

Distribución potencial de *Cedrela odorata* y análisis de costos de conservar semillas de poblaciones vulnerables al cambio climático en México

Potential distribution of *Cedrela odorata* and cost analysis of seed conservation of populations vulnerable to climate change in Mexico

Joel Rodríguez-Zúñiga ^{a,c} , Salvador Sampayo-Maldonado ^b ,
Horacio Bautista-Santos ^{a,c*} , Fabiola Sánchez-Galván ^c 

* Autor de correspondencia: ^a Instituto Tecnológico Superior de Chicontepec (ITSCHI), Ingeniería en Desarrollo Comunitario, Veracruz, México, tel.: 7891042902, horacio.bautista@itsta.edu.mx

^b Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Unidad de Biología Tecnología y Prototipos (UBIPRO), Estado de Mexico, Mexico.

^c Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca (ITSTA), Posgrado en Ingeniería Industrial, Veracruz, Mexico.

SUMMARY

Climate change (CC) affects many forest species that have social and environmental benefits; therefore, it is necessary to implement conservation measures. The potential distribution of *Cedrela odorata* was evaluated under climate change scenarios, and the costs of seed conservation for vulnerable populations (PV) in a seed bank (BS) were analyzed. The potential distribution of *C. odorata* was modeled according to the GISS-E2-1-G model (from NASA's Goddard Institute for Space Studies (GISS)), from phase 6 of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) coupled model intercomparison project. Using the collection cost method, the costs of collecting and storing PV seeds were estimated under CC scenarios. The current value of a stored accession is 15 times greater (USD 767.61) than the market price (USD 51.0). Considering a nominal interest rate of 8.24 % for the year 2050, the cost of an accession will be almost 8.5 times more (USD 6,510.61) than its present value or almost 130 times more than its current market price. The conservation of seeds from vulnerable populations in a BS guarantees their conservation; therefore, the maintenance and operation costs of the BS will always be lower than the benefits that can be obtained. This work is important for the conservation of germplasm from vulnerable populations in a BS and represents a strategic investment owing to the economic value and environmental importance of the species.

Keywords: seed bank, georeferenced data, distribution models, ecological.

RESUMEN

El Cambio climático (CC) afectará a muchas especies forestales que tienen beneficio social y ambiental, por lo que es necesario tomar medidas de conservación. Se evaluó la distribución potencial de *Cedrela odorata* ante escenarios de Cambio Climático y se analizaron los costos de conservar semillas de poblaciones vulnerables (PV) en un banco de semillas (BS). Se modeló la distribución potencial del *C. odorata* de acuerdo con el modelo GISS-E2-1-G (del Instituto Goddard de Estudios Espaciales (GISS) de la NASA), de la fase 6 del proyecto de intercomparación de modelos acoplados del Panel Intergubernamental (IPCC). Mediante el método de costo de recolección se estimaron los costos de colecta y almacenamiento de semillas de PV ante escenarios al CC. El valor actual de una accesión almacenada en un BS es 15 veces más (USD 767,61) que su precio en el mercado (USD 51,0). Considerando una tasa de interés nominal de 8,24 % para el año 2050, el costo de una accesión será casi 8,5 veces más (USD 6.510,61) a su valor presente o casi 130 veces más que su precio de mercado actual. La conservación de semillas de PV en un BS garantiza su conservación, por lo que los costos de mantenimiento y operación de los BS siempre serán menores a los beneficios que se pueden obtener. Este trabajo es importante para la conservación del germoplasma de poblaciones vulnerables en un BS y representan una inversión estratégica debido al valor económico e importancia ambiental de las especies.

Palabras clave: banco de semillas, datos georreferenciados, modelado, nicho ecológico.

INTRODUCCIÓN

La especie *Cedrela odorata* L. (cedro rojo) es un árbol de la familia Meliaceae nativo de América, se distribuye desde el norte de México a la Argentina, se puede encontrar hasta los 1.200 m s.n.m. Se desarrolla en los trópicos húmedos y subhúmedos, además crece en asociación con bosques tropicales caducifolios, subcaducifolios y con bosques nubosos tropicales montanos (Sampayo-Maldonado *et al.* 2023). En México se distribuye a lo largo del Golfo, desde el sur de Tamaulipas y el sureste de San Luis Potosí hasta la Península de Yucatán, y en el Oeste del país, desde el sur de Sonora hasta el sur de Guerrero, en la Depresión Central y la costa de Chiapas. Se encuentra en climas cálidos y semicálidos, con suelos fértiles y con buen drenaje (Hernández-Ramos *et al.* 2018).

Además de su importancia ambiental (pionera en la asociación con otras especies y en la captura de carbono, entre otros), *C. odorata* tiene una amplia gama de usos en la construcción, carpintería y ebanistería fina. Es una especie muy valiosa con alta demanda en el mercado internacional y de gran importancia en la industria forestal mexicana (Romo-Lozano *et al.* 2017). Sin embargo, la extracción intensiva de su madera y el cambio del uso del suelo ha disminuido sus poblaciones y áreas de distribución (Sampayo-Maldonado *et al.* 2023). Es una especie amenazada sujeta a protección especial bajo la Norma Oficial Mexicana 059 (NOM-059) (SEMARNAT 2010) y es vulnerable al cambio climático (CC), que ya está impactando en su fenología y nicho ambiental. Como una estrategia para su conservación, se recomienda la colecta y almacenamiento de semillas de poblaciones potencialmente afectadas por el CC (Rodríguez-Zuñiga *et al.* 2022a, Sampayo-Maldonado *et al.* 2023).

C. odorata es la especie con más demanda en la industria forestal de México y tiene gran presencia en el mercado internacional de maderas preciosas. Se prevé que la escasez de la especie tenga un impacto negativo en la industria de la madera y celulosa, así como en la empresa forestal comunitaria (EFC), lo que repercutirá en la sociedad en general (Romo-Lozano *et al.* 2017). La escasez de la especie dependerá, entre otras cosas, de la tasa de consumo o degradación actual y futura, también conocida como oferta-demanda; que ocurre cuando la demanda futura supera la oferta prevista (Parmesan 2006).

Los bancos de semillas (BS) permiten una prolongada preservación de semillas en espacios pequeños y con riesgo mínimo de daño genético, por lo que se convierten en sitios estratégicos que requieren una inversión a mediano y largo plazo (De-Zhu Li y Hug 2009). Los modelos de valoración económica en germoplasma mencionan que el costo anual de operación de un BS es considerablemente menor que las ganancias que podrían obtenerse por el uso de genotipos de mayor rendimiento o con características superiores (Mora *et al.* 1999, De-Zhu Li y Hug 2009). Además, de ser fuente de recursos genéticos útiles para ambientes futuros (Romo-Lozano *et al.* 2017).

El método adecuado para el análisis de costos por coleccionar semillas de especies forestales ante escenarios adversos es el costo de recolección (Ibarrarán *et al.* 2003, Rodríguez-Zuñiga *et al.* 2022b). Debido a la importancia de *C. odorata* en el mercado de maderas preciosas, importancia ambiental (*e.g.* captura de carbón) y escasez ante escenarios de CC; es importante medir la actividad económica por los costos de coleccionar semillas y su valor futuro por su almacenamiento, aplicando una tasa de inversión por escasez del recurso (De-Zhu Li y Hug 2009, Brambila 2011). Algunos estudios realizados sobre el análisis de costos de colecta y almacenamiento de germoplasma *ex situ* de especies forestales ante escenarios adversos por CC son los de Rodríguez-Zuñiga *et al.* (2022a) en especies del género *Pinus* y de Rodríguez-Zuñiga *et al.* (2022b) en árboles nativos de México. En ambos casos se pudo estimar, a través de diversas tasas de interés nominal por escasez, el valor presente y de un periodo de planeación de 28 años (años 2022 - 2050) de muestras de semillas en un BS.

La conservación de semillas en un BS implica un costo social que debe sopesarse en relación con el valor que representa para la sociedad en general (sociedad civil, empresarios investigadores, gobierno, entre otros.) (Rodríguez-Zuñiga *et al.* 2022a). En ese sentido se debe establecer un marco legal satisfactorio soportado por investigaciones para construir políticas públicas congruentes en la conservación del germoplasma de ésta y otras especies con importancia social, económica y ambiental. Los BS en las próximas décadas se posicionarán como espacios estratégicos para conservar el patrimonio florístico de México (Rodríguez-Zuñiga *et al.* 2022a). Bajo los argumentos antes señalados, este estudio tiene como objetivo evaluar la distribución potencial de *C. odorata* en escenarios de CC y determinar las poblaciones vulnerables a fin de analizar los costos de conservación de las semillas de esas poblaciones en un BS.

MÉTODOS

Este trabajo de investigación comprendió dos etapas: 1) la distribución potencial e identificación de zonas de colecta de semillas de *C. odorata* bajo escenarios de CC, y 2) el análisis de los costos de colecta y almacenamiento de semillas en un BS para el periodo 2023 - 2050.

Etapas 1: Distribución potencial e identificación de zonas de colecta de semillas bajo escenarios de CC. Los modelos de distribución para *C. odorata* se construyeron en el software MaxEnt con los datos de presencia de la especie, disponibles en bases de datos georreferenciadas para el país, las variables climáticas de WorldClim (2019) y las capas de tipo del suelo y de elevación (Fick y Hijmans 2017).

- Adquisición de datos: Se construyó una base de datos de especímenes georreferenciados en el país, utilizando información contenida en la plataforma

Global Biodiversity Information Facility (GBIF), de colectas depositadas en herbarios alrededor del mundo (GBIF 2022). Para depurar la base de datos se utilizó la capa de uso del suelo y de vegetación serie VII (CONABIO 2021), por lo que se eliminaron datos incompletos o referencias ubicadas en zonas urbanas o agrícolas.

- Variables climáticas: Se utilizaron 19 variables climáticas con una resolución espacial de 30 segundos de arco obtenidas de WorldClim (2019) del período de 1970 a 2000 para la distribución actual, a una resolución de 1 km² por píxel (Hijmans *et al.* 2005). Además de las capas en formato vectorial de tipo de suelo, elevación y de uso de suelo y vegetación serie VII, que fueron tomadas de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad de México (CONABIO 2021).
- Procesamiento: Con un Sistema de Información Geográfica (SIG) como herramienta, las capas de WorldClim, tipo de suelo y la de elevación (21 variables), se procedió a ubicar los datos de presencia de la especie en el país. Posteriormente, cada archivo raster tipo grid se convirtió en un archivo de texto ASCII. Como estos archivos pierden la proyección cartográfica, se reproyectaron al sistema WGS84.
- Validación de modelos: Los modelos de distribución fueron validados por el coeficiente de correlación de Pearson con el fin de probar la multicolinealidad entre las 21 variables ambientales. La selección de variables predictoras se basó en los siguientes criterios (Peterson y Soberón 2008): aquellas con mayor contribución según la prueba de jackknife, no correlacionadas ($r \leq 0.8$), con distribución normal y por el tipo de respuesta de la variable ambiental. Además, se eliminaron áreas teniendo en cuenta las barreras que imposibilitan la dispersión de la especie, restringiendo los resultados por regiones biogeográficas. Para la validación de los modelos se siguieron las recomendaciones de Peterson y Soberón (2008). La prueba se realizó con el 30 % de los datos, que fueron separados al azar del total de las localidades de presencia de la especie. La bondad de ajuste de las predicciones del modelo se evaluó por el área media bajo la curva (AUC) de características operativas del receptor (ROC).
- Distribución actual: Para el modelamiento del área del hábitat climático óptimo bajo la distribución actual, se utilizó la versión 2.1 de WorldClim (1970 a 2000). Los modelos de distribución de la especie (SDM) se construyeron con MaxEnt (versión 3.4.1®) (Phillips *et al.* 2017). Para el modelado de nicho ecológico se utilizaron las 19 variables de BioClim, además de las capas de tipo de suelo y la de elevación (Phillips *et al.* 2017). Se utilizó el método Jackknife, que muestra la contribución

relativa de cada variable climática al modelo en MaxEnt. Para generar los mapas, el programa se ejecutó usando las variables climáticas que más contribuyeron al modelo. El área de la distribución espacial del hábitat climático óptimo se obtuvo con ArcMap 9.3®, obteniendo el número de píxeles y transformándolos a km². Finalmente, se generaron los mapas de distribución de *C. odorata* en el clima contemporáneo, con una probabilidad mayor al 50 % de encontrar a la especie.

- Distribución futura: Para obtener el área futura con hábitat climático óptimo se utilizó la versión 1.4 de WorldClim. Se modeló mediante el software MaxEnt 3.4.1 (Phillips *et al.* 2017), se descargaron las capas climáticas del Modelo de Circulación General (MCG), del Instituto Goddard de Estudios Espaciales (GISS) de la Administración Nacional de Aeronautica y del Espacio (NASA), de los Estados Unidos de América (GISS-E2-1-G), los cuales fueron generados a partir de los Modelos Regionales del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 6 del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), proyectados para un horizonte futuro cercano al año 2050 (promedio para 2041-2060) y para el 2090 como horizonte futuro lejano (promedio para 2081-2100). Con Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP1) de 2,6 y (SSP5) de 8,5 Watts m⁻² (emisiones de CO₂ bajas y extremas) (Fernández-Eguiarte *et al.* 2015). La distribución se obtuvo mediante ArcMap 9.3®, los píxeles fueron transformados a km². Los mapas se generaron con una probabilidad mayor al 50 %.

Etapas 2: Análisis de costos de colecta y de almacenamiento de semillas para el periodo 2023 al 2050. Se identificaron tres poblaciones de *C. odorata* vulnerables al CC a fin de colectar y almacenar sus semillas. La unidad básica de evaluación consistió de una accesión. Una accesión es una muestra de 3.000 a 4.000 semillas diferenciables e identificables de forma única, que representan un cultivar, una línea mejorada o una población que se mantiene almacenada para su uso y conservación (Kameswara *et al.* 2007). Mientras que la forma de colecta, tratamiento y almacenamiento de las muestras fue de acuerdo con el manual establecido por Kameswara *et al.* (2007).

Para el análisis de costos de colecta y almacenamiento (CCA) de las accesiones, se utilizó el escenario de un BS en una Institución con infraestructura para fines de investigación y conservación en el centro de la República Mexicana. En los CCA se consideró un periodo de planeación a un futuro cercano de 27 años (años 2023 - 2050), lo anterior con el fin de disminuir el error por la estimación en la tasa de interés, ya que este se incrementa en función de periodos más largos (*e.g.* año 2090). Se actualizó a valor presente (año 2023) la memoria de costos de colecta, de tratamiento y de almacenamiento de semillas en un BS de

acuerdo al trabajo de Rodríguez-Zuñiga *et al.* (2022a) y su recomendación para investigaciones futuras de especies forestales comerciales y en estatus de protección *ex situ*. Asimismo se cotizaron los precios de semillas colectadas de algunas especies forestales con los prestadores de servicios técnicos forestales (PSTF), y con funcionarios públicos de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). Por último se entrevistó a diversos investigadores de un BS con fines de investigación y conservación de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), sobre la operatividad y de las formas de colecta de semillas en campo.

El proceso de evaluación económica consistió en:

a) Actualización de la memoria de los costos del 2018 al 2023. Se calcularon los costos totales de colecta y almacenamiento (CT) (costos fijos (CF) más costos variables (CV)) de colecta, tratamiento, almacenamiento y mantenimiento de una muestra (accesión); al desconocer los CF (infraestructura y operación de una organización, en este caso un BS) se recurrió al criterio propuesto por Pradhan (2011) y Brambila (2006) quienes sugieren que los CT es casi igual a dos veces el CV (cuadro 1, ecuación [1]).

b) Cálculo de la tasa de movimiento del valor de la producción forestal de semilla de *C. odorata* para el año 2050 ante escenarios de CC o tasa de escases (Rodríguez-Zuñiga *et al.* 2022a) (cuadro 1, ecuación [2]). Para ello se utilizó la serie de tiempo de los años 1993-2018, de una tercera parte del valor total de la producción forestal de maderas preciosas (CONAFOR-SEMARNAT 2019), la cual corresponde a la producción de *C. odorata* (Romo-Lozano *et al.* 2017). Esta línea de tiempo fue la base para

proyectar un modelo del valor de la producción para el año 2050, bajo un escenario de escasez por la reducción de las áreas de dichas especies); y

c) Valor de las semillas almacenadas para el año 2050. Se calculó de acuerdo con la ecuación propuesta por Brambila (2011) y la metodología por Rodríguez-Zuñiga *et al.* (2022a) (cuadro 1, ecuación [3]). Esto es, usar una tasa nominal para obtener el valor futuro: 7 % para cualquier proyecto de inversión recomendado por BANXICO (2022) más aquella tasa obtenida por escasez del recurso (r) (De-Zhu y Hug 2009, Brambila 2011, Rodríguez-Zuñiga *et al.* 2022a).

RESULTADOS

Distribución potencial bajo escenarios de cambio climático. Los modelos de distribución tuvieron valores bajo la curva (AUC) de $0,914 \pm 0,013$; lo que indica un buen ajuste, con una probabilidad mayor al 50 % de encontrar a la especie. De acuerdo con los escenarios de cambio climático del modelo GISS-E2-1-G, la distribución de las poblaciones de *C. odorata*, en el futuro disminuirán entre 17 y 36 % de su distribución actual (figura 1). Según el método jackknife, las variables que más contribuyeron al modelado de la distribución actual fueron: precipitación anual (33,4 %), rango de temperatura anual (17,3 %), precipitación del mes más seco (10 %), precipitación del trimestre más húmedo (8,4 %), tipo de suelo (7,4 %) y la altitud (3,8 %).

En el futuro cercano (2050), con trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP) de 2,6 y 8,5 Watts m⁻², se espera una reducción de las áreas de 17,02 % y 21,88 % respectivamente, en condiciones óptimas para la distri-

Cuadro 1. Resumen de ecuaciones utilizadas para obtener el valor de las semillas de poblaciones de *C. odorata* afectadas por CC para el año 2050.

Summary of equations used to obtain the seed value of *C. odorata* populations affected by CC for the year 2050.

Nombre	Desarrollo de ecuación	
Costos totales de colecta y almacenamiento (CTCA)	CTCA = 2(CV) donde: CV = costos variables	[1]
Tasa de movimiento (r) de semilla de <i>C. odorata</i> ante escenario de CC.	$\left(\frac{VP2050}{VPA}\right)^{\frac{1}{t}} - 1 = r$ donde: VP2050 = Valor proyectado de la producción forestal de <i>C. odorata</i> para el año 2050; VPA = valor actual de la producción forestal de <i>C. odorata</i> ; t = tiempo en años para el 2050 (27 años); y r = tasa de movimiento.	[2]
Valor de las semillas almacenadas para el año 2050 (VSA2050)	$VSA2050 = (CTCA)(1 + i)^t$ donde: VSA2050 = valor de las semillas almacenadas para el año 2050; i = tasa de rendimiento por almacenamiento de una accesión ante escenarios de escasez del recurso (7% tasa de interés recomendada por BANXICO (2022) para cualquier proyecto productivo más r); t = periodo de planeación por almacenamiento de semillas (27 años).	[3]

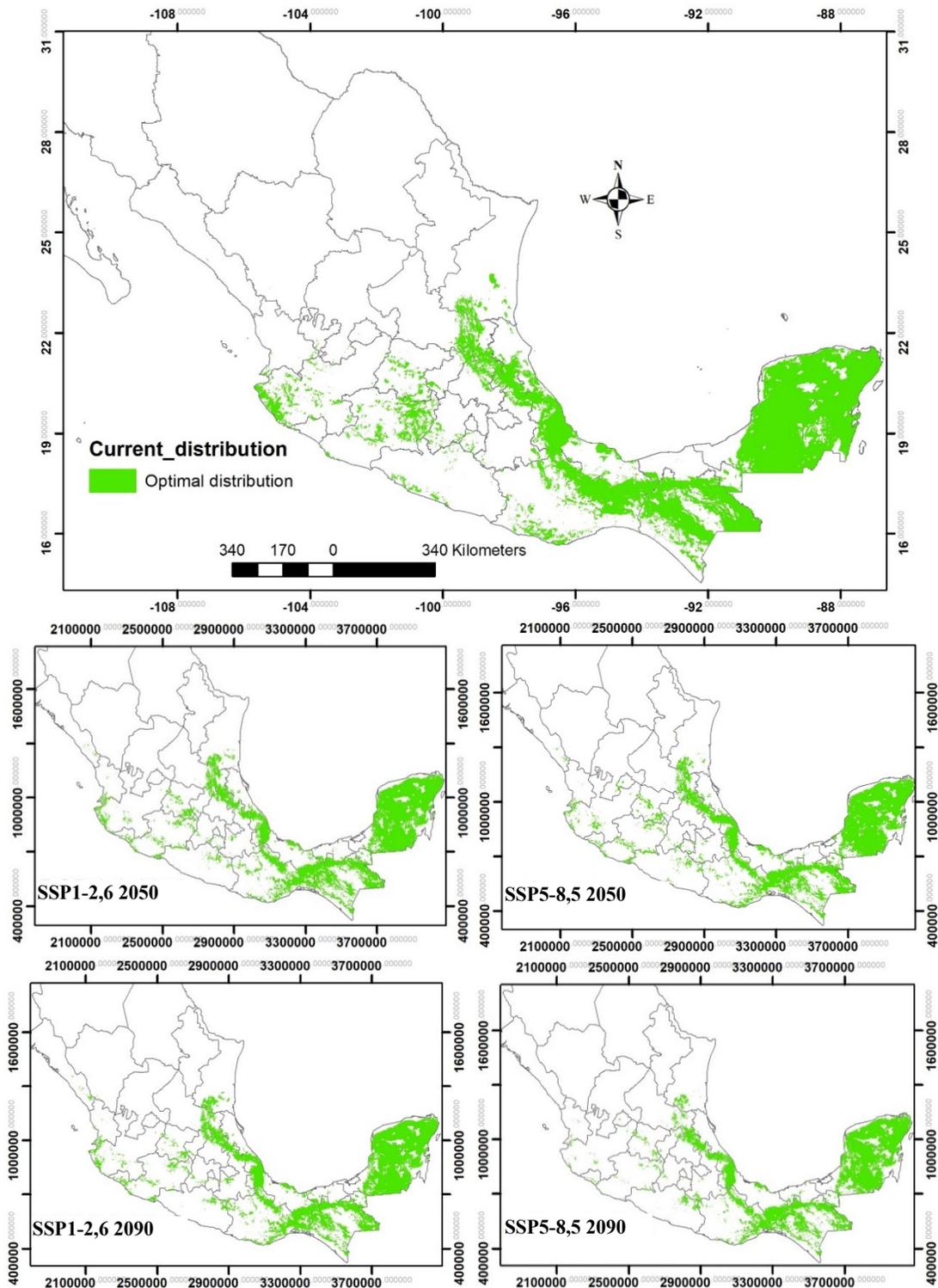


Figura 1. Distribución actual y proyectada para 2050 y 2090 de *C. odorata*, bajo escenarios de concentración SSP1-2,6 y SSP5-8,5 en el modelo GISS-E2-1-G.

Current and projected distribution for 2050 and 2090 of *C. odorata*, under SSP1-2,6 and SSP5-8,5 concentration scenarios in the GISS-E2-1-G model.

bución de la especie; en comparación con la distribución actual (cuadro 2). En el escenario de menores emisiones de CO₂ (SSP1-2,6), se pronostica la disminución de poco más de un cuarto de la distribución actual. Se espera que Zacatecas pierda condiciones adecuadas. Mientras que en Aguascalientes se reducirá en un 90 %. Las variables climáticas que más contribuyeron al modelo fueron: precipitación del trimestre más húmedo (39,6 %), temperatura mínima del mes más frío (9,4 %), estacionalidad de la temperatura (8,9 %), el tipo de suelo (8,5 %), precipitación del mes más seco (6,9 %) y la altitud (5,1 %). Para

el escenario de mayores emisiones de CO₂ (SSP5-8,5), la distribución disminuye un 4,8 % más que el escenario (SSP1-2,6). Para este escenario Michoacán y Veracruz pierden el 50 y 30 % de distribución de la especie, respectivamente. Con respecto a la distribución futura, las variables que más contribuyeron al modelo fueron: precipitación del trimestre más húmedo (44,1 %), temperatura mínima del mes más frío (12,4 %), el tipo de suelo (9,4 %), precipitación del mes más seco (8,2 %), estacionalidad de la temperatura (6,6 %) y la temperatura del trimestre más frío (5,2 %).

Cuadro 2. Área actual y pronosticada (km²) de *C. odorata* por estado para las poblaciones vulnerables de acuerdo con escenarios de cambio climático (GISS-E2-1-G).

Current and predicted area (km²) of *C. odorata* by State for vulnerable populations according to climate change scenarios (GISS-E2-1-G).

Estado	Área actual (km ²)	2050 (km ²)		2090 (km ²)	
		SSP1 2,6	SSP5 8,5	SSP1 2,6	SSP5 8,5
Aguascalientes	5,38	0,54	341,79	2,67	74,88
Campeche	43.648,58	39.207,33	40.340,71	38.718,46	34.125,32
Chiapas	43.170,28	33.731,74	30.720,98	32.008,64	28.996,30
Colima	128,97	798,73	707,37	921,23	284,79
Durango	15,82	61,15	40,72	131,00	0,10
Guanajuato	2.912,56	3.579,74	3.211,30	2.262,50	1.668,95
Guerrero	1.883,87	2.604,12	3.300,78	2.334,84	2.157,30
Hidalgo	4.596,02	3.962,73	3.903,36	4.094,36	3.899,23
Jalisco	7.838,11	4.547,02	3.982,51	4.335,85	1.182,29
México	1.159,53	597,24	521,07	630,06	304,49
Michoacán	10.343,24	5.393,54	5.027,41	4.730,42	1.807,68
Morelos	333,59	386,38	456,86	179,81	87,89
Nayarit	305,44	797,77	505,45	816,80	298,56
Oaxaca	26.566,00	25.584,19	24.146,94	25.451,82	23.190,35
Puebla	5.068,06	3.538,50	4.293,92	4.381,59	3.632,53
Querétaro	1.821,32	1.535,19	1.170,92	1.735,01	673,59
Quintana Roo	39.158,14	30.421,86	30.681,97	30.499,23	28.990,41
San Luis Potosí	6.878,88	6.930,75	6.606,62	6.446,17	3.619,27
Sinaloa	15,93	276,69	347,98	534,39	4,69
Tabasco	3.587,54	3.635,52	3.902,77	4.116,39	2.668,82
Tamaulipas	3.571,97	4.239,79	3.960,92	4.581,56	2.620,61
Veracruz	30.997,27	20.135,70	21.261,66	20.890,68	18.280,86
Yucatán	32.653,51	29.349,70	28.848,72	29.650,85	28.360,32
Zacatecas	56,63	0,00	0,00	0,00	0,00
Suitability area (km ²)	266.716,63	221.315,94	218.282,73	219.454,32	186.929,24
Decrement area (km ²)		45.400,70	48.433,90	47.262,31	79.787,39
Decrement (%)		17,02	21,88	21,65	36,36

Para el futuro lejano (2090), se espera una reducción de la distribución de la especie entre 21,65 % y 36,36 %, en comparación con la distribución actual (figura 1). En el escenario SSP1-2,6, se predice que Zacatecas pierda condiciones para la distribución de la especie. Además, en este escenario, los estados de Aguascalientes, Jalisco, México, Michoacán y Morelos pierden más del 50 % de su distribución, con respecto a la distribución actual. Las variables que más contribuyeron en la construcción del modelo fueron: precipitación del trimestre más húmedo (42,6 %), temperatura mínima del mes más frío (13,8 %), el tipo de suelo (8,4 %), estacionalidad de la temperatura (7,6 %), precipitación del mes más seco (7,4 %), y la temperatura del trimestre más frío (4,8 %). Mientras que en el escenario SSP5-8,5, se pronostica una disminución de más de un tercio de la distribución de la especie, con respecto a la distribución actual. El estado de Zacatecas no presenta condiciones para la especie. Mientras que los estados de Durango y Michoacán perderán el 99 y 85 % de su distribución, respectivamente. En este escenario los estados de Jalisco, México, Morelos, Querétaro y Sinaloa perderán más del 50 % de la distribución de la especie. Las variables que más contribuyeron al modelo fueron: precipitación anual (21,7 %), estacionalidad de la temperatura (16,9 %), precipitación del trimestre más húmedo (16,1 %), el tipo de suelo (8,9 %), la altitud (7,3 %), la precipitación del mes más seco (6,7 %) y la temperatura del trimestre más frío (5,8 %). Para la recolección de las semillas de *C. odorata* se planeó su colecta en poblaciones que por efecto del CC van a desaparecer. Por lo que se ubicaron en tres regiones del país (cuadro 3).

Costos de colecta y de almacenamiento de semillas para el periodo 2023 al 2050.

- Actualización de la memoria de costos años 2018 a 2023 y cálculo de los CT. El cuadro 4 se muestra a valores actuales (2023), los precios de las semillas colectadas en campo y almacenadas en las instalaciones del BS. Sólo existen dos precios: el de la región centro y la región norte y sur (ver cuadro 3). Se destaca que, a precio actual, los costos de colecta representan el 72 % de los costos totales o 257 % más que por costos

de almacenamiento. Es importante señalar que el costo de almacenamiento se calculó en función al costo anual que representa para un BS mantener una accesión en sus instalaciones, mientras que el costo de colecta es un valor en el momento o tiempo uno.

- Cálculo de la tasa de movimiento del valor de la producción forestal de semilla de *C. odorata* para el año 2050 ante escenarios de CC o tasa de escases. El cuadro 5 resume las posibles pérdidas (USD) por reducción del área de distribución de *C. odorata*, consideran las series de tiempo 1993 - 2018 (CONAFOR-SEMARNAT, 2019), del VPF. Debido a la baja correlación de las variables VPF y tiempo, se utilizó el promedio de tres modelos matemáticos a fin de tener una línea base con un menor error de proyección para los próximos 27 años (2023 - 2050). En ese sentido, para mantener el proceso normal del valor de la producción de *C. odorata* para el año 2050 (de 753.064 (USD) a 936.064 (USD)), se requiere una tasa de cambio o de movimiento de 1,24 % (r).
- Valor de las semillas almacenadas para el año 2050. El cuadro 6 resume el valor de las semillas almacenadas o accesión de *C. odorata* para el año 2050 (VSc2050) con una tasa de interés de 8,24 (7 % tasa recomendada por BANXICO (2022) más 1,24 % por la tasa sostenida para mantener el valor de la producción de *C. odorata* para el año 2050, ver cuadro 1, ecuación 3). Para el año 2050 estas tendrán 8,5 veces mayor a su valor actual. Mientras que su valor presente a precios de mercado es casi 15 veces más, ya que los PSTF ofertan a 51,0 (USD) una accesión o un kilogramo de semilla. Ellos no distinguen el tipo de presentación. Para el año 2090, y en forma de ejercicio utilizando los mismos criterios metodológicos (e.g. tasa de interés nominal 9.02: 7 % mas 2.02 de tasa sostenida), el valor sería de 39 (USD 257.867,00) y 5.056,00 veces más en el tiempo uno de almacenamiento y a precios de mercado actual respectivamente.

Cuadro 3. Lugares de recolecta de semillas en poblaciones de *C. odorata* vulnerables al cambio climático en México.

Seed collection sites in *C. odorata* populations vulnerable to climate change in Mexico.

Estado (región)	Municipio	Localidad	Coordenadas	
			Latitud (°)	Longitud (°)
Campeche (sur)	Candelaria	Zacatonal	18,190708	-90,623186
Veracruz (centro)	Chicontepec	Las Güirras	21,067216	-98,101252
Zacatecas (norte)	Valparaíso	Los Tanques	22,603864	-104,058458

Cuadro 4. Actualización de costos de colecta y almacenamiento de semillas de *C. odorata* año 2023.

Update on the costs of collecting and storing *C. odorata* seeds for the year 2023.

Items	Precios 2018 (USD)			Precios 2023 ((p2018) (1+pminf) ⁵) (USD)		
	Región norte	Región centro	Región sur	Región norte	Región centro	Región sur
Trabajo de campo (1)						
Pago (salario) para colecta (por persona)	33,06	27,26	33,06	41,28	34,04	41,28
Salario de un investigador (team leader) durante la colecta	74,40	59,52	74,40	92,89	74,31	92,89
Comida por persona (tres personas)	66,14	53,12	66,14	82,58	66,32	82,58
Transporte a la región norte del país (tres personas)	82,66	0,00	0,00	103,21	0,00	0,00
Transporte a la region centro del país (tres personas)	0,00	41,34	0,00	0,00	51,62	0,00
Transporte a la region sur del país (tres personas)	0,00	0	82,66	0,00	0,00	103,21
Pasaje aéreo (tres personas)	173,62	0	173,62	216,78	0,00	216,78
Otros (equipo y materiales para el viaje)	57,86	55,86	57,86	72,24	69,75	72,24
Subtotal (1)	487,76	237,1	487,76	609,00	296,04	609,00
Permisos y envíos de semillas (2)						
Permisos locales	24,80	20,84	24,80	30,96	26,02	30,96
Envío de semillas	20,66	0	20,66	25,80	0,00	25,80
Subtotal (2)	45,46	20,84	45,46	56,76	26,02	56,76
TOTAL = (1) + (2)	533,22	257,94	533,22	665,76	322,06	665,76
Tratamiento de muestras, pruebas de viabilidad, germinación y almacenamiento de semillas (3)						
		173,34			216,42	
TOTAL = (1) + (2) + (3)	706,56	431,28	706,56	882,18	538,48	882,18

Fuente: Elaboración propia, datos actualizados (2023) de la memoria de costos de colecta y de almacenamiento del trabajo de Rodríguez-Zúñiga *et al.* (2022a). P2018 = precios o cantidades del 2018; pminf = promedio de la inflación de cinco periodos.

Cuadro 5. Valor de la producción forestal de *C. odorata* según escenarios de cambio climático para el año 2050.

Value of *C. odorata* forest production according to climate change scenarios for the year 2050.

Modelo de proyección	VPFtp ₂₀₅₀ (USD)	VPFcd(1/3) ₂₀₅₀ (USD)	ES (-21.88 %)	PPFce ₂₀₅₀ (USD)	
				EC (-17.02)	Promedio (ES+EC)/2
Lineal (R ² = 0,058)	3.368.240	1.122.747	877.089,96	930.839,441	903.964,569
Logarítmico (R ² = 0,14)	1.578.947	526.316	411.157,799	436.354,34	423.756,07
Potencial (R ² = 0,21)	3.477.388	1.159.13	905.511,835	961.003,344	933.257,589
Promedio	2.808.192	936.064	731.253	776.066	753.659

Donde: VPFtp₂₀₅₀ = valor de la producción forestal total de maderas preciosas proyectada para el año 2050; ES = escenario severo (reducción de 21,88 %), EC = escenario conservador (reducción de 17,02 %); VPFcd(1/3)₂₀₅₀ = participación en el valor de la producción forestal de la especie *C. odorata* proyectada para el año 2050 (una tercera parte, Romo-Lozano *et al.* 2017); PPFce₂₀₅₀ = pérdidas por reducción de áreas promedio de *C. odorata* por de cambio climático. Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 6. Valor de las semillas de *C. odorata* almacenadas para el año 2050.

Value of *C. odorata* seeds stored by 2050.

<i>C. odorata</i> (coordenadas UTM)	Región	CTCA (USD)	VSc2050 (USD)
Campeche	Sur	882,18	7.482,16
Veracruz	Centro	538,48	4.567,09
Zacatecas	Norte	882,18	7.482,16
Promedio		767,61	6.510,47

Donde: CTCA = costos totales de colecta y almacenamiento; VSc2050 = Valor de la semilla de *C. odorata* en el año 2050.

DISCUSIÓN

Distribución potencial bajo escenarios de cambio climático. El modelo de distribución actual de *C. odorata* coincide con la distribución del bioma del bosque tropical húmedo y parte del bosque tropical estacionalmente seco en Chihuahua, Sonora, Durango y Sinaloa (Sampayo-Maldonado *et al.* 2023). Los modelos de distribución actual obtenidos en este trabajo coinciden con los reportados por Hernández-Ramos *et al.* (2018) y de Sampayo-Maldonado *et al.* (2023). Las variables que más contribuyeron al modelo de distribución de la especie fueron: precipitación anual, rango de temperatura anual, precipitación del mes más seco y precipitación del trimestre más húmedo, con un aporte del (70 %). Y coinciden con las variables para el modelo del nicho ecológico para esta especie de acuerdo con Hernández-Ramos *et al.* (2018) y Sampayo-Maldonado *et al.* (2023). A su vez, los resultados son comparables a la distribución potencial en México del hábitat climático óptimo para *S. macrophylla* (clasificada en la misma familia, Meliaceae) (Sampayo-Maldonado *et al.* 2021).

Los modelos de la distribución potencial para *C. odorata*, de acuerdo con el modelo de la NASA (GISS-E2-1-G), se espera la disminución de la distribución óptima en más del 36 %. Se optó por utilizar este modelo por su resolución adecuada para estudios de impacto regional (Montero-Martínez *et al.* 2013). Por lo que las proyecciones tuvieron buen ajuste (AUC > 0,92) en función del área bajo la curva (Moreno *et al.* 2011). Las variables que más contribuyeron a la construcción de los modelos para la distribución de la especie fueron la precipitación anual, precipitación del trimestre más húmedo y la temperatura mínima del mes más frío. Sin embargo, con el escenario de CC se espera que el régimen de lluvias cambie, lo que va a intensificar la evaporación del agua del suelo y su capacidad para retener agua, lo que puede extender las sequías. El estrés por sequía va a limitar la distribución geográfica de la especie (Bendou *et al.* 2022). Como una estrategia para conservar la diversidad genética de las poblaciones amenazadas por el CC, es importante recolectar semillas en las regiones que perderán condiciones adecuadas para la distribución de la especie.

C. odorata se propaga principalmente por semillas, son del tipo ortodoxas y no presentan latencia (Espitia-Camacho *et al.* 2017, Sampayo-Maldonado *et al.* 2019). Por lo que es importante analizar las respuestas de las semillas a las condiciones ambientales cambiantes, ya que los procesos fisiológicos involucrados en el crecimiento y desarrollo de los árboles están fuertemente influenciados por la temperatura (Nakao y Cardoso 2016), ya que afecta los mecanismos hormonales implicados en la floración y fructificación (Ortiz-Solorio 1987), lo que va a impactar en la dispersión y por ende modelar la distribución de la especie (Hartmann y Kester 2013). Por lo que este estudio sienta las bases para desarrollar estrategias para la conservación de semillas de poblaciones vulnerables al cambio climático.

Costos de colecta y de almacenamiento de semillas para el periodo 2023 al 2050. Costos de colecta es una metodología utilizada en valoración económica de los recursos naturales. Uno de los principales retos de esta metodología es identificar una o varias variables que estén regidas por reglas del mercado. Por ejemplo, sin considerar las externalidades -principal debilidad del método-(Ibarrarán *et al.* 2003). Para el caso de especies forestales, existen empresas (PSTF) que colocan en el mercado semillas colectadas de especies con características deseables (*e.g.* resistentes, adaptables, productivas, etc.). Sin embargo, ante la exigencia de calidad del germoplasma para formar una accesión digna de almacenarse en un BS, éstas organizaciones anteponen la cantidad más que la calidad, siendo sus costos muy por debajo de una muestra que se va almacenar en un BS. Por otro lado, el valor de las semillas obedecerá a su productividad. Por ejemplo, el valor del germoplasma almacenada en un BS, dependerá del rendimiento de esa variedad por hectárea (Mora *et al.* 1999). Desde el punto de vista ambiental, el germoplasma tendrá un valor excedente que se tendrá que valorar bajo otros criterios a efecto de reducir las externalidades. Esto también aplica para las semillas de *C. odorata*, especie valiosa no solo desde el punto de vista económico, sino también por su gran importancia ambiental (Sampayo-Maldonado *et al.* 2021).

Esta investigación revela que el valor de las semillas de *C. odorata*, en el tiempo uno de almacenamiento, es 15 ve-

ces más (USD 767,61) que su precio en el mercado. En un BS para un periodo de 27 años (2050) será casi nueve veces más (USD 6.510,47) a su costo total actual. En cuanto a su valor en el mercado la diferencia se debe a que el BS requiere un trabajo más detallado de colecta llevado a cabo por especialistas, estudios de biodiversidad, ensayos periódicos de viabilidad y una infraestructura con instalaciones más complejas. Las ventas de semillas por PSTF están diseñadas para maximizar ganancias y disminuir los costos, priorizando el volumen recolectado sobre la calidad del material biológico. Es importante señalar que, para el periodo de evaluación no se consideró el valor presente de la accesión ante la erosión de la viabilidad de la semilla ni la tasa de escasez del recurso (valor económico y ambiental por la reducción y pérdidas de calidad del suelo forestal de *C. odorata*), así mismo un escenario de la variación de tasa de interés por costos de oportunidad (inflación, escenarios adversos del BS, etc.) (Brambila 2011). En cualquiera de los casos, diversos autores (Evenson *et al.* 1998, De-Zhu Li and Hug 2009) consideran que cualquier inversión que se haga en investigación y conservación de los recursos filogenéticos en un BS son pocos, y que los beneficios económicos en términos de rentabilidad (beneficio marginal) siempre serán mayores al compararlos con el gasto de operación de un BS (costo marginal). En ese sentido la tasa de interés podrá incrementarse y en ello el valor de la semilla en un periodo largo (27 años) por almacenamiento. Por lo que en futuras investigaciones habrá que considerar las variables arriba señaladas tomando como base este trabajo.

En cuanto a la metodología para calcular la tasa de interés del 8,24 %, es similar al trabajo de Rodríguez-Zuñiga *et al.* (2022a), para especies forestales del género *Pinus* ante escenarios de CC. Asimismo se encuentra en el rango reportado por otros trabajos referentes a la conservación de germoplasma *ex situ* en un periodo de 25 años (1987 - 2022): 11 % para la inversión en el mejoramiento y almacenamiento de semillas forestales comerciales por parte del Sistema Nacional para la Conservación de los Recursos Fitogenéticos del Gobierno de los Estados Unidos (SNCRF-EU) (Plucknett *et al.* 1987); 5,6 % sobre las ganancias de almacenar el germoplasma de árboles frutales (Evenson *et al.* 1998); 5,0 % utilizada por el Centro Internacional para el Mejoramiento del Maíz y Trigo (CIMMYT) (Pardey *et al.* 1999); 8,84 y 7,0 por almacenamiento de semillas de especies de *Pinus* y árboles nativos de México respectivamente en un BS ante escenarios de escasez por Cambio Climático (Rodríguez-Zuñiga *et al.* 2022a, Rodríguez-Zuñiga *et al.* 2022b).

La tasa de interés dependerá de los costos de oportunidad derivados de la productividad, importancia ambiental del recurso biológico almacenado o eventos adversos. La alta tasa de SNCRF-EU, según la FAO (2010), es porque este país es altamente competitivo, siendo una de las tres principales naciones que dominan la producción forestal global. En México y en el mundo el germoplasma de *C. odorata* tendría que tener un alto valor económico (*e.g.*

madera preciosa) y ambiental (*e.g.* captura de carbón) (Romo-Lozano *et al.* 2017, Sampayo-Maldonado *et al.* 2023). De acuerdo a un inventario en el año 2017 de madera en pie de *C. odorata* el valor estimado fue de USD 288.328.788 (Romo-Lozano *et al.* 2017) por lo que si se considera que sus áreas se reducirán en promedio 19,5 % y con una tasa sostenida por escases del 2,4 % para el año 2050, las pérdidas estimadas serían de casi USD 109.224.836 lo anterior sin tomar en cuenta los diversos beneficios ambientales que esta especie genera.

Las semillas colectadas y conservadas ya sea *in situ* o *ex situ* pueden tener un valor agregado en el mercado para la agroforestería o restauración ecológica. Las experiencias en Brasil indican que los grupos socioculturales menos integrados con el mercado (*e.g.* los pueblos indígenas o campesinos) logran mejores resultados de sustento a través de la participación en el mercado de semillas (Urzedo *et al.* 2016). Así mismo en Sahel (África), con altos niveles de participación comunitaria, se priorizaron las especies mejor adaptadas al medio y de mayor importancia económica, posteriormente se recolectaron semillas de calidad y se produjeron plántulas para restaurar con éxito suelos degradados (Sacande y Berrahmound 2016). En México se ha documentado que, el mejor manejo de recursos forestales maderables y no maderables lo realizan empresas forestales comunitaria (EFC) (Rodríguez *et al.* 2021). En ese sentido para la conservación *in situ*, este trabajo puede ser referencia para: a) los dueños de los terrenos forestales o EFC para dar valor agregado al germoplasma. Hay un costo de oportunidad por conservar *in situ*, ya sea a través de huertos semilleros o unidades forestales destinadas a producir semillas de especies comerciales o de restauración. Estas EFC pueden ahora cuantificar a través de este método propuesto un valor real o valor agregado de su recurso forestal no maderable; b) el gobierno federal el cual es responsable del resguardo del patrimonio natural, este estudio representa un soporte para elaborar políticas públicas con visión estratégica anticipando posibles eventos; c) un BS ya que disminuye los costos de oportunidad para proyectos en mejorar o ampliar sus instalaciones por el hecho de conocer el valor unitario de una accesión; y d) para la sociedad en general y academia, este es uno de los pocos trabajos que establece una metodología para evaluar *ex situ* los recursos forestales ante escenarios adversos al CC.

La conservación *in situ* y *ex situ* representa una opción para que la sociedad, el gobierno y los propietarios de bosques manejen o conserven los recursos genéticos, al mismo tiempo les permite a los empresarios obtener ganancias. Es importante considerar que este estudio no incluye la medición monetaria de las ganancias o pérdidas de bienestar generadas por la conservación *ex situ* en un BS con las características propuestas. Sin embargo, para estudios futuros de esta especie (*C. odorata*) u otras de importancia ambiental y económica, representa una propuesta metodológica y componente importante de un

sistema del análisis de costos beneficios para la conservación de muestras de semillas en un BS.

Este trabajo es referente para que un BS con objetivos arriba señalados estime y valore sus inventarios (de accesiones), asimismo justifique los gastos de operación para su buen funcionamiento. En ese sentido, gestionar apoyos justos del Gobierno o instituciones nacionales e internacionales, ya que la preservación de especies forestales amenazadas ante escenarios adversos, es un patrimonio natural universal. Por otro lado, es un referente para extender periodos de almacenamiento para otras especies de importancia ambiental, social y económica con una tasa de interés mayor o igual a 8,24 %. Lo anterior ante escenarios adversos como cambio climático, cambio uso de la tierra y pérdida de la biodiversidad entre otros.

CONCLUSIONES

De acuerdo con el modelo de la NASA (GISS-E2-1-G), *C. odorata* se verá afectada por el cambio climático, por lo que perderá condiciones óptimas para su distribución. En el futuro cercano (2050), con Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) de 2,6 y 8,5 Watts m⁻², se espera una reducción de la distribución de la especie de 17,02 % y 21,88 % respectivamente y para el futuro lejano (2090), entre 21,65 % y 36,36 %, en comparación con la distribución actual. Para el año 2050 las áreas de *C. odorata* se reducirán en promedio 19,5 % y las pérdidas estimadas serían de casi USD 109.224.836 lo anterior sin considerar los diversos beneficios ambientales que esta especie genera. Los costos de conservación de una accesión de *C. odorata* en el tiempo uno de almacenamiento, es casi 15 veces más (USD 767,61) que su precio en el mercado. Considerando una tasa de interés nominal de 8,24 % en un periodo de 27 años (2023 - 2050), el valor de esa accesión será casi 8.5 veces más (USD 6.510,61) que su valor presente. A pesar de los costos asociados con el mantenimiento y operación de un BS se resalta la contribución de estas instituciones para la conservación del patrimonio florístico del país. Cualquier costo de inversión para conservar el germoplasma *in situ* o *ex situ* siempre será menor a los beneficios obtenidos por dichas acciones. Por lo que se recomienda realizar colectas de semillas, no sólo de esta especie, sino de otras de gran importancia con riesgos ambientales o antropogénicos. Realizar el análisis de los costos para la conservación de poblaciones vulnerables al CC, es estrategia para preservar la riqueza natural de México.

CONTRIBUCIONES DE AUTORES

JRZ y SSM idea original; JRZ, SSM, HBS y FSG participaron en el diseño del marco conceptual estadístico de la investigación y en la escritura de la versión preliminar; JRZ y SSM revisión técnica de las bases de datos forestales y modelación de escenarios por cambio climático; JRZ, SSM, HBS y FSG en el análisis estadístico computarizado.

Los cuatro autores contribuyeron en el proceso de la integración y revisión de la versión final del manuscrito.

FINANCIAMIENTO

El estudio fue financiado con recursos propios de los autores de la investigación.

AGRADECIMIENTOS

A los prestadores de Servicios Técnicos Forestales por la información proporcionada sobre precios de mercado de la semilla. Al posgrado en Ciencias Forestales, Colegio de Postgraduados, campus Montecillos por sus recomendaciones y observaciones técnicas.

REFERENCIAS

- BANXICO (Banco de México). 2022. Certificados de La Tesorería de La Federación. Consultado 8 ago. 2022. Disponible en: <https://www.banxico.org.mx/>
- Bendou O, I Gutiérrez-Fernández, EL Marcos-Barbero, N Bueno-Ramos, J Miranda-Apodaca, AI González-Hernández, R Morcuende, JB Arellano. 2022. Physiological and Antioxidant Response to Different Water Deficit Regimes of Flag Leaves and Ears of Wheat Grown under Combined Elevated CO₂ and High Temperature. *Plants* 11(18): 2384. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11182384>
- Brambila P. 2011. Bioeconomía: instrumentos para análisis económico. Ed. México, Mexico, Sagarpa. 312 p.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). Red Mundial de Información Sobre Biodiversidad (REMIB). 2021. Consultado 31 de ago. 2024. Disponible en: <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/usv250s7gw.html>
- CONAFOR-SEMARNAT (Comisión Nacional Forestal-Secretaría del Medio Ambiente and Recursos Naturales). 2019. Inventario Nacional Forestal y de Suelo. Consultado 12 feb. 2022. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/772>
- De-Zhu L, WP Hug. 2009. The science and economics of ex situ plant conservation. *Trends in Plant Science* 14 (1): 614-621. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.09.005>
- Espitia-Camacho M, H Araméndiz-Tatis, C Cardona-Ayala. 2017. Viability, morphometric, and anatomical characteristics of *Cedrela odorata* L. and *Cariniana pyriformis* Miers seeds. *Agronomía Mesoamericana* 28(3): 605-617. DOI: <https://doi.org/10.15517/ma.v28i3.26287>
- Evenson R, D Gollin, V Santaniello. 1998. Agricultural values of plant genetic resources. Wallingford, UK. CABI. 304 p.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2010. The Second Report on the State of the World's Plant Genetic Resources for Food and Agriculture. Rome. FAO. 320 p.
- Fernández-Eguiarte A, J Zavala-Hidalgo, R Romero-Centeno, AC Conde-Álvarez, RI Trejo-Vázquez. 2015. Actualización de los Escenarios de Cambio Climático Para Estudios de Impactos, Vulnerabilidad and Adaptación en México and Centroamérica; Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto Na-

- cional de Ecología and Cambio Climático, Ciudad de México, México. Secretaría de Medio Ambiente and Recursos Naturales-Instituto de Geografía, UNAM. 303 p.
- Fick SE, RJ Hijmans. 2017. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37(12): 4302-4315. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- GBIF (Global Biodiversity Information Facility). 2022. Acceso abierto y gratuito a datos sobre biodiversidad. Consultado el 2 may. 2022. Disponible en: <https://doi.org/10.15468/dl.zdm4rc>
- Hartmann HT, DE Kester, FT Davies, RL Geneve. 2013. Plant Propagation: Principles and Practices, 8th ed. Prentice-Hall. Hoboken, NJ, USA. 913 p.
- Hernández-Ramos J, R Reynoso-Santos, A Hernández-Ramos, X García-Cuevas, E Hernández-Máximo, JV Cob-Uicab, D Sumano-López. 2018. Historical, current and future distribution of *Cedrela odorata* in Mexico. *Acta Botánica Mexicana* 124(1): 117-134. DOI: <https://doi.org/10.21829/abm124.2018.1305>
- Ibarrarán V, C Islas, E Mayett. 2003. Valoración económica del impacto ambiental del manejo de residuos sólidos municipales: estudio de caso. *Gaceta Ecológica* 67(1): 69-82. DOI: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53906706>
- Kameswara N, J Hanson, M Ehsan, K Ghosh, D Nowell, M Larinde. 2007. Manual Para el Manejo de Semillas en Bancos de Germoplasma. Roma, Italy. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación and la Agricultura (FAO). 182 p.
- Montero-Martínez MJ, W Ojeda-Bustamante, JS Santana-Sepúlveda, R Prieto-González, R Lobato-Sánchez. 2013. Sistema de consulta de proyecciones regionalizadas de cambio climático para México. *Tecnología Y Ciencias Del Agua* 4(2): 113-128. <https://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/356>
- Moreno R, R Zamora, JR Molina, A Vásquez, M Herrera. 2011. Predictive modeling of microhabitats for endemic birds in south Chilean temperate forest using maximum entropy (Maxent). *Ecological Informatics* 6: 364-370. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2011.07.003>
- Mora U, A Bogantes, C Arroyo. 1999. Cultivares de pejíbaye para palmito. In J Mora, J Gainza eds. Palmito de pejíbaye (*Bactris gasipaes* K.) su cultivo e industrialización. San José, Costa Rica. Editorial U.C.R. p. 41-47.
- Nakao EA, VJM Cardoso. 2016. Analysis of thermal dependence on the germination of braquiaraõ seeds using the thermal time model. *Brazilian Journal of Biology* 76(1): 162-168. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.15714>
- Ortiz-Solorio CA. 1987. Elementos de Agrometeorología Cuantitativa con Aplicaciones en la República Mexicana; Universidad Autónoma Chapingo: Texcoco, Mexico, 327 p.
- Pardey PG, B Skomand, S Taba, ME Van Dusen, BD Wright. 1999. The cost of conserving maize and wheat genetic resources *ex situ*. In M Smale eds. Farmers, gene banks and crop breeding economic analyses of diversity in wheat, maize and rice, Edo México, México. CIMMYT/Kluwer Academic Publishers. p. 35-55.
- Parmesan C. 2006. Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 37(1): 637-669. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100>
- PEF (Poder Ejecutivo Federal). 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Consultado 07 abr. 2023. Disponible en <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4254/semarnat/semarnat.htm>
- Peterson AT, J Soberón. 2008. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling* 213(1): 63-72. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.11.008>
- Phillips SJ, RP Anderson, M Dudík, RE Schapire, ME Blair. 2017. Opening the black box: An open-source release of MaxEnt. *Ecography* 40(1): 887-893. DOI: <https://doi.org/10.1111/ecog.03049>
- Reid WV. 1999. Bioprospecting: A force for sustainable development. *Environmental Science and Technology* 127:1730-1732.
- Rodríguez-Zúñiga J, CM Flores-Ortiz, MJ González-Guillén, R. Lira-Saade, NI Rodríguez-Arévalo, P Dávila-Aranda, T Ulián. 2022(a). Cost Analysis of Seed Conservation of Commercial Pine Species Vulnerable to Climate Change in Mexico. *Forests* 13(1): 2-14. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13040539>
- Rodríguez-Zúñiga J, MJ Gozález-Guillén, H Bautista-Santos, F Sánchez-Galván. 2022(b). Cost Analysis of Collection and *ex situ* Conservation of Seeds of Important Native Tree Species of Mexico. *Forests* 13(1): 1-13. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13111958>
- Romo-Lozano JL, JJ Vargas-Hernández, J López-Upton, ML Ávila-Angulo. 2017. Estimate of the financial value of timber stocks of red cedar (*Cedrela odorata* L.) in Mexico. *Madera y Bosques* 23(1): 111-120. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2017.231473>
- Sacande M, N Berrahmouni. 2016. Community participation and ecological criteria for selecting species and restoring natural capital with native species in the Sahel. *Restoration Ecology* 24(1): 479-488. DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.12337>
- Sampayo-Maldonado S, CA Ordoñez-Salanueva, E Mattana, M Way, E Castillo, PD Davila-Aranda, R Lira-Sadde, O Téllez-Valdés, NI Rodríguez-Arevalo, T Ulián, CM Flores-Ortiz. 2023. Potential Distribution of *Cedrela odorata* L. in Mexico according to Its Optimal Thermal Range for Seed Germination under Different Climate Change Scenarios. *Plants* 12(1): 150. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12010150tra>
- Sampayo-Maldonado S, CA Ordoñez-Salanueva, E Mattana, M Way, E Castillo, PD Davila-Aranda, R Lira-Sadde, O Téllez-Valdés, NI Rodríguez-Arevalo, T Ulián, CM Flores-Ortiz. 2021. Thermal niche for seed germination and species distribution modelling of *Swietenia macrophylla* King (mahogany) under climate change scenarios. *Plants* 10(11): 2377. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10112377>
- Sampayo-Maldonado S, CA Ordoñez-Salanueva, E Mattana, T Ulián, M Way, E Castillo, PD Davila-Aranda, R Lira-Sadde, O Téllez-Valdés, NI Rodríguez-Arevalo, CM Flores-Ortiz. 2019. Thermal time and cardinal temperatures for germination of *Cedrela odorata* L. *Forests* 10(10): 841. DOI: <http://doi:10.3390/f10100841>
- Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2010) NORMA Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental -Especies nativas de México de flora & fauna silvestres- Categorías de riesgo

& especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-
Lista de especies en riesgo. Diario oficial. p. 67
Urzedo DI, E Vidal, EO Sills, FCM Piña-Rodrigues, RGP Jun-
queira. 2016. Tropical Forest Seeds in the Household Eco-
nomy: Effects of Market Participation among Three Socio-
cultural Groups in the Upper Xingu Region of the Brazilian

Amazon. *Environmental Conservation* 43(1): 13-23. DOI:
<https://doi:10.1017/S0376892915000247>
WorldClim. 2019. Free Climate Data for Ecological Modeling
and GIS. WorldClim-Global Climate Data 2019. Consul-
tado el 9 may. 2022. Disponible en: <http://www.worldclim.org/>

Recibido: 05.05.24
Aceptado: 23.11.24

