou” en q’eqchi’ (Guatemala), también recibe el nombre común maya de kuyché (Yucatán), cedar (Belice), culche (México), cedro amargo (Costa Rica), cedro real (Nicaragua), cedro colorado (El Salvador), cedro cóbano (Centroamérica) (INAB, 2019b).

3.3.4.4. Descripción botánica del cedro

Forma: árbol caducifolio, de 20 a 35 m (hasta 45 m) de altura, con un diámetro a la altura del pecho de hasta 1.7 m. Se han encontrado individuos de más 60 m de altura. **Copa/Hojas:** copa grande, redondeada, robusta y extendida o copa achatada. Hojas alternas, paripinnadas o imparipinnadas, de 15 a 50 cm, incluyendo el pecíolo, compuestas por 10 a 22 folíolos opuestos o alternos, de 4.5 a 14 cm de largo por 2 a 4.5 cm de ancho, lanceolados u oblongos. **Tronco/Ramas:** tronco recto, robusto, formando a veces pequeños contrafuertes poco prominentes (1 m de alto); ramas ascendentes o arqueadas y gruesas; corteza externa ampliamente fisurada con las costillas escamosas, pardo grisácea a moreno rojiza; corteza interna rosada cambiando a pardo amarillenta, fibrosa y amarga. **Flores:** en panículas terminales largas y sueltas, de 15 a 30 cm de largo; muchas flores angostas aparentemente tubulares, pero con 5 pétalos, suavemente perfumadas, actinomorfas; cáliz en forma de copa, corola crema verdosa. **Frutos:** en infrutescencias hasta de 30 cm de largo, péndulas; cápsulas leñosas dehiscentes (parecidas a nueces), de 2.5 a 5 cm de largo, 4 a 5 valvadas, elipsoides a oblongas, pardo verdosas a morenas, con un fuerte olor a ajo y produciendo un exudado blanquecino y acuoso cuando están inmaduras. El Fruto contiene alrededor de 20 a 40 semillas y permanece adherido al árbol por algún tiempo. **Semillas:** semillas aladas de 2 a 3 cm de largo, incluyendo el ala, morenas, adheridas al eje. **Sexualidad:** monoica. (Standley, P.C. & Steyermark, J.A.; 1946; CONABIO, 2019d).

3.3.4.5. Importancia ecológica

El cedro es una especie secundaria y un tanto primaria. Es una especie pionera y muy abundante en la vegetación secundaria de diversas selvas. Se encuentra frecuentemente en el estrato superior de las selvas y en potreros, cafetales y cacaoales. Como servicios al ambiente tiene los siguientes: mejora la fertilidad del suelo, estabiliza bancos de arena recupera terrenos degradados, rehabilita sitios donde hubo explotación minera, conservación del suelo evitando la erosión; también es utilizada como árbol ornamental, como sombra y refugio rompevientos y cerco vivo (CONABIO; 2019b).

3.3.4.6. Distribución y condiciones óptimas (variables) de crecimiento del cedro

Comúnmente se localiza en los bosques de la costa pacífica seca y en los bosques tropicales húmedos. Se ha encontrado en alturas de **0-1,200 msnm**, con **precipitaciones de 1,200-5,000 mm**, y **temperaturas anuales promedio de 20-28°C** (INAB, 2019; Albizu, 2009). su desarrollo óptimo ocurre en (textura) **suelos francos, franco arenosos a arcillosos**, fértiles, con **buen drenaje interno y externo**, pH entre 5-7, también se ha registrado en informes de INAB que la caoba crece en **pendientes de 0-60%** (INAB, 2019).

En Guatemala, el cedro se encuentra en los bosques de la costa pacífica seca, que incluye los departamentos de Santa Rosa, Escuintla, Suchitepéquez y Retalhuleu; también se encuentra en los bosques tropicales húmedos, que incluye los departamentos de El Petén, parte norte de Izabal y Alta Verapaz. Normalmente se encuentra distribuido desde el nivel del mar hasta 1,200 m (INAB, 2019b).

Tabla 2: Rangos de condiciones óptimas en los que crece el cedro

Variables (condiciones óptimas)	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)	Altitud (msnm)	Drenaje	pH	Pendiente (%)	Textura
<i>Cedrela odorata</i> (cedro)	20-28	1,200-5,000	0-1,200	Excesivo, buen drenaje y regular	5-7	0-60	Suelos francos, franco arenosos a arcillosos

(INAB, 2019; Albizu, 2009)

4. JUSTIFICACIÓN

Los estudios de distribución potencial de especies forestales en Guatemala están restringidos a zonas específicas y algunas no incluyen las áreas de ocurrencia de las especies, estos mapas generados dependen de la calidad del modelo elegido, de su distribución geográfica y la calidad (confiabilidad) de la información, así como las variables elegidas y los rangos de éstas (Aceves et al., 2018). Anteriormente, se han realizado mapas preliminares de la distribución potencial de las especies forestales en Guatemala (DIF-INAB, 2012), sin embargo, es necesario realizar un reajuste de los mapas generados, que permita actualizar la información que se ha recabado por más de 15 años de mediciones por el INAB, para poder obtener mapas de distribución potencial más reales y con condiciones óptimas de cada especie (Prado, Q., 2019). Esto servirá para poder asesorar a las personas que desean establecer plantaciones de caoba y cedro en este caso, en cuanto a qué áreas tienen probabilidad de ocurrencia de la especie.

Además, la caoba y el cedro son de las especies forestales más importantes de Guatemala y Centroamérica. Desde el último siglo hasta hoy, la caoba y el cedro son de las especies ecológicamente más importantes de los bosques latifoliados y también han sido de las especies más relevantes para el desarrollo de la industria forestal de América Latina en regiones tropicales (Vester & Navarro, 2003; André, 2008). Estas especies han sido fuertemente explotadas; al deterioro causado por la deforestación y el cambio de uso de suelo, ahora se le añade el desacoplamiento que hay entre las poblaciones forestales y el clima que les es propicio, debido a los cambios que se han dado en el clima (Rehfeldt, 2012; Garza, L. et al., 2016). Es por ello que caoba y el cedro se encuentran actualmente en el apéndice II y III de CITES y en categoría 3 y 2 (en orden respectivo) en el índice del CONAP, según LEAs (CONAP, 2006); esto significa que, aunque en la actualidad la caoba

aún no se encuentra en peligro de extinción, podría llegar a esta situación, y el cedro se encuentra en reglamentación para prevenir o restringir su explotación y tiene un control para su comercio.

Es por ello que en esta investigación se brinda la información metodológica necesaria para que INAB realice los mapas de los sitios potenciales de restauración y establecimiento de plantaciones de las otras especies forestales relevantes a nivel nacional para que, como se mencionó anteriormente, se pueda brindar una guía sobre los sitios potenciales donde se podrían establecer proyectos de restauración, reforestación, tener herramientas que apoyen y sustenten actividades técnicas en relación al establecimiento y manejo silvicultural de plantaciones forestales de las especies, ayudar a conservar las especies, que éstas se desarrollen en condiciones óptimas y hacer un esfuerzo para garantizar el éxito de las especies.

Por estos motivos, es necesario generar información que permita al sector forestal de Guatemala, tener herramientas que apoyen y sustenten actividades técnicas en relación al establecimiento y manejo silvicultural de plantaciones forestales de las especies (en este caso de la caoba y el cedro), para poder establecer plantaciones de estas que puedan, llegar a producir madera de primera calidad, que esté disponible para la industria forestal de Guatemala, lo cual potencializa el mercado y la industria forestal del país. También ayudaría a la conservación de las especies, ya que se podrán establecer proyectos de reforestación, restauración y plantaciones de las mismas para que se desarrollen en condiciones óptimas.

5. OBJETIVOS

5.1. General

- Conocer los sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con *Swietenia macrophylla* King y *Cedrela odorata* L. en Guatemala.

5.2. Específicos

- Realizar un mapa de sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con *Swietenia macrophylla* King y para *Cedrela odorata* L. en Guatemala, en los cuales se muestren los sitios óptimos donde las especies puedan crecer con las mejores condiciones bióticas y abióticas para su conservación y aprovechamiento.
- Evaluar la metodología realizada con SIG (análisis multicriterio) y la metodología MaxEnt, para conocer los sitios potenciales para especies forestales.
- Establecer una metodología replicable para el análisis de los sitios potenciales para el crecimiento de especies forestales prioritarias de interés para el sector forestal de Guatemala para el Instituto Nacional de Bosques.

6. METODOLOGÍA

6.1. Área de Estudio: Guatemala.

El territorio de Guatemala es de aproximadamente 108.889km² (PNUD, 2019; ONU, 2019), cuenta con más de la mitad de su territorio como con vocación forestal (SIFGUA, 2019). En cuanto a su topografía se puede decir que es un país montañoso a excepción del área de la costa sur y las tierras del norte. Las diferentes áreas del territorio guatemalteco varían en cuanto al clima, la elevación y el tipo de paisaje; por ello hay contrastes dramáticos entre zonas bajas con un clima tropical, cálido y húmedo y las regiones altas con picos y valles (Lozano, V., et. Al. 1998). Por ello Guatemala es de los países más ricos a nivel de diversidad biológica y la flora se incluye en este contexto (CONAP, 2009). A partir de ello se ha considerado uno de los países a nivel mundial con la más amplia riqueza de recursos naturales (Salazar, M.R., 2007).

Se ha elegido como área de estudio el país de Guatemala ya que se desea conocer qué áreas son potenciales para la ocurrencia de caoba y cedro, para posteriores estudios o procesos a realizar en el INAB.

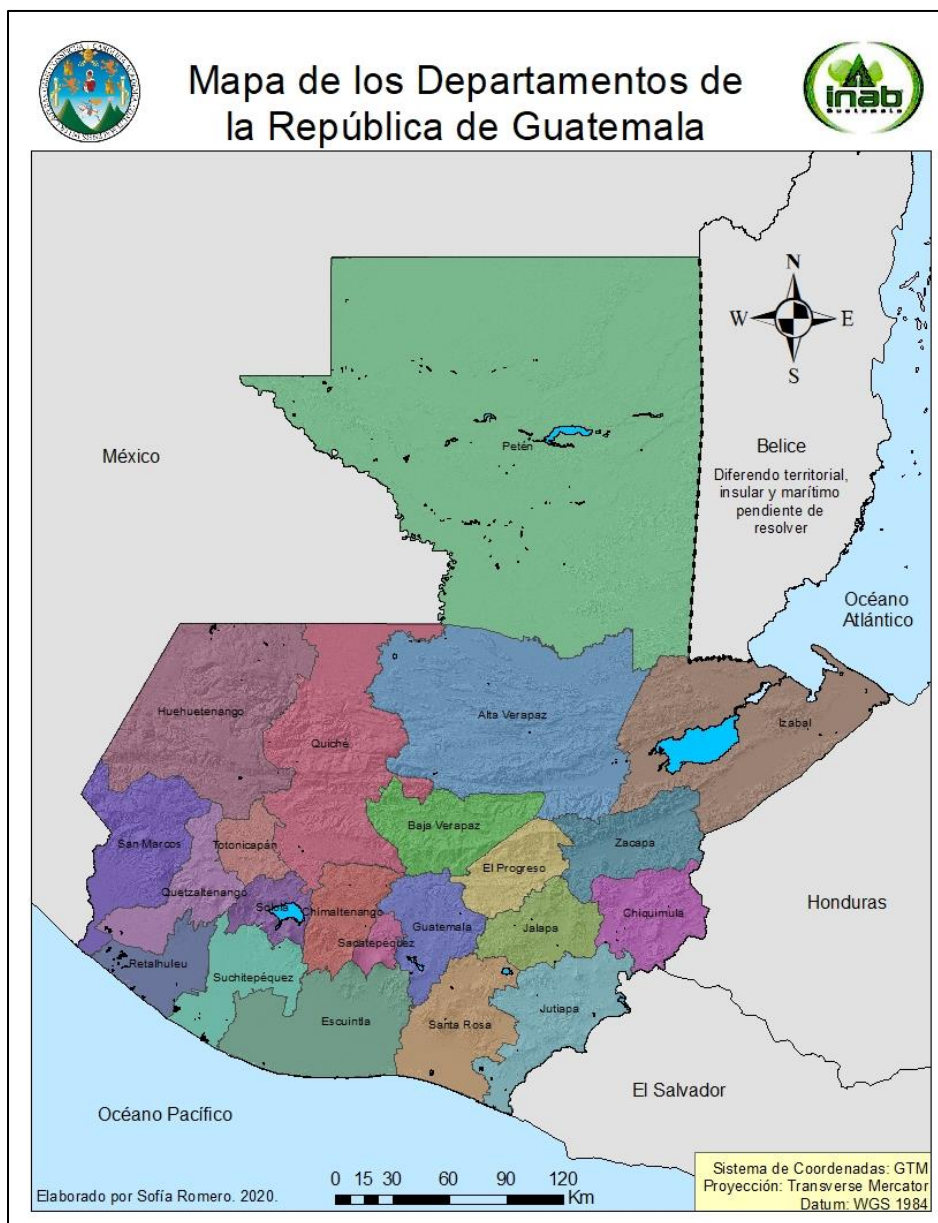


Figura 1: Mapa de los Departamentos de la República de Guatemala

6.2. Encuestas: reconocimiento de variables a utilizar.

Además de la búsqueda de bibliografía para reconocer qué variables son importantes para el crecimiento adecuado de cada una de las especies, también se realizaron encuestas/boletas (una para el cedro y una para la caoba) para entrevistar a técnicos, regentes, y personas que tienen experiencia en campo con las especies estudiadas, para que compartieran qué otras variables que no se encuentran en la literatura, son importantes para el crecimiento de las mismas. Cabe mencionar que para caoba se obtuvieron un total de 17 encuestas llenadas y para cedro se obtuvo 22; esta diferencia se debe a que el cedro tiene un área de distribución mayor que el de la caoba.

6.3. Variables y parámetros específicos utilizados en cada método

Tabla 3: Variables y parámetros utilizados en el método I

Variables (condiciones óptimas)	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)	Altitud (msnm)	Tipo de drenaje de suelo	Pendiente (%)
<i>Swietenia macrophylla</i> King. (caoba)	22-28	1,000-6,000	0-1,400	Drenaje excesivo, drenaje regular, buen drenaje y drenaje moderado	0-60
<i>Cedrela odorata</i> L. (cedro)	20-28	1,200-5,000	0-1,200	Excesivo, buen drenaje y regular	0-60

Tabla 4: Variables y parámetros utilizados en el método II

Variables bioclimáticas utilizadas para ambas especies
Temperatura media anual (BIO1)
Rango diurno medio (BIO2)
Isotermalidad (BIO3)
Estacionalidad de la temperatura (BIO4)
Temperatura máxima del mes más cálido (BIO5)
Temperatura mínima del mes más frío (BIO6)
Rango anual de temperatura (BIO7)
Temperatura media del trimestre más húmedo (BIO8)
Temperatura media del cuarto más seco (BIO9)
Temperatura media del trimestre más cálido (BIO10)
Temperatura media del cuarto más frío (BIO11)
Precipitación anual (BIO12)
Precipitación del mes más húmedo (BIO13)
Precipitación del mes más seco (BIO14)
Estacionalidad de la precipitación (BIO15)
Precipitación del cuarto más húmedo (BIO16)
Precipitación del cuarto más seco (BIO17)
Precipitación del trimestre más cálido (BIO18)
Precipitación del cuarto más frío (BIO19)
Variables climáticas utilizadas para ambas especies
Temperatura media anual
Precipitación media anual
Variable fisiográfica utilizada para ambas especies
Altitud
Variables edáficas utilizada para ambas especies
Pendiente
pH
Parámetros utilizados para ambas especies
Puntos geolocalizados de presencia de cada especie (coordenadas)

6.4. Obtención y depuración de datos

- a) Para la **recolección de información de bases de datos, variables climáticas, fisiográficas y edáficas** se hizo por medio de bases de datos del INAB, capas que posee la Institución, capas que posee el MAGA, bases de datos biológicas (GBIF, Trópicos), herbarios y documentos científicos publicados.
- b) En el DIF-INAB se procedió a buscar en las bases de datos los **puntos de ocurrencia** de *Swietenia macrophylla* King y *Cedrela odorata* L., los cuales son puntos donde se tiene el registro de la especie con sus debidas coordenadas de donde ésta fue colectada. En base a los fines de esta investigación, los puntos de coordenadas provinieron de planes de distribución natural para cada una de las especies.
- c) Se buscaron las **capas de variables climáticas** como lo son la temperatura y precipitación; las **capas de variables fisiográficas** como lo es la altitud y ríos; **variables edáficas** como el tipo de suelo, drenaje, pH y pendiente; asimismo la capa de centros poblados.
- d) Obtención de las **capas de variables ambientales** (climáticas): se procedió a extraerlas de la base de datos climáticos WorldClim -Global Climate Data-.
- e) Por último, se **filtraron y depuraron las bases de datos** usando el programa Microsoft Office Excel, eliminando datos con información incompleta, tales como: sinonimias encontradas a lo largo del proceso y se eliminó nombres y datos sin resolver, así mismo fue necesario llevar a cabo una corrección y homogenizar los sistemas de coordenadas, todos en el sistema de proyección GTM, DATUM WGS 1984 en un software SIG.

6.4. Procesamiento y análisis de datos

6.4.1. Generación de mapas de sitios potenciales de restauración con caoba y cedro: análisis multicriterio/SIG (método I)

Los métodos de evaluación multicriterio son frecuentemente integrados en los SIG para el análisis del emplazamiento óptimo para una actividad, lo cual permite la obtención de mapas continuos de aptitud; el análisis multicriterio proporciona el marco adecuado para la integración de los distintos factores o variables que intervienen en la aptitud (Santé, R. & Crecente, M., 2005) del área para cada especie en este caso. Es una herramienta de apoyo en la toma de decisiones durante el proceso de planificación que permite integrar diferentes criterios de acuerdo a la opinión de actores en un solo marco de análisis para dar una visión integral (Tobón, W., 2013), en este caso los criterios tienen una representación georreferenciada (variables biofísicas y climáticas).

- a) Se inició el software SIG y tomó la base de datos anteriormente depurada en donde se encuentran los registros de *Swietenia macrophylla* King y *Cedrela odorata* L., se procedió a

utilizar un software SIG para realizar la geolocalización de todos los registros en el área de Guatemala, con el fin de poseer una visión del estado general de las especies y/o la distribución actual de las especies.

- b) En el mismo programa, se cargaron las capas de las variables (altitud, precipitación, temperatura, tipo de drenaje, pH, pendiente) y se procedió a reclasificar las mismas en función del rango en el que se ha registrado la especie. Luego de reclasificarlas, se seleccionó solamente el polígono que nos interesa.
- c) Se procedió a unir las diferentes capas preparadas anteriormente y se generaron los mapas en función de aptitud (análisis multicriterio) dependiente de las variables anteriormente mencionadas. Este proceso se hizo realizando cortes para cada unión que se era necesario realizar (Anexo No. 2); al finalizar cada corte, se verificó en la tabla de contenidos que solo se observara un polígono.
- d) Se realizó la exclusión de los centros poblados y otra de los lagos de Guatemala, dando como resultado un mapa final con los sitios potenciales de restauración y establecimiento de la caoba y otro para el cedro (Anexo No. 2).
- e) A estos dos últimos mapas se les calculó el área para luego conocer el área en hectáreas de cada uno de ellos; también se le calculó el área de los sitios potenciales en hectáreas por departamento con base al tamaño del mismo y en base al área total potencial para la caoba y cedro. Esto se hizo de la siguiente manera: se realizó un corte de la capa de departamentos con la capa de distribución potencial de la especie y abrió la tabla de atributos, en donde se agregó una nueva columna denominada "Área", en la cual se hizo el cálculo del área en hectáreas. También se conoció, con el mismo procedimiento, el área por cada mapa realizado (Mapa Síntesis 1, 2, 3; Mapa Preliminar; y Mapa Final) para cada especie.

En este primer método realizado (SIG), se utilizaron 761 registros de distribución natural de *Swietenia macrophylla* King. y las variables de precipitación, temperatura, altitud, tipo de drenaje de suelo y pendiente (Tabla No. 1), que intervienen en la aptitud de la misma. En el caso de *Cedrela odorata* L. se utilizaron 577 registros de distribución natural y las mismas 5 variables que se utilizó con caoba, pero con diferentes rangos de aptitud (Tabla No. 2).

6.4.2. Modelado de sitios potenciales de caoba y cedro: máxima entropía/maxEnt (método II)

En los últimos años se ha desarrollado la técnica de distribución potencial o también llamado modelado de nicho ecológico, lo cual consiste en una lista de localidades de registros georreferenciados y variables ambientales del área de interés, que son estimadas para representar las condiciones que influyen en la presencia de la especie en dichas áreas (García, 2010). El objetivo de este modelado es predecir cuales son las áreas que satisfacen los requerimientos ecológicos de las especies y con ello proponer las áreas de distribución potencial (García, 2010). El programa

MaxEnt, mediante su algoritmo de máxima entropía, obtiene resultados robustos en términos de la proyección espacial de la distribución y la relevancia de las variables ambientales que funcionan como restricciones (Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011). El software mencionado trabaja con coordenadas y variables que permiten modelar y restringir la distribución potencial de las especies (Phillips, Anderson, & Schapire, 2006; Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011). Por ello MaxEnt fue el programa que se seleccionó para realizar los modelados de distribución potencial de *Swietenia macrophylla* King y *Cedrela odorata* L.

- a) Para ello se inició cargando en el software SIG las 19 variables bioclimáticas extraídas de WorldClim, al igual que las variables utilizadas en el método I. Se procedió a convertir las variables bioclimáticas en ráster para poderlas trabajar en el software SIG (ACSII a raster), las otras variables que se encuentren como capa también se convirtieron en raster (en este caso fue la variable drenaje). Al tener todas las variables en raster, éstas **se re proyectaron con el mismo sistema de coordenadas** (en este caso son WGS84 Transverse Mercator). Por último, se convirtieron nuevamente todas las variables en formato **ACSII** para que el programa Maxent reconozca las mismas. Este paso se realizó con ayuda de la sección de “ambiente” para tomar como referencia un raster base.
- b) Como segundo paso se cargó en el software SIG las bases de datos que contuvieran los puntos de coordenadas de cada especie. Esta base de datos, al igual que las variables anteriores, se proyectaron (re-proyectar) en el mismo sistema de coordenadas que anteriormente se utilizó. Se desplegó X y Y, luego se exportaron todos los datos para que las mismas fuesen editables (convertir en capa). Se abrió la tabla de atributos de cada base de datos y luego se calculó la geometría de X y Y. Estas bases preparadas se abrieron como (formato) DBF en Excel y luego se guardaron como CSV, formato reconocido para MaxEnt.
- c) Luego se abrió MaxEnt, cargando en el programa las variables climáticas (extraídas anteriormente de WorldClim) y las demás variables trabajadas en el programa SIG, al igual que los registros de las especies depurados anteriormente.
- d) Se procedió a ejecutar el programa con lo cual se generó un modelo general que contara con las 19 variables climáticas y las variables edáficas y fisiográficas utilizadas en la metodología I (temperatura, precipitación, altitud, pendiente y drenaje); posteriormente, de acuerdo al desempeño de cada variable en el modelo general, se seleccionaron las variables adecuadas para cada uno de los modelos generados; esto con el objetivo de evitar utilizar una mayor cantidad de variables que pudieran haber sobreestimado el modelo.
- e) Se ejecutó 55 veces el programa para conocer diferentes modelos para cada especie, y se compararon hasta que se encontró el adecuado, que se seleccionó como el “mejor modelo” basado en los mejores índices AUC y ROC.

- f) Al obtener la imagen que muestra el mapa generado en MaxEnt se procedió a trasladar el archivo de salida “.asc” (ASCII) generado en MaxEnt hacia el software SIG y se transformó del formato ASCII a un formato Raster, que permitió visualizar la distribución potencial de la caoba en un mapa, al mismo se le realizaron los cambios de color pertinentes, siempre tomando en cuenta un color cálido para el mayor porcentaje de potencialidad y colores fríos para el menor porcentaje de potencialidad. Para ello se tuvo que volver a proyectar las coordenadas del raster creado a partir del ASCII y colocar las mismas coordenadas proyectadas en “x” y “y” que las capas que habíamos estado usando. Para que el mapa tuviera los colores adecuados, se realizó una reclasificación (No presencia, probabilidad muy baja, baja, media, alta y muy alta) colocándole los colores más parecidos al mapa generado en MaxEnt. La clasificación de las probabilidades se realizó gracias al punto de corte que presenta la Figura No. 12 y 13 (15.89 para caoba y 16 para cedro), se dividió 100 y se obtuvieron 6 probabilidades (esto se realizó en base al criterio del autor). Se realizó una tabla con el área en hectáreas de cada probabilidad (Tabla No. 5 y 6).
- g) Por último (en el software SIG) se superpusieron los dos mapas finales (metodología MaxEnt vs. metodología de análisis multicriterio) para poder observar las áreas de traslape entre los dos métodos utilizados y así poder observar los sitios potenciales para restauración y plantaciones. También se realizó una tabla con las probabilidades de traslape entre las dos metodologías (Tabla No. 8 y 9).

En este método se utilizaron 761 registros de *Swietenia macrophylla* King. y 19 variables bioclimáticas, una edáfica (pendiente) y una fisiográfica (altitud); en el caso de *Cedrela odorata* L. se utilizaron 577 registros de distribución natural y las mismas variables que se utilizó con caoba. Este método, a comparación del análisis realizado en el software SIG, utiliza el logaritmo de máxima entropía. Lo que hace este logaritmo es modelar todo lo que es conocido y no supone nada sobre lo desconocido: modelar todo lo conocido se refiere a cumplir con una serie de condicionantes que deben ser satisfechas (registros y restricciones de variables ambientales), y no suponer nada sobre lo desconocido se refiere a escoger la distribución más “uniforme” y escoger la que tiene máxima entropía, que a la vez es la más estable.

6.5. Equipo y materiales

- Una computadora con un procesador mayor o igual a i5 y memoria RAM mayor o igual a 8GB, con ello se garantiza un rápido e ininterrumpido análisis en los sistemas y software.
- Un software SIG, el cual permitirá recopilar, organizar, analizar, compartir y distribuir información geográfica.
- El software, que realizará el proceso de datos, el cual es automático y se generarán las grillas de idoneidad/abundancia de especies, así como reportes del método de procesamiento y ajuste de la simulación. En este caso se utilizó MaxEnt.
- Se requirió de una base de datos que mostrara la distribución natural de *Swietenia macrophylla* King y *Cedrela odorata* L. en Guatemala, con ayuda de puntos de ocurrencia

provenientes de otras bases de datos que posee INAB como las que maneja PINPEP (modalidad de bosque de protección y bosque bajo manejo), PROBOSQUE (modalidad de bosque de protección y bosque bajo manejo) y PPMF (modalidad de bosque natural), bases de datos biológicas, herbarios, artículos y tesis que contengan coordenadas de distribución natural de las especies mencionadas.

- Capas y rásters de variables biofísicas (precipitación, temperatura, altitud, drenaje de suelo, pH, textura del suelo, pendiente %, cuerpos de agua y centros poblados).

7. RESULTADOS

7.1. Método I

En las figuras del método I, se puede observar dos mapas por figura, que muestran en color verde los sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con caoba y con cedro en Guatemala, el color dorado (tan) representa las áreas que no son aptas para caoba y cedro. En todas las figuras, los mapas de la derecha, a diferencia de los de la izquierda, muestran con puntos de color rojo los registros de distribución natural que fueron utilizados de caoba y con azul los registros de distribución natural utilizados de cedro.

Los mapas de la Figura No. 2 y 3 están basados en la unión de rangos de las variables de temperatura y precipitación óptimas en los cuales se desarrolla la caoba y el cedro respectivamente. En este primer paso, al unir la capa de rango de precipitación a la cual se registra cada especie (caoba y cedro respectivamente) y la capa del rango de temperatura a la cual se registra cada especie también, se generó el Mapa Síntesis 1 (Figura No. 2 y 3), en estos se puede observar que apenas se restringen sus sitios potenciales para el país y los registros de caoba (Figura No. 2) y cedro (Figura No. 3) caen todos dentro de la distribución potencial de caoba y cedro (respectivamente) sin problema alguno.

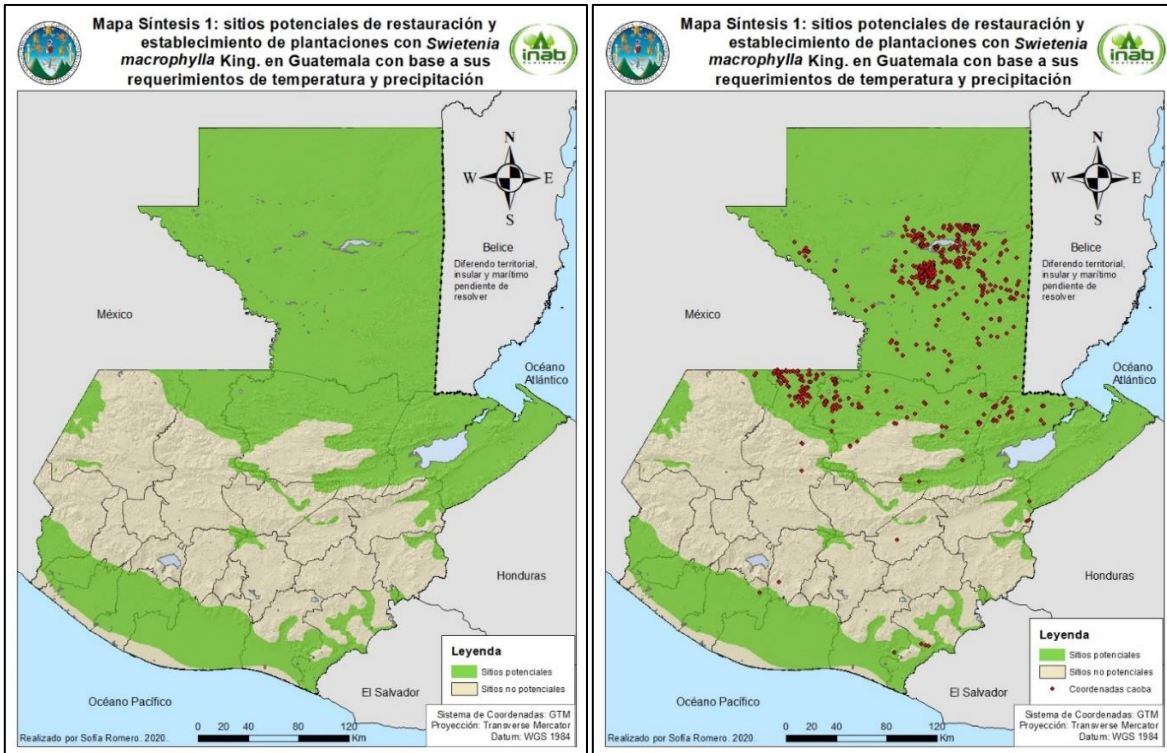


Figura 2: Mapa de sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con *Swietenia macrophylla* King (caoba) en función a sus rangos óptimos de temperatura y precipitación

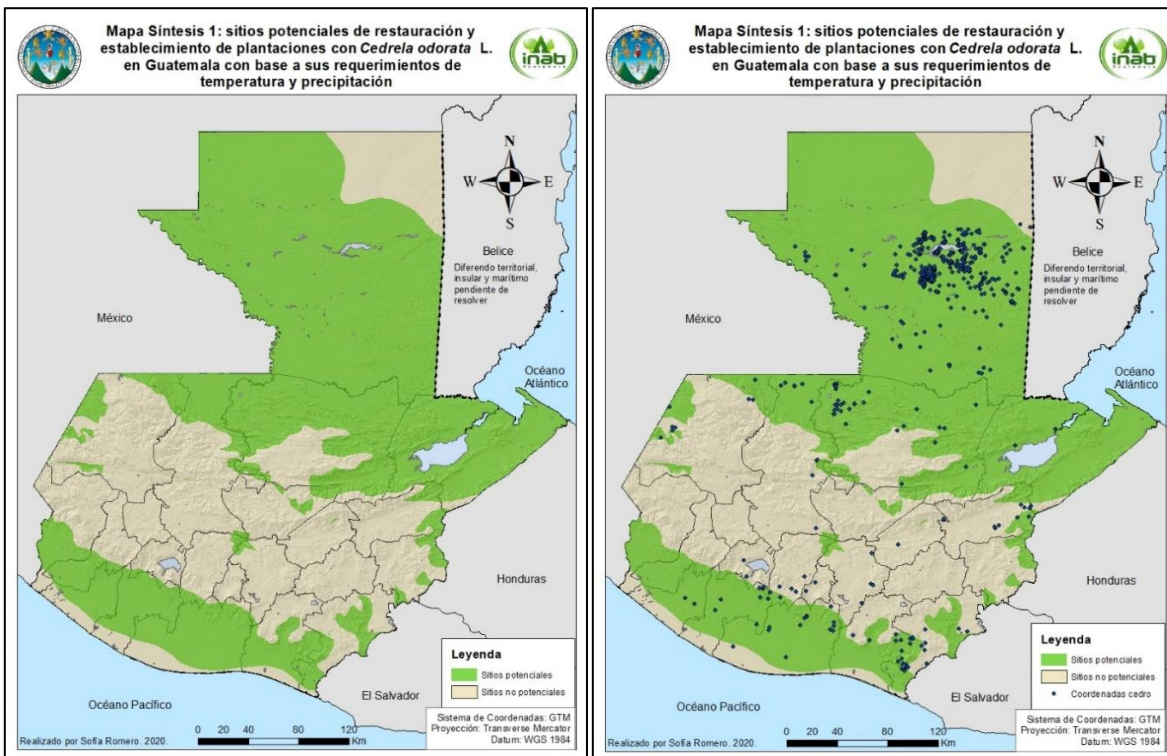


Figura 3: Mapa de sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con *Cedrela odorata* L. (cedro) en función a sus rangos óptimos de temperatura y precipitación

Los mapas de la Figura No. 4 y 5 se basan en la unión de rangos de las variables de temperatura, precipitación y altitud óptimas en los cuales se desarrolla la caoba (Figura No. 4) y el cedro (Figura No. 5). Como segundo paso, al unir el Mapa Síntesis 1 (Figura No. 4 y 5) con la capa de rango altitudinal en el cual se registra cada especie, se generó un Mapa Síntesis 2 (Figura No. 5 y 5), en el cual se puede observar que para las dos especies, las partes más altas del país, como lo es el piso montano, montano bajo y casi todo el piso premontano (Anexo No. 3 y 4) son excluidos del mapa, haciendo que se restrinja más el sitio potencial para caoba y cedro; a pesar de esta restricción, se observa que los registros que se utilizaron para cada especie concuerdan con estos sitios potenciales sin problema alguno.

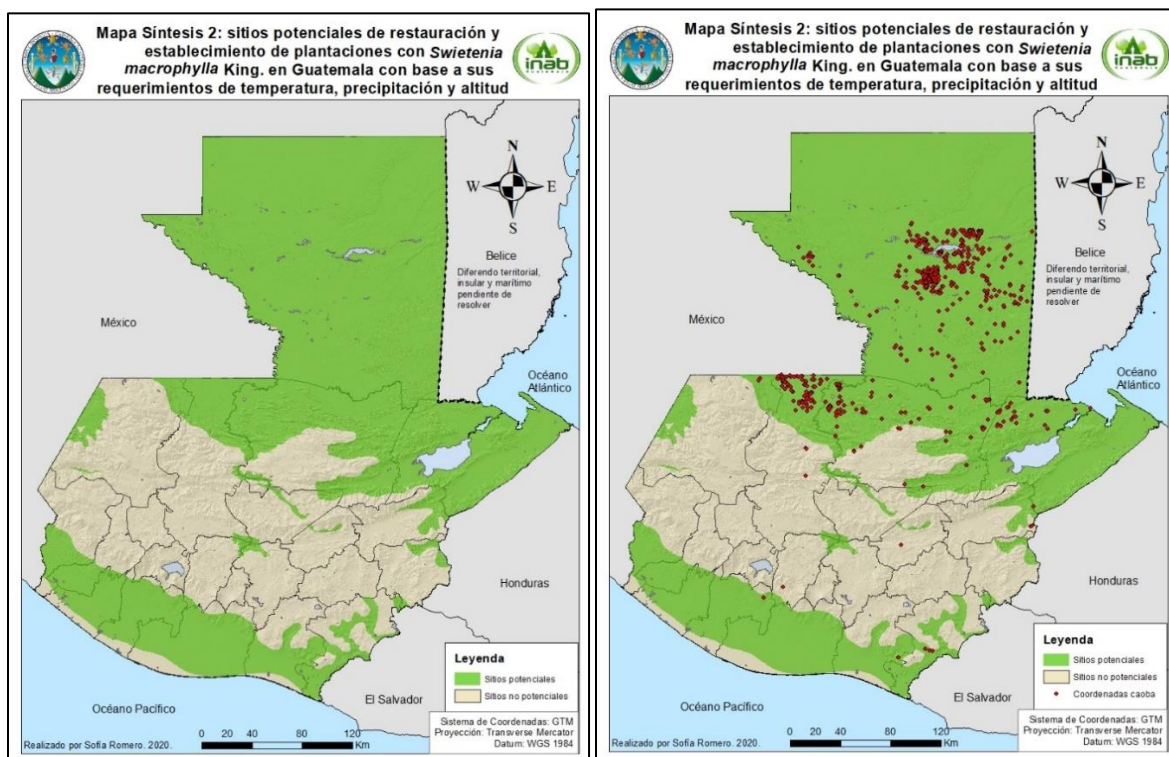


Figura 4: Mapa de sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con *Swietenia machophylla* King (caoba) en función a sus rangos óptimos de temperatura, precipitación y altitud

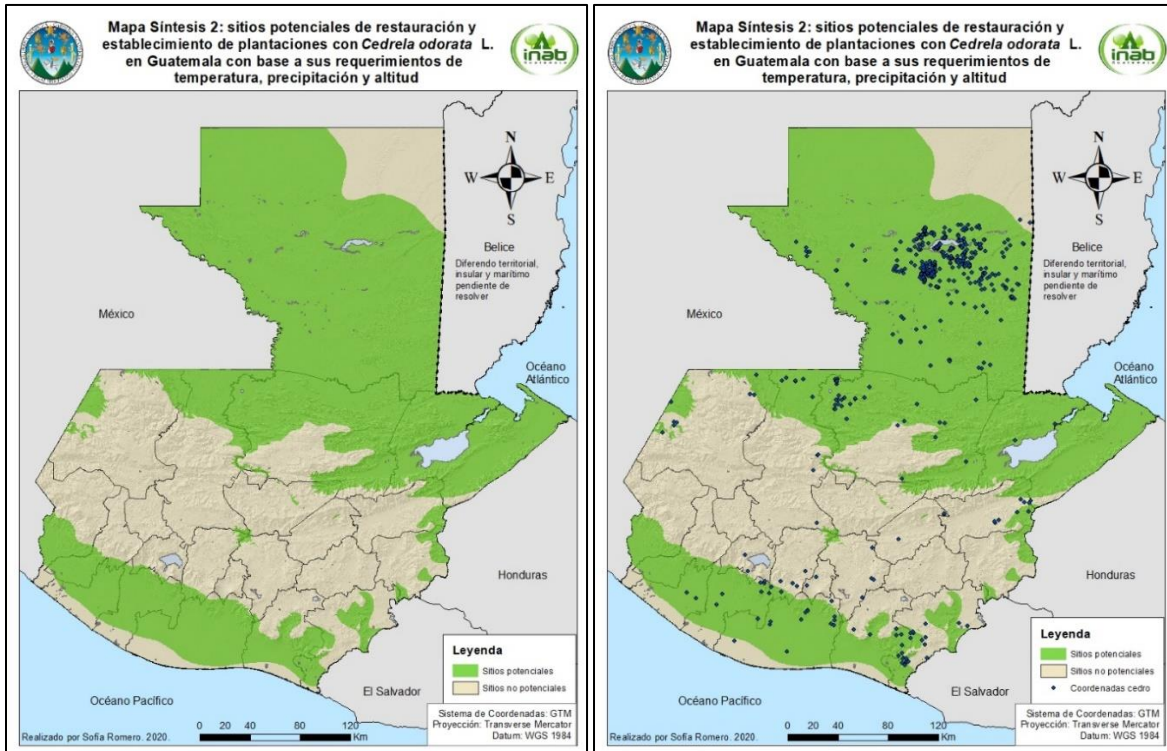


Figura 5: Mapa de sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con *Cedrela odorata* L. (cedro) en función a sus rangos óptimos de temperatura, precipitación y altitud

Los mapas de la Figura No. 6 y 7 están basados en la unión de rangos de las variables de temperatura, precipitación, altitud y drenaje óptimo en los cuales se desarrolla la caoba (Figura No. 6) y el cedro (Figura No. 7). Para el tercer paso se unió el Mapa Síntesis 2 (Figura 4 y 5) con la capa de drenaje óptimo, y se generó un Mapa Síntesis 3 (Figura 6 y 7), restringiendo el mapa cada vez más; en estos, ya se puede observar que algunos de los registros de caoba (Figura No. 6) y cedro (Figura No. 7) caen fuera de estos sitios potenciales para la mismas.

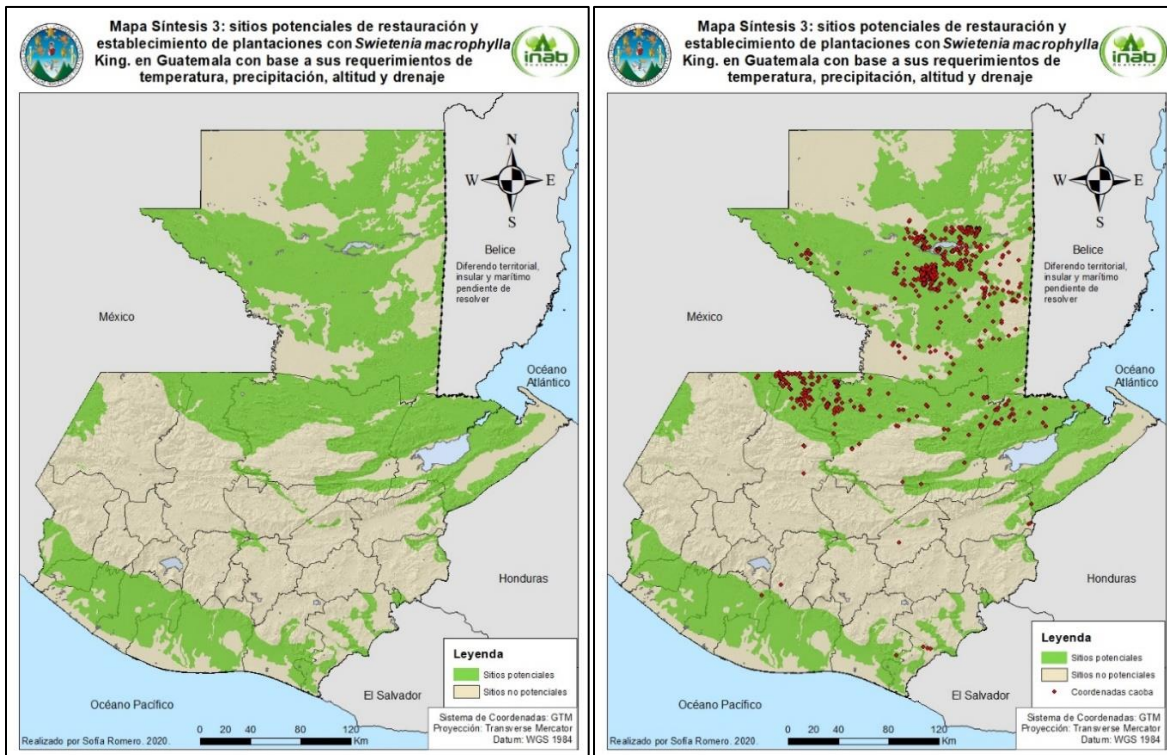


Figura 6: Mapa de sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con *Swietenia machophylla* King (caoba) en función a sus rangos óptimos de temperatura, precipitación, altitud y drenaje

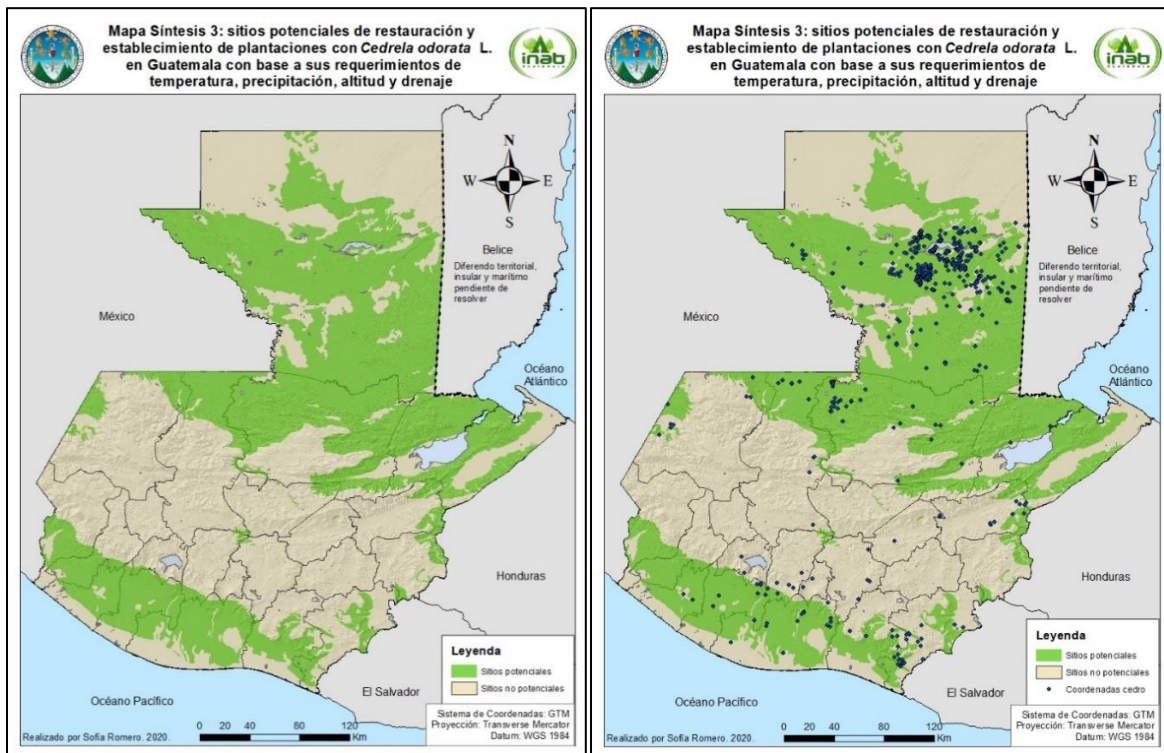


Figura 7: Mapa de sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con *Cedrela odorata* L. (cedro) en función a sus rangos óptimos de temperatura, precipitación, altitud y drenaje

Los mapas de la Figura No. 8 y 9 se basan en la unión de rangos de las variables de temperatura, precipitación, altitud, drenaje y pendiente óptima en los cuales se desarrolla la caoba (Figura No. 8) y el cedro (Figura No. 9). Como cuarto paso, al unir la capa de rango de pendiente de caoba y cedro con el Mapa Síntesis 3 de cada especie (Figura No. 6 y 7), se generó el Mapa Preliminar (Figura No. 8 y 9), el cual restringe de manera notoria los sitios potenciales para caoba (Figura No. 8) y cedro (Figura No. 9).

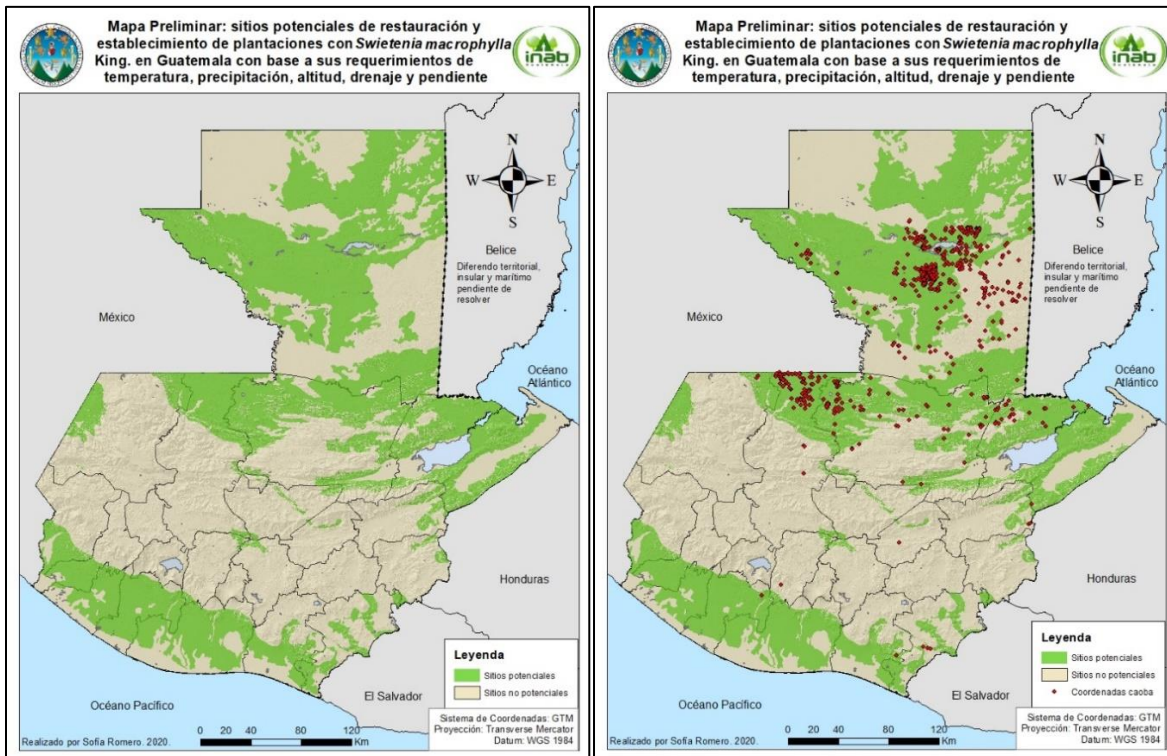


Figura 8: Mapa de sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con *Swietenia machophylla* King (caoba) en función a sus rangos óptimos de temperatura, precipitación, altitud, drenaje y pendiente

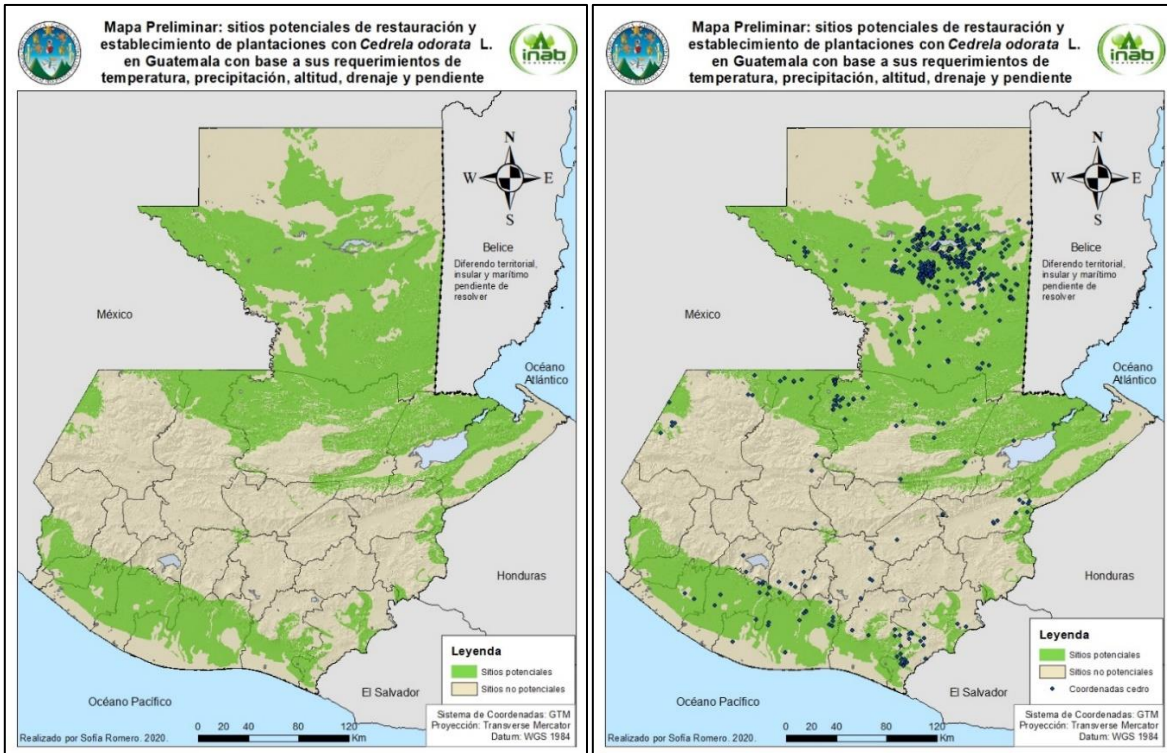


Figura 9: Mapa de sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con *Cedrela odorata* L. (cedro) en función a sus rangos óptimos de temperatura, precipitación, altitud, drenaje y pendiente

Los mapas de la Figura No. 10 y 11 se basan en la unión de rangos de todas las variables utilizadas, con la excepción a los anteriores (Figura No. 8 y 9) en que en ellos se generó una máscara para asegurar que los modelos no tomen en cuenta los lagos y centros poblados de Guatemala, ya que estas áreas habrá caoba ni cedro; y por ello que no afectaran en el cálculo posterior de sitios potenciales en hectáreas. En este quinto paso, se unió el Mapa Preliminar (Figura No. 8 y 9) con el Mapa Síntesis 3 (Figura No. 6 y 7) y se generó un Mapa Final (Figura No. 10 y 11).

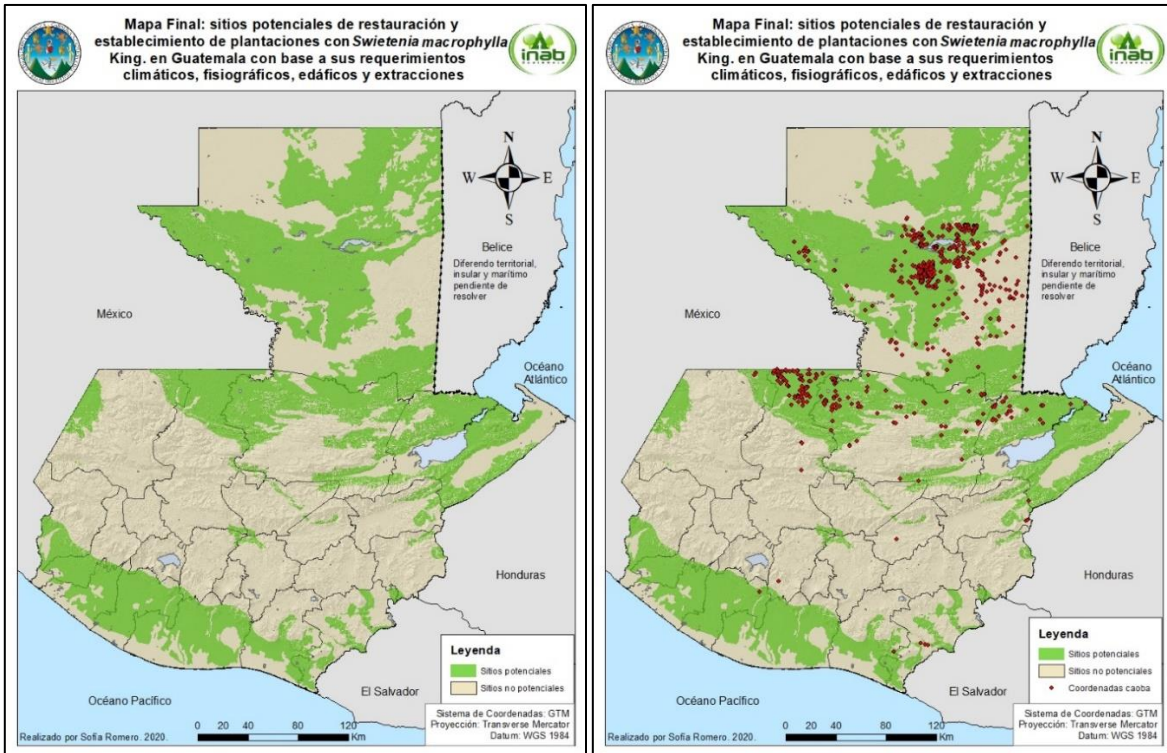


Figura 10: Mapa de sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con *Swietenia machophylla* King (caoba) en función a sus rangos óptimos climáticos (temperatura y precipitación), fisiográficos (altitud), edáficos (tipo de drenaje de suelo) y extracciones

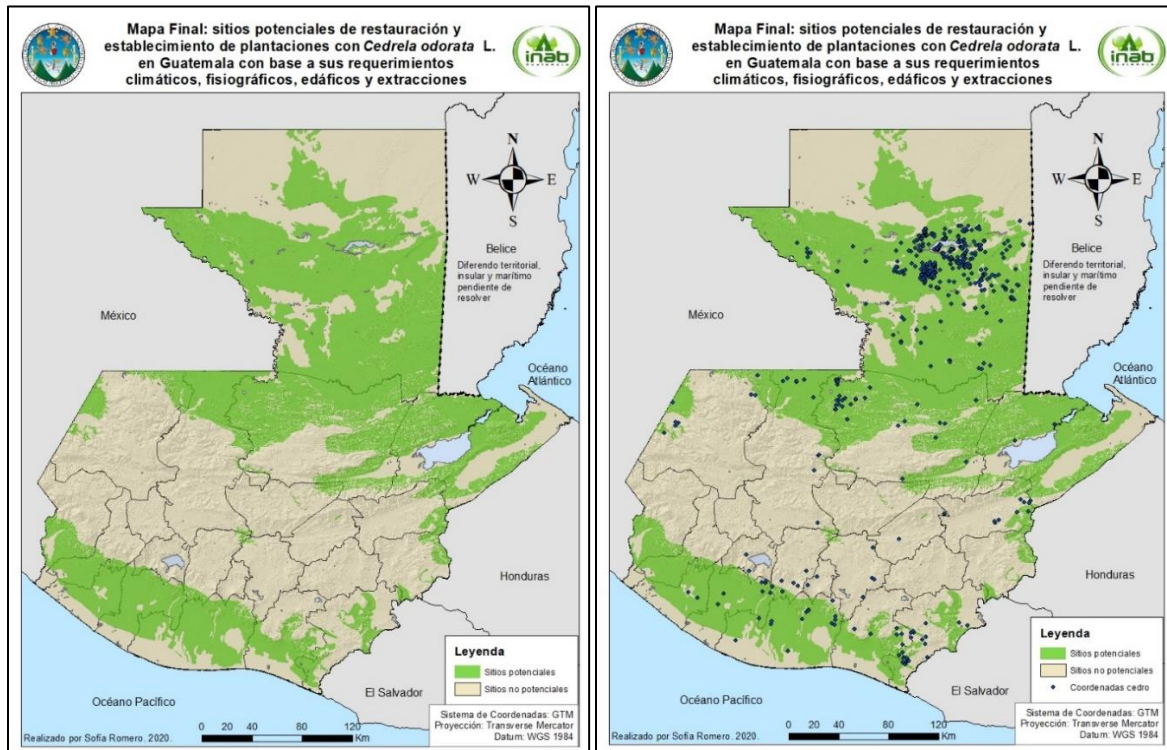


Figura 11: Mapa de sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con *Cedrela odorata* L. (cedro) en función a sus rangos óptimos climáticos (temperatura y precipitación), fisiográficos (altitud), edáficos (tipo de drenaje de suelo y pendiente) y extracciones

En la Tabla No. 5 se puede observar la cantidad de hectáreas de sitios potenciales que tiene cada mapa en donde se puede desarrollar la caoba sin problemas. Éstas fueron calculadas en un software SIG, y se puede observar claramente que cada mapa tiene una disminución de hectáreas potenciales para cada especie con base a las restricciones que se hizo en cada paso (Anexo No. 6).

En la Tabla No. 5 se observa el área en hectáreas que tiene cada departamento de Guatemala, cuántas área en hectáreas de sitios potenciales para caoba posee cada uno de ellos, también se observa cuánto porcentaje del departamento es potencial para que se desarrolle la caoba con base al tamaño (en ha) de cada departamento. Por último, se observa el porcentaje de sitios potenciales por departamento para que la caoba se desarrolle, en base al sitio potencial total del país; en el mismo se destacan (rellenado con gris) los departamentos que poseen un mayor porcentaje de sitios potenciales para caoba en base al área de sitios potenciales total del país, los cuales son: Petén con 45%, Alta Verapaz con 12%, Izabal con 11%, Escuintla con 6%, y con el mismo porcentaje están Quiché y Suchitepéquez con 5% (Tabla No. 5); y los departamentos que poseen los porcentajes más altos de área con sitios potenciales para caoba en base al área total del mismo son: Suchitepéquez con 80%, Retalhuleu con 63%, Escuintla con 61%, Izabal con 60%, Petén con 54% (Tabla No. 5).

Tabla 5: Área en hectáreas y porcentaje por departamento de los sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con *Swietenia macrophylla* King (caoba) en Guatemala

Sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con <i>Swietenia macrophylla</i> King. en ha por departamento				
Departamento	Área total (ha)	Área de sitios potenciales por departamento (ha)	Porcentaje de sitios potenciales para caoba por departamento con base al área total de la misma	Porcentaje de sitios potenciales para caoba por departamento con base al área apta total del país
Guatemala	220,468.08	8,156.81	4%	0%
El Progreso	183,454.75	4,969.02	3%	0%
Sacatepéquez	53,603.23	-	0%	0%
Chimaltenango	186,346.18	11,607.48	6%	0%
Escuintla	450,435.07	273,383.03	61%	6%
Santa Rosa	315,943.28	103,110.44	33%	2%
Sololá	116,674.55	1,431.41	1%	0%
Totonicapán	107,628.65	-	0%	0%
Quetzaltenango	213,315.04	74,811.14	35%	2%
Suchitepéquez	239,341.42	191,778.66	80%	5%
Retalhuleu	170,098.68	107,821.16	63%	3%
San Marcos	355,405.74	70,680.83	20%	2%
Huehuetenango	736,124.95	114,821.86	16%	3%
Quiché	727,895.90	196,191.21	27%	5%
Baja Verapaz	286,316.69	19,153.21	7%	0%
Alta Verapaz	1,074,824.14	530,903.93	49%	12%
Petén	3,591,822.07	1,925,828.74	54%	45%
Izabal	749,269.22	451,083.63	60%	11%
Zacapa	269,882.81	39,293.98	15%	1%
Chiquimula	240,260.75	17,203.63	7%	0%
Jalapa	202,971.69	210.58	0%	0%
Jutiapa	331,687.64	105,566.80	32%	2%
Total	10,823,770.53	4,248,007.56	---	100%

En la Tabla No. 6 se puede observar la cantidad de hectáreas de sitios potenciales que tiene cada mapa en donde se puede desarrollar el cedro sin problemas. Esta información fue calculada en un software SIG. Al igual que con la caoba, con el cedro se puede observar claramente que cada mapa tiene una disminución de hectáreas potenciales para cada especie con base a las restricciones que se hizo en cada paso (Anexo No. 7).

En la Tabla No. 6 se puede observar el área en hectáreas que tiene cada departamento de Guatemala, cuántas área en hectáreas de sitios potenciales para cedro posee cada uno de ellos, también se observa cuánto porcentaje del departamento es potencial para que se desarrolle la caoba y cedro en base al tamaño (en ha) de cada departamento. Por último, se observa el porcentaje de sitios potenciales por departamento para cedro se desarrolle, en base al sitio potencial total del país; en el mismo se destacan (rellenado con gris) los departamentos que poseen un mayor porcentaje de sitios potenciales para cedro en base al área de sitios potenciales total del país, los

cuales son: Petén con 45%, Alta Verapaz con 14%, Izabal con 10%, Escuintla con 6%, y con el mismo porcentaje están Quiché y Suchitepéquez con 4% (Tabla No. 4); y los departamentos que poseen los porcentajes más altos de área con sitios potenciales para caoba en base al área total del mismo son: Suchitepéquez con 79%, Retalhuleu con 64%, Escuintla e Izabal con 62%, y Alta Verapaz con 61% (Tabla No. 6).

Tabla 6: Área en hectáreas y porcentaje por departamento de los sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con *Cedrela odorata* L. (cedro) en Guatemala

Sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con <i>Cedrela odorata</i> L. en ha por departamento				
Departamento	Área total (ha)	Área de sitios potenciales por departamento (ha)	Porcentaje de sitios potenciales para cedro por departamento con base al área total de la misma	Porcentaje de sitios potenciales para cedro por departamento con base al área apta total del país
Guatemala	220,468.08	4,117.04	2%	0%
El Progreso	183,454.75	769.52	0%	0%
Sacatepéquez	53,603.23	878.96	2%	0%
Chimaltenango	186,346.18	17,697.12	9%	0%
Escuintla	450,435.07	277,579.81	62%	6%
Santa Rosa	315,943.28	116,686.70	37%	3%
Sololá	116,674.55	6,220.77	5%	0%
Totonicapán	107,628.65	-	0%	0%
Quetzaltenango	213,315.04	82,578.11	39%	2%
Suchitepéquez	239,341.42	190,067.96	79%	4%
Retalhuleu	170,098.68	108,336.74	64%	2%
San Marcos	355,405.74	81,914.32	23%	2%
Huehuetenango	736,124.95	106,695.50	14%	2%
Quiché	727,895.90	180,161.48	25%	4%
Baja Verapaz	286,316.69	16,895.93	6%	0%
Alta Verapaz	1,074,824.14	651,682.23	61%	14%
Petén	3,591,822.07	2,052,492.88	57%	45%
Izabal	749,269.22	464,039.78	62%	10%
Zacapa	269,882.81	41,696.90	15%	1%
Chiquimula	240,260.75	37,932.38	16%	1%
Jalapa	202,971.69	-	0%	0%
Jutiapa	331,687.64	99,659.59	30%	2%
Total	10,823,770.53	4,538,103.73	---	100%

7.2. Método II

La Figura No. 12 (caoba) y Figura No. 13 (cedro) muestran en color rojo la “fracción de fondo prevista”, en color azul la “omisión en muestras de entrenamiento”, en color verde la “omisión en muestras de prueba”, y en negro la “omisión prevista”. Se puede observar la tasa de omisión y el área pronosticada en función del umbral acumulativo. La tasa de omisión debe estar cerca de la omisión prevista, debido a la definición del umbral acumulativo; en las dos imágenes se observa que

esto concuerda con lo esperado (en los dos casos) ya que la línea de color verde está bastante cerca (arriba) de la negra, en base a ello y a su AUC Y ROC (Figura No. 14 para caoba, Figura No. 15 para cedro); estos modelos fueron elegidos dentro de los 55 modelos desarrollados para cada especie.

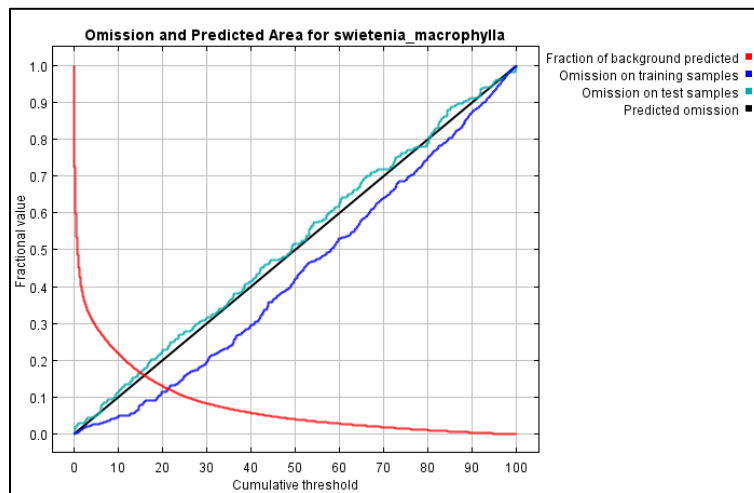


Figura 12: Gráfico que presenta la tasa de omisión y el área predicha en función del umbral acumulado para Swietenia macrophylla King (caoba)

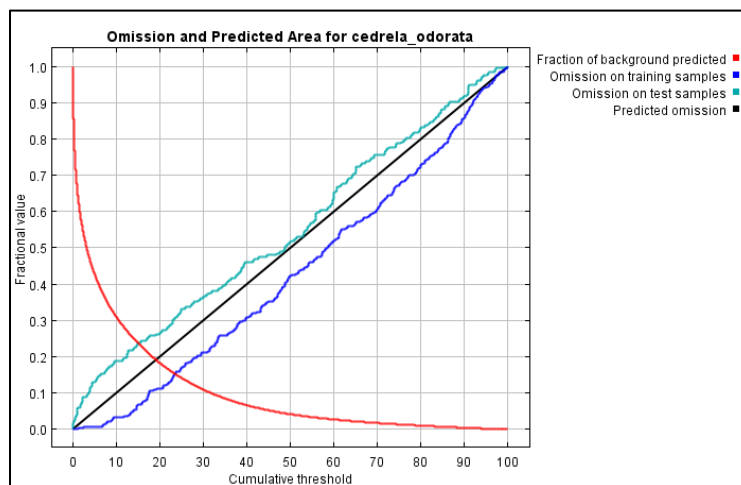


Figura 13: Gráfico que presenta la tasa de omisión y el área predicha en función del umbral acumulado para Cedrela odorata L. (cedro)

La Figura No. 14 (caoba) y Figura No. 15 (cedro) muestran la curva característica de funcionamiento del receptor (ROC) para los mismos datos. En rojo se puede observar los datos de entrenamiento con un AUC para caoba de 0.942 (Figura No. 14) y un AUC para cedro de 0.932 (Figura No. 15), en azul se observan los datos de prueba con un AUC para caoba de 0.909 (Figura No. 14) y con un AUC para cedro de 0.843 (Figura No. 15), y en negro se observa la predicción al azar con un AUC de 0.5 para las dos especies (no cambia). En las dos figuras (caoba y cedro) podemos observar que el AUC tiende a acercarse a 1, lo cual es lo que se espera en estos modelos, por lo que éste es el otro motivo por el cual se eligió estos modelos sobre los 55 desarrollados por especie.

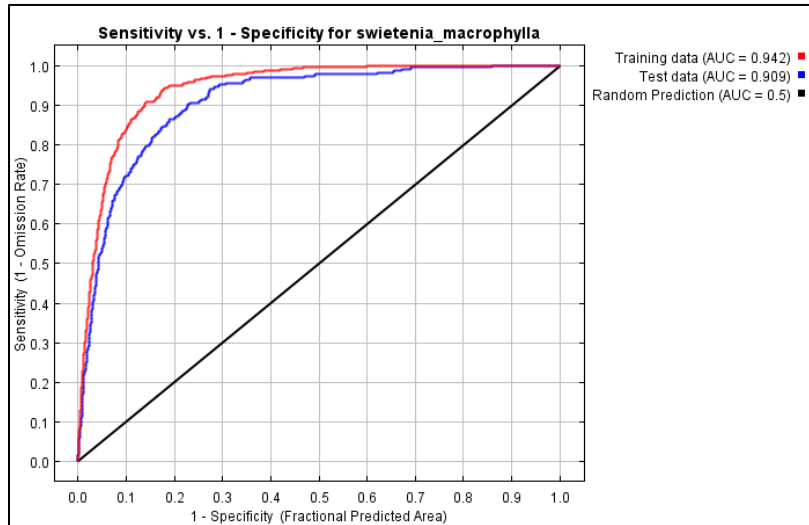


Figura 14: Gráfico que muestra la curva operacional ROC y AUC. En la misma se presenta la sensibilidad vs. el área fraccionada pronosticada para *Swietenia macrophylla* King (caoba)

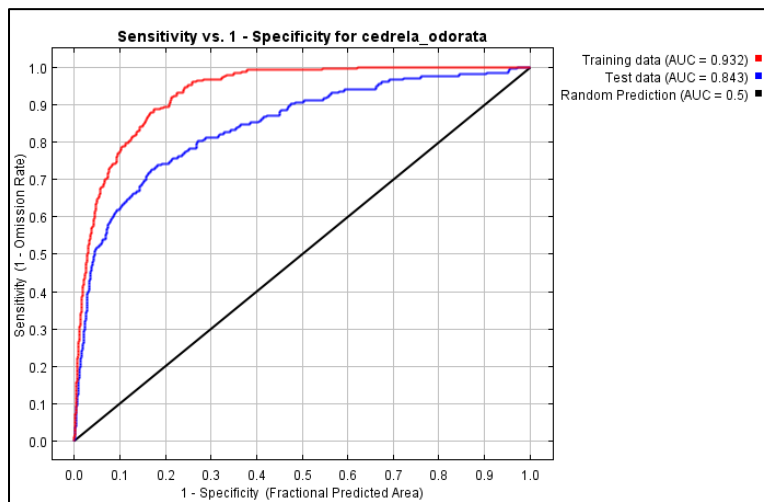


Figura 15: Gráfico que muestra la curva operacional ROC y AUC. En la misma se presenta la sensibilidad vs. el área fraccionada pronosticada para *Cedrela odorata* L. (cedro)

La Figura No. 16 muestra una representación del modelo MaxEnt para caoba, se pueden observar los sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con caoba en Guatemala; los colores más cálidos muestran áreas con mejores condiciones predichas para cada especie y los colores fríos muestran una baja probabilidad de condición. Los puntos blancos ubicados en el mapa (Anexo No. 8), muestran las ubicaciones de presencia utilizadas para el entrenamiento, mientras que los puntos violetas muestran las ubicaciones de prueba. Los puntos de prueba son una muestra aleatoria tomada de la localización de presencia de caoba. En esta figura se puede observar en color verde el área donde no es probable que se encuentre caoba, en color amarillo una probabilidad muy baja en la que se puede encontrar la caoba, en color mostaza una probabilidad baja que se

encuentre caoba, en color naranja una probabilidad media que se encuentre caoba, en color naranja fuerte una probabilidad alta que se encuentre caoba, y en color rojo una probabilidad muy alta que ésta se encuentre.

En base a esta figura y al Anexo No. 8, se podría deducir que las áreas que muestran sitios potenciales para caoba en Guatemala de forma descendente son las siguientes: Petén, con una alta probabilidad en el centro del mismo, la Franja Transversal del Norte (Alta Verapaz y Quiché, exceptuando Huehuetenango), con la más alta probabilidad en los municipios de Ixcán y Cobán; noroeste del Caribe (Izabal), y el norte de la región Bocacosta (Figura No. 16 y Anexo No. 8). Se puede observar que la distribución potencial de caoba no concuerda con las tierras muy altas, como la franja volcánica y montañosa (Figura No. 16 y Anexo No. 4).

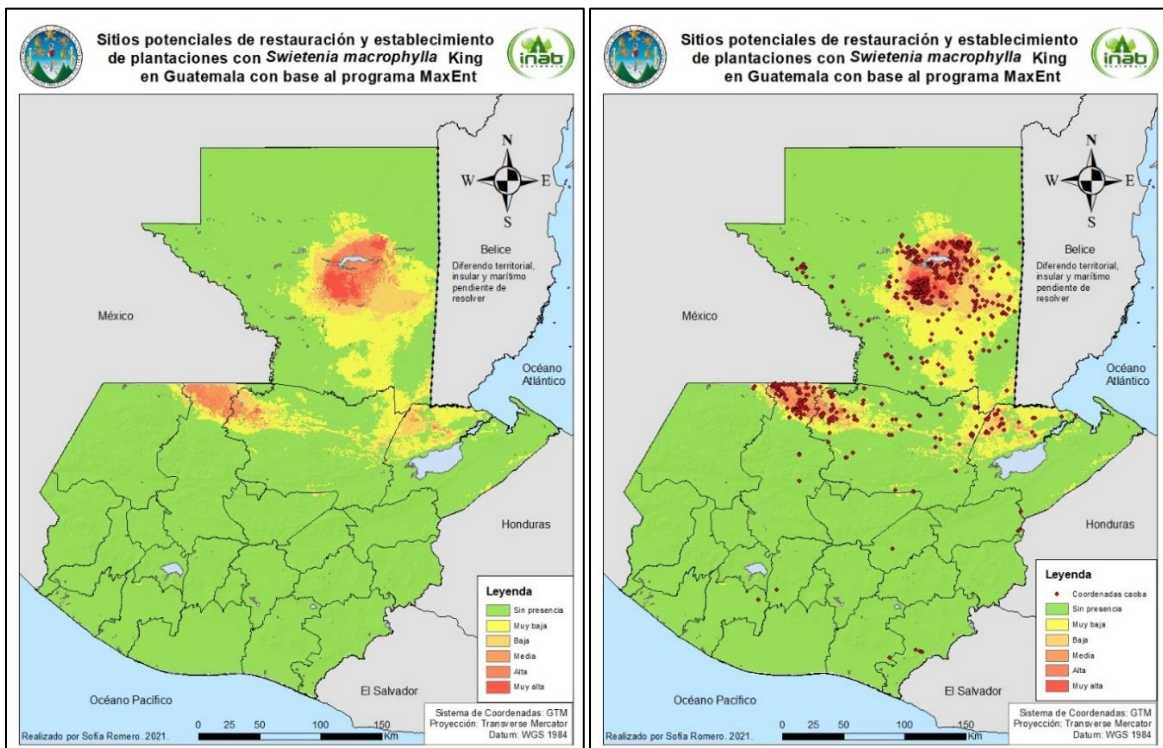


Figura 16: Mapa de sitios potenciales de restauración y establecimiento de plantaciones con *Swietenia macrophylla* King. en Guatemala con base al programa MaxEnt

Al calcular el área en hectáreas de cada probabilidad de ocurrencia (sin presencia, probabilidad muy baja, baja, media, alta, y muy alta) de caoba en Guatemala, realizado con el programa de MaxEnt, podemos observar que tenemos 9,221,842.49 hectáreas en donde la probabilidad que distribuya caoba es nula, con probabilidad muy baja tenemos 884,459.05 hectáreas, con probabilidad baja 332,106.05 hectáreas, con probabilidad media 170.817.96 hectáreas, con una probabilidad alta 96,380.50 hectáreas, y con una probabilidad muy alta tenemos 5,325.32 hectáreas (Tabla No. 7).

Tabla 7: Probabilidades en donde se muestra el tamaño del área en hectáreas de que *Swietenia macrophylla* King se encuentre en Guatemala

Tipo de probabilidad de ocurrencia de <i>Swietenia macrophylla</i> King en Guatemala	Área en ha de probabilidad de ocurrencia de <i>Swietenia macrophylla</i> King en Guatemala con la metodología MaxEnt
Sin presencia	9,221,842.49
Muy baja	884,459.05
Baja	332,106.04
Media	170,817.96
Alta	96,380.50
Muy alta	56,325.32

Al realizar los modelos en MaxEnt (correr el programa), se pudo rastrear qué variables ambientales son las que más contribuyeron en mayor medida al modelo elegido (porcentaje de contribución); en la Tabla No. 8 podemos observar que para la caoba fueron BIO17 (precipitación del cuarto más seco), BIO3 (isotermalidad), BIO2 (rango diurno medio), BIO4 (estacionalidad de temperatura) lo cual demuestra que estas variables están altamente correlacionadas y son importantes para la distribución de la caoba.

Tabla 8: Porcentaje de contribución e importancia de permutación para cada variable utilizada en el método II/MaxEnt con respecto a la caoba

Variable	Porcentaje de Contribución	Importancia de la Permutación
BIO17 (precipitación del cuarto más seco)	21.3	6.1
BIO3 (isotermalidad)	16.5	1
BIO2 (rango diurno medio)	14.4	4.8
BIO4 (estacionalidad de la temperatura)	14	35.2
BIO12 (precipitación anual)	5.2	13.3
BIO1 (temperatura media anual)	4.9	4.9
BIO14 (precipitación del mes más seco)	4.7	0.3
BIO16 (precipitación del cuarto más húmedo)	3.9	6.6
BIO6 (temperatura mínima del mes más frío)	3.3	2.8
BIO18 (precipitación del trimestre más cálido)	2.6	2.7
Precipitación	2.4	5
Altitud	2.1	1.5
Temperatura	1.2	4.1
BIO13 (precipitación del mes más húmedo)	0.8	2
BIO7 (rango anual de temperatura)	0.6	7.1
BIO10 (temperatura media del trimestre más cálido)	0.5	0.4
BIO5 (temperatura máxima del mes más cálido)	0.3	0.7
Drenaje	0.1	0.6
BIO15 (estacionalidad de la precipitación)	0.1	0.4
BIO8 (temperatura media del trimestre más húmedo)	0.1	0.3
Pendiente	0.1	0.4
BIO9 (temperatura media del cuarto más seco)	0.1	0
BIO19 (precipitación del cuarto más frío)	0.1	0
BIO11 (temperatura media del cuarto más frío)	0.1	0

la Figura No. 17 muestra la representación del modelo MaxEnt para cedro, en el mismo se puede observar los sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con cedro en Guatemala. Los colores más cálidos muestran áreas con mejores condiciones predichas para cada especie y los colores fríos muestran una baja probabilidad de condición. Los puntos blancos ubicados en el mapa (Anexo No. 9), muestran las ubicaciones de presencia utilizadas para el entrenamiento, mientras que los puntos violetas muestran las ubicaciones de prueba. Los puntos de prueba son una muestra aleatoria tomada de la localización de presencia de cedro. En esta figura se puede observar en color verde el área donde no es probable que se encuentre el cedro, en color amarillo una probabilidad muy baja en la que se puede encontrar el cedro, en color mostaza una probabilidad baja que se encuentre cedro, en color naranja una probabilidad media que se encuentre cedro, en color naranja fuerte una probabilidad alta que se encuentre cedro, y en color rojo una probabilidad muy alta que éste se encuentre.

En base a los resultados de cedro, podemos deducir que las áreas que muestran sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con cedro en Guatemala de forma descendente son las siguientes: centro de Petén y en probabilidades más bajas al este, parte de la Región Bocacosta y sur de los Valles de oriente y sur del Altiplano Central, parte de la Franja Transversal (este de Alta Vera, partes altas de la sur del Caribe (Izabal) (Figura No. 17 y Anexo No. 9). Se puede observar que la distribución potencial de cedro no concuerda con las tierras muy altas, pero a diferencia de la caoba, el cedro si tiene probabilidad de distribución en las tierras medias (Figura No. 17 y Anexo No. 4).

Al igual que la caoba, los sitios potenciales de distribución para cedro también concuerdan en su mayoría con la distribución natural que nos muestra el Paquete Tecnológico del Cedro (INAB, 2019): bosques de la costa pacífica seca, que incluye los departamentos de Santa Rosa, Escuintla, Suchitepéquez y Retalhuleu, a diferencia que el mapa realizado incluye bastante área de Chimaltenango y Jutiapa; bosques tropicales húmedos, como lo es el departamento de Petén, exceptuando la parte norte de Izabal, y parte este de Alta Verapaz (Figura No. 17).

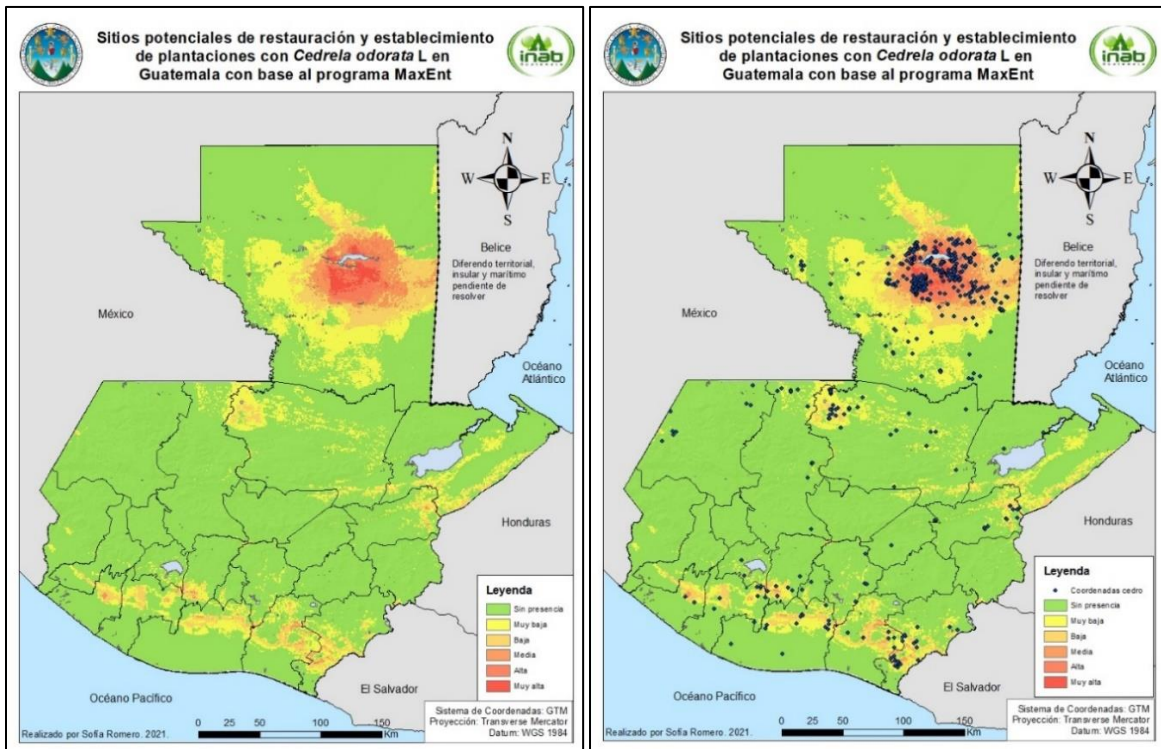


Figura 17: Mapa de sitios potenciales de restauración y establecimiento de plantaciones con *Cedrela odorata* L. en Guatemala con base al programa MaxEnt

Al calcular el área en hectáreas de cada probabilidad de ocurrencia (sin presencia, probabilidad muy baja, baja, media, alta, y muy alta) de caoba en Guatemala, realizado con el programa de MaxEnt, podemos observar que tenemos 8,652,403.91 hectáreas en donde no podremos observar el cedro nunca, con probabilidad muy baja tenemos 1,203,957.54 hectáreas, con probabilidad baja 524,384.76 hectáreas, con probabilidad media 215,740 hectáreas, con una probabilidad alta 108,898.84 hectáreas, y con una probabilidad muy alta tenemos 56,872.38 hectáreas (Tabla No. 9).

Tabla 9: Probabilidad en donde se muestra el tamaño del área en hectáreas de que *Cedrela odorata* L. se encuentre en Guatemala

Tipo de probabilidad de ocurrencia de <i>Cedrela odorata</i> L. en Guatemala	Área en ha de probabilidad de ocurrencia de <i>Cedrela odorata</i> L. en Guatemala con la metodología MaxEnt
Sin presencia	8,652,403.91
Muy baja	1,203,957.54
Baja	524,384.76
Media	215,740
Alta	108,898.84
Muy alta	56,872.38

En la Tabla No. 10 podemos observar las variables ambientales que contribuyeron en mayor medida (porcentaje de contribución) al modelo elegido para cedro fueron BIO3 (isotermalidad), BIO2 (rango diurno medio), BIO12 (precipitación anual), y altitud; estas variables también se encuentran altamente correlacionadas y son importantes para la distribución del cedro. Los valores de contribución porcentual se definen de manera heurística, o sea que dependen de la ruta particular que usa el código MaxEnt para obtener la solución óptima y un algoritmo diferente que podrían obtener la misma solución por medio de una ruta distinta (Phillips, et al., 2006).

Tabla 10: Porcentaje de contribución e importancia de permutación para cada variable utilizada en el método II/MaxEnt con respecto al cedro

Variable	Porcentaje de Contribución	Importancia de la Permutación
BIO3 (isotermalidad)	24	5.4
BIO2 (rango diurno medio)	20.7	4.5
BIO12 (precipitación anual)	10.9	20.9
Altitud	7.4	18.1
BIO7 (rango anual de temperatura)	7.3	10.9
BIO13 (precipitación del mes más húmedo)	6.2	8.3
BIO6 (temperatura mínima del mes más frío)	4.3	0.7
BIO18 (precipitación del trimestre más cálido)	2.9	1.9
BIO14 (precipitación del mes más seco)	2.4	0.3
BIO16 (precipitación del cuarto más húmedo)	2.3	5.2
BIO17 (precipitación del cuarto más seco)	2.2	1.5
BIO11 (temperatura media del cuarto más frío)	1.5	1.4
BIO5 (temperatura máxima del mes más cálido)	1.4	0.1
BIO1 (temperatura media anual)	1.1	4.7
Precipitación	1.1	2.9
BIO19 (precipitación del cuarto más frío)	0.8	0.3
BIO15 (estacionalidad de la precipitación)	0.8	5.4
Temperatura	0.7	2.7
Drenaje	0.6	0.5
BIO10 (temperatura media del trimestre más cálido)	0.6	0.5
BIO4 (estacionalidad de la temperatura)	0.4	2.3
Pendiente	0.4	1.6
BIO9 (temperatura media del trimestre más húmedo)	0.2	0
BIO8 (temperatura media del trimestre más húmedo)	0.1	0

La Figura No. 18 (caoba) y Figura No. 19 (cedro) muestra la coincidencia de sitios potenciales de restauración y establecimiento de plantaciones con *Swietenia macrophylla* King (Figura No. 18) y con *Cedrela odorata* L. (Figura No. 19) en Guatemala con base a la metodología de MaxEnt (algoritmo de máxima entropía) y SIG (análisis multicriterio). La metodología MaxEnt muestra con colores rojo y naranja fuerte una mayor probabilidad y con colores amarillo y naranja una menor probabilidad, la metodología SIG muestra los sitios potenciales de forma achurada en el mapa.

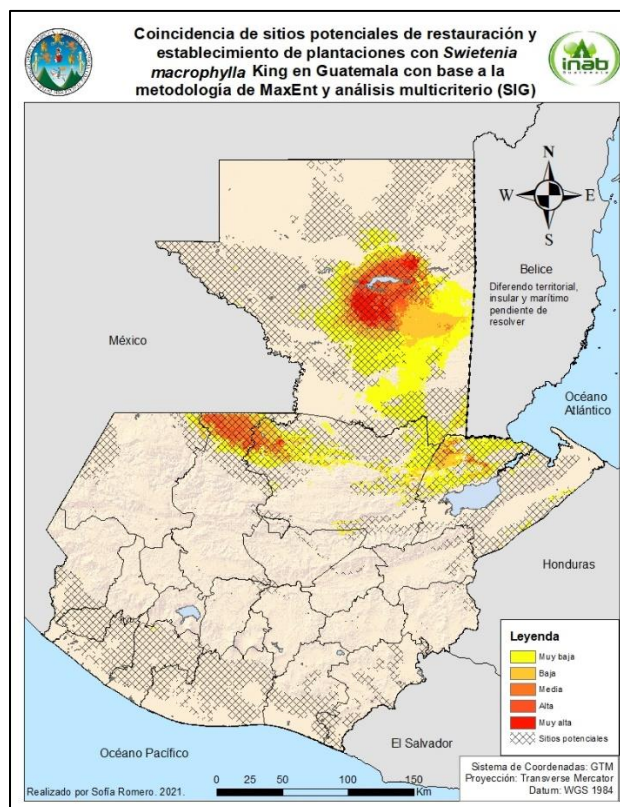


Figura 18: Mapa de coincidencia de sitios potenciales de restauración y establecimiento de plantaciones con *Swietenia macrophylla* King en Guatemala con base a la metodología de MaxEnt (algoritmo de máxima entropía) y metodología AMC

En la Tabla No. 11 se puede observar el área en hectáreas en el que se traslapan los sitios potenciales de restauración y establecimiento de plantaciones realizado con las diferentes metodologías utilizadas (AMC y MaxEnt). En la misma se observa, en base a las diferentes probabilidades cuántas hectáreas se traslapan entre sí: la probabilidad muy baja se traslapa 563,928.46 hectáreas, probabilidad baja se traslapa 189,677.56 hectáreas, probabilidad media se traslapa 144,684.06 hectáreas, probabilidad alta se traslapa 87,865.06 hectáreas, probabilidad muy alta se traslapa 53,917 hectáreas.

Tabla 11: Área en hectareas de traslape de los mapas realizados con las dos metodologías (SIG y MaxEnt), basados en la probabilidad de ocurrencia de *Swietenia macrophylla* King en Guatemala

Probabilidad de ocurrencia de <i>Swietenia macrophylla</i> King en Guatemala	Área en ha de traslape con base a los mapas realizados con las dos metodologías utilizadas (traslape de SIG y MaxEnt)
Muy baja	563,928.46
Baja	189,677.56
Media	144,684.06
Alta	87,865.06
Muy alta	53,917.71

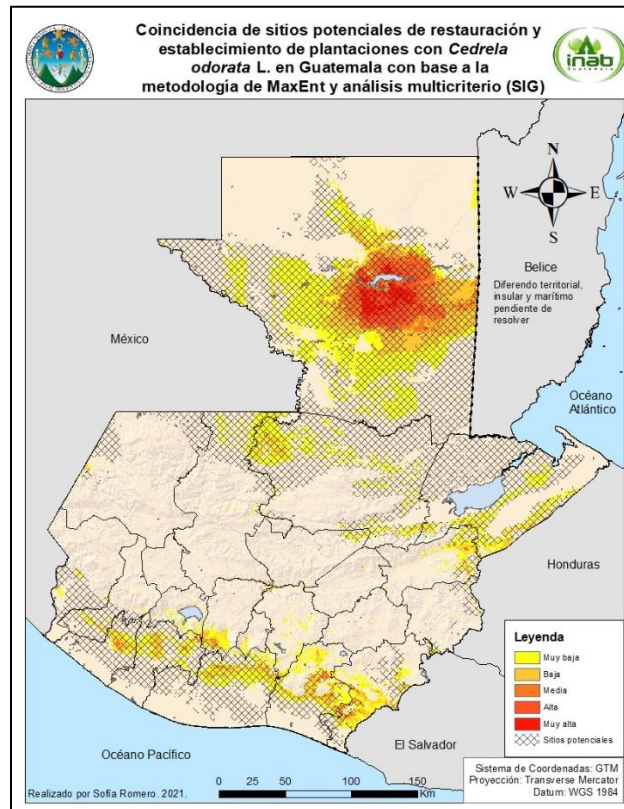


Figura 19: Mapa de coincidencia de sitios potenciales de restauración y establecimiento de plantaciones con *Cedrela odorata* L. en Guatemala con base a la metodología de MaxEnt (algoritmo de máxima entropía) y metodología AMC

En la Tabla No. 12 se puede observar el área en hectáreas en el que se traslapa los sitios potenciales de restauración y establecimiento de plantaciones realizado con las diferentes metodologías utilizadas (AMC y MaxEnt). En la misma se observa, en base a las diferentes probabilidades cuántas hectáreas se traslapan entre sí: la probabilidad muy baja se traslapa 923,428.88 hectáreas, probabilidad baja se traslapa 402,300.70 hectáreas, probabilidad media se traslapa 170,446.40 hectáreas, probabilidad alta se traslapa 101,111.43 hectáreas, probabilidad muy alta se traslapa 55,326.72 hectáreas.

Tabla 12: Área en hectareas de traslape de los mapas realizados con las dos metodologías (AMC y MaxEnt), basados en la probabilidad de ocurrencia de *Cedrela odorata* L. en Guatemala

Probabilidad de ocurrencia de <i>Cedrela odorata</i> L. en Guatemala	Área en ha de traslape con base a los mapas realizados con las dos metodologías utilizadas (traslape de SIG y MaxEnt)
Muy baja	923,428.88
Baja	402,300.70
Media	170,446.40
Alta	101,111.43
Muy alta	55,326.72

8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

8.1. Método de análisis multicriterio/Método I

Al utilizar Sistemas de Información Geográficos para conocer los sitios potenciales o distribución potencial para *Swietenia macrophylla* King (caoba) y *Cedrela odorata* L. (cedro) se utilizó como base una metodología que se basa en el flujograma (Anexo No. 2) que une en cada paso dos variables; lo cual tiene como ventajas simplificar situaciones complejas, avanzar paso a paso hacia la búsqueda de nuestro mapa final, lo cual permitió elegir las variables a nuestra conveniencia y unir las que se creyó más convenientes. Por otro lado, la desventaja de este método es que, al dirigir la búsqueda o el estudio hacia nuestro mapa final, podría generar algún sesgo o errores por subjetividad.

En el Mapa Final de sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con caoba (Figura No. 10) y con cedro (Figura No. 11), se requirió reconocer (como en los mapas anteriores), por medio de bibliografía, los requerimientos para la especie relacionados con factores biofísicos y climáticos mediante una técnica de análisis multicriterio; esta técnica utiliza únicamente datos de presencia de la especie y el error de omisión no se conoce en su totalidad (Leal-Nares, et al., 2012).

Es posible observar que desde los Mapa Síntesis 1 al Mapa Final de cada especie (Figura No. 2, 4, 6, 8) para caoba; Figura No. 3, 7, 9, 11 para cedro), varios puntos de registros de las especies, caen fuera de su distribución potencial (sitios potenciales) para la mismas. Esto puede deberse a múltiples razones, pero la principal en este caso podría ser que el tipo de suelo y el pH del suelo en el que se encuentran (los puntos de registro que se encuentran fuera de las áreas de sitios potenciales) es apto para el desarrollo de las mismas, por lo que al no tomar en cuenta estas variables en esta metodología, hay un sesgo para este método. Las variables anteriormente mencionadas no se utilizaron ya que las bases de datos de las mismas se encuentran incompletas y con datos de años muy antiguos.

Al generar los mapas se obtuvieron los sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con caoba y cedro en base a su aptitud o requerimiento climático, en parte edáfico y fisiográfico.

Los sitios potenciales reconocidos con el primer método para el desarrollo de *Swietenia macrophylla* King en Guatemala (Figura No. 10, Anexo No. 5 y Tabla No. 5) pueden deberse por que las áreas (de sitios potenciales) de estos departamentos comparten algunas de las variables climáticas (temperatura, precipitación), edáficas (tipo de drenaje del suelo y pendiente del suelo) y fisiográficas (altitud) entre sí. Se puede observar que los sitios no potenciales para el desarrollo de caoba son las tierras muy altas, como la franja volcánica y montañosa (Figura No. 10 y Anexo No. 4).

El porcentaje de sitios potenciales por departamento para caoba en base al área de sitios potenciales total del país (Tabla No. 5) puede deberse a la relación: área total departamental-área total de sitios potenciales departamental, también se debe a que los mismos llenan las condiciones de las variables utilizadas para que se desarrolle bien la especie.

Los sitios potenciales reconocidos con el primer método para el desarrollo de *Cedrela odorata* L. en Guatemala (Figura No. 11), al igual que en los mapas de caoba, pueden deberse por que las áreas (de sitios potenciales) de estos departamentos comparten algunas de las variables climáticas (temperatura, precipitación), edáficas (tipo de drenaje del suelo y pendiente del suelo) y fisiográficas (altitud) entre sí. Se puede observar también, que los sitios no potenciales para el desarrollo del cedro son las tierras altas y muy altas, como la franja volcánica y montañosa (Figura No. 11 y Anexo No. 4).

El porcentaje de sitios potenciales por departamento para cedro en base al área de sitios potenciales total del país (Tabla No. 6) puede deberse a la relación: área total departamental-área total de sitios potenciales departamental, y como se mencionó para caoba, también se debe a que los mismos llenan las condiciones de las variables utilizadas para que se desarrolle bien el cedro.

8.2. Método con -MaxEnt- (algoritmo de máxima entropía) /Método II

A diferencia del análisis multicriterio utilizado en el software SIG, MaxEnt analiza estadísticamente 19 variables bioclimáticas, más las variables que están relacionadas con el desarrollo de la especie, en este caso de caoba y cedro, junto a la base de datos de distribución natural de cada especie (registros/coordenadas), por lo que el programa tomó en cuenta los rangos de las variables bioclimáticas, edáficas y fisiográficas en donde se encuentra registrada la especie, obteniendo un conjunto de gráficas, tablas y mapas que nos proponen la distribución potencial de la especie a través de probabilidades de ocurrencia, en este caso, los sitios potenciales para restaurar y establecer plantaciones con cada especie. Esto es una de las ventajas que tiene MaxEnt por sobre el método I, ya que con este modelado nunca quedarán los registros de la especie fuera de las áreas de distribución potencial. El modelo, además, creó datos de prueba en base a los datos registrados de caoba y cedro (independientemente), por lo que generó una probabilidad más alta de que la especie se encuentre en las áreas de distribución potencial que se está modelando.

Los mapas de sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con caoba (Figura No. 16) realizado con el programa MaxEnt, a pesar de sus diferencias, concuerda bastante con la distribución natural planteada por INAB en el Paquete Tecnológico de la Caoba (INAB, 2019b); ya que en éste cita que la caoba crece naturalmente en las tierras bajas del norte y atlántico de Guatemala, dicha área abarca el territorio de Petén y algunas pequeñas áreas de la Franja Transversal del Norte, en los departamentos de Quiché, Alta Verapaz e Izabal (Navarro, 1999; Grogan et al., 2017; Bauer & Francis, 2000). Se puede observar en base a la Figura No. 16 y la Tabla No. 5, que se tiene una probabilidad muy alta (56,325.32 hectáreas) que la caoba tenga un buen desarrollo en el centro de Petén y el norte de Quiché. Con una probabilidad menor en el departamento de Izabal y Alta Verapaz. También se menciona en el Paquete Tecnológico (INAB, 2019b), que, en el área anteriormente descrita, predomina el bosque húmedo subtropical cálido al norte de El Petén, y bosque muy húmedo subtropical al sur de Petén, Alta Verapaz y Quiché, y bosque muy húmedo tropical en Izabal (Navarro, 1999; Grogan et al., 2017; Bauer & Francis, 2000), esto según la clasificación de zonas de vida de Holdridge (Anexo No. 2).

Con esta información se puede deducir, en base a los mapas generados con la metodología AMC, que *Swietenia macrophylla* King prefiere un bosque muy húmedo subtropical y bosque muy húmedo tropical; a diferencia del mapa generado con el programa MaxEnt, que se puede afirmar que la caoba prefiere el bosque húmedo subtropical cálido (con algunas excepciones, Figura No. 16), bosque muy húmedo subtropical y bosque muy húmedo tropical (INAB, 2019b; Anexo No. 2). También se pudo observar que la distribución potencial de caoba no concuerda con las tierras muy altas, como la franja volcánica y montañosa (Figura No. 16 y Anexo No. 4), por lo que se deduce que la caoba prefiere tierras bajas.

Al obtener el mejor modelo para caoba, al ejecutar el programa nos generó una tabla en donde se pudo observar de forma descendente, las variables que más influyen en el desarrollo de la especie (Tabla No. 8); con la precipitación del trimestre más seco (BIO17) podemos deducir que esta especie no soporta la sequía, la isothermalidad (BIO3) nos dice que es importante el estudio de la variabilidad de la temperatura (cociente entre la oscilación térmica diaria y la oscilación térmica anual multiplicado por cien), el rango diario medio (BIO2) nos dice que es importante el estudio de los cambios en el promedio del rango diario de la temperatura en el lugar que se encuentra la especie, y por último la estacionalidad de la temperatura (BIO4) nos dice que es importante conocer la variación periódica y predecible del mismo lugar con un periodo anterior.

En la Figura No. 18 se puede observar el Mapa de coincidencia de los sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con caoba en Guatemala con base a la metodología de MaxEnt (en colores) y metodología AMC. En este se puede observar que la mayoría de áreas que muestran sitios potenciales para caoba con el programa MaxEnt, se encuentran sombreado con líneas, o bien la metodología MaxEnt concuerda en gran parte con la metodología AMC; a diferencia que ésta última posee una mayor área de sitios potenciales. Por ejemplo, la metodología AMC posee más área de sitios potenciales en la región del Altiplano Central y el Pacífico; también tiene bastante área que no concuerda en la parte noreste del Petén. Con la Metodología MaxEnt se puede observar que no concuerda con la de AMC en la parte este y parte noreste Petén.

Podemos observar (Tabla No. 11) que se tiene un área de incidencia de probabilidad muy alta y alta de hectáreas de traslape al área total de probabilidad muy alta y alta (Tabla No.7) del mapa realizado con MaxEnt; y en menor cantidad al referirnos a las probabilidades medias, pero siempre compartiendo gran cantidad de hectáreas. Lo mismo se puede observar en el mapa, ya que la parte con mayor probabilidad de incidencia de la especie (MaxEnt) se encuentra casi todo sombreado por la metodología SIG. Por ello se puede deducir que podemos confiar en los mapas realizados con MaxEnt, ya que concuerdan en gran escala con el mapa de traslapes de las dos metodologías.

Los departamentos anteriormente descritos poseen una probabilidad muy alta de que se desarrolle bien el cedro, contando con 56,872.38 hectáreas para el mismo (Tabla No. 9). El cedro puede también formar colonias en la vegetación secundaria, pastizales abandonados, tierras agrícolas y lugares que han sido quemados (INAB, 2019). Según la Figura No. 17, podemos deducir también, que la distribución potencial de cedro no concuerda con las tierras muy altas, pero a diferencia de la caoba, el cedro si tiene probabilidad de distribución en las tierras medias (Anexo No. 4).

Al obtener el mejor modelo para cedro, al ejecutar el programa también nos generó una tabla en donde se pudo observar de forma descendente, las variables que más influyen en el desarrollo de la especie (Tabla No. 10): la isothermalidad (BIO3) nos dice que es importante el estudio de la

variabilidad de la temperatura del lugar donde se encuentre la especie (cociente entre la oscilación térmica diurna y la oscilación térmica anual multiplicado por cien), el rango diurno medio (BIO2) nos dice que es importante el estudio de los cambios en el promedio del rango diurno de la temperatura en el lugar que se encuentra el cedro, la precipitación media anual (BIO12) nos dice que es importante la cantidad de lluvia que cae en el lugar por año (como media), y altitud que es una variable biofísica bastante importante ya que la misma no cambia.

En la Figura No. 19 se puede observar el Mapa de coincidencia de los sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con cedro en Guatemala con base a la metodología de MaxEnt (en colores) y metodología del programa SIG (sombreado con rayas). En este se puede observar que la mayoría de área que muestra sitios potenciales para cedro con el programa MaxEnt, no se encuentra sombreado, pero la metodología MaxEnt concuerda en gran parte con la metodología de SIG. En el mapa se puede observar que hay una gran parte que no concuerda en el departamento de Petén, Izabal, Franja Transversal y Pacífico del país, en tierras medias; se podría deducir que se debe a los registros de cedro en ciertas altitudes del país, pero se tienen vacíos de información en cuanto al verdadero rango altitudinal para la especie. Podemos observar (Tabla No. 9) que se tiene un área de incidencia de probabilidad muy alta y alta hectáreas de traslape al área total de probabilidad muy alta y alta (Tabla No. 12) del mapa realizado con MaxEnt; y en menor cantidad al referirnos a las probabilidades medias, pero siempre compartiendo gran cantidad de hectáreas al igual que con caoba. Por ello, también se deduce que se puede confiar en los mapas realizados con MaxEnt, ya que concuerdan en gran escala con el mapa de traslapes de las dos metodologías.

8.3. Comparación método I y II

Los mapas de distribución potencial elaborados a partir de la aplicación de técnicas de análisis espacial implementadas en un AMC (Figura No. 6 a 11) y el modelado de distribución potencial a partir un algoritmo de máxima entropía (Figura No. 12 a 19), han demostrado que son bastante confiables, ya que proporcionan una aproximación razonable al hábitat o nicho de las especies (Chefaoui et al., 2005). Aunque se debe tomar muy en cuenta que las áreas en las que se predice la presencia de la especie en los modelos de distribución potencial (método I y II) son típicamente mayores que sus distribuciones reales, debido a diversos factores que impiden su dispersión, como lo son las barreras geográficas, las interacciones bióticas y las modificaciones humanas al ambiente, por lo que pocas especies ocupan todas las áreas que satisfacen los requerimientos de su nicho (Leal-Nares, et al., 2012), en este caso el de caoba y el cedro.

Al superponer o hacer coincidir el Mapa final de sitios potenciales realizado con la metodología I (AMC) de caoba y cedro (independiente uno con el otro) con el Mapa de sitios potenciales realizado con la metodología II (MaxEnt) de caoba y cedro (independiente también), se obtuvo un último mapa para cada especie (Figura No. 18 para caoba y 19 para cedro), en el cual podemos observar en conjunto los mapas realizados con los dos métodos. En éstos se puede apreciar que la mayoría de las áreas de cada metodología se traslapan. Se puede reconocer también, que las áreas rojas (mayor probabilidad de distribución) al traslaparse con la distribución potencial de caoba (método

AMC), nos dirigen a las áreas que tendrían una probabilidad mayor de sitios potenciales para cada especie.

Al querer conocer los sitios potenciales o distribución potencial de cualquier especie, se debe plantear qué tipo de información respecto a la distribución potencial se desea saber para concretar una metodología específica. Por ejemplo, si se desea conocer la distribución potencial de la especie, pero no se tienen los registros de la especie, se recomienda utilizar el método de análisis multicriterio (ayudado con un SIG) o; si se desea conocer el área en hectáreas de la distribución potencial de la especie, o conocer el área de distribución potencial de un lugar específico (aldea, municipio, departamento, etc.), se recomienda utilizar el análisis AMC (ayudado con un programa SIG), pero también se puede realizar la metodología en MaxEnt y calcular el área en un programa SIG. En lo anteriormente descrito se pueden observar las ventajas que se tienen al utilizar un método AMC con un programa SIG para conocer la distribución potencial de una especie, pero la ventaja de MaxEnt tiene más peso, ya que todos los modelos generados en el programa utilizan funciones matemáticas y estadística computacionales aplicadas, lo cual genera información más cercana a la realidad.

Al finalizar los mapas y analizarlos, se pudo deducir que es necesario utilizar los dos programas para conocer los sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones para cualquier especie, ya que cada metodología y programa posee diferentes opciones con base a cada una de nuestras necesidades. Las metodologías se complementan, pero el programa que tiene una mayor precisión es MaxEnt, ya que utiliza un conjunto de modelos, métodos, fundamentos, teoremas y funciones matemáticas/estadísticas que se relacionan estrechamente con la ecología de las especies (Rivadeneira, 2017).

Cabe mencionar que la distribución potencial para el desarrollo de caoba y cedro se basó en las regiones climáticas que estableció el INSIVUMEH: Región Pacífico, Región Bocacosta, Región Occidente, Región Altiplano Central, Región Valles de Oriente, Región Franja Transversal del Norte, Región Caribe, y Región Petén (INSIVUMEH, 2018).

9. CONCLUSIONES

Los sitios potenciales con alta probabilidad, para restauración y establecimiento de plantaciones en base a las dos metodologías para el desarrollo de *Swietenia macrophylla* King. en Guatemala son Petén, Quiché e Izabal, con 53,917.71 hectáreas disponibles para la especie. Para *Cedrela odorata* L. son Petén, Izabal, Alta Verapaz, Santa Rosa, Escuintla, Suchitepéquez, Retalhuleu, Chimaltenango, Jutiapa, contando con 55,326.72 hectáreas para la especie.

Se deben utilizar los dos programas para conocer la distribución potencial de una especie. El programa SIG (con la metodología AMC) nos ayuda a preparar las capas y analizar las mismas, calcular áreas, etc. (lo cual para MaxEnt es imposible de realizar), con este programa se realizó un análisis multicriterio (AMC), que, en este caso, nos permitió analizar analíticamente diversas soluciones ante nuestro problema, en el cual se utilizaron nuestras variables como datos de partida y por último se obtuvieron los mapas correspondientes. La metodología II realizó mapas más precisos y concretos, ya que utiliza un conjunto modelos, métodos, fundamentos, teoremas y funciones matemáticas/estadísticas que se relacionan estrechamente con la ecología de las especies.

La metodología más acertada para realizar mapas de distribución potencial (sitios potenciales) para cualquier especie es la metodología II utilizando MaxEnt (algoritmo de máxima entropía) ya que concuerdan en gran escala con el mapa de traslapes de las dos metodologías a diferencia de la metodología I -AMC- utilizando un SIG.

10. RECOMENDACIONES

Otras de las variables importantes para el desarrollo óptimo de la caoba y el cedro son: el tipo de suelo o textura de suelo y el pH de este, por lo que se recomienda, si es posible, utilizar estas variables para una investigación próxima.

Se recomienda realizar más colectas o hacer registros de la especie en otros lugares con el mismo esfuerzo de muestreo en todos, ya que la falta de colecta, datos o información puede causar sesgos en los modelos realizados con el programa MaxEnt.

Se debe tomar en cuenta que es importante tener los datos actualizados (coordenadas, variables, capas, etc.) para trabajar con la información más reciente; esto debido a que, si los datos son de años antiguos, éstos causarán un sesgo en la investigación y por ello no se estaría creando información (resultados) certera.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

11.1. Libros:

Hall, J.B. (1994). Mapping for monographs: baselines for resource development. Londres: Chapman & Hall.

Holdridge, L.R. (2000). Ecología basada en zonas de vida (Quinta reimpresión). San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.

Lozano, A.V., Trepát, C.M., & Alonso, E.S. (1998). Guatemala. Barcelona: Laertes. Pp. N.A.

Melgar, W. (2003). Estado de la diversidad biológica de los árboles de Guatemala. Departamento de Montes de la FAO, Roma. Italia. 63 p.

Morrone, J.J. (2000). La importancia de los atlas biogeográficos para la conservación de la biodiversidad. Zaragoza: Monografías Tercer Milenio.

Standley, P.C., Steyermark, J.A. (1946). Flora of Guatemala. Vol.24part V. Chicago Natural History Museum, 502 p.

11.2. Revistas Científicas:

Aceves, R., Méndez, G., García, A. & Nájera, L. (2018). Distribución potencial de 20 especies de pinos en México. *Agrociencia* 52: 1043-1057.

Fischer, J., Lindenmayer, D., Nix, H., Stenin, J. L., & Stein, J. A. (2001). Climate and animal distribution: a climatic analysis of the Australian marsupial *Trichosurus caninus*. *Journal of Biogeography*, 28: 293-304.

García, A., Méndez, G., Hernández, A. (2017). Distribución potencial de *Pinus cembroides*, *Pinus nelsonii* y *Pinus culminicola* en el Noreste de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 5(13): 3-13.

Garza, L., Ortega, R., Zamudio, S., López, T., Domínguez, A., Sáenz, R. (2016). Calakmul como refugio de *Swietenia macrophylla* King ante el cambio climático. *Botanical Sciences*, 94 (1): 43-50, 2016, Pp. 43-50.

Guisan, A., & Thuiller, W. (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8, 993-1009.

Meentemeyer, R., Anacker, B., Mark, W., & Rizzo, D. (2008). Early detection of emerging forest disease using dispersal estimation and ecological niche modeling. *Ecological Applications* 2: 377-390.

Phillips, S.J., Anderson, R.P., Schapire, R.E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modeling* 190:231-259.

Phillips, S., Anderson, R., Dudík, M., Schapire, R., & Blair, M. (2017). Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography*, 40, 887-893.

Phillips, S., y Dudík, M. (2004). A maximum entropy approach to species distribution modeling. *Twenty-first International Conference on Machine Learning*. Canadá. Pp. 655-662.

Plasencia, V., Escalona, S., & Esparza, O. (2014). Modelación de la distribución geográfica potencial de dos especies de psitácidos neotropicales utilizando variables climáticas y topográficas. *México: Acta Zoológica Mexicana*, 30(3): 471-490.

Ramírez, G., Vera, C., Carrillo, A., & Magaña, T. (2008). El cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) como alternativa de reconversión en terrenos abandonados por la agricultura comercial en el sur de Tamaulipas. *Agricultura Técnica en México*. Vol. 34 Núm. 2: 243-250.

Rehfeldt, G.E., Jaquish, B.C., López-Upton, J., Sáenz-Romero, C., St Clair, J.B., Leites, L.P., & Joyce, D.G. (2014). Comparative genetic responses to climate for the varieties of *Pinus ponderosa* and *Pseudotsuga menziesii*: Realized climate niches. *Forest Ecology and Management*, 324: 126-137.

Rozen, T. (1998). A case study of need: The struggle to protect bigleaf mahogany. *Natural Resources Journal* 38 (fall): 603-633.

Salinas, M., Ager, A., Vargas, C., Hayes, J., Zuñiga, G. (2010). Determining the vulnerability of Mexican pine forests to bark beetles of the genus *Dendroctonus Erichson* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). *Forest Ecology and Management*. 260: 52-61.

Shaily, M., Baharul, I., Choudhury, M., Latif, K., & Townsend, P. (2010). Ecological niche modeling and local knowledge predict new populations of *Gymnocladus assamicus* a critically endangered tree species. *Endangered Species Research*. 11: 175-181.

Torres, R., & Jayat, P. (2010). Modelos predictivos de distribución para cuatro especies de mamíferos (*Cingulata*, *Artiodactyla* y *Rodentia*) típicas del chaco en Argentina. *Mastozoología Neotropical*, 17(2):335-352.

11.3. Documentos Técnicos:

Cifuentes, J.B. (2010). Evaluación y Monitoreo de Plantaciones Forestales en Guatemala. Proyecto FODECYT No. 078-2007. Guatemala. 135 p.

CONAP. (2006). Lista de Especies Amenazadas de Guatemala –LEAs- y Listado de Especies de Flora y Fauna Silvestre –CITES- de Guatemala: Departamento de Vida Silvestre. Guatemala: CONAP. PP. 58.

CONAP. (2009). IV Informe Nacional de cumplimiento a los acuerdos del convenio de “Diversidad Biológica ante la Conferencia de la Partes –CBD- “. Consejo Nacional de Áreas Protegidas. Guatemala. 135p.

CONAP-INAB. (2012). Mapa de Cobertura Forestal por Tipo y Subtipo de Bosque para la República de Guatemala, 2012. Guatemala. Informe Técnico. 26 p.p.

DIF-INAB. (2012). Mapa de distribución de especies forestales. Guatemala. 7 p.

Gámez, P. (2011). Guía para la elaboración de mapas de distribución potencial. México: Universidad Veracruzana. P.p. 39.

INAB. (2000). Plan Estratégico 1998-2015. INAB. Guatemala. P. 24-39.

INAB. (2014). Dinámica de Crecimiento y Productividad de 28 especies forestales en plantaciones en Guatemala. Guatemala. 212 p.

INAB. (2015). Decreto Número 2-2015. Ley de Fomento al Establecimiento, Recuperación, Restauración, Manejo, Producción y Protección de Bosques en Guatemala. INAB. Guatemala. 23p.

INAB. (2016). Análisis de la situación actual y tendencias del sector forestal. Dirección de Planificación, Monitoreo y Evaluación INAB. Guatemala. 55p.

INAB. (2017). Plan Estratégico Institucional 2017-2032. INAB. Guatemala. 40p.

INAB. (2019). Paquete Tecnológico Forestal para Cedro *Cedrela odorata* L. Guatemala, Departamento de Investigación Forestal. 84 p. (Serie técnica DT-29-2019)

INAB. (2019b). Paquete Tecnológico Forestal para Caoba del Petén *Swietenia macrophylla* King versión 1.0. Guatemala, Departamento de Investigación Forestal. 80 p. (Serie técnica DT-26-2019).

Margules, C., & Sarkar, S. (2009). Planeación sistemática de la conservación. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México D.F. 304 p.

OFI-CATIE. (2014). Descripciones de especies: *Swietenia macrophylla*. Árboles de Centroamérica. Pp. 901-906.

Robbins, C.S. (2000). Mahogany Matters: *The U.S Market for Big-Leafed Mahogany And Its Implications For The Conservation Of the Species*. TRAFFIC North America. Washington D.C, USA.

Salazar, M.R. (2007). Propuesta de procedimientos para el establecimiento y seguimiento de parcelas permanentes de medición forestal en plantaciones beneficiarias del PINFOR. Unidad de Fomento y Desarrollo Forestal, INAB. Guatemala. 34p.

11.4. Tesis:

Albizu, P. (2009). Modelo de manejo para plantaciones forestales con especies de alto valor económico en El Petén, Guatemala (tesis de grado). Zamorano: Honduras.

Arreaza, R. (2007). Generación de un paquete tecnológico para el manejo forestal sostenible en plantaciones y bosque natural de caoba (*Swietenia macrophylla* King) en Guatemala (tesis de grado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. 128 p.

Fajardo, P. (2011). Identificación y determinación de 15 especies maderables para su producción en pilones de Antigua S.A. (Finca Tierra Maya) (tesis de grado). Universidad de San Carlos de Guatemala: Guatemala. 97p.

Prado, M. (2006). Caracterización de plantaciones de caoba (*Swietenia macrophylla* G. King) y cedro (*Cedrela odorata* Chan & Schlecht) del programa de incentivos forestales en los departamentos de Alta Verapaz, Izabal y El Petén (tesis de grado). Universidad Rafael Landívar: Guatemala. 83p.

Pereyra, E. (2011). Potencialidad de *Cedrela odorata* L. para estudios dendroclimáticos y dendroecológicos en la selva central del Perú (tesis de grado). Universidad Nacional del Centro del Perú: Perú. 67p.

Reguerin, L. (2012). Distribución potencial de especies de la familia araliaceae de la región Madidi (tesis de grado). Universidad de San Andrés, La Paz, Bolivia.

Rivadeneira, M.Y. (2017). Enfoque de máxima entropía para la modelación de la distribución del Paludismo en Ecuador (tesis de grado). Universidad Central del Ecuador: Ecuador 65 p.

Rueda, S. (1998). Áreas potenciales para plantaciones forestales de 11 especies de pino en Jalisco (tesis de Maestría). Universidad de Guadalajara, Jal: México 109 p.

11.5. Artículos Científicos:

Figueroa, J.C. (1994). *An assessment of the distribution and status of big-leafed mahogany (Swietenia macrophylla King)*. Puerto Rico Conservation Foundation and USDA Forest Service, International Institute of Tropical Forestry, Rio Piedras, Puerto Rico.

Pliscoff, P., & Fuentes-Castillo, T. (2011). Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. Universidad de Lausanne y Universidad de Chile: Suiza & Chile.

Vester, F.M. & Navarro-Martínez, M.A. (2007). Árboles Maderables de Quintana Roo. Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica: Quintana Roo.

11.6. Entrevistas:

Cutzal, J. (2020). Entrevista realizada personalmente. (26 de enero de 2020). INAB. Guatemala.

Prado, R. (2019). Entrevista realizada por medio de correo electrónico. (27 de marzo de 2019). INAB. Guatemala.

11.7. Páginas Web:

Bembibre, C. (2009). Definición de materiales. Revisado el 26 de enero de 2020 en: <https://www.definicionabc.com/general/materiales.php>

Bonet, G.F. (2007). Modelos algorítmicos: Taller sobre modelización de nichos ecológicos de GIF. Revisado el 03 de marzo de 2019 en: <http://www.gbif.es/formaciondetalles.php?IDForm=22#ad-image-0>.

CONABIO. (2019). Taxonomía de *Swietenia macrophylla*. Revisado el 04 de marzo de 2019 en: <https://www.naturalista.mx/taxa/169442-Swietenia-macrophylla>

CONABIO. (2019b). Taxonomía de *Cedrela odorata*. Revisado el 10 de noviembre de 2019 en: <https://www.naturalista.mx/taxa/62833-Cedrela-odorata>

CONABIO. (2019c). Ficha técnica de *Swietenia macrophylla* King. Revisado el 12 de noviembre de 2019 en: http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/37-melia5m.pdf

CONABIO. (2019d). Ficha técnica de *Cedrela odorata* L. Revisado el 12 de noviembre de 2019 en: http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/36-melia2m.pdf

FAO. (2015). Recursos Forestales. Revisado el 13 de febrero de 2019 en: <http://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/285875/>

FAO. (2018). Incentivos forestales. Revisado el 02 de abril de 2019 en: <http://www.fao.org/partnerships/forest-farm-facility/43818-0b956f693db9f38841a46a2e4887a29f8.pdf>

INAB. (2018). Acerca del INAB. Revisado el 08 de febrero de 2019 en: <http://www.inab.gob.gt>

Juárez, M. (2017). Biodiversidad Mexicana, Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad: distribución de las especies. Revisado el 5 de marzo de 2017 en: <http://www.biodiversidad.gob.mx/especies/distribesp.html>

Navarro, J. (2016). Definición de instrumento e instrumentos. Revisado el 25 de enero de 2019 en: <https://www.definicionabc.com/audio/instrumento.php>

ONU. (2019). Acerca de Guatemala. Revisado el 24 de marzo de 2019 en: <https://onu.org.gt/acerca-de-guatemala/>

PNUD. (2019). Guatemala en breve. Revisado el 24 de marzo de 2019 en: <http://www.gt.undp.org/content/guatemala/es/home/countryinfo.html>

SIFGUA. (2019). Territorio con vocación forestal. Revisado el 03 de marzo de 2019 en: <http://www.sifgua.org.gt/SectorForestal.aspx>

Tropicos. (2019). Synonyms of *Swietenia macrophylla* King. Revisado el 11 de noviembre de 2019 en: <https://www.tropicos.org/Name/20400346?tab=synonyms>

Tropicos. (2019b). Synonyms of *Cedrela odorata* L. Revisado el 11 de noviembre de 2019 en: <https://www.tropicos.org/Name/20400353?tab=synonyms>

WorldClim Team (2016). WorldClim 2.0 Global Climate Data. Revisado el 02 de marzo de 2019 en: <http://worldclim.org/version2>

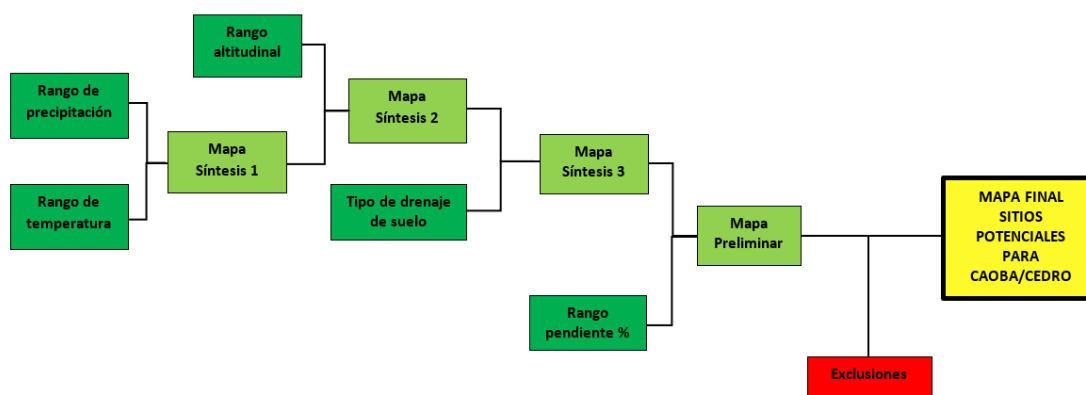
12. ANEXOS

Anexo No. 1: Especies forestales evaluadas por el INAB en plantaciones.

No.	Nombre técnico	Nombre común	Código de especie	Parcelas
1	<i>Abies guatemalensis</i> Rehder	Pinabete, pashaque	ABIEGU	3
2	<i>Acrocarpus fraxinifolius</i> Wight & Arn	Cedro rosado o mundani	ACROFR	44
3	<i>Alnus jorulensis</i> Kunth.	Aliso, ilamo	ALNUJO	1
4	<i>Azadirachta indica</i> A. Juss	Nim, nem	AZADIN	4
5	<i>Caesalpinia velutina</i> (Britton & Rose) Stanley	Aripin, malinche	CAESVE	3
6	<i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess	Santa maría, marillo, marío	CALOBR	1
7	<i>Cassia siamea</i> Lam	Casuarina	CASSI	1
8	<i>Casuarina equisetifolia</i> L.	Cassia de flor amarilla	CASUEQ	6
9	<i>Cedrela odorata</i> L.	Cedro	CEDROD	2
10	<i>Cupressus lusitánica</i> Mill	Ciprés común	CUPRLU	74
11	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	Conacaste, guanacaste	ENTECY	2
12	<i>Gmelina arborea</i> Roxb. Ex Sm.	Melina	GMELAR	17
13	<i>Grevillea robusta</i> A. Cunningham ex R. Br.	Gravilea	GRAVRO	1
14	<i>Guazuma umifolia</i>	Caulote	GUAZUL	1
15	<i>Nectandra especie</i>	Aguacatillo	NECTSP	3
16	<i>Pinus ayacahuite</i> C. Ehrenb. Ex Schltdl.	Pino blanco, pino tabla	PINUAY	2
17	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	Pino caribe, pino de Petén	PINUCH	101
18	<i>Pinus maximinoi</i> H. E. Moore	Pino candelillo	PINUMI	65
19	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede	Pino ocote, pino colorado	PINUOO	121
20	<i>Pinus pátula</i>	Pino patula o candelabro	PINUPA	1
21	<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	Pino triste	PINUPS	14
22	<i>Pinus rudis</i>	Pino de las cumbres	PINURU	2
23	<i>Pinus tecunumanii</i> Eguluz & J.P. Perry	Pino de la sierra	PINUTE	2
24	<i>Pterocarpus macrocarpus</i>	Palo de sangre	PTERMA	7
25	<i>Sickingia Salvadorensis</i>	Puntero	SICKSA	1
26	<i>Swietenia macrophylla</i> King.	Caoba	SWIEMA	6
27	<i>Tabebuia donnell-smithii</i> Rose	Palo blanco	TABEDO	58
28	<i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) A. DC.	Matiliguat	TABERO	16
29	<i>Tectona grandis</i> L. f.	Teca	TECTGR	105
30	<i>Terminalia oblonga</i> (Ruiz & Pav.) Steud.	Volador, guayabón	TERMOB	1
31	<i>Vochysia guatemalensis</i> Donn. Sm.	San juan	VOCHGU	1
TOTAL				666

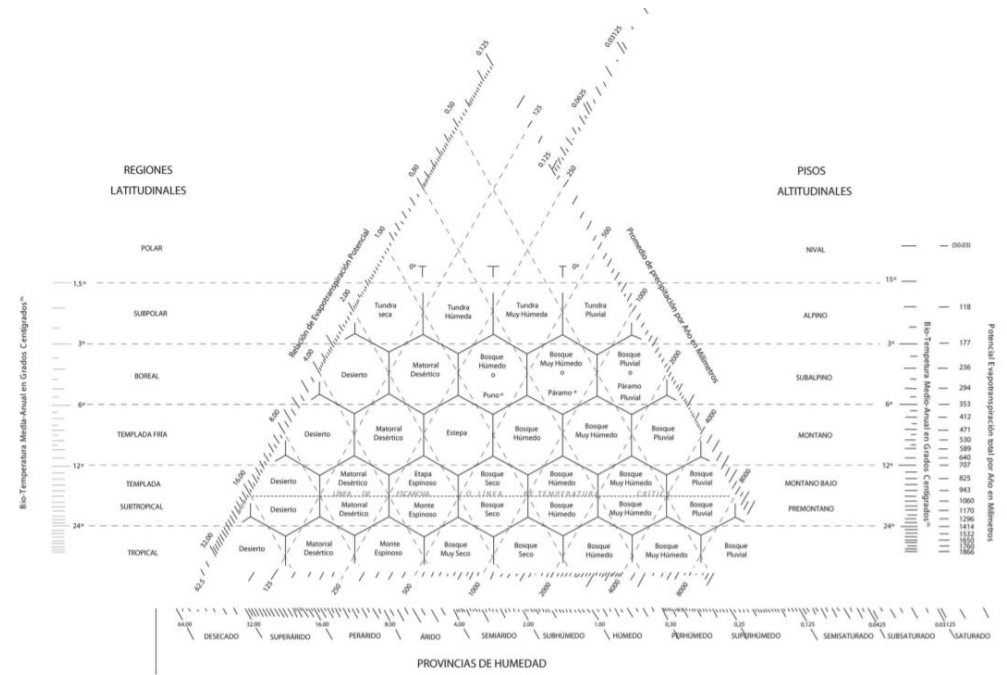
(Fuente: Sección de seguimiento y evaluación de plantaciones forestales, INAB.)

Anexo No. 2: Diagrama de Flujo para identificar áreas aptas para la distribución de *Swietenia macrophylla* King y *Cedrela odorata* L. (metodología SIG).



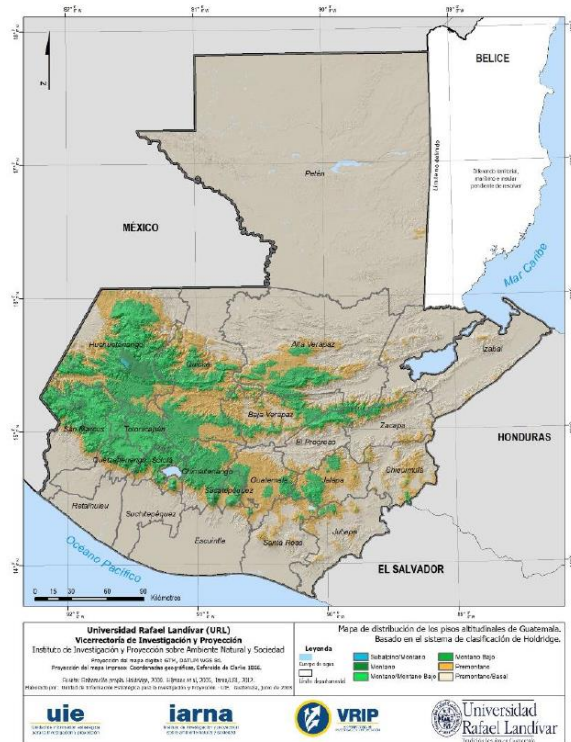
(Fuente: Elaboración propia con ayuda de la metodología del “flujograma para identificar áreas aptas en cultivos promisorios a nivel nacional”, realizada por DIGEGR-MAGA-)

Anexo No. 3: Clasificación de zonas de vida de Holdridge



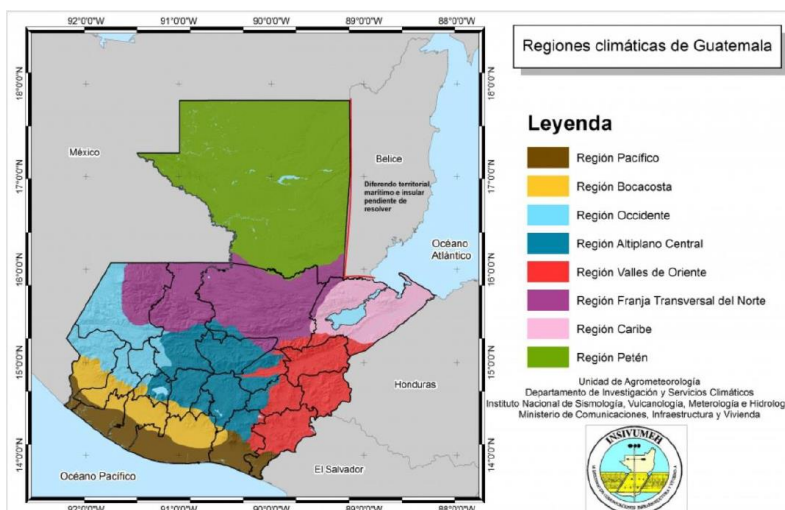
(Fuente: Holdridge, 2000)

Anexo No. 4: Mapa altitudinal de Guatemala, basado en el sistema de clasificación de Holdridge.



(Fuente: Instituto de Investigación y Proyección sobre ambiente Natural y Sociedad, URL)

Anexo No. 5: Mapa de las regiones climáticas de Guatemala realizado por el INSIVUMEH.



(Fuente: Unidad de Agrometeorología, DISC; INSIVUMEH)

Anexo No. 6: Tabla de áreas de sitios potenciales para caoba en Guatemala, medido en hectáreas para cada mapa realizado.

Área potencial donde crece la caoba (ha)	
Mapa Síntesis 1	6,768,032.96
Mapa Síntesis 2	6,734,278.81
Mapa Síntesis 3	4,793,152.71
Mapa Síntesis 4	8,607,210.40
Mapa Preliminar	4,248,436.30
Mapa Final	4,248,007.56

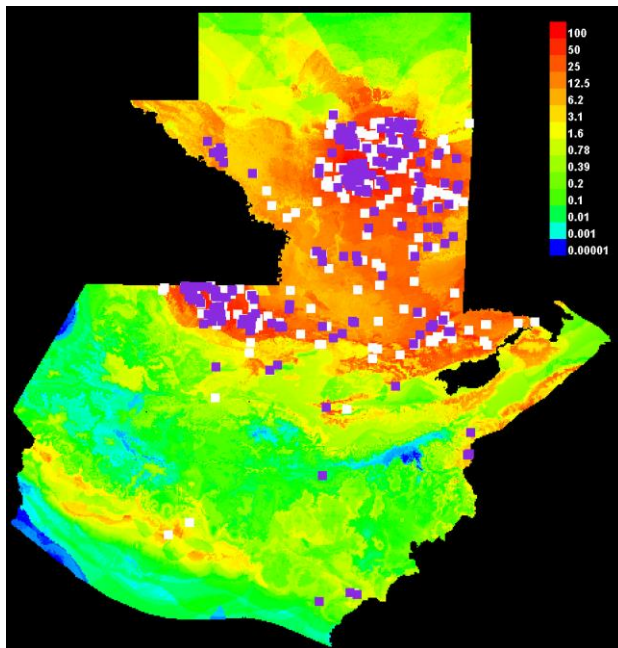
(Fuente: Elaboración propia, 2020)

Anexo No. 7: Tabla de áreas de sitios potenciales para caoba en Guatemala, medido en hectáreas para cada mapa realizado.

Área potencial donde crece el cedro (ha)	
Mapa Síntesis 1	6,353,134.88
Mapa Síntesis 2	6,224,253.31
Mapa Síntesis 3	4,748,863.95
Mapa Síntesis 4	5,396,791.46
Mapa Preliminar	2,016,441.94
Mapa Preliminar 2	4,543,297.79
Mapa Final	4,538,103.73

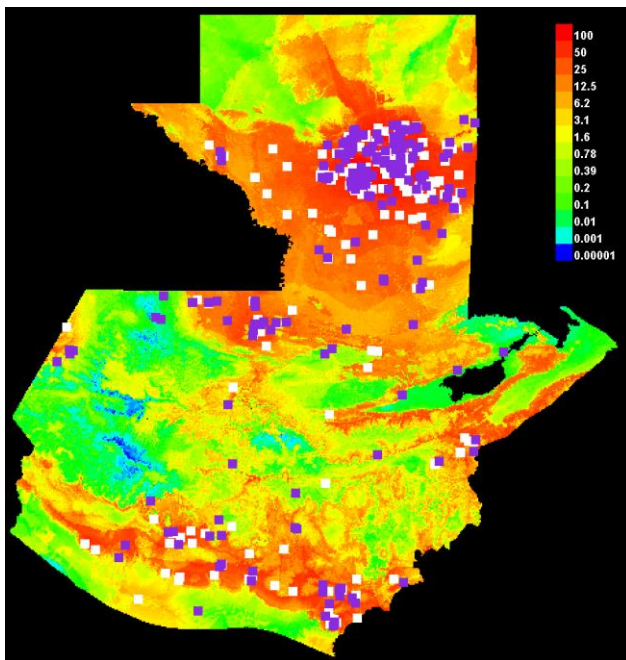
(Fuente: Elaboración propia, 2020)

Anexo No. 8: Imagen generada en MaxEnt, que muestra un mapa de sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con caoba en Guatemala.



(Fuente: Elaboración propia, 2020)

Anexo No. 9: Imagen generada en MaxEnt, que muestra un mapa de sitios potenciales para restauración y establecimiento de plantaciones con cedro en Guatemala.



(Fuente: Elaboración propia, 2020)

Sofía María Romero Fernández

Autora

M.Sc. Sara Michelle Catalán Armas

Asesora y revisora

Ph.D. Sergio Alejandro Melgar Valladares

Director

Escuela de Biología



M.A. Pablo Ernesto Oliva Soto

Decano

Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia