

Aptitud del terreno para el establecimiento de plantaciones de agave espadín en Oaxaca

Ramiro Pérez-Miranda¹

Antonio González-Hernández¹

Martín Enrique Romero-Sánchez^{2,§}

Efraín Velasco-Bautista¹

Fernando Carrillo-Anzures²

Miguel Acosta-Mireles²

1 CENID-COMEF INIFAP Ave. Progreso, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México, 04010 México

2 Campo Experimental Valle de México INIFAP Carretera Los Reyes-Texcoco km 13.5, Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, 56250 México

Autor para correspondencia: romero.martin@inifap.gob.mx.

Resumen

El crecimiento del consumo de mezcal ha generado una sobreoferta de agave, lo que ha reducido los precios para los productores. Este estudio evaluó la aptitud del terreno para la plantación de *Agave angustifolia* Haw. en Oaxaca mediante dos modelos de distribución: MaxEnt y Random Forest. Se utilizaron variables climáticas, edafológicas y topográficas, junto con registros de presencia de la especie. Ambos modelos mostraron valores AUC > 0.85, con 16 variables relevantes. La superficie con alto potencial fue de 4 475.89 km² (MaxEnt) y 28 700.97 km² (Random Forest), las áreas idóneas para plantaciones fueron 6 671.12 km² y 9 618.67 km², respectivamente. A pesar de las diferencias, los modelos ofrecen información útil para la planificación sostenible del agave espadín.

Palabras clave:

Agave angustifolia Haw., distribución potencial, MaxEnt, Random Forest.



Introducción

De las 211 especies de agave que existen en el mundo, 159 se encuentran en territorio mexicano, lo que representa el 75% de las especies distribuidas en el planeta (García-Mendoza, 2018). Los agaves crecen preferentemente en climas áridos y semiáridos de la parte central y norte de México; son plantas tolerantes a la escasez de lluvias y altas temperaturas; no obstante, también se desarrollan en menor medida en zonas templadas; en altitudes que van desde cero hasta 3 400 msnm (García-Mendoza, 2007).

El estado de Oaxaca tiene la mayor diversidad de agaves en México, se distribuyen 35 especies de las 159 reportadas en el país (García-Mendoza, 2018) y es considerado como el mayor productor de mezcal. Por ello, para lograr un manejo ecológico y económico sostenible de la producción del agave y reducir la presión antropogénica sobre las poblaciones silvestres, es preciso conocer las áreas idóneas para el establecimiento de plantaciones de maguey espadín en Oaxaca (Torres *et al.*, 2013).

Los modelos de distribución de especies identifican áreas aptas bajo distintas condiciones ambientales. Sin embargo, los resultados varían según el algoritmo, lo que genera incertidumbre en la delimitación de zonas para cultivos y en las decisiones territoriales (Serra *et al.*, 2025).

Los más usados son MaxEnt y Random Forest, con diferencias clave: MaxEnt maximiza la entropía a partir de datos de presencia y de variables ambientales; Random Forest usa árboles de decisión para modelar relaciones complejas y no lineales (Gutiérrez-Hernández *et al.*, 2018). Estas diferencias producen estimaciones opuestas de aptitud, con sub o sobreestimación espacial. Compararlos reduce la incertidumbre y proporciona información robusta para la planificación sostenible del cultivo de *Agave angustifolia* (Haile *et al.*, 2024).

El objetivo de este trabajo fue comparar la aptitud territorial para el establecimiento de *Agave angustifolia* en Oaxaca mediante los algoritmos MaxEnt y Random Forest y evaluar las discrepancias espaciales entre ambos modelos y sus implicaciones para la planificación sostenible del cultivo. Se plantea que la selección del algoritmo puede modificar significativamente la estimación de áreas aptas, generando incertidumbre en la toma de decisiones relacionadas con el ordenamiento territorial y la expansión productiva del agave mezcalero.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en el estado de Oaxaca, que limita al norte con Puebla y Veracruz, al sur con el océano pacífico, al este con Chiapas y al oeste con Guerrero. Sus coordenadas extremas son 98° 33' 9" O - 93° 52' 4" O y 18° 39' 32" N - 15° 39' 25" N (INEGI, 2018) (Figura 1).



Figura 1. Localización del área de estudio.



Datos de presencia de la especie de agave mezcalero

Se compiló una base de datos con 775 registros de presencia de *A. angustifolia* provenientes del GBIF (2023) y de observaciones de campo. Los registros utilizados correspondieron a *Agave angustifolia* Haw. en sentido amplio, debido a que las bases de datos disponibles no permitieron diferenciar de manera consistente las variedades infraespecíficas. La depuración de registros incluyó la eliminación de duplicados, de coordenadas erróneas, de registros ubicados en cuerpos de agua o en zonas urbanas, así como de observaciones con información geográfica inconsistente. Posteriormente, los registros fueron revisados para asegurar la coherencia espacial y ambiental antes del modelado.

Variables edafoclimáticas

Se utilizaron 32 variables edafoclimáticas ajustadas a la misma extensión y resolución espacial (~900 m). Las 19 variables climáticas provienen de WorldClim, mientras que las nueve variables edáficas se obtienen de SoilGrids (Cuadro 1).



Cuadro 1. Variables edafológicas.

Variables	Descripción
Bdod	Densidad aparente de la fracción tierra fina
Cec	Capacidad de intercambio cationico
Clay	Proporción de partículas de arcilla (<0.002 mm) en la fracción tierra fina
Nitro	Nitrogeno total (N)
Ph	pH del suelo
Sand	Proporción de partículas de arena (>0.05 mm) en la fracción tierra fina
Silt	Proporción de partículas de limo ($\#0.002$ mm y $\#0.05$ mm) en la fracción tierra fina
Soc	Contenido de carbono orgánico del suelo en la fracción tierra fina
Mostpro	Sistema internacional de clasificación de suelos

Se añadió el índice de humedad de Lang (Sánchez y Garduño, 2008). Las variables topográficas (altitud, pendiente y orientación) se obtuvieron del Modelo de Elevación Digital Nacional (INEGI, 2018). Se aplicó la prueba de correlación de Pearson y se evaluó la multicolinealidad con un umbral del 85% mediante NicheToolBox (Osorio *et al.*, 2020) en RStudio 4.3.

Modelado espacial

MaxEnt

Se empleó MaxEnt 3.4.4, con salida logística y validación cruzada (25% para prueba, 10 000 puntos de fondo). Se eliminaron iterativamente las variables de baja contribución. El modelo final se clasificó en cuatro niveles de aptitud: nulo (0-0.25), bajo (0.25-0.5), medio (0.5-0.75) y alto (0.75-1). Los intervalos se definieron a partir de rangos equivalentes de la salida logística de los modelos, con el propósito de estandarizar la comparación espacial entre algoritmos y facilitar la interpretación ecológica de los resultados.

Random Forest

Se utilizó el algoritmo CART en RStudio 4.3, con el índice de Gini para seleccionar atributos. Se descartaron variables irrelevantes y se evaluó el modelo mediante (area under the curve (AUC) e índice Kappa. Las categorías generadas fueron las mismas que en MaxEnt.

Para el proceso de modelación, se definió como área accesible (M) el territorio del estado de Oaxaca, dado que esta región abarca la distribución histórica y actual de *Agave angustifolia*, asociada a sistemas tradicionales y comerciales de producción de mezcal. La delimitación se justificó ecológicamente debido a la continuidad ambiental existente en la entidad, a la amplia presencia documentada de la especie y a las condiciones climáticas y edáficas compatibles con su establecimiento y manejo. Esta definición permitió restringir el modelado al espacio potencialmente accesible para la especie, reduciendo el riesgo de extrapolación a ambientes ecológicamente irrelevantes.

Validación de los modelos

La validación se realizó mediante métricas comparables entre modelos para asegurar uniformidad en la evaluación del desempeño predictivo (Mi *et al.*, 2017). Se seleccionaron 100 sitios (georreferenciados vía GPS Garmin™ 65sx) mediante un muestreo aleatorio espacial en la región central del estado de Oaxaca, considerando la accesibilidad en campo y la representación de las diferentes categorías de aptitud predichas por los modelos.

Identificación de áreas idóneas de plantaciones de agave

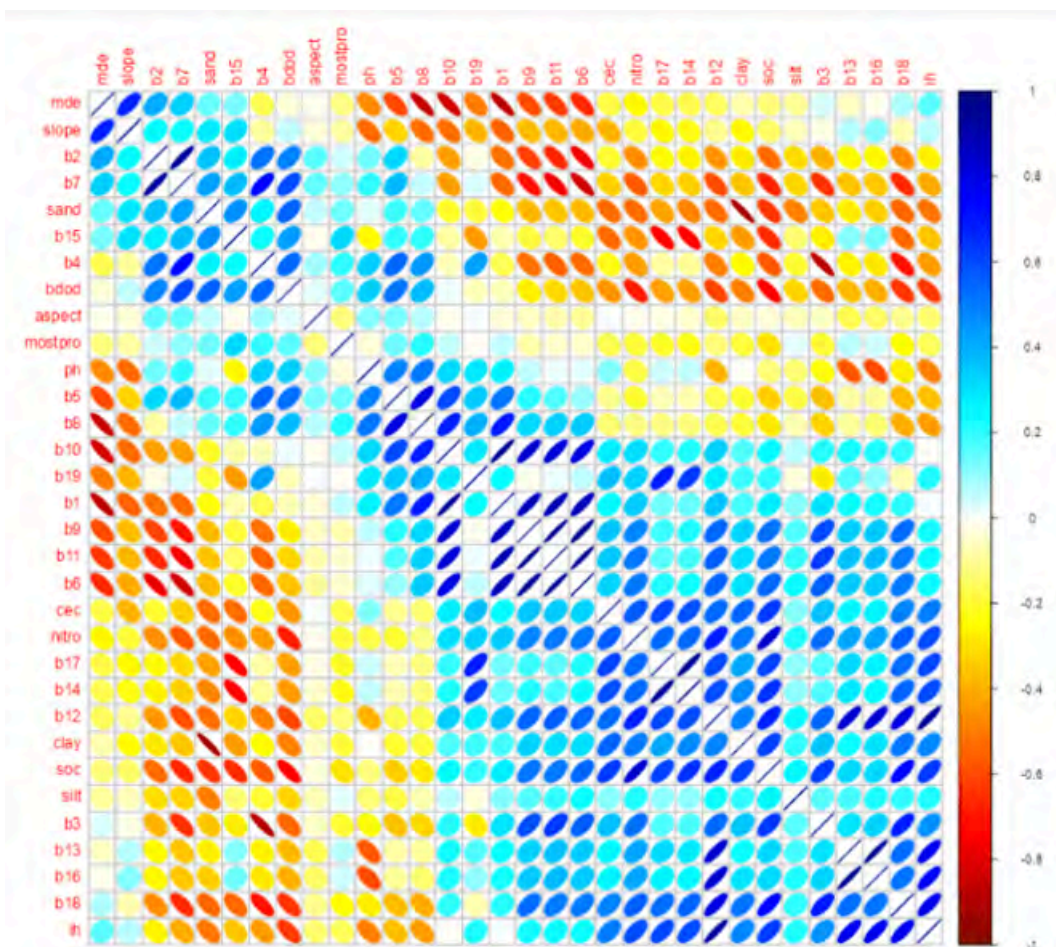
Se consideraron áreas idóneas aquellas superficies clasificadas con aptitud ecológica media y alta por ambos modelos, ya que representan condiciones ambientales favorables para el establecimiento potencial de *Agave angustifolia*. Con el propósito de reducir errores de sobreestimación espacial y aumentar la aplicabilidad territorial de los resultados, estas áreas fueron posteriormente intersectadas con capas de uso de suelo compatibles con actividades agrícolas y de restauración. La delimitación se basó en capas del INEGI (2018), SNIGF-CONAFOR y CONANP (2023), procesadas en ArcMap™ 10.5.

Resultados y discusión

Correlación de Pearson

La prueba de correlación de Pearson identificó 21 variables no redundantes para modelar la distribución de *A. angustifolia*, con coeficientes de correlación entre -0.85 y 0.85 ($p < 0.0001$), lo que permitió eliminar variables altamente colineales (Dormann *et al.*, 2013) (Figura 2).

Figura 2. Pruebas de correlación de Pearson entre variables edafoclimáticas.



Métricas de precisión de los modelos

Los valores AUC fueron 0.898 para MaxEnt y 0.931 para Random Forest, considerados como 'bueno' y 'excelente' respectivamente (Romo *et al.*, 2013). Ambos modelos mostraron capacidades predictivas adecuadas según los valores AUC obtenidos; sin embargo, esta métrica fue interpretada únicamente como un indicador general de desempeño y no como evidencia concluyente de superioridad entre algoritmos.

La contribución de las variables edafoclimáticas empleadas para generar los modelos de distribución potencial del maguey espadín, mediante MaxEnt y Random Forest, se presenta en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Contribución de cada variable al modelado de *A. angustifolia*.

Número	MaxEnt		Random Forest	
	Variables	(%)	Variables	(%)
1	B13	35.5	B1	21.6
2	B1	27	B12	11.7
3	B3	11.3	Ph	11.5
4	B19	4.8	B8	10.2
5	Ph	4	B13	9
6	B15	3.3	Nitro	7
7	B18	2.9	B3	6.5
8	B14	2.4	B5	5.6
9	Silt	1.8	Mostpro	5
10	B8	1.6	B14	3.7
11	Nitro	1.4	B18	3.5
12	Mostpro	1.3	B19	2.5
13	Clay	1	Clay	1.1
14	Slope	0.8	B15	0.6
15	B12	0.6	Slope	0.3
16	B5	0.3	Silt	0.2

Se eliminaron cinco variables con baja aportación (<5%). En MaxEnt, predominó la influencia de variables climáticas relacionadas con precipitación y temperatura, particularmente B13, B1, B3 y B19, lo que sugiere que el algoritmo restringe principalmente la distribución potencial de *Agave angustifolia* a condiciones climáticas específicas.

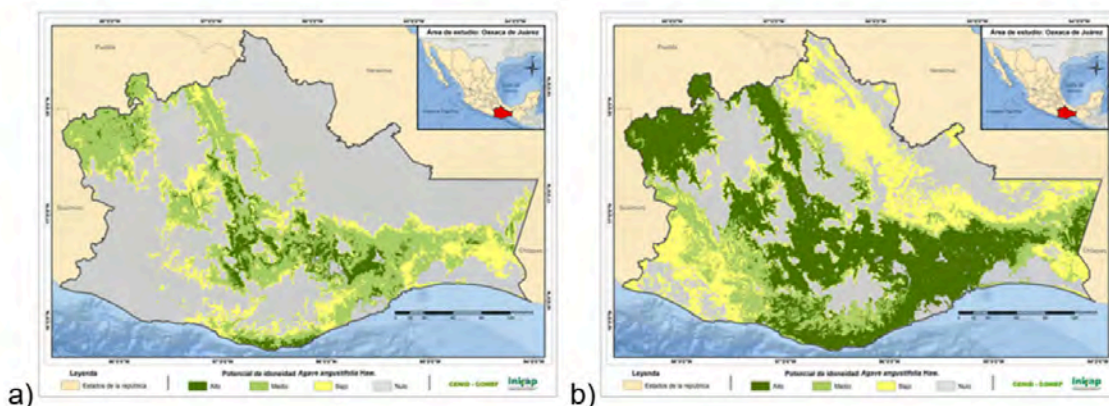
En contraste, Random Forest asignó mayor importancia no solo a variables climáticas, sino también a factores edáficos como pH y nitrógeno del suelo, indicando una mayor sensibilidad a condiciones ambientales locales y a interacciones complejas entre variables.

Distribución espacial del agave espadín

MaxEnt estimó como apto el 39.3% del estado, pero solo 4.77% con alta aptitud. En cambio, Random Forest indicó un 70.2% de área apta, de la cual el 30.6% fue clasificada como alta (Figura 3).



Figura 3. Distribución del potencial de *A. angustifolia* en el estado de Oaxaca: a) MaxEnt; y b) Random Forest.



Estas diferencias reflejan la mayor sensibilidad de Random Forest, como lo respaldan otros estudios (Chunrong *et al.* , 2017 ; Valavi *et al.* , 2021). En la categoría 'alta', Random Forest identificó un 25.8% más de superficie que MaxEnt.

Los resultados del modelo MaxEnt en Oaxaca resaltan que la aptitud alta se concentra principalmente en la zona central del estado, en el sureste y en menor medida, en el sur. Mientras que con Random Forest se localiza en una amplia extensión por toda la entidad (Cuadro 3).

Cuadro 3. Superficies por categorías de aptitud para *A. angustifolia* .

Potencial	MaxEnt		Random Forest	
	(km ²)	(%)*	(km ²)	(%)*
Alta	4 475.89	4.77	28 700.97	30.61
Media	20 890.95	22.28	14 870.79	15.86
Baja	11 516.76	12.28	22 252.72	23.73
Total	36 883.61	39.34	65 824.49	70.21

*= % con respecto a la superficie total que cubre el estado (93 757.6 km²).

De acuerdo con el Cuadro 3 , el modelo MaxEnt estimó que aproximadamente el 40% del estado de Oaxaca es apto para el cultivo de *Agave angustifolia* ; sin embargo, únicamente el 4.77% de dicha superficie (4 475.89 km²) fue clasificada como de alta aptitud. En contraste, el modelo Random Forest identificó como apto el 70.21% del territorio estatal, de los cuales el 30.61% corresponde a zonas de alta aptitud.

Estos resultados evidencian diferencias notables entre ambos algoritmos en la superficie potencialmente adecuada para el cultivo del agave mezcalero. Las diferencias observadas entre MaxEnt y Random Forest pueden explicarse por las características metodológicas de cada algoritmo. MaxEnt utiliza un enfoque basado en la máxima entropía que restringe las predicciones a condiciones ambientales similares a las de los registros de presencia empleados durante el entrenamiento del modelo, lo que genera estimaciones espacialmente más conservadoras.

En contraste, Random Forest emplea múltiples árboles de decisión ensamblados capaces de identificar relaciones complejas y no lineales entre variables climáticas, edáficas y topográficas. Esta capacidad incrementa la sensibilidad del algoritmo para detectar ambientes potencialmente adecuados, lo que puede traducirse en una expansión considerable de las superficies clasificadas como aptas.

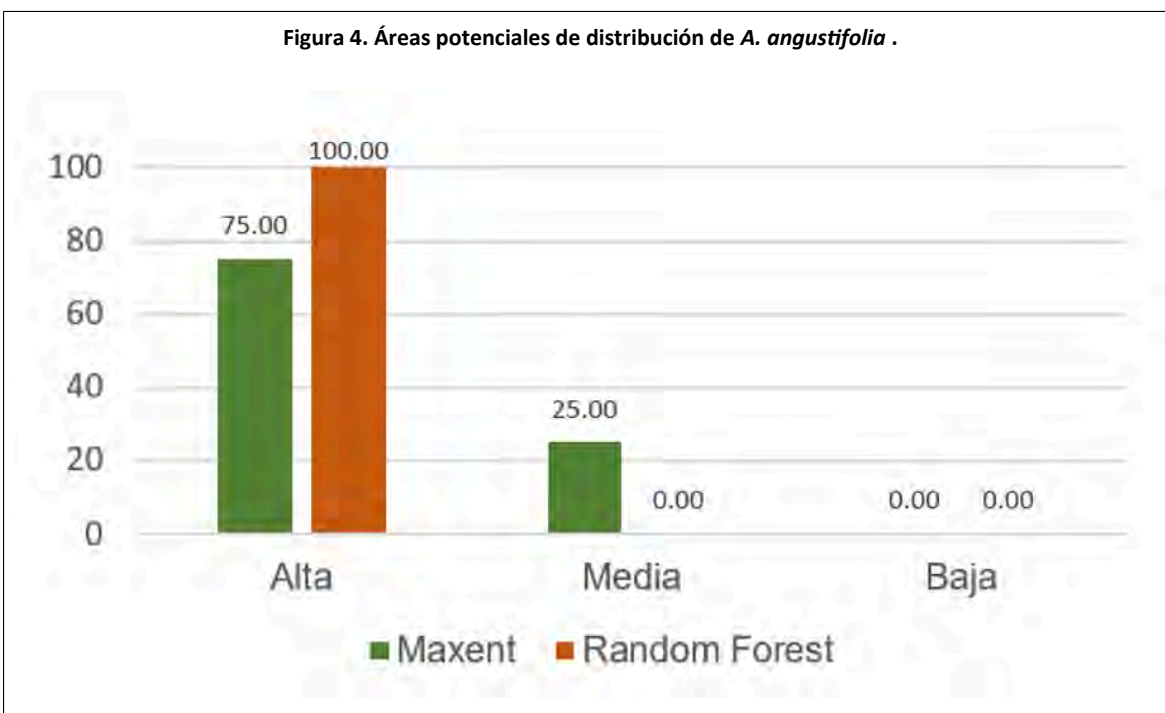
En el presente estudio, estas diferencias metodológicas produjeron discrepancias importantes en la estimación de áreas con alta aptitud para *Agave angustifolia* , particularmente en regiones

ambientalmente intermedias o marginales. Esto sugiere que la elección del algoritmo constituye una fuente relevante de incertidumbre espacial en los estudios de distribución potencial (Chunrong *et al.*, 2017; Valavi *et al.*, 2021).

En el caso específico de *A. angustifolia*, Random Forest estimó un 25.84% más de superficie con aptitud alta en comparación con MaxEnt. Por otro lado, MaxEnt superó a Random Forest en la categoría de aptitud media con un 6.42% adicional, mientras que, en la categoría baja, Random Forest estimó un 11.45% más. Estas diferencias entre modelos coinciden con hallazgos reportados en la literatura, en los que se ha demostrado que la elección del algoritmo influye de manera significativa en los resultados.

Verificación de los mapas de idoneidad del agave

El modelo MaxEnt clasificó el 75% de los puntos de validación dentro de la categoría de aptitud alta y el 25% en aptitud media. Por su parte, Random Forest ubicó el 100% de los sitios verificados en zonas clasificadas como de alta aptitud (Figura 4).



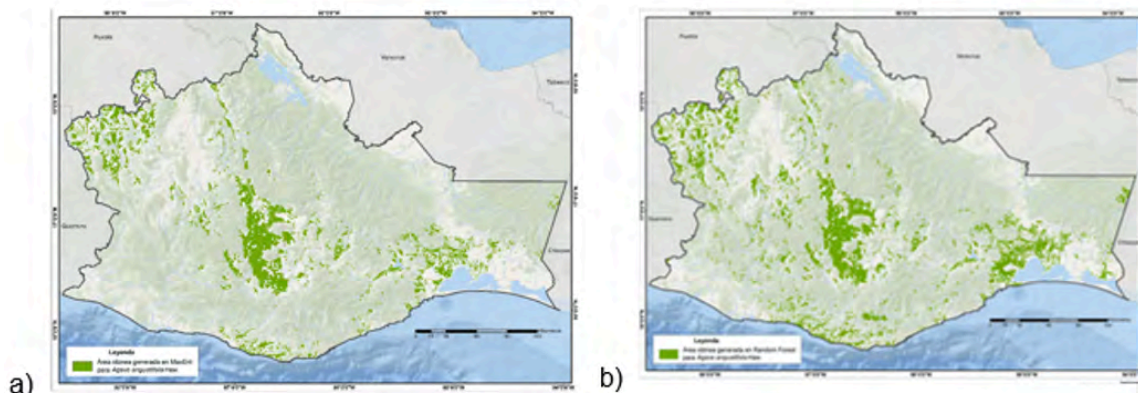
Por lo tanto, con ambos modelos, aunque fueron diferentes los porcentajes de validación, los dos tuvieron buen desempeño.

Identificación de áreas idóneas de plantaciones del agave

Los mapas de idóneas del maguey espadín se presenta en la Figura 5, la derivada de los algoritmos: a) MaxEnt; y b) Random Forest.



Figura 5. Superficie potencial para plantaciones de *A. angustifolia* : a) MaxEnt; y b) Random Forest.



La distribución del maguey espadín con ambos modelos se observa en una franja que se extiende del noroeste al sureste con una presencia amplia en la zona centro, mientras que la superficie idoneas y su porcentaje respecto al total estatal se muestran en el Cuadro 4 .

Cuadro 4. Superficie apta para establecer *A. angustifolia* en el estado de Oaxaca.

Uso de suelo	MaxEnt		Random Forest	
	(km ²)	(%)*	(km ²)	(%)*
Agricultura	4 903.09	5.23	7 794.99	8.31
Pastizal	1 661.85	1.77	1 698	1.81
Zonas destinadas a restauración	106 18	0.11	125.68	0.13
Total	6 671.12	7.12	9 618.67	10.26

*= % con respecto a la superficie total que cubre el estado (93 757.6 km²).

El modelo Random Forest estimó que el 10.25% del territorio de Oaxaca es idóneo para plantaciones de *Agave angustifolia* , mientras que MaxEnt calculó un 7.11%. La diferencia entre ambos modelos asciende a 3.14 puntos porcentuales, equivalentes a 2 947.55 km².

Debido a las diferencias espaciales observadas entre MaxEnt y Random Forest, se consideró el promedio de ambas estimaciones como una aproximación intermedia de consenso entre modelos para representar de manera más conservadora la superficie potencialmente apta para el establecimiento de *Agave angustifolia* .

Conclusiones

Las diferencias observadas entre MaxEnt y Random Forest evidencian que la delimitación de áreas aptas para *Agave angustifolia* depende significativamente del algoritmo utilizado. Esta discrepancia representa una fuente relevante de incertidumbre metodológica en estudios de distribución potencial y puede influir directamente en procesos de planificación territorial y expansión productiva del cultivo.

Mientras MaxEnt mostró una delimitación espacial más conservadora, Random Forest estimó superficies más amplias con aptitud alta, probablemente debido a su mayor sensibilidad para modelar relaciones ambientales complejas. No obstante, los resultados no permiten afirmar una superioridad absoluta de un modelo sobre otro, sino que reflejan diferencias metodológicas en la forma de representar la aptitud ecológica.

En consecuencia, el uso complementario de múltiples algoritmos puede contribuir a generar escenarios territoriales más robustos y útiles para apoyar estrategias de manejo sostenible del agave mezcalero en Oaxaca.

Además de su utilidad para la delimitación territorial de áreas aptas, este tipo de estudios puede contribuir al diseño de estrategias de manejo sustentable del agave mezcalero cuando se articulan con procesos participativos que involucren a productores locales y otros actores sociales vinculados a la cadena productiva del mezcal.

Bibliografía

- 1 Chunrong, M.; Huettmann, F.; Guo, Y.; Han, X. and Wen, L. 2017. Why choose random forest to predict rare species distribution with few samples in large undersampled areas? Three Asian crane species models provide supporting evidence. *PeerJ*. 5:e2849. <https://doi.org/10.7717/peerj.2849>.
- 2 CONANP. 2023. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Información espacial de las áreas naturales protegidas. <http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/info-shape.htm>.
- 3 Dormann, C. F.; Elith, J.; Bacher, S.; Buchmann, C.; Carl, G.; Carré, G.; García-Márquez, J. R.; Gruber, B.; Lafourcade, B.; Leitão, P. J.; Münkemüller, T.; McClean, C.; Osborne, P. E.; Reineking, B.; Schröder, B.; Skidmore, A. K.; Zurell, D. and Lautenbach, S. 2013. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*. 36(1):27-46. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x>.
- 4 Falk, H.; Yumin, G.; Xuesong, H. and Lijia, W. 2017. Why choose random forests to predict rare species distribution with few samples in large undersampled areas? Three Asian crane species models provide supporting evidence. *PeerJ*. 5:e2849. <https://doi.org/10.7717/peerj.2849>.
- 5 García-Mendoza, A. J. 2007. Los agaves de México. *Revista Ciencias*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). 87:14-23. <https://www.revistas.unam.mx/index.php/cns/article/view/12113>.
- 6 García-Mendoza, A. J. 2018. Los agaves de Oaxaca. *Boletín UNAM-DGCS-045*. <https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2018-045.html>.
- 7 GBIF. 2023. Global Biodiversity Information Facility. <https://www.gbif.org/>.
- 8 Gutiérrez-Hernández, O.; Artigas, R. C.; González, J. M. S. y García, L. V. 2018. Modelos predictivos en biogeografía: aplicación para la modelización de nichos ecológicos en geografía física. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*. 78:88-126. <https://doi.org/10.21138/bage.2395>.
- 9 Haile, A.; Desta, A. B. and Dejene, S. W. 2024. Modeling the distribution of *Aloe ankoberensis* and *A. debrana* under different climate change scenarios in North Shewa Zone, Amhara National Regional State, Ethiopia. *Ecological Processes*. 13(1):39. <https://doi.org/10.1186/s13717-024-00511-x>.
- 10 Hijmans, R. J. and Graham, C. H. 2006. The ability of climate envelope models to predict the effect of climate change on species distributions. *Global Change Biology*. 12(12):2272-2281. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01256.x>.
- 11 INEGI. 2018. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VII. Conjunto nacional. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842781>.
- 12 Romo, B. H.; Sanabria, P. and García-Barros, S. E. 2013. Predicción de los impactos del cambio climático en la distribución sobre las especies de Lepidoptera: el caso del género *Boloria* Moore, 1900 en la Península Ibérica (Lepidoptera: Nymphalidae). *SHILAP Revista de Lepidopterología*. 41(162):267-286.

- 13 Sánchez, N. S. and Garduño, R. L. 2008. Algunas consideraciones acerca de los sistemas de clasificación climática. *Contactos*. 68:5-10. <https://www.divulgameteo.es/fotos/meteoroteca/Sistemas-clasificaci%C3%B3n-clim%C3%A1tica.pdf>.
- 14 Serra, E.; Debolini, M.; Fraga, H.; Trabucco, A.; Mereu, V. and Spano, D. 2025. Machine learning and species distribution models for crops: A review. *Ecological Informatics*. 93:103563. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103563>.
- 15 Torres, I.; Casas, A.; Delgado-Lemus, A. and Rangel-Landa, S. 2013. Aprovechamiento, demografía y establecimiento de *Agave potatorum* en el Valle de Tehuacán, México: aportes ecológicos y etnobiológicos para su manejo sustentable. *Zonas Áridas*. 15(1):92-109. <https://doi.org/10.21704/ZA.V15I1.110>.
- 16 Valavi, R.; Guillera-Aroita, G.; Lahoz-Monfort, J. J. and Elith, J. 2021. Predictive performance of presence-only species distribution models: a benchmark study with reproducible code. *Ecological Modelling*. 92(1):e1486. <https://doi.org/10.1002/ecm.1486>.



Aptitud del terreno para el establecimiento de plantaciones de agave espadín en Oaxaca

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
ISSN (electronic): 2007-9230
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (México)

Article/Issue Information
Date received: 01 March 2026
Date accepted: 01 June 2026
Publication date: 01 August 2026
Electronic Location Identifier: e4002
DOI: 10.29312/remexca.v17i5.4002

Categories

Subject: Artículo

Palabras clave:

Palabras clave:

Agave angustifolia Haw.

distribución potencial

MaxEnt

Random Forest

Counts

Figures: 5

Tables: 4

Equations: 0

References: 16