



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

EVALUACIÓN INTEGRAL DE UNA PLANTACIÓN FORESTAL COMERCIAL
PROVENIENTE DE UN ACAHUAL ENRIQUECIDO

TESIS DE GRADO

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

Presenta:

CARLOS ALDAIR CONTRERAS CRUZ

Bajo la supervisión de:

DR. FRANCISCO JOSÉ ZAMUDIO SÁNCHEZ



APROBADA



Chapingo, Estado de México, octubre de 2021.



EVALUACIÓN INTEGRAL DE UNA PLANTACIÓN FORESTAL COMERCIAL
PROVENIENTE DE UN ACAHUAL ENRIQUECIDO

Tesis realizada por **Carlos Aldair Contreras Cruz** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR:



DR. FRANCISCO JOSÉ ZAMUDIO SÁNCHEZ

ASESOR:



DR. HUGO RAMÍREZ MALDONADO

ASESOR:



DR. CELESTINO FLORES LÓPEZ

ASESOR:



DR. ALEJANDRO CORONA AMBRIZ

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
AGRADECIMIENTOS	ix
DEDICATORIAS	xi
DATOS BIOGRÁFICOS	xiv
RESUMEN GENERAL	xv
GENERAL ABSTRACT	xvi
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. Objetivo general.....	3
1.2. Objetivos particulares	3
1.3. Literatura citada	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1. Plantaciones forestales.....	5
2.1.1. Plantaciones industriales.....	5
2.1.2. Plantaciones sociales y comunitarias	7
2.1.3. Plantaciones de amortiguamiento	8
2.1.4. Plantaciones de rehabilitación y restauración.....	9
2.1.5. Plantaciones para secuestro de carbono (C).....	9
2.1.6. Plantaciones de enriquecimiento.....	10
2.2. Evaluación forestal	11
2.2.1. Modelos de crecimiento	14
2.3. Evaluación financiera.....	22

2.3.1.	Valor actual neto (VAN).....	24
2.3.2.	Periodo de repago.....	24
2.3.3.	Tasa interna de retorno (TIR).....	24
2.3.4.	Relación beneficio-costo (RBC).....	25
2.3.5.	Análisis de sensibilidad	26
2.4.	Rotación económicamente óptima	26
2.5.	Análisis de riesgo.....	29
2.5.1.	Método de simulación de Monte Carlo (SMC)	30
2.6.	Literatura citada	31
3.	EVALUACIÓN FINANCIERA CON FACTORES DE RIESGO EN UNA PLANTACIÓN FORESTAL	40
3.1.	Resumen	40
3.2.	Introducción	41
3.3.	Materiales y métodos.....	44
3.3.1.	Área de estudio	44
3.3.2.	Evaluación forestal	44
3.3.3.	Ajuste de los modelos de crecimiento.....	45
3.3.4.	Evaluación financiera y análisis de sensibilidad.....	46
3.3.5.	Determinación de la edad óptima de rotación.....	49
3.3.6.	Análisis de riesgo	49
3.4.	Resultados.....	51
3.4.1.	Modelos de estimación de volúmenes de cosecha	51
3.4.2.	Caracterización financiera y sensibilidad del proyecto.....	53

3.4.3. Edad de rotación óptima	56
3.4.4. Análisis de riesgo	58
3.5. Discusión	60
3.6. Conclusiones	63
3.7. Literatura citada	64
4. DISCUSIÓN GENERAL	73
5. CONCLUSIÓN	76

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Modelos de crecimiento usados en silvicultura.....	21
Cuadro 2. Modelos ajustados para las especies de interés.	45
Cuadro 3. Valores de las variables usados en el análisis de sensibilidad.	49
Cuadro 4. Estadísticos de bondad de ajuste y parámetros estimados de los modelos.....	51
Cuadro 5. Modelos de rendimiento forestal para las especies de interés.....	52
Cuadro 6. Probabilidad de éxito y estadísticos de los indicadores económicos.	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Plantación forestal comercial de primavera (<i>Tabebuia donell-smithii</i>), en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.....	6
Figura 2. Establecimiento de plantación de amortiguamiento de especies tropicales, en el estado de Oaxaca.....	8
Figura 3. Plantación forestal de caoba (<i>Swietenia macrophylla</i>) y cedro rojo (<i>Cedrela odorata</i>) en combinación con acahual, en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.	10
Figura 4. Curvas de índice de sitio basadas en un modelo de crecimiento	13
Figura 5. Curva sigmoide y su primera derivada (incremento corriente) del crecimiento acumulado de una especie forestal	16
Figura 6. Predicción de la altura dominante (m), con el modelo de Gompertz, para <i>Pinus ayacahuite</i>	17
Figura 7. Predicción de la productividad maderable ($m^3 ha^{-1}$), con el modelo de Chapman-Richards, en plantaciones forestales.....	18
Figura 8. Predicción de altura dominante (m) en bosques naturales.....	19
Figura 9. Predicción de altura dominante (m) en plantaciones de <i>Cedrela odorata</i>	20
Figura 10. Técnicas de evaluación de proyectos	23
Figura 11. Curvas de edad de rotación económicamente óptima (A) y técnicamente óptima (B).....	28
Figura 12. Modelo determinístico y modelo estocástico	31
Figura 13. Curvas de volumen promedio por árbol pronosticadas a los 25 años para las cuatro especies de interés comercial	52
Figura 14. Diferentes valores de VES al variar (a) los precios por producto, (b) los costos de establecimiento y (c) las tasas de actualización.....	54

Figura 15. Comportamiento del VES ante cambios en la tasa de actualización y el precio por producto en el mercado.....	55
Figura 16. Edades de rotación óptima con costos marginales a diferentes tasas de actualización y el escenario base.	56
Figura 17. Edad de rotación óptima desde la perspectiva de los crecimientos en las tasas de VES y el valor de CETES + 1.....	57
Figura 18. Escenarios estocásticos de VES y edad de rotación óptima.	58
Figura 19. Histograma de los valores más posibles y probabilidad de éxito de los indicadores económicos.	60

AGRADECIMIENTOS

A Dios; gracias, señor, por concederme el don de una vida llena, abundante; por poner en mi camino a personas nobles que me han enseñado valores; por permitirme vivir con almas que me han brindado su amor, cariño y amistad; gracias también por el gozo de lograr un objetivo tan importante, sin duda a través de tu sabiduría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT); por el apoyo económico brindado y demás facilidades para mis estudios de posgrado. Sin duda, el desarrollo científico y tecnológico es la pauta para un mejor futuro nacional.

Infinitamente, a la Universidad Autónoma Chapingo, mi alma mater, especialmente a la División de Ciencias Forestales, por abrigarme en mis estudios de posgrado.

Al Dr. Francisco José Zamudio Sánchez, por su docta y pulcra dirección en el desarrollo de mi trabajo de investigación, por la motivación constante a esforzarme.

Al Dr. Celestino Flores López; por formar parte de mi comité asesor, por sus consejos en campo y por la detallada revisión de este trabajo, los cuales enriquecieron la obra que se presenta.

Al Dr. Hugo Ramírez Maldonado; por formar parte del comité asesor y por sus acertados comentarios sobre la redacción del trabajo aquí presentado.

Al Dr. Alejandro Corona Ambriz; por el acompañamiento y atención prestada durante el desarrollo estadístico de la tesis.

A Ing. Guadalupe C. Morales Pérez, los alumnos Miguel Nahúm Ramírez Velásquez, Brayan Ariel Matías Ruiz, Juana Betsabé Espinoza Guzmán y al trabajador Leobardo Ambrosio; por la invaluable ayuda en el levantamiento de información en campo.

A los profesores de la División de Ciencias Forestales que compartieron conmigo su inigualable conocimiento y experiencia. Infinitamente, agradezco a la Dra. Adriana Ávalos Vargas que fue Cátedra CONACyT durante mis estudios en la Maestría en Ciencias; Dr. Gabriel Arcángel Rodríguez Yam; Dr. Antonio Villanueva Morales; su inigualable dedicación y constancia lograron fortalecer mi discernimiento en el campo estadístico.

A mi entrañable e inigualable maestro Ing. Carlos Francisco Romahn de la Vega (†), gracias por las enseñanzas, por compartir conmigo su amplio conocimiento y por mostrarme el hermoso mundo de la dendrometría.

Al Sr. José Luis López Pérez, dueño de la empresa Agrosilvícola San José, por brindarme las facilidades para realizar este trabajo.

A todos aquellos que omito y formaron parte de esta etapa de mi vida.

DEDICATORIAS

A mi madre, la Señora Adela Cruz Luna quien me dio la vida y sus consejos que me condujeron por el buen camino, quien sé que se alegra con mis triunfos, y me apoya en mis decisiones, porque a pesar de las adversidades siempre ha estado a mi lado.

A mi abuela, la Señora Juana Luna Ojeda, persona digna de todo mi respeto y admiración, quien con mano dura y consejos sabios supo educarme con integridad, yo soy el resultado de sus enseñanzas.

A mi tío, el señor Armando Cruz Luna, muestra tangible de esfuerzo, dedicación y constancia, quien me ha enseñado con el ejemplo que todo es posible en la vida. Gracias por su invaluable apoyo y dedicación para con mi persona.

A mis tíos Josefina, Guadalupe, Amada, Raúl y Nicolás (†) quienes son para mí un ejemplo de constancia y sencillez, gracias por los consejos y los deseos bien intencionados.

A mi tío, el señor Andrés Jijón Aragón (†), persona cabal y admirable, siempre recordaré que fue parte importante para hacer realidad mis sueños de superación, gracias por acompañarme a Chapingo por primera vez.

Al Ing. Pablo Valencia Martínez, por los consejos cosechados de su experiencia y por brindarme su amistad franca.

Al Ing. Juan Morales Hernández, por el apoyo y los consejos en campo, por permitirme además de todo esto, ser su amigo.

A mis primos, Mayren, Yeraldin, Paty, Armando, Lucero, Daniel, Doris, Elio, David, Yaneli e Iván, por motivarme constantemente a seguir adelante.

A mis sobrinos con quienes he compartido horas interminables de risas y alegría. Gracias a Miguel Ángel por brindarme su compañía desinteresadamente en la madrugada, cuando la investigación se mostraba interminable.

A mis amigos de la maestría: M.C. Mayra Itzel Velázquez, M.C. Alejandra Rodríguez, M.C. Joaquín Parra y M.C. Remedio Hernández, con quienes he compartido más que clases, la vida misma. Gracias por enseñarme que con dedicación y constancia se cosechan frutos a tiempo.

A mis amigos sin nombre y toda la fraternidad, que me mostraron el camino hacia la paz en un periodo de interminables guerras internas. Que me han enseñado que se puede ser mejor y que se puede ser diferente. Gracias a ellos comprendí que todo lugar es aquí y todo momento es ahora.

A una persona que, aunque no nombro, agradezco infinitamente su paso por mi vida, pues gracias a su influencia tomé la decisión de estudiar la maestría. Parodiando al poeta: “porque después de todo he comprendido que lo que el árbol tiene de florido vive de lo que tiene sepultado”.

A todos aquellos que directa e indirectamente han influido en mi superación personal.

Con cariño: Carlos Aldair.

INSPIRACIÓN

“Mi madre es la mujer más bella que jamás conocí. Todo lo que soy, se lo debo a mi madre. Atribuyo todos mis éxitos en esta vida a la enseñanza moral, intelectual y física que recibí de ella. Soy el resultado de lo que una gran mujer quiso hacer de mí.”

“Acoge mis palabras, hijo mío, guarda mi enseñanza, que tu oído se abra a la sabiduría, que tu corazón se doblegue a la verdad, apela a la inteligencia y déjate guiar por la razón; busca la sabiduría como el dinero, como un tesoro escondido: entonces penetrarás en el temor de Yavé y hallarás el conocimiento de Dios.”

-PROVERBIOS 2:1-5

“Hay que medir lo que es medible, y lo que no lo es... hay que hacerlo medible.”

-Galileo Galilei, “el Mensajero de las Estrellas”

“Entrégate a Dios, tal como tú lo concibes. Admite tus faltas ante Él y ante tus semejantes. Limpia de escombros tu pasado. Da con largueza de lo que has encontrado y únete a nosotros. Estaremos contigo en la Fraternidad de Espíritu, y seguramente te encontrarás con algunos de nosotros cuando vayas por el camino del destino feliz. Que Dios te bendiga y conserve hasta entonces.”

-William Griffith Wilson (Bill W.)

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre	Carlos Aldair Contreras Cruz
Fecha de nacimiento	30 de mayo de 1991
Lugar de nacimiento	San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca
No. Cartilla militar	D-0938152
CURP	COCC910530HOCNRR09
Profesión	Ingeniero Forestal
Cedula profesional	09988060

Desarrollo académico

Originario de San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca, desarrolló sus estudios de Licenciatura en la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo, en el Estado de México, obteniendo el título de Ingeniero Forestal el 27 noviembre de 2015, con la tesis titulada: “Comparación de dos métodos de cubicación de árboles de primavera *Tabebuia donnell-smithii* en la costa de Oaxaca”.

En el verano de 2019 ingresó al Programa de Posgrado en Ciencias Forestales, en la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo.

RESUMEN GENERAL

EVALUACIÓN INTEGRAL DE UNA PLANTACIÓN FORESTAL COMERCIAL PROVENIENTE DE UN ACAHUAL ENRIQUECIDO¹

Las plantaciones forestales son una opción viable para abastecer la demanda de madera, trayendo consigo beneficios ambientales y económicos. El estudio técnico de estos proyectos permite estimar volúmenes a edades determinadas, incrementos, calidades de sitio, además de cotejar la rentabilidad a través de evaluaciones financieras y determinar la probabilidad de éxito de la inversión ante escenarios adversos, gracias a los análisis de riesgo estocástico. El objetivo de este trabajo fue determinar la rentabilidad mediante tres criterios financieros: valor actual neto, relación beneficio-costos, tasa interna de retorno; identificar las variables que afectan la rentabilidad del proyecto mediante un análisis de sensibilidad; calcular la edad de rotación a través de la fórmula de Faustmann y estimar el riesgo, mediante el método de Monte Carlo, de una plantación forestal en combinación con acahual, en la costa de Oaxaca, con un horizonte de planeación de 25 años, y tasas de actualización (costo del dinero) variables proporcionadas por los Certificados de la Tesorería de la Federación (Banco de México). Se pronosticaron los volúmenes esperados a los 25 años. Las existencias maderables revelan que técnicamente el proyecto es exitoso, los indicadores de rentabilidad refuerzan esta afirmación, mostrando una viabilidad económica superior a proyectos agrícolas o pecuarios, pero inferior a proyectos similares establecidos en la vertiente del Golfo de México. El análisis de sensibilidad prueba que las variables que influyen en la viabilidad de la inversión son las tasas de actualización y los precios de la madera. La edad de rotación óptima sugiere acortar el turno técnico, pues con el horizonte de planeación propuesto, el inversor tiende a perder sus beneficios económicos a medida que se pospone la cosecha; este razonamiento debe combinarse con la edad en que la madera alcanza la calidad demandada por el mercado, sugiriéndose un punto intermedio entre ambos criterios para cosechar. El análisis de riesgo indica que la probabilidad de éxito en este proyecto es alta, por lo que se recomienda iniciar una segunda rotación. El presente trabajo contribuye al sector forestal abordando una metodología diferente para el análisis de riesgo en donde además de involucrar variables financieras, se consideran daños por naturaleza biótica y meteorológica que pudieran generar escenarios adversos en el proyecto.

Palabras clave: Modelos de crecimiento, evaluación financiera, análisis de sensibilidad, edad de rotación, análisis de riesgo.

¹Tesis de Maestría en Ciencias, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Carlos Aldair Contreras Cruz

Director de Tesis: Dr. Francisco José Zamudio Sánchez

GENERAL ABSTRACT

INTEGRAL EVALUATION OF A COMMERCIAL FOREST PLANTATION FROM AN ENRICHED ACAHUAL²

Forest plantations are a viable option to supply the demand for wood, bringing environmental and economic benefits. The technical study of these projects allows estimating volumes at specified ages, increments, site qualities, in addition to collating profitability through financial assessments and determining the probability of success of the investment in adverse scenarios, through stochastic risk analysis. The aim of this work was to determine the profitability through three financial criteria: net present value, benefit-cost ratio, Internal rate of return; to identify identify the variables that affect the profitability of the project through a sensitivity analysis; calculate the rotation age using the Faustmann formula and to estimate the risk using the Monte Carlo method, of a forest plantation in combination with secondary vegetation on the coast of Oaxaca, with a planning horizon of 25 years, and variable discount rates (cost of money) provided by the *Certificados de la Tesorería de la Federación* (Bank of Mexico). Expected volumes were forecast at 25 years. Timber stocks indicate that the project has been technically successful, profitability indicators obtained reinforce this claim, showing economic viability above agricultural or livestock projects, but less than similar projects established on the Gulf of Mexico slope. Sensitivity analysis shows that the variables that influence the viability of the investment are discount rates and wood prices. The optimal rotation age suggests shortening the technical age, as with the proposed planning horizon, the investor tends to lose its economic benefits as the harvest is postponed; this reasoning should be combined with the age at which wood reaches the quality demanded by the market, suggesting an intermediate point between the two criteria for harvesting. The risk analysis indicates that the probability of success in this project is high, so it is recommended to start a second rotation. This paper contributes to the forest sector by approaching a different methodology for risk analysis where, in addition to involving financial variables, biotic and meteorological damage are considered, that could generate adverse scenarios in the project.

Keywords: Growth models, financial evaluation, sensitivity analysis, rotation age, risk analysis.

²Thesis, Universidad Autónoma Chapingo

Author: Carlos Aldair Contreras Cruz

Advisor: Dr. Francisco José Zamudio Sánchez

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La deforestación y la degradación de los bosques naturales ocurre de forma desenfrenada en todo el mundo, y la extracción maderable representa uno de los factores más importantes de ello (Dudley, Jeanrenaud, & Sullivan, 2014). Lo anterior genera grandes consecuencias para la biodiversidad, los diferentes servicios ambientales, las comunidades y sus economías (Pirard, Dal, & Warman, 2016). De este modo, un tema que ha cobrado gran relevancia en todo el mundo es la conservación y administración de los ecosistemas forestales (Horák et al., 2019).

Pirard, Dal, & Warman (2016) afirman que una alternativa viable para hacer frente a estos problemas son las plantaciones forestales, minimizando la pérdida de los ecosistemas, al reemplazar el abastecimiento de madera de los bosques naturales por madera proveniente de plantaciones forestales.

Los bosques plantados son fuente potencial de generación de ingresos. Además, generan beneficios socioeconómicos y ambientales tangibles e intangibles. Concretamente, el beneficio tangible es el abastecimiento de madera para fines industriales y de construcción, dentro de los bienes intangibles se cuenta con los servicios ambientales como la captura de carbono (C), la infiltración de agua de lluvia, la regulación del ciclo hidrológico y la conservación de la biodiversidad (Mohammadi, Limaiei, & Shahraji, 2019).

Necesariamente se destaca que las plantaciones forestales (sin incluir las plantaciones de palma de aceite) representan aproximadamente el 7% de la superficie mundial arbolada, y se intuye que este porcentaje crecerá a más del 20% en los próximos 100 años (Brockerhoff et al., 2013; Hansen et al., 2013). Actualmente, las plantaciones forestales suministran poco más del 33% del volumen total de madera en rollo que la industria demanda cada año a nivel mundial, y se predice que para el año 2040 este porcentaje de abastecimiento alcance hasta el 50% de la producción mundial (Verheyen et al., 2015).

Dentro de las plantaciones forestales existe una amplia diversidad en genotipos, especies, estructura y función, razón por la cual Bauhus, van der Meer, & Kanninen (2010) suponen que estas masas arboladas habrían de adaptarse con mayor éxito a las condiciones ambientales cambiantes en comparación con los monocultivos. Esto demanda el progreso de proyectos de plantaciones novedoso y con más diversidad arbórea que puedan mejorar la estabilidad, la producción y la generación de servicios ambientales. A pesar de que esto, se observa que los técnicos forestales se resisten a establecer plantaciones mixtas o de enriquecimiento de acahual, en muchas ocasiones guiados por la idea de que combinar genotipos y especies afecta el rendimiento dificultando el manejo forestal (Carnol et al., 2014).

Por otro lado, el análisis económico-financiero de estos proyectos permite determinar los periodos económicamente óptimos de rotación y la viabilidad de las inversiones. A pesar de que algunos investigadores han adoptado diversos métodos y criterios financieros para evaluar el desempeño económico de estos proyectos, la fórmula Faustmann, ofrece la solución más apropiada. Algunos indicadores importantes como el valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR) y relación beneficio costo (RBC), también se utilizan para evaluar la rentabilidad de los proyectos forestales, brindando información útil para la toma de decisiones con respecto a la inversión forestal (Restrepo & Orrego, 2015).

El presente documento corresponde a una evaluación integral de un proyecto de plantación forestal proveniente de un acahual enriquecido con cuatro especies de valor comercial. Se ajustaron modelos de crecimiento forestal, se efectuó una evaluación financiera y un análisis de riesgo mediante el método de Monte Carlo, para lo cual se hizo uso de datos colectados en muestreos consecutivos de 2010 a 2017 y el más reciente en 2020.

1.1. Objetivo general

- Evaluar la viabilidad financiera de la plantación forestal comercial Agrosilvícola “San José” que está sujeta a condiciones de riesgo.

1.2. Objetivos particulares

- Estimar los volúmenes de cosecha, haciendo uso de funciones de crecimiento aplicadas en el ámbito forestal, para proyectar el volumen de madera que será objeto de venta y así obtener los beneficios del proyecto.
- Obtener la viabilidad financiera del proyecto, determinando el valor actual neto (VAN), relación beneficio-costos (RBC), tasa interna de retorno (TIR).
- Identificar las variables que suponen riesgo a la viabilidad del proyecto.
- Determinar la edad de rotación económicamente óptima mediante la fórmula de Faustmann.
- Efectuar un análisis de riesgo mediante el método de simulación de Monte Carlo, para valorar la probabilidad de éxito del proyecto y sugerir su segunda rotación.

1.3. Literatura citada

Bauhus, J., van der Meer, P. J., & Kanninen, M. (2010). *Ecosystem Goods and Services from Plantation Forests*. Londres: Earthscan.

Brockerhoff, E. G., Jactel, H., Parrotta, J. A., Quine, C. P., & Sayer, J. (2008). Plantation forests and biodiversity: oxymoron or opportunity? *Biodiversity and Conservation*, 17(5), 925–951. <https://doi.org/10.1007/s10531-008-9380-x>

Carnol, M., Baeten, L., Branquart, E., Grégoire, J. C., Heughebaert, A., Muys, B., . . . Verheyen, K. (2014). Ecosystem services of mixed species forest stands and monocultures: comparing practitioners' and scientists' perceptions with formal scientific knowledge. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 87(5), 639–653. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpu024>

Dudley, N., Jeanrenaud, J.P., & Sullivan, F. (2014). *Bad Harvest: The Timber Trade and the Degradation of Global Forests*. Taylor & Francis. <https://doi.org/10.4324/9781315070445>

Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., . . . Townshend, J. R. G. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342(6160), 850–853.

<https://doi.org/10.1126/science.1244693>

- Horák, J., Brestovanská, T., Mladenović, S., Kout, J., Bogusch, P., Halda, J. P., & Zasadil, P. (2019). Green desert?: Biodiversity patterns in forest plantations. *Forest Ecology and Management*, 433, 343–348. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.019>
- Mohammadi, Z., Limaie, S. M., & Shahraji, T. R. (2019). Evaluating the Most Suitable Tree Species Using Land Expectation Value: A Case Study from Plantation in North of Iran. *Asian Journal of Agricultural Extension, Economics & Sociology*, 1–8. <https://doi.org/10.9734/ajaees/2019/v31i430138>
- Pirard, R., dal Secco, L., & Warman, R. (2016). Do timber plantations contribute to forest conservation? *Environmental Science & Policy*, 57, 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.12.010>
- Restrepo, H. I., & Orrego, S. A. (2015). A comprehensive analysis of teak plantation investment in Colombia. *Forest Policy and Economics*, 57, 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2015.05.001>
- Verheyen, K., Vanhellemont, M., Auge, H., Baeten, L., Baraloto, C., Barsoum, N., . . . Scherer-Lorenzen, M. (2015). Contributions of a global network of tree diversity experiments to sustainable forest plantations. *Ambio*, 45(1), 29–41. <https://doi.org/10.1007/s13280-015-0685-1>

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Plantaciones forestales

Las plantaciones forestales se definen como masas arboladas de especies principalmente introducidas y, en algunos casos, especies nativas, establecidas intencionalmente mediante plantación o siembra (Mohammadi, Limaie, & Shahraji, 2019), con una superficie mínima requerida de 0.5 a 1.0 hectáreas (ha); cobertura mínima de 10% al 30% de la superficie de suelos (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2020a); y una altura total mínima de los árboles adultos de cinco metros (m) (FAO, 2020b). Los principales objetivos de estos proyectos son esencialmente económicos, como la cosecha de madera en rollo y otros productos derivados de ésta. Aunque, de igual forma se establecen plantaciones con fines medioambientales como la conservación del agua y el suelo, la captura de C y en el proceso de reforestación y forestación (Stephens & Wagner, 2007).

Evans (2009) sugiere que las plantaciones forestales pueden clasificarse con base en el destino de la producción, de la siguiente manera:

2.1.1. Plantaciones industriales

Las plantaciones forestales industriales, o también llamadas comerciales son aquellas que se establecen con una orientación económica, es decir, son proyectos cuyos productos será objeto de venta (Musálem, 2006), principalmente carbón vegetal, pasta para papel y cartón, madera en rollo para aserrío (Evans, 2009). Generalmente se establecen como monocultivos de especies mayormente introducidas de rápido crecimiento, de rotaciones muy cortas (17 años en promedio) (Alvarez-Garretón, Lara, Boisier, & Galleguillos, 2019). Durante el curso de las rotaciones, el proyecto de plantación suministra los productos esperados, así como la contribución al progreso local y regional proveyendo oportunidades de empleo o apoyando económicamente las infraestructuras locales (Pirard, Petit, & Baral, 2017), también favorecen la reducción de la presión

sobre los bosques naturales, la purificación y regulación del agua, el ciclo de nutrientes, previene la erosión, conservación de la diversidad genética, la recreación y probablemente los valores culturales (Baral et al., 2016; D'Amato, Rekola, Wan, Cai, & Toppinen, 2017). Sin embargo, el principal objetivo de estos proyectos es la obtención de un producto comercial (Evans, 2009).



Figura 1. Plantación forestal comercial de primavera (*Tabebuia donell-smithii*), en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.
Fuente: elaboración propia (2020)

FAO (2020a) menciona que la mayor superficie correspondiente a plantaciones forestales comerciales se encuentra en la región de América del Sur, donde este tipo de plantación representa el 99% de la superficie plantada y únicamente el 2% de la superficie forestal total. En Europa, los proyectos de plantación forestal comercial, no ha cobrado importancia, puesto que representa solamente el 6% de la superficie forestal plantada y el 0.4% de la superficie forestal total.

2.1.2. Plantaciones sociales y comunitarias

Este tipo de proyectos surgen como una alternativa para compensar los daños causados a los ecosistemas naturales; tienen como objetivo reducir la deforestación, mantener la biodiversidad, mejorar el bienestar humano local (Bowler et al., 2012). De estas plantaciones se obtienen algunos productos para uso doméstico, como cercos vivos, la biomasa leñosa, frutas, medicinas (Peeters, Soto-Pinto, Perales, Montoya, & Ishiki, 2003), forraje para el alimento del ganado (Evans, 2009) y en algunos países como Indonesia, estas plantaciones son establecidas por comunidades para generar bioelectricidad y abastecer de bioenergía a muchos asentamientos rurales (Siregar, Narendra, Suryana, Siregar, & Weston, 2017).

Generalmente, estas plantaciones son cultivadas en pocas extensiones de superficie, preferentemente comunal, aledañas a alguna población (Köhlin & Amacher, 2005) y ordinariamente la especie de interés son árboles de rápido crecimiento (Siregar et al., 2017). Gracias a estos proyectos, se ha disminuido la presión sobre los bosques naturales (Köhlin & Amacher, 2005).

Las plantaciones sociales y comunitarias, fueron ampliamente promovidas en la década de los setentas y ochentas en algunos países africanos como Mauritania, Senegal, Malí, Burkina Faso, Níger, Nigeria (Evans, 2009), la India (Köhlin & Amacher, 2005) y otros lugares, mayormente en lugares característicos de trópicos subhúmedos, aunque el éxito de los proyectos no siempre fue frecuente. El fracaso de las plantaciones se debió a factores como a la inadecuada selección de las especies, litigios en la tenencia de la tierra, pero principalmente al desinterés o poca participación de las comunidades en la toma de decisiones (Evans, 2009).

Debido a algunas características similares, algunos autores clasifican a este tipo de plantaciones, como plantaciones forestales comerciales (por ejemplo, Musálem, 2006; Santika et al., 2017), aunque el tamaño puede ser, incluso de 0.01 ha (Evans, 2009).

2.1.3. Plantaciones de amortiguamiento

Zak et al. (2019) menciona que estas plantaciones son establecidas con el objetivo principal de regular la contaminación por nutrientes (nitrógeno (N), fósforo (P) y sedimentos) desde las tierras agrícolas a las aguas superficiales. Además de ello, se ha intuido que estos proyectos también contribuyen a la regulación del clima mediante el secuestro de C, proporcionan sombra para temperaturas extremas, funcionan como hábitats para diversas especies de aves, algunos anfibios y una variedad de polinizadores, así como oportunidades para la recreación y la educación ambiental (Stutter, Chardon, & Kronvang, 2012).



Figura 2. Establecimiento de plantación de amortiguamiento de especies tropicales, en el estado de Oaxaca.

Fuente: elaboración propia (2020)

Generalmente son cultivadas en zonas donde la pendiente es muy accidentada o la humedad es elevada, lo cual lo convierte en un área difícil para el establecimiento de cultivos agrícolas (Stutter et al., 2012). Evans (2009), opina

que, en algunas ocasiones, estas plantaciones se establecen en zonas aledañas a los bosques naturales, como una opción para obtener productos forestales, leñosos y no leñosos. De esta manera, las plantaciones de amortiguamiento minimizan la presión sobre el bosque natural.

2.1.4. Plantaciones de rehabilitación y restauración

Este tipo de plantaciones tienen como objetivo salvaguardar los recursos propios de los ecosistemas naturales (recursos hídricos, protección de los suelos contra la erosión), además favorecen la mitigación de las emisiones C y reducen la pérdida de biodiversidad vegetal (Weber, Stimm, & Mosandl, 2011). Se establecen en terrenos con suelo desnudo (por causas naturales o inducidas) y que en consecuencia están en riesgo de erosión (eólica o hídrica) (Musálem, 2006). Durante todo el desarrollo de estos proyectos, se busca mantener la biodiversidad inalterada y se desecha el uso de máquinas o intervenciones en el ecosistema, puesto que se aspira a obtener un bioma muy parecido al que originalmente existía en el sitio (Simoes Macayo & Renison, 2015).

Estos proyectos se han establecido con éxito en países como China o Namibia; generalmente adoptan un diseño de cinturones de protección, alrededor de los bosques naturales, y en ocasiones fungen como protección de cuencas hidrográficas (Simoes Macayo & Renison, 2015).

2.1.5. Plantaciones para secuestro de carbono (C)

Evans (2009), advierte que son pocas las plantaciones que se han establecido con el principal objetivo de capturar C y de esta manera mitigar el incremento del bióxido de carbono (CO₂) atmosférico. Generalmente las investigaciones sobre el secuestro de C son vastas, pero la mayoría de ellos se desenvuelven en proyectos que tiene como objetivo final la obtención de madera, otros productos comestibles o aprovechables (Kongsager, Napier, & Mertz, 2012).

2.1.6. Plantaciones de enriquecimiento

La plantación de enriquecimiento es un tratamiento rotacional en el cual se mezclan árboles para aprovechamiento de madera en rollo, cuyo valor económico es alto, con las especies arbóreas nativas de la sucesión secundaria (Soto Pinto et al., 2011); es decir, estos proyectos ofrecen la oportunidad de mermar los procesos de degradación reintroduciendo especies clave para apresurar el proceso de recuperación natural y paralelamente conservar la biodiversidad, principalmente en las zonas tropicales (Millet, Tran, Vien Ngoc, Tran Thi, & Prat, 2013).



Figura 3. Plantación forestal de caoba (*Swietenia macrophylla*) y cedro rojo (*Cedrela odorata*) en combinación con acahual, en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.
Fuente: elaboración propia (2020)

Este tipo de plantaciones han tenido un éxito considerablemente alto, debido a que conociendo los rasgos funcionales de las especies naturales que habitan en los sitios, es posible predecir el éxito de las especies a plantar, es decir se cuenta

con conocimiento previo sobre las características de las especies y su regeneración (Asanok et al., 2013), lo cual es de gran utilidad para el manejo forestal, concretamente, los tratamientos silvícolas, aplicados a las plantaciones de enriquecimiento, contribuyen al crecimiento de las especies comerciales, reducen la mortalidad de los individuos plantados, y los ataques de plagas en especies particulares como el llamado comúnmente barrenador de las Meliaceae (*Hypsipyla grandella*) que es considerado como la plaga principal que imposibilita el desarrollo de las especies pertenecientes a esta familia botánica y entre los vastos métodos propuestos para el control de este insecto, la plantación de enriquecimiento ha mostrado excelentes resultados (dos Santos & Ferreira, 2020).

2.2. Evaluación forestal

Para conseguir una administración adecuada de los recursos maderables, es necesario conocer la cantidad total de madera que existen en un predio o una plantación (Avery & Burkhart, 2015) y aunado a que dichas plantaciones son proyectos de inversión, cuyo turno técnico es relativamente largo, es necesario recurrir a las evaluaciones cada determinado tiempo y con ello asegurarse que los objetivos se están cumpliendo (Vega Alarcón, 2013). La información obtenida en los ecosistemas forestales, sirve de base para la toma de decisiones políticas en cualquiera de sus niveles hasta las operaciones involucradas en el manejo forestal (Liang et al., 2016).

De acuerdo con Liang et al. (2016), el principal objetivo del inventario forestal es coleccionar información de biomasa, volúmenes fustales y biodiversidad, desde un punto de vista estático, para este propósito se hace uso de la medición forestal, cuya función es proveer los datos numéricos obtenidos de mediciones directas, para tomar decisiones prudentes respecto al manejo forestal (Avery & Burkhart, 2015).

Los objetivos de las evaluaciones forestales, son variados, Costa & Suranga (2012) hicieron uso de la evaluación forestal para estimar las existencias de

biomasa y C de las plantaciones forestales existentes en Sri Lanka, utilizando relaciones alométricas; encontraron que las plantaciones forestales que representaban el 1% de la superficie total de Sri Lanka habían secuestrado una importante cantidad de C (4.91 millones de toneladas en 2008).

En el sureste de Brasil, Machado, Conceição, Leite, De Souza, & Wolff (2015), probaron la eficiencia del sistema dinámico (SD) para modelar y simular el crecimiento forestal en las plantaciones de eucalipto; los resultados obtenidos prueban que el sistema dinámico es una técnica de simulación muy eficiente para modelar el crecimiento de madera y secuestro de C en las plantaciones forestales. Principalmente, porque mostró sensibilidad a las variadas características edafoclimáticas en cada región, en consecuencia, se obtuvieron diferentes resultados con los mismos rasgos de especies, densidades y manejo.

Martínez-Zurimendi, Domínguez-Domínguez, Juárez-García, López-López, & Álvarez-Martínez (2015), evaluaron las plantaciones forestales comerciales de *Gmelina arborea*, en Tabasco, México, con el fin de ajustar modelos y poder predecir la cantidad de madera a cosechar, así como la edad a la que se alcanzará el turno técnico referente al diámetro de corta determinado, por medio del índice de sitio.

Wekesa et al. (2019) evaluaron plantaciones forestales aledañas a los campos agrícolas de pequeños agricultores en las costas de Kenia, con el objetivo de intuir la viabilidad financiera de estos proyectos, encuestaron a 282 agricultores, concluyendo que la especie más rentable para plantar en la región es *Casuarina equisetifolia*, además que la viabilidad financiera de las parcelas forestales está en función del nivel de integración en los sistemas agrícolas aledaños, la demanda en el mercado y el valor agregado a los productos comerciales.

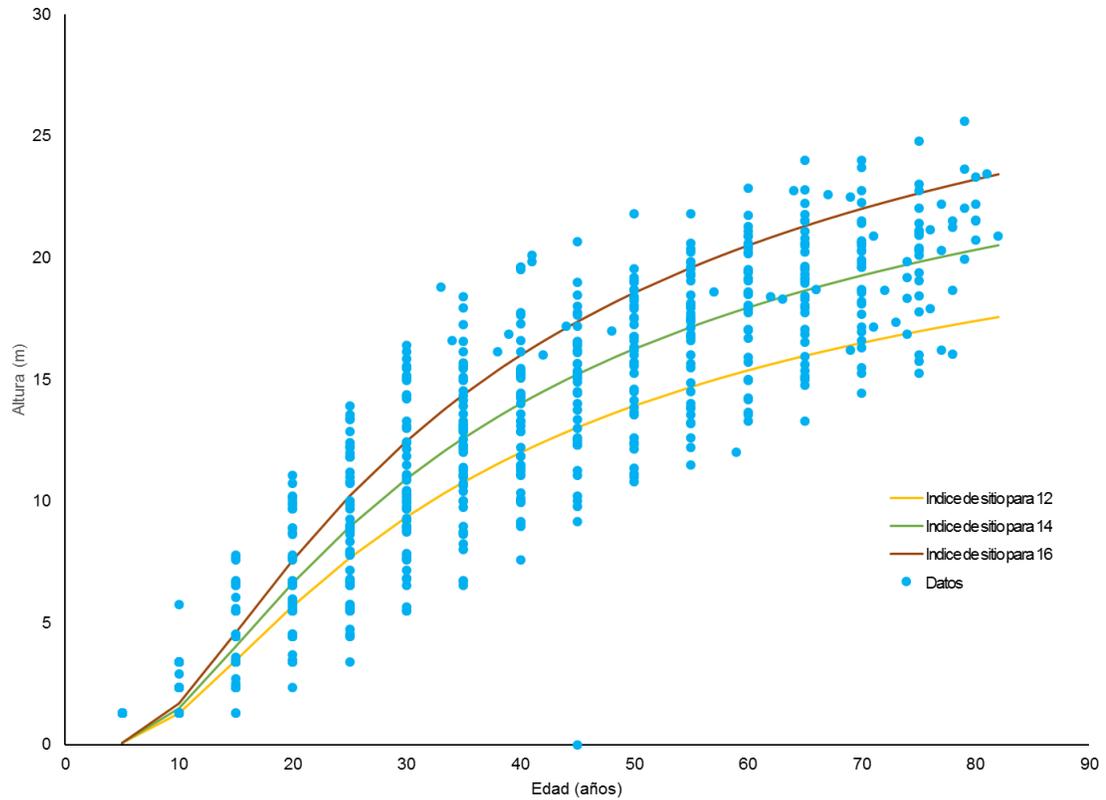


Figura 4. Curvas de índice de sitio basadas en un modelo de crecimiento
Fuente: elaboración propia (2020)

Freitas Alvarado, Zárate Gómez, Bardales Lozano, & del Castillo Torres (2019) evaluaron variables biométricas, para analizar el efecto de dos densidades de plantación de la palmera aguaje (*Mauritia flexuosa* L.); mostraron que la densidad de siembra está relacionada con el crecimiento en altura de forma directamente proporcional.

Siregar et al. (2017), evaluaron el crecimiento de plantaciones establecidas como fuente de bioelectricidad, por comunidades rurales en la isla Jawa; por medio de este estudio, mostraron que las mejores producciones de biomasa podrían generar entre 160 412 y 80 481 kilovatio hora (kWh) de electricidad. Por ello, se infiere que estos proyectos sostenibles están en capacidad de satisfacer la demanda de biomasa para producción de bioenergía en muchas localidades rurales.

Gracias a los estudios anteriores, se puede notar que también son necesarias las estimaciones de crecimiento para planificar los diferentes métodos de manejo y apoyar la toma de decisiones; debido a que los bosques son sistemas biológicos dinámicos (Avery & Burkhart, 2015), por lo tanto, el uso de las predicciones sobre el comportamiento futuro de las plantaciones forestales, se vuelve necesario. Las herramientas que permiten obtener información confiable sobre el comportamiento futuro de las plantaciones y masas forestales son los modelos de crecimiento y rendimiento (Hynynem, 2011).

2.2.1. Modelos de crecimiento

Los modelos son abstracciones de la realidad que buscan expresar las principales relaciones de un sistema. Existen modelos cuantitativos y cualitativos, todos están compuestos por diferentes campos de conocimiento. En consecuencia, los modelos generalmente tienen usos importantes y variados (Weiskittel, Hann, Kershaw, & Vanclay, 2011).

En el proceso de construcción y validación del modelo, son necesarios los datos empíricos (Weiskittel et al., 2011). Según Hynynem (2011) a pesar de que la forma que asume un modelo está influenciado continuamente por un conjunto de elementos de información que influyen en un objeto o característica a modelarse (volumen o crecimiento en diámetro), se requieren datos honrados para conseguir valores apropiados y poder ajustar los parámetros que componen el modelo. La bondad de los datos está afectada por qué tan apropiadamente los datos cubren la variación que existe en la población de interés, las variables colectadas y el valor de error aceptable en la medición (Weiskittel et al., 2011). Para la creación y desarrollo de estos modelos de crecimiento y rendimiento, se utilizan las técnicas estadísticas, las cuales se han desarrollado de una manera considerable en los últimos años (por ejemplo, modelos lineales mixtos, modelos no lineales, los modelos lineales generalizados) (Burkhart & Tome, 2012).

Kiviste, Álvarez González, Rojo Alboreca, & Ruiz González (2002) señalan que los modelos de crecimiento representan las variaciones que sufre el cuerpo de

un organismo o una población respecto al tiempo. Es posible resumir de forma sencilla, complejos procesos biológicos que experimentan los organismos, específicamente si se trata de un árbol o un bosque. El crecimiento de un árbol se define como el aumento irreversible de sus dimensiones a través del tiempo (Weiskittel et al., 2011; Bowman, Brienen, Gloor, Phillips, & Prior, 2013). Las variables más comúnmente evaluadas son el diámetro normal (medido a 1.3 m de altura del suelo) y la altura total, debido a que estas medidas están correlacionadas fuertemente con la variable volumen y, en consecuencia, con la biomasa. El área basal de los fustes, el volumen y otras variables importantes en estudios ecológicos pueden ser determinadas a partir del diámetro normal y la altura total (Bowman et al., 2013).

Kiviste et al. (2002) observan que si se grafica el crecimiento en tamaño de algunas de las variables de interés en un árbol o un conjunto de árboles (diámetro normal, altura total, área basal, volumen, etc.), durante toda su vida, se aprecia una curva de crecimiento tipo sigmoide. La curva en la Figura 5 exhibe primeramente una pendiente ascendente hasta llegar a un punto de inflexión, a partir del cual el crecimiento se hace más lento a medida que el tiempo transcurre, es decir, cuando la curva tiende a una asíntota paralela al eje de la variable edad (Machado et al., 2015).

Los modelos de crecimiento son de gran beneficio en el sector forestal, algunos de las utilidades que brindan son la predicción del crecimiento de los árboles individuales y el rodal (Semenzato, Cattaneo, & Dainese, 2011), construcción de curvas índice de sitio (Petrou, Kitikidou, Milios, Koletta, & Mavroyiakoumos, 2015); la información que se obtienen gracias a estos modelos, son indispensables para la confección de tablas de rendimiento (Camacho-Linton, Ramírez-Maldonado, de los Santos-Posadas, & Zamudio Sánchez, 2013), la planeación de los tratamientos silvícolas (Dufour-Kowalski, Courbaud, Dreyfus, Meredieu, & De Coligny, 2012), e incluso, su utilidad alcanza estudios fitosanitarios, monitoreo de la productividad, evaluación de beneficios socioeconómicos derivados del bosque, servicios ambientales como la captura

de C (Salas, Gregoire, Craven, & Gilabert, 2016). En los últimos años se ha desencadenado un interés en incrementar la utilidad de estos modelos de crecimiento y rendimiento, integrando procesos a grado de paisaje e incluso la administración de bosques no maderables (Semenzato et al., 2011).

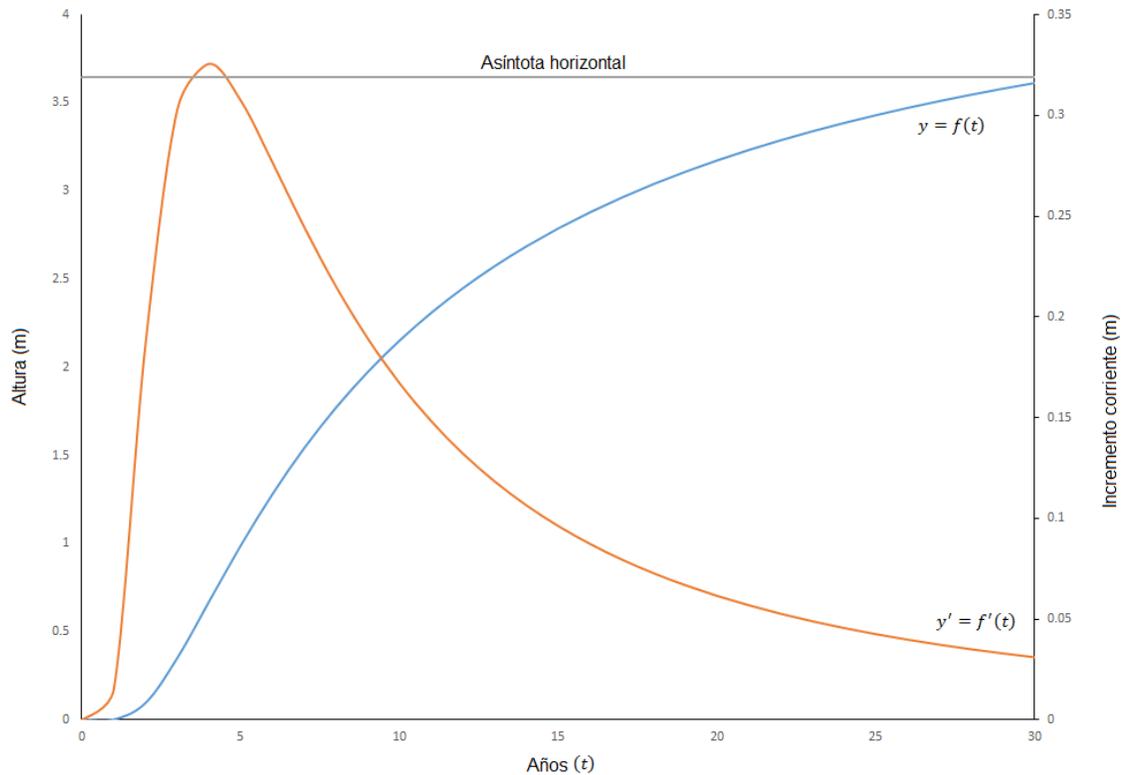


Figura 5. Curva sigmoide y su primera derivada (incremento corriente) del crecimiento acumulado de una especie forestal

Fuente: elaboración propia (2020) con datos de Vásquez-García, Cetina-Alcalá, Campos Bolaños, & Casal-Ángeles (2016).

Teniendo en cuenta a Kiviste et al. (2002), los modelos de crecimiento y rendimiento forestal, pueden ser clasificados según su expresión matemática y según su forma integral. Nigul et al. (2021) resalta que los modelos de crecimiento y rendimiento más comúnmente usados para evaluar el crecimiento forestal provienen del modelo de crecimiento ideado por von Bertalanffy, se caracterizan porque el proceso de crecimiento y los procesos fisiológicos son representados por medio de los parámetros de los modelos, habitualmente presentan un término de crecimiento y un término límite, generando una curva redondeada en forma de S (sigmoide).

Modelo de Gompertz: La primera propuesta de aplicar modelos en la predicción de fenómenos biológicos, fue probablemente la de Gompertz, (1825), modelando la esperanza de vida. La primera aplicación, propiamente al crecimiento, fue la realizada por Davidson (1928), quien predijo el crecimiento de la masa corporal de ganado usando el modelo Gompertz (Tjørve & Tjørve, 2017). La expresión matemática del modelo es la siguiente (Hernández-Cuevas, Santiago-García, de los Santos-Posadas, Martínez-Antúnez, & Ruiz-Aquino, 2018):

$$v = \beta_0 e^{\beta_1 e^{\beta_2 E}} \quad (1)$$

En la Figura 6, se aprecia el comportamiento de la altura dominante (m), a diferentes edades en un rodal de *Pinus ayacahuite*, publicado por (Hernández-Cuevas et al., 2018).

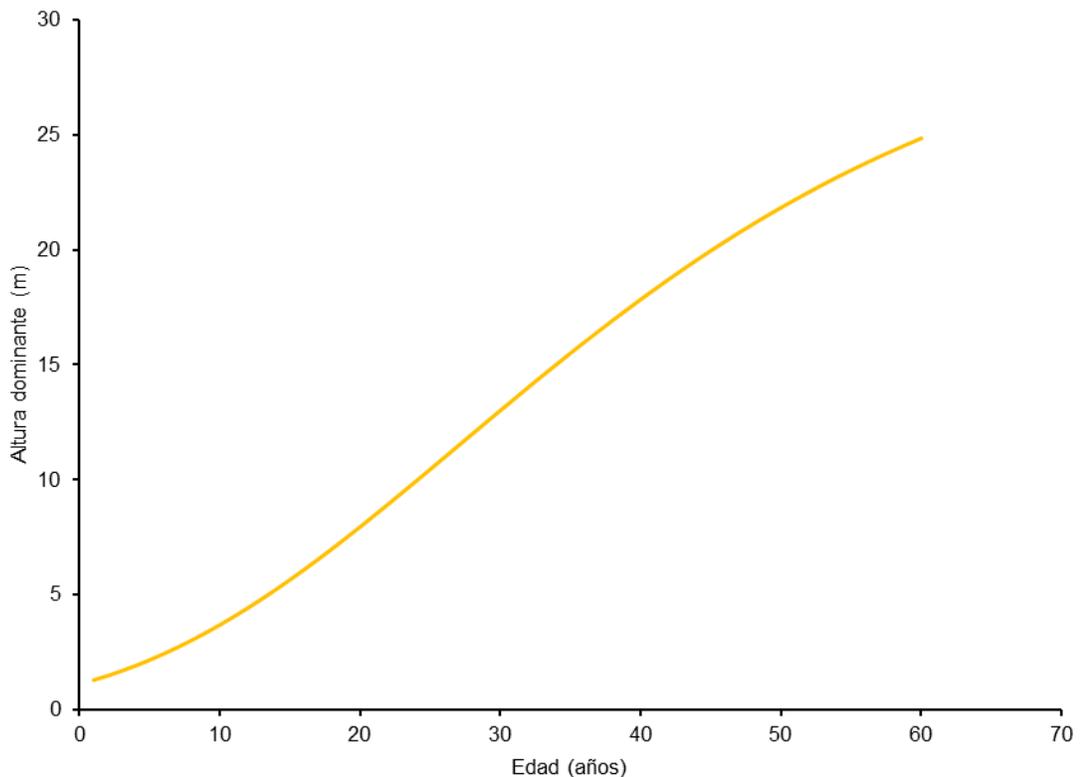


Figura 6. Predicción de la altura dominante (m), con el modelo de Gompertz, para *Pinus ayacahuite*

Fuente: elaboración propia (2020) con datos Hernández-Cuevas et al. (2018).

Modelo de Chapman-Richards: El modelo fue propuesto por el fisiólogo Richards (1959) para describir el comportamiento de plantas; se ha denominado también como modelo de Chapman-Richards. Fue obtenido del modelo von Bertalanffy, por esta razón en algunas ocasiones también se ha llamado como modelo de Bertalanffy-Richards. En la Figura 7 se puede observar la curva del comportamiento de la productividad ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) en plantaciones forestales, predicho por el modelo de Chapman-Richards, reportados por Guera, da Silva, Caraciolo Ferreira, Álvarez Lazo, & Barrero Medel (2019).

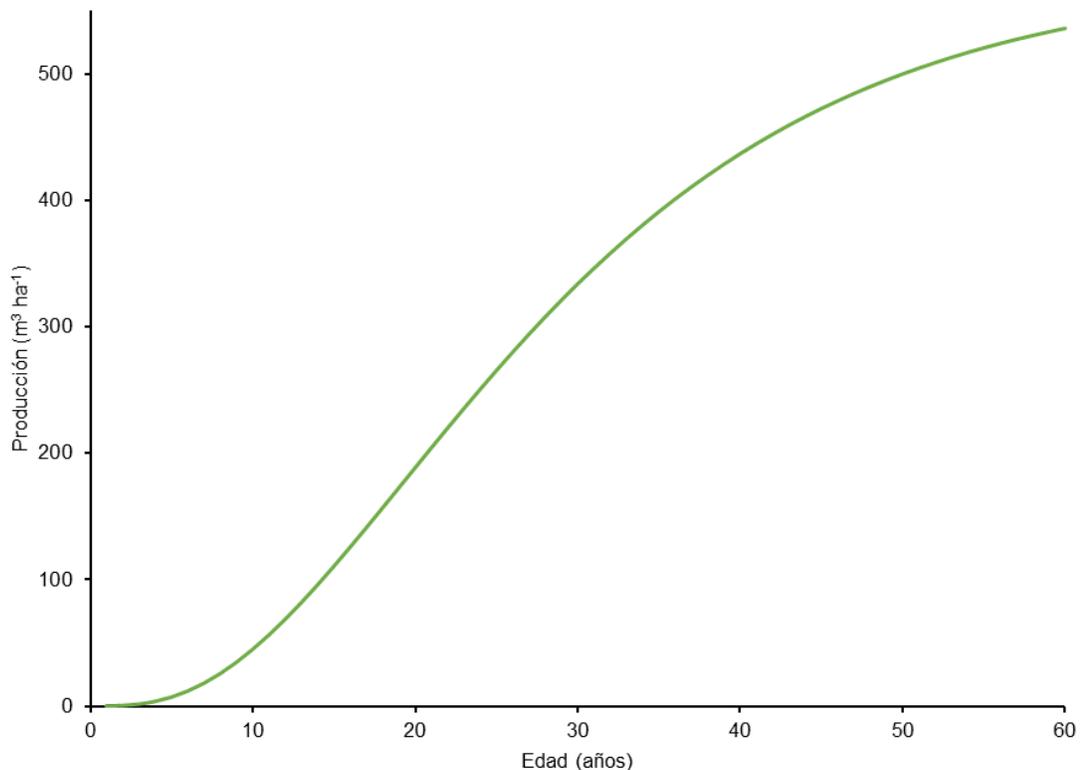


Figura 7. Predicción de la productividad maderable ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$), con el modelo de Chapman-Richards, en plantaciones forestales
Fuente: elaboración propia (2020) con datos de Guera et al. (2019).

Esta expresión es una opción racional para representar el crecimiento biológico. Su uso ha sido generalizado para fenómenos como epidemias, crecimiento de aves, caimanes, mamíferos y crecimiento de masas forestales (Tjørve & Tjørve, 2017). La forma algebraica del modelo es la siguiente (Kiviste et al., 2002):

$$v = \beta_0(1 - e^{-\beta_1 E})^{\beta_2} \quad (2)$$

Modelo de Schumacher: Este modelo es usado con frecuencia para ajustar con mayor certeza una amplia variedad de curvas de crecimiento, a menudo esta expresión también es denominada modelo de Johnson-Schumacher; fue planteado por Johnson (1935) y Schumacher (1939). La mayor parte de su uso se centra en la descripción del crecimiento de los árboles (Fang, Liu, & Huang, 2020).

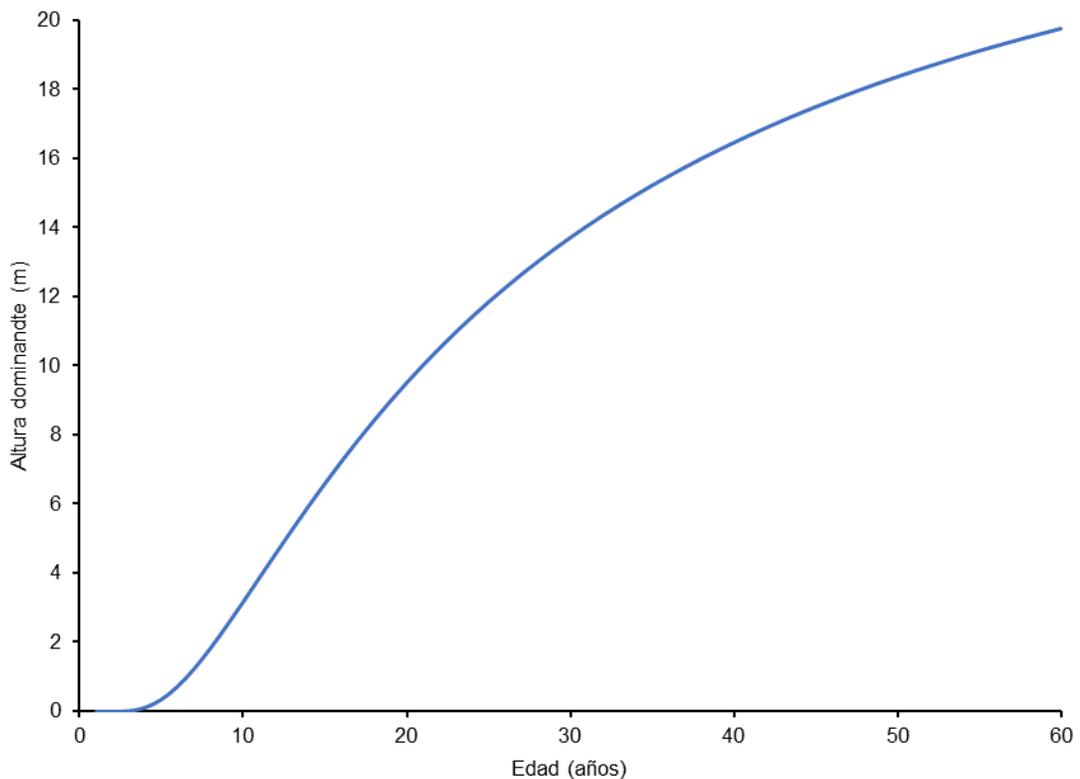


Figura 8. Predicción de altura dominante (m) en bosques naturales
Fuente: elaboración propia (2020) con datos de Hernández-Ramos et al. (2018).

En la Figura 8 se aprecia la curva del modelamiento de la altura dominante por el modelo de Schumacher en bosques naturales de *Pinus teocote* del estado de Hidalgo, obtenidos por Hernández-Ramos et al. (2018).

El modelo tiene la expresión algebraica (Vásquez-García et al., 2016):

$$v = \beta_0 e^{-\frac{\beta_1}{E}} \quad (3)$$

Siendo $\beta_0 > 0$ y $\beta_1 > 0$, v es el volumen a cualquier edad; β_0 es el factor que expresa el límite asintótico de la variable respuesta del árbol, β_1 es el parámetro que establece la tasa de crecimiento de la variable respuesta del árbol (Fang et al. 2020).

Modelo logístico: Este modelo fue ideado por Verhulst (1845), estudiando el crecimiento de la población, después fue usado para predicciones en el estudio de crecimiento bacteriano, por McKendrick & Pai (1912). En el período de 1940, fue aplicada la regresión por mínimos cuadrados ordinarios para ajustar los modelos sigmoides (incluido el modelo logístico) con una asíntota superior (Tjørve & Tjørve, 2017). En la Figura 9, se aprecia la predicción de altura dominante (m) usando el modelo logístico, obtenidos de Murillo-Brito et al. (2017).

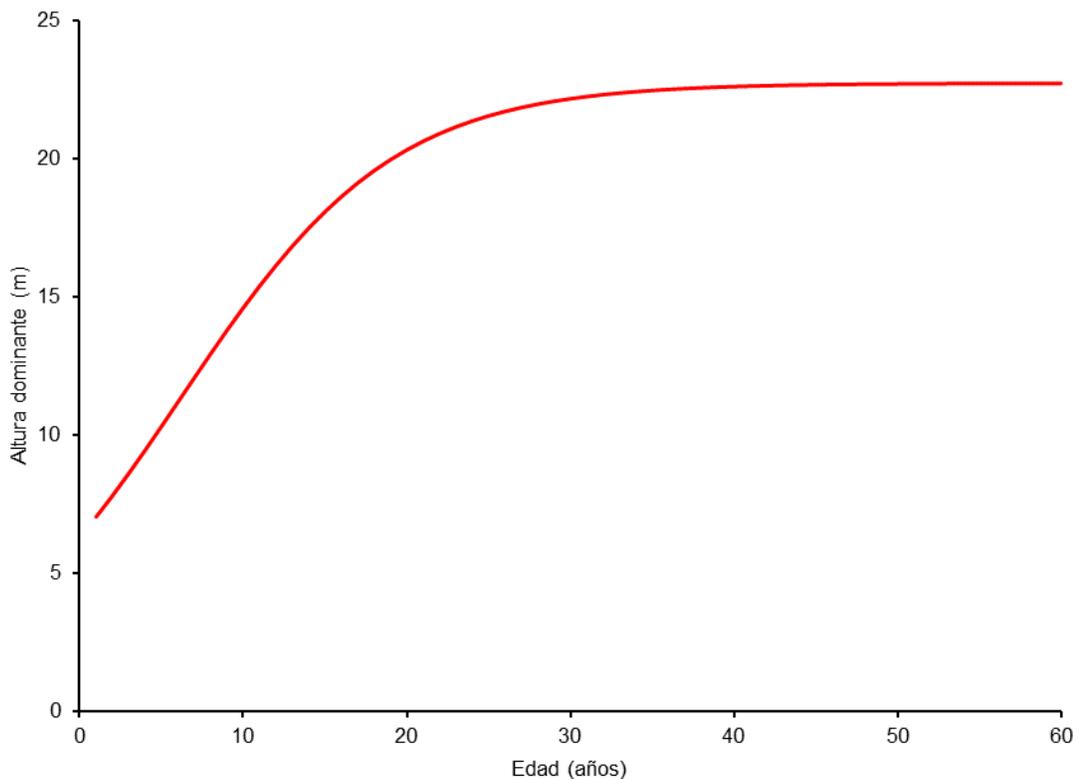


Figura 9. Predicción de altura dominante (m) en plantaciones de *Cedrela odorata*
Fuente: elaboración propia (2020) con datos de Murillo-Brito et al. (2017).

La expresión algebraica, correspondiente a este modelo se muestra en la ecuación 4 (Murillo-Brito, Domínguez-Domínguez, Martínez-Zurimendi, Lagunes-Espinoza, & Aldrete, 2017).

$$v = \frac{\beta_0}{1 + \beta_1 e^{\beta_2 E}} \quad (4)$$

Desde el punto de vista de Tjørve & Tjørve (2017), el enfoque actual para describir el crecimiento biológico sugiere ajustar los datos a un modelo sigmoideo con una asíntota superior, haciendo uso de la regresión no lineal. Existen otros modelos para pronosticar el crecimiento forestal en sus diversas variables (altura, diámetro, volumen, etc.); en el Cuadro 1 se reportan los modelos más comunes y sus expresiones matemáticas (Kiviste et al., 2002). Otros autores emplean métodos alternos, como el uso de modelos mixtos no lineales (Sofaer et al., 2013).

Cuadro 1. Modelos de crecimiento usados en silvicultura.

Nombre	Expresión matemática
Hossfeld I	$v = \frac{E^2}{(\beta_0 + \beta_1 E + \beta_2)}$ (5)
Hossfeld I (modificado)	$v = \frac{E^2}{(\beta_0 + \beta_1 E)^2}$ (6)
Strand	$v = \left(\frac{E}{\beta_0 + \beta_1 E} \right)^3$ (7)
Hossfeld III	$v = \frac{E}{(\beta_0 + \beta_1 \ln(E) + \beta_2 E)}$ (8)
Smalian	$v = \frac{E}{\beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 E^2}$ (9)
Alométrica	$v = \beta_0 E^{\beta_1}$ (10)
Exponencial	$v = \beta_0 e^{\beta_1 E}$ (11)
Terazaki	$v = e^{\beta_0 - \frac{\beta_1}{E}}$ (12)

v : volumen (m^3); E : edad (años); β_i : parámetros.

2.3. Evaluación financiera

Dentro de las decisiones que se deben tomar al emprender un proyecto de plantación forestal, la relacionada con la inversión es la más relevante debido a que envuelve grandes recursos, y puede representar éxito o fracaso para la inversión. Si bien la evaluación apropiada de un proyecto, no avala el éxito del mismo, es aconsejable reunir la mayor cantidad posible de información y someterla a juicios estrictos, antes de invertir (Meza Orozco, 2013). Con el objetivo de dictar métodos de mejora, identificar debilidades, amenazas y evolucionar de los escenarios actuales a los optimistas los inversionistas recurren a la evaluación de proyectos de inversión (Aponte, Muñoz, & Álzate, 2017).

Los mismos autores señalan que la evaluación de proyectos es el proceso que pretende identificar y comparar las ganancias y los costos de una gama de opciones con el objetivo de elegir la más benéfica para los inversionistas. Tal proceso tiene como fin calcular la viabilidad del proyecto, así como su capacidad financiera. Toda esta evaluación pretende identificar las alternativas que permitan maximizar los ingresos.

Considerando las alternativas posibles de inversión, es necesario contar con instrumentos que faciliten la selección de proyectos probablemente rentables (Bacchini, García, & Márquez, 2007). Dentro de estas herramientas, se considera al valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR), relación beneficio-costos (RBC), entre otras (ver Figura 10).

Varios autores reportan hallazgos en investigaciones que tuvieron como objetivo, la evaluación financiera de plantaciones comerciales forestales, por ejemplo: Romo-Lozano, García-Cruz, Uribe-Gómez, & Rodríguez-Trejo (2012), quienes evaluaron sistemas agroforestales (SAF) del estado de Veracruz, concluyendo que los indicadores económicos sugieren que los SAF son rentables; González-Rojas, Murillo-Cruz, & Ávila Arias (2017), estos autores determinaron la viabilidad financiera de un SAF de *Cedrela odorata* L. en combinación con café, concluyendo que la combinación de este SAF es viable

económicamente; Svatoňová, Herák y Kabutey (2015), quienes analizaron la rentabilidad financiera y sensibilidad de plantaciones de palma para obtención de aceite, en Indonesia, concluyendo que el proyecto es rentable y que las variables que afectan la viabilidad financiera son el costo de material, mano de obra, maquinaria y el precio de mercado para la venta del producto obtenido.

Los indicadores que brindan información sobre la pertinencia de un proyecto, que tradicionalmente han sido reportados en la literatura se detallan a continuación.

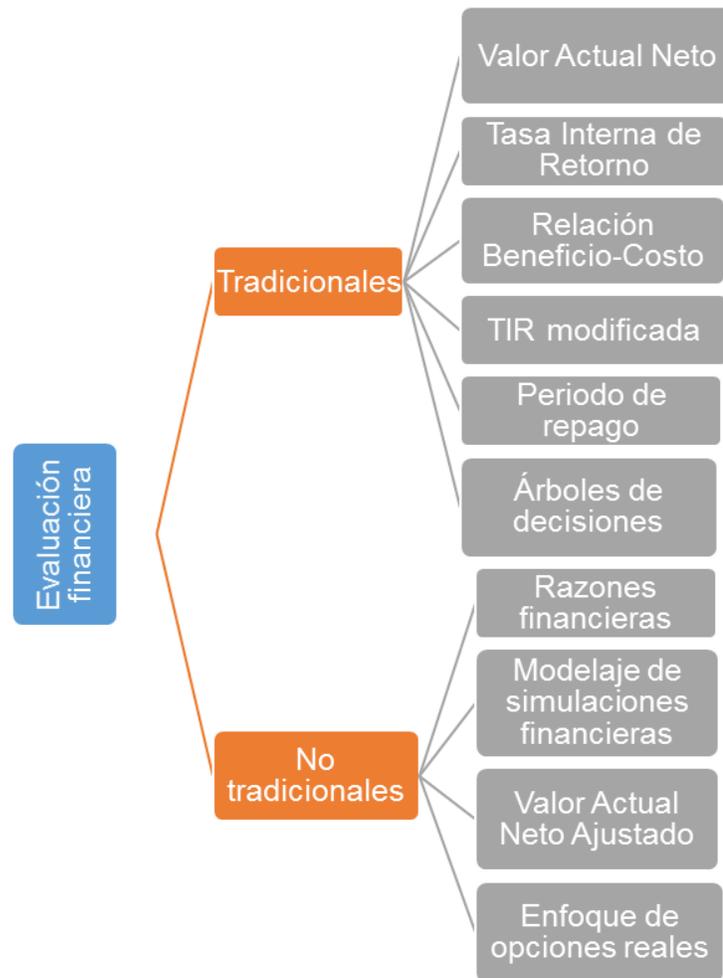


Figura 10. Técnicas de evaluación de proyectos
Fuente: elaboración propia (2021) con datos de Aponte, Muñoz, & Álzate (2017).

2.3.1. Valor actual neto (VAN)

Es el monto de flujos futuros de dinero, indicados en valores presentes, reducidos a una tasa de actualización (Aponte & Melo, 2002). Expresa el valor presente de todos los flujos de efectivo ocurridos en el futuro, disminuyendo una tasa de actualización adecuada a la tasa de inversiones opcionales, menos el costo de inicio del proyecto (Staiger, 2015). El resultado de los flujos está compuesto por el costo de establecimiento del proyecto, y por los flujos de fondo a suscitarse en el futuro (Bacchini et al., 2007). Su forma matemática se muestra a continuación (Ramírez-Martínez et al., 2021):

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1 + i)^t} \quad (13)$$

donde B_t son los beneficios derivados del proyecto en el año t (\$MXN ha⁻¹); C_t son los costos erogados del proyecto en el año t (\$MXN ha⁻¹); i es la tasa de actualización (en decimales); t es el tiempo en años.

2.3.2. Periodo de repago

Este indicador hace referencia al periodo que tarda un plan de negocio en reintegrar su costo de establecimiento. Este valor puede calcularse mediante la siguiente ecuación (Aponte et al., 2017):

$$\text{Periodo de recuperación} = \frac{\text{Inversión total (\$MXN)}}{\text{Utilidad promedio anual (\$MXN)}} \quad (14)$$

Whitman & Terry (2012), sostienen que este indicador determina el tiempo en que la inversión está propensa a riesgo, es decir, es el tiempo en que se estima obtener el capital invertido en el establecimiento del proyecto.

2.3.3. Tasa interna de retorno (TIR)

Este indicador ha sido usado durante un periodo prolongado por economistas para determinar la viabilidad de un proyecto. Su definición se sustenta en los

procedimientos de flujo de efectivo actualizados, esta técnica es utilizada para ponderar los flujos de efectivo que ocurren en la actualidad de una manera objetiva y poder determinar su valor relacionado con los flujos de efectivo a ocurrir en tiempo futuro (Mellichamp, 2017), resumidamente involucra calcular la tasa de actualización cuando VAN es cero (Aponte et al., 2017). La TIR está representada por la ecuación 15 (Ramírez-Martínez et al., 2021).

$$TIR = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1 + i^*)^t} = 0 \quad (15)$$

donde: B_t son los beneficios derivados del proyecto en el año t (\$MXN ha⁻¹); C_t son los costos erogados del proyecto en el año t (\$MXN ha⁻¹); t es el tiempo en años; i^* es la tasa (en decimales) que iguala el flujo de efectivo con cero.

Mellichamp (2017), sugiere que la TIR (con unidades en %) compone la segunda medida necesaria para determinar la rentabilidad financiera, después del VAN (con unidades en \$MXN). Ambos indicadores son necesarios para diferenciar entre proyectos que suelen ser representados por medidas de rentabilidad similares, pero son diferentes en horizonte de planeación o dimensión.

2.3.4. Relación beneficio-costo (RBC)

Este razonamiento muestra la relación que concurre entre el valor presente de los beneficios obtenidos del proyecto y el valor presente de los costos erogados al mismo. Este es un indicado integral, pues involucra ventajas y desventajas del proyecto, además del valor del dinero a través del tiempo (Aponte et al., 2017). Su expresión algebraica se muestra a continuación (Ramírez-Martínez et al., 2021).

$$RBC = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1 + i)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1 + i)^t}} \quad (16)$$

donde B_t son los beneficios derivados del proyecto en el año t (\$MXN ha⁻¹); C_t son los costos erogados del proyecto en el año t (\$MXN ha⁻¹); i es la tasa de actualización (en decimales); t es el tiempo en años.

2.3.5. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es una herramienta precisa y oportuna para medir las propiedades de un proyecto de inversión por medio de su capacidad para mostrar que variables provocan la mayor variación en algún modelo de rentabilidad de un proyecto de inversión (Russell et al., 2015). Propiamente, este análisis inquiriere como la fluctuación de la respuesta dada por un modelo numérico puede ser atribuida a las variaciones de los valores de entrada (Pianosi et al., 2016).

Estas herramientas son de gran utilidad para definir las variables que conjeturan riesgo a la viabilidad de los proyectos de inversión. La aptitud de los indicadores financieros se obtiene evaluando su flexibilidad y experimentando la respuesta en la posibilidad del proyecto ante escenarios de estrés, asignando desarrollos optimistas o pesimistas de varias variables a la vez (Cardoso, Silva, & Eusébio, 2019).

Los mismos autores, afirman que las variables siguientes influyen en la viabilidad del proyecto:

- i. Costo de establecimiento;
- ii. Tasa de actualización;
- iii. Precio de venta de la madera.

2.4. Rotación económicamente óptima

Determinar la edad de rotación óptima en un bosque natural o plantado es un tema de relevante interés en el campo de la silvicultura y manejo forestal, esta edad fija los ciclos de corta (Nakajima, Shiraishi, Kanomata, & Matsumoto, 2017). Algunas investigaciones han abordado edades de rotación bajo diferentes perspectivas, por ejemplo, en términos físicos, técnicos y financieros (Bettinger

et al., 2009). Estudios previos han referido a la edad de rotación física, basada en el tiempo que un árbol presta un servicio o brinda un bien, tal edad, naturalmente varía de un árbol a otro, e incluso de una plantación forestal a un bosque natural. La edad de rotación técnica es determinada con base en el tiempo en el que un árbol alcanza las características necesarias para obtener un producto maderable requerido por el mercado. La edad óptima de rotación de los bosques naturales y plantados desde la perspectiva económica, equivale a maximizar la rentabilidad. Los técnicos forestales obtienen ganancias al optimizar la utilidad, además, maximizar la rentabilidad de una masa arbolada acarrea beneficios económicos y ecológicos (Nakajima et al., 2017).

Hesse Martin Faustmann exhibió la llamada fórmula de Faustmann o formula del Valor Esperado del Suelo (VES) (Viitala, 2016), la cual ha sido pilar de la economía forestal; esta expresión plantea que la edad de rotación que maximiza el VES derivara en un periodo final de corta que es sostenible desde la perspectiva económica (Faustmann 1968), es decir el momento económicamente oportuno para efectuar la cosecha o establecer regímenes de aclareo (Yousefpour & Augustynczik, 2019).

El VES, matemáticamente simboliza el valor actual de los beneficios obtenidos de un bosque natural o plantado de una serie interminable de rodales idénticos y representa el máximo precio que un inversor debe asumir por una unidad de suelo y obtener la tasa mínima aceptable de reintegro (Restrepo & Orrego, 2015). La expresión se presenta a continuación (Guera et al., 2019):

$$VES (T) = \frac{B_T - C_T}{(1 + i)^T - 1} \quad (17)$$

donde: B_T son los beneficios derivados del proyecto a la edad de rotación (\$MXN ha^{-1}); C_T son los costos acumulados derivados del proyecto a la edad de rotación (\$MXN ha^{-1}); T es la edad de rotación (años); i es la tasa de actualización (en decimales).

Chang (2020) argumenta que está técnica esta sustentada en los supuestos que los valores siguientes serán los mismos en todas las rotaciones:

- Precios para venta de madera
- Volúmenes de cosecha
- Costo establecimiento
- Beneficio neto anual
- Tasa de actualización

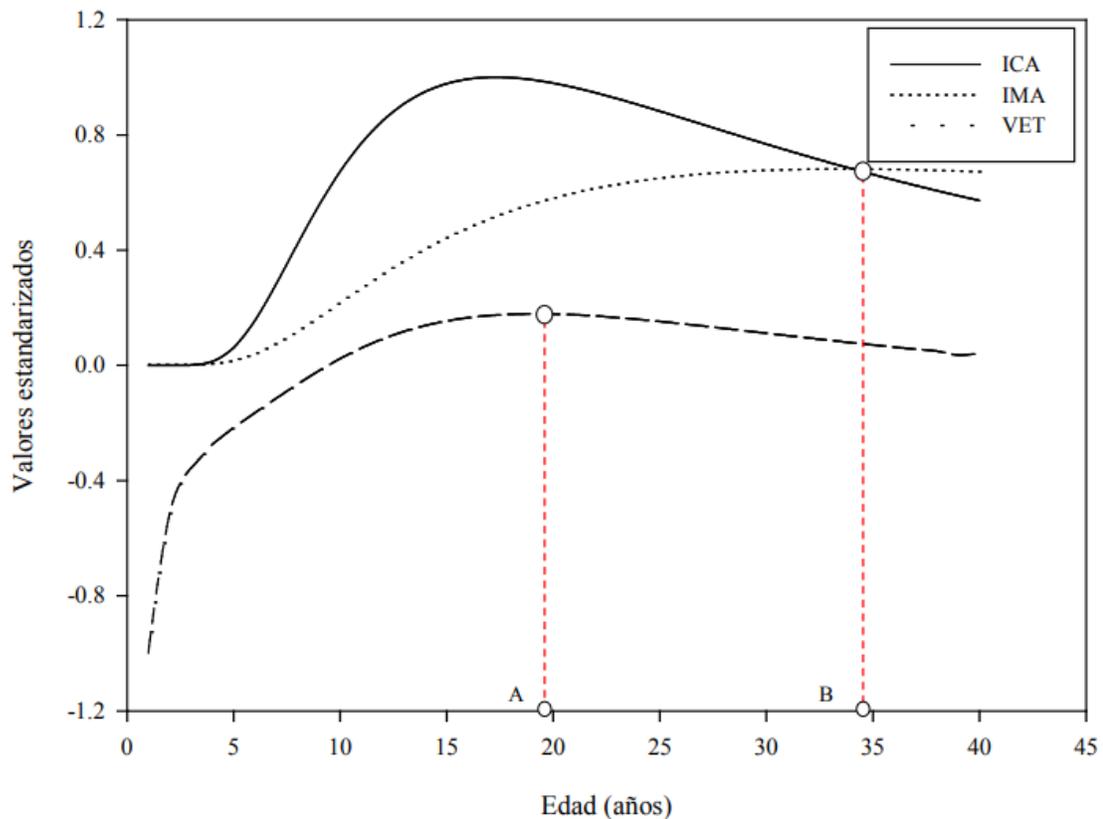


Figura 11. Curvas de edad de rotación económicamente óptima (A) y técnicamente óptima (B)

Fuente: Guera et al. (2019).

Diversos autores han basado sus investigaciones en torno al VES, por ejemplo: Yousefpour & Augustynczik (2019), quienes analizaron la incertidumbre de la economía en la captura de carbono; Dong, Lu, & Liu (2020), al determinar las rotaciones óptimas de las plantaciones de alerces; Ramírez-Martínez, González-Guillén, de Los Santos-Posadas, Ángeles-Pérez, & Santiago-García (2021), para desarrollar el manejo forestal con escenarios de carbono; Trujillo Ubaldo, Álvarez

López, Valdovinos Chávez, Benitez Molina, & Rodríguez González (2018), al determinar turnos en plantaciones forestales.

El uso del VES o también llamado Valor Esperado de la Tierra (VET) se ha extendido en el manejo forestal y es base para la toma de decisiones, puesto que regularmente difiere con el turno técnico, un ejemplo es lo obtenido por Guera et al. (2019) que se aprecia en la Figura 11.

La relevancia del modelo de Faustmann es que su alcance no solo cubre la silvicultura. Esta fórmula supuestamente solo atiende el crecimiento de la madera, pero es posible su adecuación para modelar todos los activos de capital (Viitala, 2016).

2.5. Análisis de riesgo

Desde el punto de vista de la inversión, el riesgo es la fluctuación de los indicadores de viabilidad financiera como VAN, TIR, RBC y en el ámbito forestal, VES. Consecuentemente, cuando las fluctuaciones del flujo de efectivo son mayores, mayor es el riesgo al que está expuesta la inversión (Rodríguez Limachi & Tudela Mamani, 2018). La valoración de los riesgos se centra en determinar la probabilidad de que los proyectos de inversión consigan un valor bondadoso para los indicadores de viabilidad económica (Platon & Constantinescu, 2014).

El mismo autor sugiere que para examinar los proyectos que están sujetos a condiciones de riesgo y en los cuales es necesario tomar decisiones en medio de la incertidumbre, es ineludible diferenciar ambos conceptos. El riesgo es una situación desfavorable que no ha ocurrido, pero que es posible que ocurra en el futuro y que se ha observado su amenaza en estudios previos (análisis de sensibilidad). El riesgo, entonces, simboliza la incertidumbre para alcanzar las metas planteadas y se considera una mezcla de probabilidad e impacto. La parte más importante de este análisis está relacionada con la identificación de las variables que supone riesgo a la viabilidad del proyecto (Platon & Constantinescu, 2014).

La incorporación del estudio de los riesgos en las evaluaciones financieras de proyectos silvícolas en América Latina es escasa, aun estando consiente de los riesgos asumidos al emprender un proyecto de este tipo, debido a su relativamente largo horizonte de planeación. Los métodos determinísticos brindan una aproximación al conocimiento de los riesgos, pero frecuentemente se ven influidos por el sesgo al introducir valores a las variables que son de naturaleza aleatoria (Acuña Carmona & Drake Aranda, 2003).

Bajo un enfoque de ciencias forestales para determinar el riesgo financiero como respuesta a la incertidumbre, se describen a continuación el método actual más usado para la valoración de los riesgos (Hildebrandt & Knoke, 2011).

2.5.1. Método de simulación de Monte Carlo (SMC)

Este método apareció aproximadamente en el año de 1944 (Platon & Constantinescu, 2014). Para la obtención de los posibles resultados SMC asume muestras aleatorias repetidas. Los valores aleatorios para las posibles variables de riesgo se mezclan de forma que posibilitan cualquier interdependencia, obteniendo una basta cantidad de posibles resultados para la variable respuesta (pudiendo ser indicadores financieros de viabilidad) que logran ser usadas para obtener las funciones de distribución de probabilidades. Posteriormente, es factible calcular las medidas de tendencia central y de dispersión (Hildebrandt & Knoke, 2011).

Los mismos autores mencionan que SMC posee una gran capacidad para integrar variadas variables cuyo comportamiento es desconocido, y gracias a ello, su uso se ha vuelto frecuente. Algunas debilidades de este método son atribuidas a que las distribuciones de entrada, frecuentemente son inciertas y en consecuencia se suponen comportamientos uniformes en las variables simuladas, lo que pudiera traer consecuencias significativas en las colas de las funciones de distribución obtenidas. También, las correlaciones que se pudieran presentar entre las variables con frecuencia son desconocidas y en consecuencia no se incluyen en los efectos de la simulación.

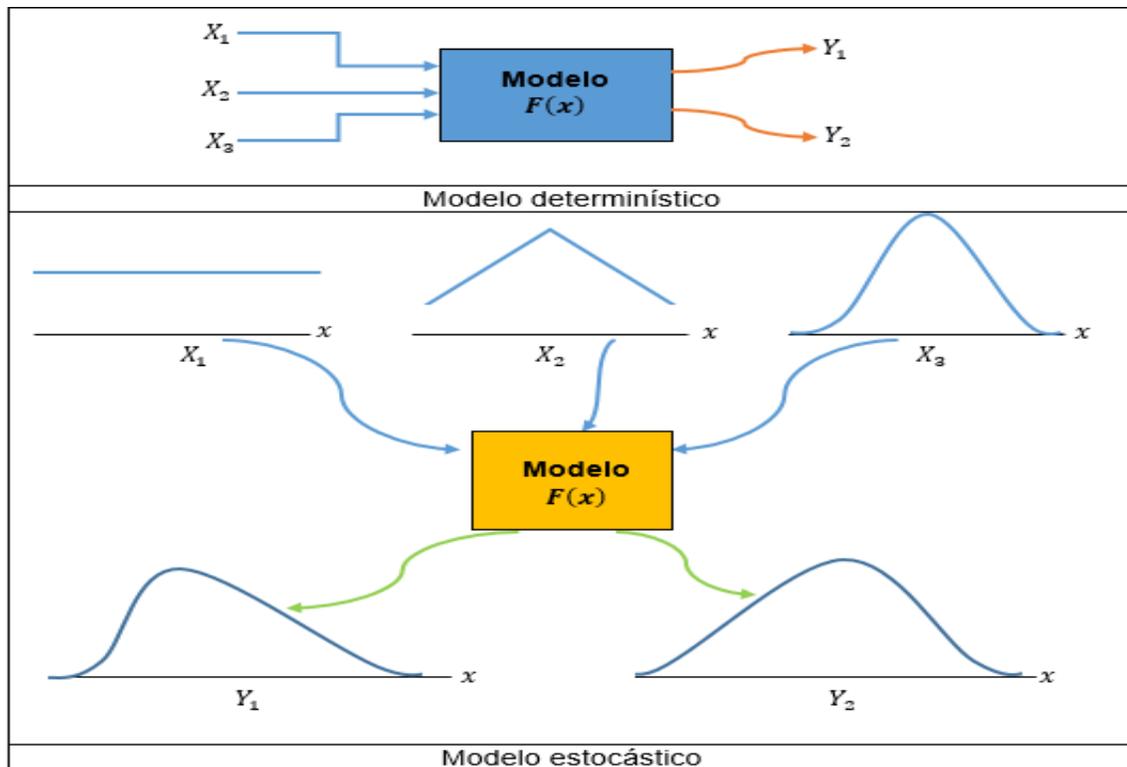


Figura 12. Modelo determinístico y modelo estocástico
Fuente: Platon & Constantinescu (2014).

Algunas investigaciones desarrolladas por el método de SMC para determinar el riesgo y éxito de un proyecto forestal, son Knoke et al. (2021), que evaluaron las pérdidas económicas por perturbaciones naturales en los bosques de abetos de Noruega; Moore, Ruel, Lapointe, & Lussier (2011), quienes evaluaron la rentabilidad de las cortas de selección en bosques boreales; Yang, Song, & Lu (2020), que evaluaron la sanidad de los ecosistemas terrestres; Lv, Li, & Sun (2018), que hicieron uso del método para el manejo de ecosistemas regionales.

2.6. Literatura citada

Acuña Carmona, E., & Drake Aranda, F. (2003). Análisis del riesgo en la gestión forestal e inversiones silviculturales: una revisión bibliográfica. *Bosque (Valdivia)*, 24(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.4067/s0717-92002003000100009>

Alvarez-Garretón, C., Lara, A., Boisier, J. P., & Galleguillos, M. (2019). The Impacts of Native Forests and Forest Plantations on Water Supply in Chile. *Forests*, 10(6), 473. <http://dx.doi.org/10.3390/f10060473>

- Aponte, G., & Melo, J. E. (2002). *Formulación y Evaluación de Proyectos* (E. M. de A. "Marco F. Suárez", Ed.).
- Aponte, R., Muñoz, F., & Álzate, L. (2017). La evaluación financiera de proyectos y su aporte en la generación de valor corporativo. *Ciencia y Poder Aéreo*, 12(1), 144–155. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.567>
- Asanok, L., Marod, D., Duengkae, P., Pranmongkol, U., Kurokawa, H., Aiba, M., ... Nakashizuka, T. (2013). Relationships between functional traits and the ability of forest tree species to reestablish in secondary forest and enrichment plantations in the uplands of northern Thailand. *Forest Ecology and Management*, 296, 9–23. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.01.029>
- Avery, T. E., & Burkhart, H. E. (2015). *Forest Measurements* (5th ed.; Virginia Polytechnic Institute and State University, Ed.). Waveland Press Inc.
- Bacchini, R. D., García Fronti, J. I., & Márquez, E. A. (2007). Evaluación de inversiones con opciones reales: utilizando Microsoft Excel. Buenos Aires: Omicron System.
- Baral, H., Guariguata, M. R., & Keenan, R. J. (2016). A proposed framework for assessing ecosystem goods and services from planted forests. *Ecosystem Services*, 22(September), 260–268. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.10.002>
- Bettinger, P., Boston, K., Siry, J. P., & Grebner, D. L. (2009). *Forest management and planning*, (Burlington: Academic.).
- Bowler, D. E., Buyung-ali, L. M., Healey, J. R., Jones, J. P. G., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2012). Does community forest management provide global environmental benefits and improve local welfare? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10(1), 29–36. <https://doi.org/10.1890/110040>
- Bowman, D. M. J. S., Brienen, R. J. W., Gloor, E., Phillips, O. L., & Prior, L. D. (2013). Detecting trends in tree growth: not so simple. *Trends in Plant Science*, 18(1), 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.08.005>
- Burkhart, H. E., & Tomé, M. (2012). Indices of Individual-Tree Competition. *Modeling Forest Trees and Stands*, 201–232. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3170-9_9
- Camacho-Linton, A., Ramírez-Maldonado, H., de los Santos-Posadas, H. M., & Zamudio Sánchez, J. F. (2013). Tablas de rendimiento para teca (*Tectona grandis* L.) en el estado de campeche. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(19), 92–101. <https://doi.org/https://doi.org/10.29298/rmcf.v4i19.381>
- Cardoso, J., Silva, V., & Eusébio, D. (2019). Techno-economic analysis of a biomass gasification power plant dealing with forestry residues blends for electricity production in Portugal. *Journal of Cleaner Production*, 212, 741–753. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.054>

- Chang, S. J. (2020). Twenty one years after the publication of the generalized Faustmann formula. *Forest Policy and Economics*, 118, 102238. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102238>
- D'Amato, D., Rekola, M., Wan, M., Cai, D., & Toppinen, A. (2017). Effects of industrial plantations on ecosystem services and livelihoods: Perspectives of rural communities in China. *Land Use Policy*, 63, 266–278. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.01.044>
- Davidson, F. A. (1928). Growth and senescence in purebred Jersey cows. University of Illinois (Urbana-Champaign Campus). Agricultural Experiment Station), No. 302.
- de Costa, W. A. J. M., & Suranga, H. R. (2012). Estimation of carbon stocks in the forest plantations of Sri Lanka. *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka*, 40(1), 9–41. <https://doi.org/10.4038/jnsfsr.v40i1.4166>
- Dong, L., Lu, W., & Liu, Z. (2020). Determining the optimal rotations of larch plantations when multiple carbon pools and wood products are valued. *Forest Ecology and Management*, 474(July), 118356. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118356>
- dos Santos, V. A. H. F., & Ferreira, M. J. (2020). Initial establishment of commercial tree species under enrichment planting in a Central Amazon secondary forest: Effects of silvicultural treatments. *Forest Ecology and Management*, 460(January), 117822. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117822>
- Dufour-Kowalski, S., Courbaud, B., Dreyfus, P., Meredieu, C., & De Coligny, F. (2012). Capsis: An open software framework and community for forest growth modelling. *Annals of Forest Science*, 69(2), 221–233. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0140-9>
- Evans, J. (2009). Forests and forest plants (J. N. Owens & H. G. Lund, Eds.). Oxford, United Kingdom: Eolss Publisher Co. Ltd.
- Fang, L., Liu, S., & Huang, Z. (2020). Uncertain Johnson–Schumacher growth model with imprecise observations and k-fold cross-validation test. *Soft Computing*, 24(4), 2715–2720. <https://doi.org/10.1007/s00500-019-04090-4>
- FAO. (2020a). Global Forest Resources Assessment 2020. Recuperado el 09 de septiembre del 2021, de <https://doi.org/10.4060/ca8753en>
- FAO. (2020b). Global Forest Resources Assessment 2020 Guidelines and specifications. En Food and Agricultural Organization (FAO). Rome, Italy.
- Freitas Alvarado, L., Zárate Gómez, R., Bardales Lozano, R., & del Castillo Torres, D. (2019). Efecto de la densidad de siembra en el desarrollo vegetativo del aguaje (*Mauritia flexuosa* L.f.) en plantaciones forestales. *Revista Peruana de Biología*, 26(2), 227–234.

<https://doi.org/10.15381/rpb.v26i2.16378>

- Gompertz, B. (1825). On the Nature of the Function Expressive of the Law of Human Mortality, and on a New Mode of Determining the Value of Life Contingencies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 115, 513–585. Recuperado el 07 de agosto del 2021, de <http://www.jstor.org/stable/107756>
- González-Rojas, M., Murillo-Cruz, R., Virginio-Filho, E. D. M., & Ávila-Arias, C. (2017). Influencia de factores biofísicos y de manejo en el crecimiento de *Cedrela odorata* L. en asocio con café en Pérez Zeledón, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 15(36), 46. <https://doi.org/https://doi.org/10.18845/rfmk.v15i36.3420>
- Guera, O. G. M., da Silva, J. A. A., Caraciolo Ferreira, R. L. C., Álvarez Lazo, D., & Barrero Medel, H. (2019). Modelos matemáticos para la determinación del turno óptimo en plantaciones forestales. *Madera y Bosques*, 25(1). <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511636>
- Hernández-Ramos, J., García-Magaña, J. J., García-Cuevas, X., Hernández-Ramos, A., Muñoz-Flores, H. J., & Samperio-Jiménez, M. (2018). Índice de sitio para bosques naturales de *Pinus teocote* Schlecht. & Cham. en el oriente del estado de Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(27), 24–36. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i27.278>
- Hernández-Cuevas, M., Santiago-García, W., de los Santos-Posadas, H. M., Martínez-Antúnez, P., & Ruiz-Aquino, F. (2018). Modelos de crecimiento en altura dominante e índices de sitio para *Pinus ayacahuite* Ehren. *Agrociencia*, 52(3), 437–453. Recuperado el 09 de septiembre del 2021, de <https://www.agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/1680>
- Hildebrandt, P., & Knoke, T. (2011). Investment decisions under uncertainty—A methodological review on forest science studies. *Forest Policy and Economics*, 13(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2010.09.001>
- Hynynem, J. (2011). Conceptos básicos para la modelación del crecimiento forestal. *Recursos Naturales y Ambiente*, 64(22–27), 1–6. Recuperado el 19 de septiembre del 2021, de <http://hdl.handle.net/11554/7075>
- Johnson, N. (1935). A trend line for growth series. *J Am Stat Assoc*, 30(192).
- Kiviste, A., Álvarez González, J. G., Rojo Alboreca, A., & Ruiz González, A. D. (2002). Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal. Madrid, España.: INIA.
- Knoke, T., Gosling, E., Thom, D., Chreptun, C., Rammig, A., & Seidl, R. (2021). Economic losses from natural disturbances in Norway spruce forests—A quantification using Monte-Carlo simulations. *Ecological Economics*, 185(October 2020), 107046. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107046>
- Köhlin, G., & Amacher, G. S. (2005). Welfare Implications of Community Forest

- Plantations in Developing Countries: The Orissa Social Forestry Project. *American Journal of Agricultural Economics*, 87(4), 855–869. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8276.2005.00774.x>
- Kongsager, R., Napier, J., & Mertz, O. (2012). The carbon sequestration potential of tree crop plantations. *Mitig Adapt Strateg Glob Change*, 18(2013), 1197–1213. <https://doi.org/10.1007/s11027-012-9417-z>
- Liang, X., Kankare, V., Hyypä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., . . . Vastaranta, M. (2016). Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 63–77. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006>
- Lv, J. P., Li, Y. P., & Sun, J. (2018). Monte Carlo simulation based interval chance-constrained programming for regional ecosystem management – A case study of Zhuhai, China. *Ecological Indicators*, 85(November 2017), 214–228. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.10.027>
- Machado, R. R., Conceição, S. V., Leite, H. G., de Souza, A. L., & Wolff, E. (2015). Evaluation of forest growth and carbon stock in forestry projects by system dynamics. *Journal of Cleaner Production*, 96(October), 520–530. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.049>
- Martínez-Zurimendi, P., Domínguez-Domínguez, M., Juárez-García, A., López-López, L. M., De-la-Cruz-Arias, V., & Álvarez-Martínez, J. (2015). Índice de sitio y producción maderable en plantaciones forestales de *Gmelina arborea* en Tabasco, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(4), 415–425. <https://doi.org/10.35196/rfm.2015.4.415>
- McKendrick, A. G., & Pai, M. K. (1912). The rate of multiplication of microorganisms: a mathematical study. *Proc. R. Soc. Edinburgh*, 31, 649–653.
- Mellichamp, D. A. (2017). Internal rate of return: Good and bad features, and a new way of interpreting the historic measure. *Computers and Chemical Engineering*, 106, 396–406. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.06.005>
- Meza Orozco, J. de J. (2013). Evaluación financiera de proyectos (Tercera; Ecoe, Ed.). Bogotá, D.C.: Buena semilla.
- Millet, J., Tran, N., Vien Ngoc, N., Tran Thi, T., & Prat, D. (2013). Enrichment planting of native species for biodiversity conservation in a logged tree plantation in Vietnam. *New Forests*, 44(3), 369–383. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9344-6>
- Mohammadi, Z., Limaie, S. M., & Shahraji, T. R. (2019). Evaluating the Most Suitable Tree Species Using Land Expectation Value: A Case Study from Plantation in North of Iran. *Asian Journal of Agricultural Extension, Economics & Sociology*, 31(4), 1–8. <https://doi.org/10.9734/ajaees/2019/v31i430138>

- Moore, T. Y., Ruel, J. C., Lapointe, M. A., & Lussier, J. M. (2011). Evaluating the profitability of selection cuts in irregular boreal forests: an approach based on Monte Carlo simulations. *Forestry*, *85*(1), 63–77. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpr057>
- Murillo-Brito, Y., Domínguez-Domínguez, M., Martínez-Zurimendi, P., Lagunes-Espinoza, L. del C., & Aldrete, A. (2017). Índice de sitio en plantaciones de *Cedrela odorata* en el trópico húmedo de México. *Revista De La Facultad De Ciencias Agrarias UNCuyo*, *49*(1), 15–31. Recuperado el 19 de septiembre del 2021, de <https://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/RFCA/article/view/3100>
- Musálem, M. Á. (2006). Silvicultura de plantaciones forestales comerciales. Universidad Autónoma Chapingo Km. 38.5 Carretera México-Texcoco 56230 Chapingo, Estado de México.
- Nakajima, T., Shiraishi, N., Kanomata, H., & Matsumoto, M. (2017). A method to maximise forest profitability through optimal rotation period selection under various economic, site and silvicultural conditions. *New Zealand Journal of Forestry Science*, *47*(1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/s40490-016-0079-6>
- Nigul, K., Padari, A., Kiviste, A., Noe, S. M., Korjus, H., Laarmann, D., . . . Kangur, A. (2021). The Possibility of Using the Chapman – Richards and Näslund Functions to Model Height – Diameter Relationships in Hemiboreal Old-Growth Forest in Estonia. *Forests*, *12*(2), 184. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/f12020184>
- Peeters, L. Y., Soto-Pinto, L., Perales, H., Montoya, G., & Ishiki, M. (2003). Coffee production, timber, and firewood in traditional and Inga-shaded plantations in Southern Mexico. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *95*(2–3), 481–493. [https://doi.org/10.1016/s0167-8809\(02\)00204-9](https://doi.org/10.1016/s0167-8809(02)00204-9)
- Petrou, P., Kitikidou, K., Milios, E., Koletta, J., & Mavroyiakoumos, A. (2015). Site index curves for the golden oak species (*Quercus alnifolia*). *Bosque (Valdivia)*, *36*(3), 497–503. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002015000300016>
- Pianosi, F., Beven, K., Freer, J., Hall, J. W., Rougier, J., Stephenson, D. B., & Wagener, T. (2016). Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow. *Environmental Modelling and Software*, *79*, 214–232. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.008>
- Pirard, R., Petit, H., & Baral, H. (2017). Local impacts of industrial tree plantations: An empirical analysis in Indonesia across plantation types. *Land Use Policy*, *60*(2017), 242–253. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.10.038>
- Platon, V., & Constantinescu, A. (2014). Monte Carlo Method in Risk Analysis for Investment Projects. *Procedia Economics and Finance*, *15*(14), 393–400. [https://doi.org/10.1016/s2212-5671\(14\)00463-8](https://doi.org/10.1016/s2212-5671(14)00463-8)
- Ramírez-Martínez, A., González-Guillén, M., de Los Santos-Posadas, H.,

- Ángeles-Pérez, G., & Santiago-García, W. (2021). Forest management with carbon scenarios in the central region of Mexico. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 14(5), 413–420. <https://doi.org/10.3832/ifer3630-014>
- Rodriguez Limachi, O. M., & Tudela Mamani, J. W. (2018). Análisis de Riesgo del Proyecto de Inversión Pública del Sector Saneamiento: Caso Proyecto Tinicachi - Yunguyo. *Revista de Investigaciones de La Escuela de Posgrado*, 7(3), 653–664. <http://dx.doi.org/10.26788/riepg.2018.3.89>
- Romo-Lozano, J. L., García-Cruz, Y. B., Uribe-Gómez, M., & Rodríguez-Trejo, D. A. (2012). Prospectiva financiera de los sistemas agroforestales de el Fortín, municipio de Atzalan, Ver. *Revistas Chapingo Seria Ciencias Forestales y Del Ambiente*, XVIII(1), 43–55. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.09.068>
- Russell, M. B., Fraver, S., Aakala, T., Gove, J. H., Woodall, C. W., D'Amato, A. W., & Ducey, M. J. (2015). Quantifying carbon stores and decomposition in dead wood: A review. *Forest Ecology and Management*, 350, 107–128. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.04.033>
- Salas, C., Gregoire, T. G., Craven, D. J., & Gilabert, H. (2016). Modelación del crecimiento de bosques: Estado del arte. *Bosque (Valdivia)*, 37(1), 3–12. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002016000100001>
- Santika, T., Meijaard, E., Budiharta, S., Law, E. A., Kusworo, A., Hutabarat, J. A., ... Wilson, K. A. (2017). Community forest management in Indonesia: Avoided deforestation in the context of anthropogenic and climate complexities. *Global Environmental Change*, 46(August), 60–71. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.08.002>
- Schumacher, F. (1939). A new growth curve and its relation to timber yield studies. *J Forest* 37(1), 37(1), 819–820.
- Semenzato, P., Cattaneo, D., & Dainese, M. (2011). Growth prediction for five tree species in an Italian urban forest. *Urban Forestry & Urban Greening*, 10(3), 169–176. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2011.05.001>
- Simoës Macayo, N., & Renison, D. (2015). ¿Cuántos años monitorear el éxito de plantaciones con fines de restauración?: Análisis en relación al micrositio y procedencia de las semillas. *Bosque (Valdivia)*, 36(2), 315–322. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002015000200016>
- Siregar, U. J., Narendra, B. H., Suryana, J., Siregar, C. A., & Weston, C. (2017). Evaluation on community tree plantations as sustainable source for rural bioenergy in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 65(1), 012019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/65/1/012019>
- Sofaer, H. R., Chapman, P. L., Sillett, T. S., & Ghalambor, C. K. (2013). Advantages of nonlinear mixed models for fitting avian growth curves. *Journal of Avian Biology*, no. <https://doi.org/10.1111/j.1600-048x.2013.05719.x>

- Soto Pinto, L., Martínez Anzueto, M., & Quechulpa, S. (2011). El Acahual Mejorado Un Prototipo Agroforestal. San Cristóbal de Las Casas, Chiapas,; El Colegio de la Frontera Sur.
- Staiger, R. (2015). Foundations of real estate financial modelling. New York: Routledge.
- Stephens, S. S., & Wagner, M. R. (2007). Forest plantations and biodiversity: A fresh perspective. *Journal of Forestry*, 105(6), 307–313. <https://doi.org/10.1093/jof/105.6.307>
- Stutter, M. I., Chardon, W. J., & Kronvang, B. (2012). Riparian Buffer Strips as a Multifunctional Management Tool in Agricultural Landscapes: Introduction. *Journal of Environmental Quality*, 41(2), 297–303. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0439>
- Svatoňová, T., Herák, D., & Kabutey, A. (2015). Financial Profitability and Sensitivity Analysis of Palm Oil Plantation in Indonesia. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 63(4), 1365–1373. <https://doi.org/10.11118/actaun201563041365>
- Tjørve, K. M. C., & Tjørve, E. (2017). A proposed family of Unified models for sigmoidal growth. *Ecological Modelling*, 359, 117–127. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.05.008>
- Trujillo Ubaldo, E., Álvarez López, P. S., Valdovinos Chávez, V. R., Benitez Molina, G., & Rodríguez González, L. O. (2018). Turnos forestales en plantaciones maderables de Eucalyptus grandis Hill ex Maiden, en Balancán, Tabasco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(48), 27–46. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i48.130>
- Vásquez-García, I., Cetina-Alcalá, V. M., Campos-Bolaños, R., & Casal-Ángeles, L. F. (2016). Evaluacion de plantaciones forestales en tres comunidades de la mixteca alta oaxaqueña. *Agroproductividad*, 9(2), 12–19. Recuperado el 19 de septiembre del 2021, de <https://www.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/716>
- Vega Alarcón, A. (2013). Evaluación de las plantaciones forestales comerciales establecidas entre 1994 y 1996 en los Tuxtlas. (Universidad Veracruzana). Recuperado el 19 de octubre del 2021, de <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/679070>
- Verhulst, P.-F. (1845). Recherches mathématiques sur la loi d'accroissement de lapopulation. 1–41.
- Viitala, E. J. (2016). Faustmann formula before Faustmann in German territorial states. *Forest Policy and Economics*, 65, 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2015.11.004>
- Weber, M., Stimm, B., & Mosandl, R. (2011). Review Plantations for Protective Purposes and Rehabilitation. *Tropical Forestry*, 475–490.

https://doi.org/10.1007/978-3-642-19986-8_30

- Weiskittel, A. R., Hann, D. W., Kershaw, J. A., & Vanclay, J. K. (2011). *Forest Growth and Yield Modeling* (1st ed.; J. Wiley & S. Ltd, Eds.). Chichester, West Sussex, UK: Wiley-BlackWell.
- Wekesa, L., Mwalewa, S., Muema, K., Muthini, J., Riziki, P., Mukirae, P., & Menya, C. (2019). An Economic Assessment of Woodlots for Smallholder Farms in the Coast Region of Kenya. *East African Agricultural and Forestry Journal*, *83*(1), 1–12. <https://doi.org/10.1080/00128325.2018.1532694>
- Whitman, D., & Terry, R. (2012). *Fundamentals of Engineering Economics and Decision Analysis*. Recuperado el 19 de septiembre del 2021, de <https://www.morganclaypool.com/doi/pdf/10.2200/S00410ED1V01Y201203ENG018>
- Yang, Y., Song, G., & Lu, S. (2020). Assessment of land ecosystem health with Monte Carlo simulation: A case study in Qiqihaer, China. *Journal of Cleaner Production*, *250*, 119522. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119522>
- Yousefpour, R., & Augustynczyk, A. L. D. (2019). Uncertainty of Carbon Economy Using the Faustmann Model. *Journal of Forest Economics*, *34*(1–2), 99–128. <https://doi.org/10.1561/112.00000444>
- Zak, D., Stutter, M., Jensen, H. S., Egemose, S., Carstensen, M. V., Audet, J., ... Kronvang, B. (2019). An Assessment of the Multifunctionality of Integrated Buffer Zones in Northwestern Europe. *Journal of Environmental Quality*, *48*(2), 362–375. <https://doi.org/10.2134/jeq2018.05.0216>

3. EVALUACIÓN FINANCIERA CON FACTORES DE RIESGO EN UNA PLANTACIÓN FORESTAL

Carlos Aldair Contreras-Cruz¹, Francisco José Zamudio-Sánchez^{1*}, Celestino Flores-López², Alejandro Corona-Ambríz¹, Hugo Ramírez-Maldonado¹

HIGHLIGHTS

- Ajuste de modelos de crecimiento y validación de los mismos para predecir volúmenes de cosecha.
- El proyecto es económicamente factible con un horizonte de planeación de 25 años
- La viabilidad de la inversión es afectada por la tasa de actualización y el precio de la madera de venta.
- La edad de rotación económicamente óptima es de 20 años.
- La probabilidad de éxito en este proyecto es alta, se sugiere una segunda rotación.

3.1. Resumen

La evaluación de las plantaciones forestales como proyectos económicos ha cobrado gran importancia, brindando un panorama integral a los inversionistas, desde la perspectiva de tomar decisiones en condiciones de riesgo. Se efectuó un análisis integral a las inversiones realizadas en una plantación forestal establecida en el año 1996, con especies de caoba (*Swietenia macrophylla*), cedro rojo (*Cedrela odorata*) macuil (*Tabebuia rosea*) y primavera (*T. donnell-smithii*) en combinación con acahual. Se Modeló el crecimiento de madera,

¹ División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, Km 38.5 Carretera México-Texcoco. C. P. 56230. Chapingo, Texcoco, Estado de México. México.

² Departamento Forestal, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.

* Autor de correspondencia: FZAMUDIOS@chapingo.mx

determinó la viabilidad financiera del proyecto con un horizonte de planeación de 25 años, calculó la edad de rotación de la plantación y cuantificó la probabilidad de éxito sometiendo a las variables que afectan la viabilidad del proyecto a procesos estocásticos, mediante el método de simulación de Monte Carlo. Los resultados obtenidos muestran que la especie con mayor crecimiento es cedro rojo, con un volumen promedio de $1.8 \text{ m}^3 \text{ árbol}^{-1}$ a los 25 años; la especie con menor crecimiento es caoba con un volumen promedio de $0.26 \text{ m}^3 \text{ árbol}^{-1}$ a los 25 años. El análisis financiero sugiere $\text{VAN} = \$\text{MXN } 393\,873.26 \text{ ha}^{-1}$, $\text{TIR} = 9.7\%$, $\text{RBC} = 1.56$, $\text{VES} = \$\text{MXN } 912\,463.91 \text{ ha}^{-1}$ y la edad de rotación a los 20 años. El análisis de riesgo indica que la probabilidad de éxito del proyecto a un horizonte de planeación de 25 años es alta, si las variables de riesgo muestran un comportamiento similar al observado en este estudio.

Palabras clave: Modelos de crecimiento, evaluación financiera, análisis de sensibilidad, edad de rotación, análisis de riesgo.

3.2. Introducción

Una evaluación integral de las inversiones realizadas a una plantación forestal, necesariamente incluye estimaciones confiables de los volúmenes de cosecha, cálculo del valor esperado del suelo (VES), análisis de riesgo (Restrepo & Orrego, 2015) e indicadores económicos de rentabilidad como el Valor Actual Neto (VAN) (Knoke, Gosling, & Paul, 2020), la Relación Beneficio-Costo (RBC) (Xian, Xia, & Cao, 2020), la Tasa Interna de Retorno (TIR) (Keča, Keča, & Pantić, 2012) y el análisis de sensibilidad (Svatonová, Herák, & Kabutey, 2015).

Para la creación y mejora de los modelos de crecimiento en la silvicultura, y, en consecuencia, la predicción de los volúmenes a determinada edad, se hace uso de los métodos estadísticos (Burkhart & Tome, 2012), específicamente de técnicas estadísticas con sustento biológico (Restrepo & Orrego, 2015). Un modelo empírico e importante por presentar parámetros con propiedades biológicas significativas, es el de Karl Ludwig von Bertalanffy (Borah & Mahanta, 2018; Mahanta, Saikia, & Chetia, 2018; Frater, Hrafnkelsson, Elvarsson, & Stefansson, 2019; Saikia & Mahanta, 2020), que resumidamente asocia el

desarrollo de los organismos biológicos a través del tiempo (Renner-Martin, Brunner, Kühleitner, Nowak, & Scheicher, 2018). Además del modelo tradicional de von Bertalanffy, existen otros modelos en los cuales se apoya la ciencia forestal, para predecir el crecimiento de las masas forestales: Schumacher (Fang, Liu, & Huang, 2019), logístico, Gompertz, Chapman-Richards (Tjørve & Tjørve, 2017).

Asimismo, para evaluar la idoneidad económica de las plantaciones forestales, se recurre, usualmente al análisis financiero del proyecto (López López & Caballero Deloya, 2018); los indicadores económicos que componen la evaluación son VAN, TIR, RBC (Cuong, Chinh, Zhang, & Xie, 2020), y el análisis de sensibilidad, cuya función es identificar las variables económicas que afectan la viabilidad del proyecto de inversión, haciendo variar estos factores (de Assis et al., 2017). Si bien, existen variados métodos financieros, para valorar la rentabilidad económica de los proyectos forestales de inversión, el modelo de Faustmann (VES), es el criterio comúnmente usado para esta labor (Tahvonen & Viitala, 2006; Viitala, 2016; Liang et al., 2017; Yousefpour & Augustynczyk, 2019); la relevancia se debe a que la rotación óptima es el tema más importante dentro de la economía forestal (Moog, 2020), y este razonamiento posibilita el hallazgo de un periodo de rotación, indicando una edad de corta sostenible económicamente (Nakajima, Shiraishi, Kanomata, & Matsumoto, 2017). El valor esperado del suelo (VES), constituye el VAN de los beneficios procedentes de la cosecha, de una sucesión interminable de plantaciones idénticas (Chang, 2020). Concretamente, la rotación óptima económicamente indica el periodo oportuno para efectuar la cosecha de la plantación (Restrepo & Orrego, 2015) y tiene lugar en la edad donde el VES es máximo (Dong, Lu, & Liu, 2020), o, desde la perspectiva de equi-marginalidad, cuando la diferencia de beneficios marginales, derivados del proyecto (BM) y los costos marginales erogados en el proyecto (CM) es igual a cero (Ramírez-Martínez, González-Guillén, de Los Santos-Posadas, Ángeles-Pérez, & Santiago-García, 2021).

De acuerdo con Restrepo & Orrego (2015), la evaluación de los riesgos asociados a las inversiones en proyectos forestales, brinda a los análisis financieros un alcance exhaustivo y completo. La valoración de los riesgos es crucial en las actividades forestales, donde la inversión involucra horizontes de planeación relativamente largos y las decisiones deben asumirse bajo escenarios de incertidumbre. Tales incertidumbres incorporan la variabilidad de los precios de la madera en rollo, costos de mantenimiento del proyecto (Grimes & Cortés Acosta, 2021), tasas de actualización (Hildebrandt & Knoke, 2011) y pérdidas por perturbaciones naturales (Knoke et al., 2021). Arnold & Yildiz (2015) observan que un enfoque frecuentemente usado para evaluar los riesgos de inversión en un proyecto, es la simulación de Monte Carlo (SMC). Mediante esta técnica estadística, se obtienen valores aleatorios de las variables que suponen riesgo a los proyectos, a partir de funciones de densidad de probabilidad (Koch, 2017); en seguida se determinan los resultados que simbolizan los valores probables de VAN, RBC, y otros indicadores económicos de interés.

En este estudio se desarrolla una evaluación integral de las inversiones realizadas a una plantación forestal, incluyendo las estimaciones de volúmenes de cosecha, indicadores económicos, análisis de sensibilidad, edad de rotación óptima y análisis de riesgo mediante la simulación de Monte Carlo. Esta investigación es de las pocas en el país que afrontan un análisis exhaustivo de las inversiones vertidas a un proyecto forestal, añadiendo un análisis de riesgo (por ejemplo, Zamudio Sánchez, Romo Lozano, & Cervantes Carrillo, 2010). La mayoría de las investigaciones que evalúan la viabilidad financiera de plantaciones forestales, únicamente determinan los indicadores económicos tradicionales (por ejemplo, López López & Caballero Deloya, 2018; García Cuevas, Rodríguez Santiago, & Islas Gutiérrez, 2011; López-Sánchez & Musálem, 2007). Innovamos una simulación estocástica de riesgos que involucra aspectos de crecimiento forestal, variabilidad financiera, el efecto de agentes bióticos y fenómenos meteorológicos para validar la viabilidad financiera de una plantación forestal comercial proveniente de enriquecimiento de acahual en la costa de Oaxaca.

3.3. Materiales y métodos

3.3.1. Área de estudio

Los datos de las variables dasométricas fueron obtenidos de las evaluaciones realizadas en los años 2010-2015, 2017 y 2020 en 37 parcelas permanentes en una plantación forestal de enriquecimiento de acahual, en el municipio de San Pedro Pochutla ubicado en las coordenadas geográficas 15°39'27.36" a 15°55'21.72" de latitud Norte y 96°31'52.32" a 96°15'37.80" de longitud Oeste (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2020) de la región costa del estado de Oaxaca, una descripción más profunda del sitio de estudio se encuentra en Galán Larrea, de los Santos Posadas, & Valdez Hernández (2008). Se contó con ocho mediciones para cada parcela permanente y se confirmó cuidadosamente la coherencia de las mediciones de campo. Las evaluaciones también informan del estado fitosanitario de los árboles en cada sitio.

3.3.2. Evaluación forestal

Para ubicar las parcelas permanentes de muestreo se utilizó un GPS Garmin GSmap60csx (Sol-Sánchez, López-Juárez, Córdova-Ávalos, & Gallardo-López, 2018), para determinar las variables de altura total (m) y altura de fuste limpio (m) de los árboles en cada parcela se utilizó la pistola Haga GmbH & Co D-90429, la determinación de diámetro normal (cm) se efectuó con cinta diamétrica Bioweb® JIMG-59571 (García-Aguilar, Velasco-Velasco, V. A. Rodríguez-Ortiz, & Enríquez-del Valle, 2017), la medición de distancias horizontales (m) con cinta métrica Ingco® HFMT8130.

Para la obtención de los volúmenes, se utilizaron diferentes expresiones para cada especie. En el caso de cedro rojo, se presenta en la ecuación (18); las ecuaciones para determinar los volúmenes de la especie caoba, macuil y primavera se obtuvieron del SiBiFor: Sistema Biométrico Forestal para el manejo de los bosques de México (Vargas-Larreta et al., 2017), se expresan en las ecuaciones (19), (20) y (21):

$$v = e^{-7.3165+3.2288} \log(d) + 2.1332 \log(h) \quad (18)$$

$$v = 0.0040526 \cdot d^{1.2309873} \cdot h^{0.4354034} \quad (19)$$

$$v = 0.0001124 \cdot d^{1.667541} \cdot h^{0.9577109} \quad (20)$$

$$v = 0.0001336 \cdot dbh^{2.076199} \cdot h^{0.4137395} \quad (21)$$

donde: v es volumen (m^3); -7.3165, 3.2288, 2.1332, 0.0001124, 1.667541, 0.9577109, 0.0001336, 2.076199 y 0.4137395 son valores constantes; d es el diámetro normal (cm) y h es la altura total (m).

3.3.3. Ajuste de los modelos de crecimiento

Se ajustaron cinco modelos de crecimiento en función de la variable edad (años), mediante análisis de regresión, utilizando el software estadístico Statistical Analysis System (SAS), versión 9.4, para predecir el volumen de cosecha (m^3) (Santiago-García et al., 2016) de cada especie y el cual será objeto de venta. En el Cuadro 2 se muestran los modelos probados, propuestos por Kiviste, Álvarez González, Rojo Alboreca, & Ruiz González (2002) y Vásquez-García et al. (2016), para la actividad forestal.

Cuadro 2. Modelos ajustados para las especies de interés.

Especies	Nombre	Expresión matemática
Cedro rojo	Hossfeld I	$v = \frac{E^2}{(\beta_0 + \beta_1 E + \beta_2)} \quad (22)$
Cedro rojo y caoba	Hossfeld I (modificado)	$v = \frac{E^2}{(\beta_0 + \beta_1 E)^2} \quad (23)$
	Strand	$v = \left(\frac{E}{\beta_0 + \beta_1 E} \right)^3 \quad (24)$
Cedro rojo y primavera	Hossfeld III	$v = \frac{E}{(\beta_0 + \beta_1 \ln(E) + \beta_2 E)} \quad (25)$
Caoba y macuil	Chapman-Richards	$v = \beta_0 (1 - e^{-\beta_1 E})^{\beta_2} \quad (26)$
Caoba, macuil y primavera	Smalian	$v = \frac{E}{\beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 E^2} \quad (27)$
Macuil	Alométrica	$v = \beta_0 E^{\beta_1} \quad (28)$

Especies	Nombre	Expresión matemática	
Macuil y primavera	Exponencial	$v = \beta_0 e^{\beta_1 E}$	(29)
Primavera	Terazaki	$v = e^{\beta_0 - \frac{\beta_1}{E}}$	(30)
Todas	Schumacher	$v = \beta_0 e^{-\frac{\beta_1}{E}}$	(31)

v : volumen (m^3); E : edad (años); y β_i : parámetros.

Con las ecuaciones ajustadas, se procedió a seleccionar la expresión más confiable para estimar el volumen de cosecha en cada especie; se utilizó el criterio clásico que consiste en elegir el modelo que presente un valor mínimo de Cuadrados Medios del Error (CME) y el valor máximo del pseudo coeficiente de determinación (pseudo R^2) (Shamaki, Akindele, Isah, & Mohammed, 2016; Hernández-Ramos et al., 2018; Hernández-Ramos et al., 2019), además, se añadió el método general de dos criterios y se validaron los resultados obtenidos, siguiendo lo propuesto por Alvarado-Segura, Zamudio-Sánchez, & de La Cruz-De La Cruz (2020).

3.3.4. Evaluación financiera y análisis de sensibilidad

Los costos promedio ha^{-1} para las principales actividades de administración en la plantación forestal (establecimiento, manejo y cosecha), se determinaron por medio de entrevistas con el personal técnico y trabajadores involucrados en el proyecto (Ramírez-Martínez et al., 2021).

Para la asignación de precios por producto en el mercado, se consideró lo propuesto por Salazar-Ruiz, Murillo-Cruz, Salas-Rodríguez, & Fonseca-González (2021): madera primaria ($d \geq 30$ cm) y madera secundaria ($20 \text{ cm} \leq d < 30$ cm). El precio para cada especie y por tipo de producto se obtuvieron de Comisión Nacional Forestal [CONAFOR] (2018); para las especies cedro rojo y caoba: madera primaria (\$MXN 5 771.70 m^{-3}) y secundaria (\$MXN 3 581.37 m^{-3}); para las especies macuil y primavera: trocería (\$MXN 2 598.80 m^{-3}).

La actualización de los flujos de efectivo futuros es una actividad económica base, de amplio uso en la economía forestal, gracias al extenso periodo de tiempo

que ocurre entre el establecimiento y el aprovechamiento de la plantación (Sauter & Mußhoff, 2018). Por este motivo, la elección de la correcta tasa de actualización es un tema de continua discusión por sus extensas implicaciones (Nakajima et al., 2017; Moog, 2020; Chang, 2020). Optamos por el uso de tasas de actualización variables, proporcionadas por los Certificados de la Tesorería de la Federación (CETES) promedio de 28 días, 1996-2021 (Trujillo Ubaldo, Álvarez López, Valdovinos Chávez, Benitez Molina, & Rodríguez González, 2018; Navarro-Pineda, Ponce-Marbán, Sacramento-Rivero, & Barahona-Pérez, 2017; García Cuevas et al., 2011).

Los indicadores de viabilidad financiera recurridos fueron VAN, TIR, RBC (Ramírez-Martínez et al., 2021) y VES (Guera, Silva, Ferreira, Álvarez Lazo, & Barrero Medel, 2019); las ecuaciones (32) a (35) muestran las expresiones correspondientes:

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1 + i)^t} \quad (32)$$

$$TIR = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1 + i^*)^t} = 0 \quad (33)$$

$$RBC = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1 + i)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1 + i)^t}} \quad (34)$$

$$VES(T) = \frac{B_T - C_T}{(1 + i)^T - 1} \quad (35)$$

donde: B_t son los beneficios derivados del proyecto en el año t (\$MXN ha⁻¹); C_t son los costos erogados del proyecto en el año t (\$MXN ha⁻¹); i es la tasa de actualización (en decimales) obtenidas de los Certificados de la Tesorería de la Federación (CETES); t es el tiempo en años; i^* es la tasa (en decimales) que iguala el flujo de efectivo con cero; $VES(T)$ es el Valor Esperado del Suelo a la edad de rotación (\$MXN ha⁻¹); B_T son los beneficios derivados del proyecto a la

edad de rotación ($\$MXN ha^{-1}$); C_T son los costos acumulados derivados del proyecto a la edad de rotación ($\$MXN ha^{-1}$); T es la edad de rotación (años).

Para intuir las variables financieras que asocian riesgo a la viabilidad del proyecto, se ejecuta un análisis de sensibilidad determinístico. La aptitud de los indicadores financieros se obtiene evaluando su flexibilidad y experimentando la respuesta en la posibilidad del proyecto ante escenarios de estrés, asignando desarrollos optimistas o pesimistas de varias variables a la vez (Cardoso, Silva, & Eusébio, 201).

Los mismos autores, afirman que las variables siguientes influyen en la viabilidad del proyecto:

- i. Costo de establecimiento;
- ii. Tasa de actualización;
- iii. Precio de venta de la madera.

Para observar el efecto en el VES frente a posibles alteraciones de las variables mencionadas, se efectuó el análisis de sensibilidad. Los costos de establecimiento considerados fueron los reportados por López-Sánchez & Musálem (2007), la inversión obtenida para el proyecto de este estudio, el costo considerado por Espinosa-Zaragoza et al. (2016) y el determinado por García Cuevas et al. (2011). Para los precios por producto, se consideraron los reportados por CONAFOR (2015), CONAFOR (2016), CONAFOR (2017) y CONAFOR (2018). Las tasas de actualización probadas fueron la utilizada por Romo-Lozano, García-Cruz, Uribe-Gómez, & Rodríguez-Trejo (2012); la propuesta por Dong et al. (2020), la expuesta por Nakajima et al. (2017) y las reportadas en los CETES promedio de 28 días, 1996-2021. En el Cuadro 3 se aprecian los valores adquiridos de la literatura. El escenario base se llamó a la combinación de los precios reportados por CONAFOR (2018), costo de establecimiento de $\$MXN 21\ 935.94 ha^{-1}$ y una tasa de actualización proporcionada por las CETES promedio de 28 días, 1996-2021.

Cuadro 3. Valores de las variables usados en el análisis de sensibilidad.

Co (\$MXN ha ⁻¹)	P cedro rojo y caoba		P de troza macuil y primavera (\$MXN m ⁻³)	Tasa (%)
	Primario (\$MXN m ⁻³)	Secundario (\$MXN m ⁻³)		
20 093.06	3 066.36	1 416.02	1 283.80	1
21 935.94	3 483.44	1 395.40	1 293.45	3
25 095.66	4 341.02	2 717.84	1 585.24	5
32 887.03	5 453.83	3 970.95	2 790.51	CETES

Co: Costo de establecimiento; P: Precio por producto.

3.3.5. Determinación de la edad óptima de rotación

Un criterio para determinar la edad de rotación económicamente óptima es el de equi-marginalidad, propiamente, ocurre cuando el beneficio marginal (BM) y el costo marginal (CM) son iguales. Sus expresiones algebraicas se muestran en las ecuaciones (19) y (20) (Ramírez-Martínez et al., 2021):

$$BM = p \cdot V'(T) \quad (36)$$

$$CM = i \cdot p \cdot V(T) + i \cdot VES \quad (37)$$

donde p es el precio por producto (\$MXN m⁻³), $V'(T)$ es el incremento marginal en volumen (m³ ha⁻¹ año⁻¹); $V(T)$ es el volumen (m³ ha⁻¹).

Adicionalmente, se propone un criterio de identificación de la edad de rotación, el cual sucede cuando el incremento marginal de VES y el factor anual $i + 1$, son iguales.

3.3.6. Análisis de riesgo

La valoración de los riesgos de la rentabilidad de un proyecto, mayormente han sido abordados en la literatura forestal por enfoques determinísticos (Yoshimoto, Asante, & Konoshima, 2016). No obstante, investigaciones recientes (por ejemplo Knoke et al., 2021; Yang, Song, & Lu, 2020 y Lv, Li, & Sun, 2018) han integrado el método de simulación de Monte Carlo, permitiendo tomar en cuenta la dinámica de las variables (Moore, Ruel, Lapointe, & Lussier, 2011). La probabilidad evaluada de la rentabilidad del proyecto, comunican a los inversores

y técnicos forestales sobre posibles riesgos de inversión (Colantoni et al., 2021), conjuntamente puede considerarse como una medida de éxito de inversión.

Para realizar las simulaciones por el método de Monte Carlo, se ajustaron las variables de riesgo a diferentes distribuciones de probabilidad:

- i. el número de árboles $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$, se simularon como incidentes aleatorios, sin importar si fueron causados por plagas o huracanes (Brandl, Paul, Knoke, & Falk, 2020). La sobrevivencia de árboles por plaga, se simuló siguiendo la distribución binomial (Cheng, Ding, Xia, & Zhan, 2014) con la tasa de éxito obtenida en un análisis de supervivencia por el método de Kaplan-Meier (Neuner et al., 2014), previamente realizado usando la paquetería survival (Therneau, 2021) de R (R Core Team, 2019). La predicción de un huracán es difícil de realizar debido a su naturaleza escasa (Knoke et al., 2021), la ocurrencia de huracanes se simuló siguiendo una distribución tipo Poisson (Oxenyuk, Golam Kibria, Gulati, & Hamid, 2017), con una probabilidad igual al periodo de retorno, el cual se obtuvo de los registros de la Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2021); cuando la simulación favoreció la salida de un huracán, al número de árboles sobrevivientes se le disminuyó 6.7% que es el promedio de afectación de árboles ha^{-1} reportado en la literatura (Navarro-Martínez, Durán-García, & Méndez-González, 2016 y Parker, Martínez-Yrizar, Álvarez-Yépiz, Maass, & Araiza, 2018).
- ii. para simular las variables precio por producto en el mercado, los costos anuales del proyecto y las tasas anuales de actualización que normalmente se establecen desde una perspectiva determinística (por ejemplo Ferguson, 2015), se ajustaron las distribuciones: triangular, weibull, gamma, normal y log-normal. Para obtener una comparación ecuánime y elegir la distribución que mejor explicara el comportamiento de las variables, se hizo uso del criterio de información de Akaike (AIC) y del criterio de información bayesiano (BIC) como medidas de bondad de ajuste (Teimouri, Doser, & Finley, 2020), con base en lo anterior se

seleccionó la distribución tipo log-normal para simular las variables financieras con lo que Cary & Frey (2020) y Ferguson (2015) coinciden.

Se consideraron 25 años del horizonte de planeación y se ejecutaron 50 000 iteraciones en el método de simulación de Monte Carlo (Silva, Oliveira, Coelho Junior, Scolforo, & Souza, 2014). Con las variables simuladas se alimentaron las expresiones de indicadores económicos VAN, RBC y VES, obteniendo una gran cantidad de escenarios posibles. Todos los valores numéricos se computaron con el software estadístico R (R Core Team, 2019).

3.4. Resultados

3.4.1. Modelos de estimación de volúmenes de cosecha

Basados en el criterio clásico de selección del mejor modelo de estimación de volúmenes de cosecha, todos los modelos no lineales ofrecen ajustes convenientes. En el Cuadro 4 se muestran los estadísticos obtenidos y la estimación de los parámetros para el mejor modelo de cada especie.

Cuadro 4. Estadísticos de bondad de ajuste y parámetros estimados de los modelos

Especie	Modelo	CME	Pseudo R ²	Parám.	Estim.	Pr > t
Cedro rojo	Hossfeld III	0.0177	0.916	β_0	103.296	<0.0001
				β_1	-40.907	<0.0001
				β_2	1.646	<0.0001
Caoba	Chapman-Richards	0.0002	0.919	β_0	0.305	<0.0001
				β_1	0.124	<0.0001
				β_2	3.127	<0.0001
Macuil	Smalian	0.0004	0.884	β_0	341.793	<0.0001
				β_1	-21.065	<0.0001
				β_2	0.423	<0.0001
Primavera	Hossfeld III	0.0004	0.936	β_0	628.420	<0.0001
				β_1	-256.644	<0.0001
				β_2	9.726	<0.0001

CME: cuadrados medios del error; Pseudo R²: pseudo coeficiente de determinación; Parám: parámetro; Estim: Estimación; β_i : valor de los parámetros estimados; Pr > |t|: probabilidad de un valor más grande que t calculada.

Sumando el criterio sugerido por Alvarado-Segura et al. (2020), se seleccionaron los modelos más confiables y robustos desde la perspectiva estadística y económica, para predecir volúmenes de cosecha (ver Cuadro 5).

Cuadro 5. Modelos de rendimiento forestal para las especies de interés.

Especie	Modelo	Expresión matemática	
Cedro rojo	Schumacher	$v = 5.734435 \cdot e^{-\frac{27.657}{E}}$	(38)
Caoba	Chapman-Richards	$v = 0.305441 \cdot (1 - e^{-0.124158 \cdot E})^{3.127159}$	(39)
Macuil	Alométrico	$v = 0.000681 \cdot E^{1.925905}$	(40)
Primavera	Hossfeld III	$v = \frac{E}{628.42 - 256.64 \ln(E) + 9.7264E}$	(41)

v : volumen (m^3), E : edad (años)

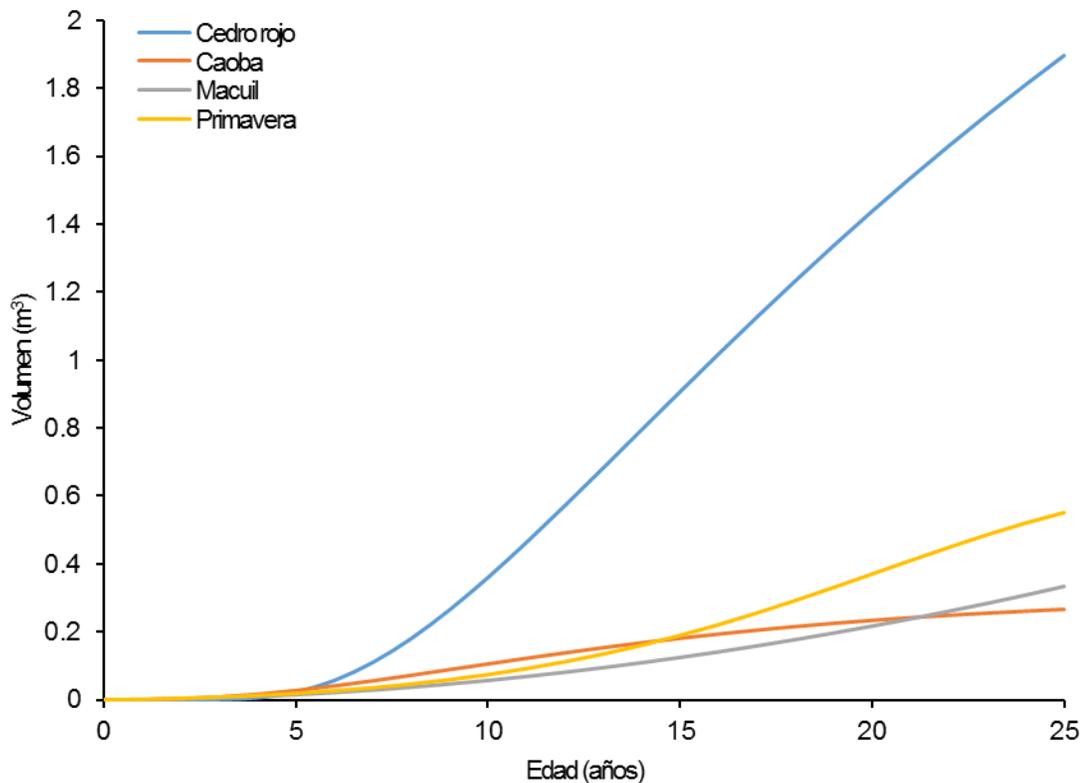


Figura 13. Curvas de volumen promedio por árbol pronosticadas a los 25 años para las cuatro especies de interés comercial

Estos modelos fueron validados, contrastando el volumen promedio estimado reconstruido con el volumen medio determinado en campo (la descripción

completa del método se encuentra en Alvarado-Segura et al., 2020). En la Figura 13, se aprecia que en un periodo de 25 años, la especie con mayor crecimiento por árbol es el cedro rojo y la de menor crecimiento es caoba.

3.4.2. Caracterización financiera y sensibilidad del proyecto

Se interpretaron los indicadores financieros según López López & Caballero Deloya (2018): se obtuvo un VAN = \$MXN 42 158.26 ha⁻¹ actualizado para el año 1996, VAN = \$MXN 393 873.26 ha⁻¹ actualizado para el año 2021, el proyecto es rentable porque VAN es positivo. El juicio anterior es validado por la RBC = 1.56, indicando que por peso invertido en 1996, el proyecto lo recobra y se obtiene una utilidad del 56% de la inversión, renovando los beneficios para el año 2021, se recobra el peso invertido que en la actualidad equivale a \$MXN 9.34 y se obtiene una ganancia de \$MXN 5.23. La TIR = 9.7%; este criterio informa que con dicha tasa de actualización, el VAN sería igual a cero; considerando que el valor promedio de los CETES se aproxima a 5% (Banco de México [BANXICO], 2021), la posibilidad económica de este proyecto es aceptable. Se obtuvo un VES = \$MXN 97 665.66 ha⁻¹ actualizado para el año 1996, VES = \$MXN 912 463.91 ha⁻¹ actualizado para el año 2021; para evaluar la bondad financiera desde esta perspectiva, se acepta el proyecto si el VES > el precio promedio del suelo desnudo en la región (Restrepo & Orrego, 2015).

Respecto al análisis de sensibilidad, se aprecia en la Figura 14 (a), que la variable precio por producto influye en los valores del VES, se obtienen mayores beneficios cuando la madera tiene un mayor precio; el valor máximo de la variable respuesta se presenta a los 20 años de edad, para los diferentes precios, los que supone desde esta perspectiva, la rotación en ese periodo. En la Figura 14 (b), se observa que el cambio en costo de establecimiento no tiene efecto en el VES debido a que es una mínima parte de todo lo invertido en el proyecto, a pesar de probar diferentes valores de esta variable, no se observa afectación en el VES, cuyos valores máximo se expresan en la edad de 20 años y esto supone dar lugar a la rotación.

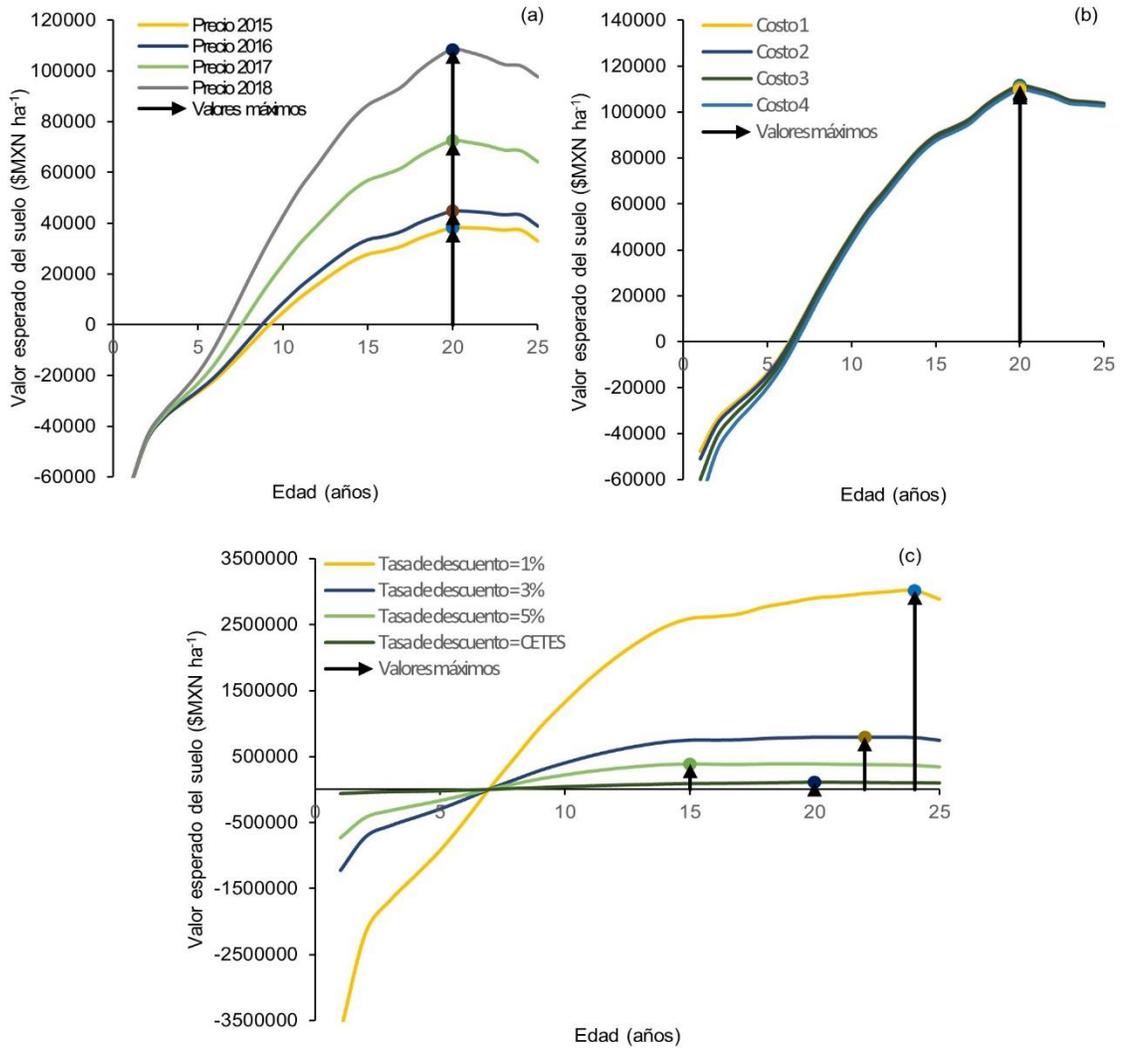


Figura 14. Diferentes valores de VES al variar (a) los precios por producto, (b) los costos de establecimiento y (c) las tasas de actualización.

La tasa de actualización influye en el VES, esto se muestra en la Figura 14 (c), obteniendo valores mayores de la variable respuesta cuando la tasa es menor y viceversa; desde esta perspectiva se observan diferentes edades en donde ocurre el máximo VES y en consecuencia, diferentes edades de rotación. De esta manera, se concluye que las variables que afectan la viabilidad del proyecto son el precio por producto y la tasa de actualización siendo esta última variable la que influye de forma más sólida en el periodo de rotación, con lo que Nakajima et al. (2017) coinciden.

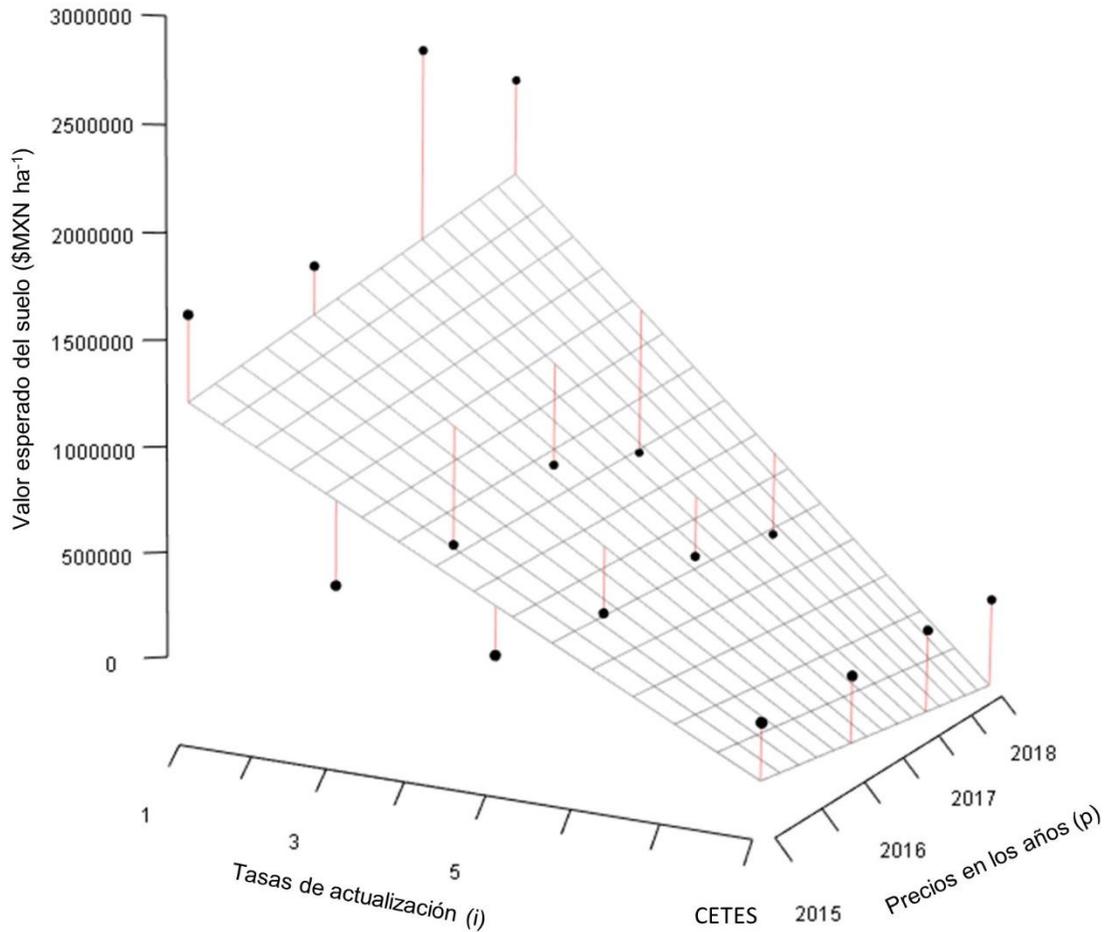


Figura 15. Comportamiento del VES ante cambios en la tasa de actualización y el precio por producto en el mercado.

En la Figura 15 se aprecia que el VES alcanza su valor máximo con los precios por producto reportados en el año 2018, con una tasa de actualización del 1% y el valor mínimo con los precios por producto reportados en el año 2015, con una tasa de actualización proporcionada por CETES. Asignando un valor constante al costo de establecimiento, y viendo la variación de i , se distingue que el VES alcanza los valores mayores en el intervalo de 1% a 3%. Por otro lado, percibiendo los valores de VES al variar los años de precio por producto, se advierte que las diferencia de los valores respuesta son mayores entre un precio y otro, en comparación de los obtenidos entre una tasa y otra. Concretamente se expone que la viabilidad del proyecto es más sensible a los cambios en precios por producto que a los cambios en tasas de actualización. Se considera esta variable como un elemento importante en la evaluación de este tipo de proyectos.

3.4.3. Edad de rotación óptima

En la Figura 16 se grafica el comportamiento de los beneficios marginales (BM) y los costos marginales (CM); inicialmente el crecimiento en volumen de madera, transcrito a BM prospera a grandes tasas, prevaleciendo sobre los CM. Al almacenar madera, el proyecto llega a un momento en que la regularidad de su desarrollo alcanza un punto máximo, y después, el crecimiento se rezaga de una forma considerable.

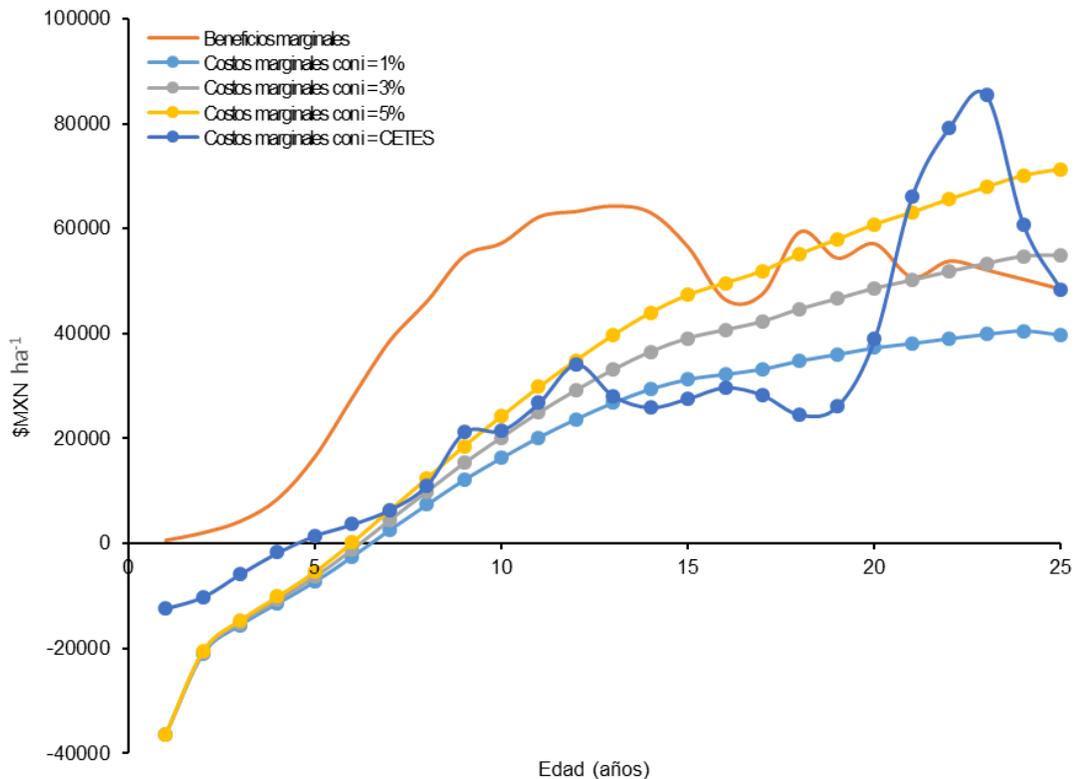


Figura 16. Edades de rotación óptima con costos marginales a diferentes tasas de actualización y el escenario base.

Las edades de rotación económicamente óptimas determinadas con diferentes tasas de actualización se observan en la Figura 16. Tal edad de rotación se sugiere a edades más tempranas, cuando las tasas de actualización son constantes y mayores. Cuando $i = 1\%$ la edad de cosecha es mayor a 25 años, con $i = 3\%$ la edad de cosecha se sugiere a los 23 años, con $i = 5\%$ la edad de cosecha se sugiere a los 18 años, con $i = CETES$ la cosecha debe realizarse a los 20 años de edad.

Tales hallazgos de edades prematuras de rotación, tiene consecuencias económicas; esto es debido a que, pasada la edad de rotación, el inversor tiende a perder sus beneficios económicos a medida que tarda en efectuar la cosecha. Una característica decisiva para elegir la edad de cosecha, está determinada por el porcentaje de duramen alcanzado en el diámetro del árbol y demás propiedades físico-mecánicas y químicas, peculiaridades que la catalogan como madera preciosa y de alto valor comercial (Honorato Salazar & Sánchez Monsalvo, 2018), la cual en edades tempranas es escasa en los árboles y por tal no cumplen con lo demandado por el mercado.

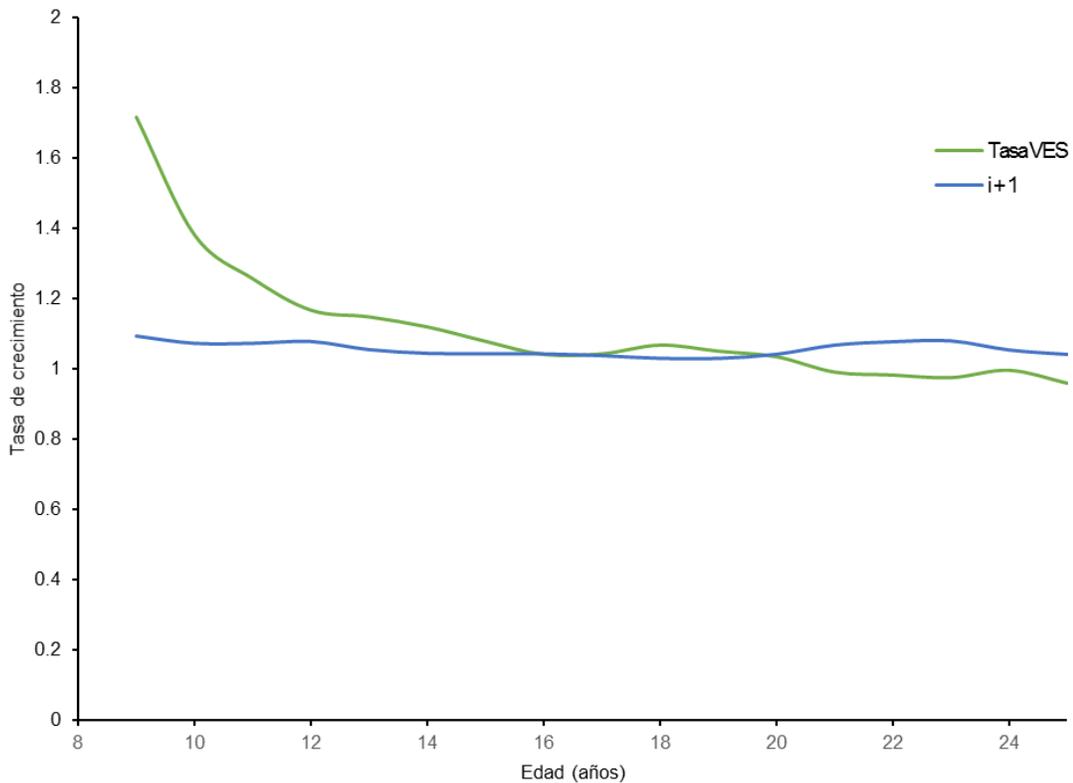


Figura 17. Edad de rotación óptima desde la perspectiva de los crecimientos en las tasas de VES y el valor de CETES + 1.

En la Figura 17 se expresa el comportamiento del incremento marginal de VES desde la edad que este es positivo, y el factor anual $i + 1$; se recomienda continuar con el proyecto siempre que la curva de incremento marginal de VES sea mayor que el factor anual $i + 1$, cuando estos sean iguales, se sugiere la cosecha, la cual ocurre en este estudio a los 20 años de edad. En la edad de 16

años (ver Figura 17), el incremento marginal de VES fue menor que el factor anual $i + 1$; en este caso no se considera como edad de rotación, pues esto es resultado del efecto de un huracán sobre el arbolado, reduciendo la cantidad de madera ($m^3 \text{ ha}^{-1}$), situación que cambio los años posteriores, hasta llegar a la edad óptima de rotación.

3.4.4. Análisis de riesgo

En el proceso del análisis de riesgo, se simularon los VES obteniendo múltiples escenarios posibles, se presentan los comportamientos de cinco condiciones correspondientes a los valores mínimos y primer cuartil que figuran escenarios desfavorables, tercer cuartil y máximo que representan escenarios optimistas y el escenario medio.

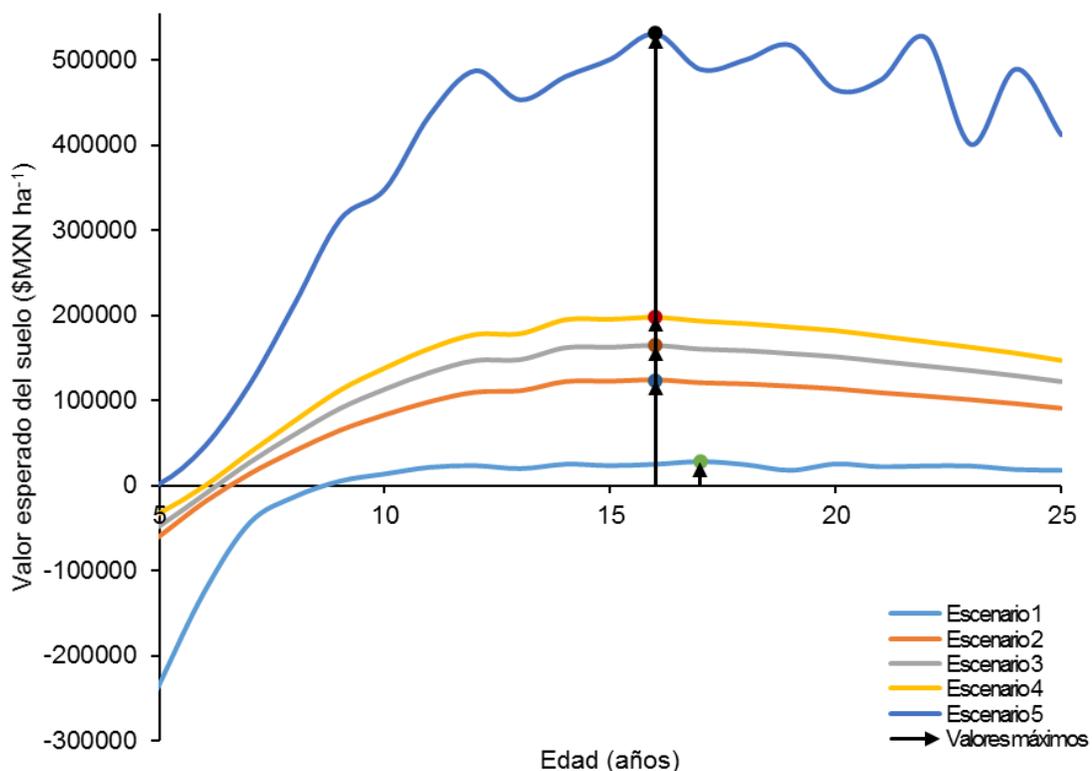


Figura 18. Escenarios estocásticos de VES y edad de rotación óptima.

En la Figura 18 se personifica el comportamiento de estas cinco condiciones y su valor máximo, entendido como la edad óptima de rotación; en el escenario

correspondiente a los valores mínimos, la edad de rotación se sugiere a los 17 años de edad; en los escenarios restantes se sugiere la rotación a los 16 años de edad. Se obtuvo un valor máximo para el escenario más optimista de \$MXN 531 523.73 ha⁻¹ y un valor máximo para el escenario más pesimista de \$MXN 27 919.89 ha⁻¹ (ver Figura 18).

Se simuló el VAN y la RBC, obteniendo diversos escenarios posibles, se ajustaron las distribuciones: normal y Cauchy para describir el comportamiento de los histogramas obtenidos para cada indicador financiero. Se determinó la bondad de ajuste con AIC y BIC, eligiendo la distribución normal como la idónea para describir el comportamiento de ambas variables y se determinó sus probabilidades de éxito y riesgo (ver Cuadro 6).

Cuadro 6. Probabilidad de éxito y estadísticos de los indicadores económicos.

Indicador	p(éxito)	\bar{x}	σ	LI	LS
VAN	88.4%	40959.85	34158.55	40660.44	41259.26
RBC	89.5%	1.433	0.345	1.430	1.436

VAN: valor actual neto, RBC: relación beneficio-costo, p(éxito): probabilidad de éxito, \bar{x} : media, σ : desviación estándar, LI: limite inferior, LS: limite superior.

En la Figura 19 se muestran los histogramas obtenidos del proceso estocástico que fueron sometidos el VAN y RBC, para determinar la viabilidad del proyecto en la primera rotación y mostrar el riesgo que se asumirá si las variables se comportan de una manera semejante a las observadas durante el primer horizonte de planeación. Obteniendo los valores de rentabilidad de la primera rotación, se deduce consecuentemente que la siguiente rotación tendrá una rentabilidad semejante, pero los resultados de los procesos de simulación, nos otorgan un criterio objetivo para afirmar tal conjetura.

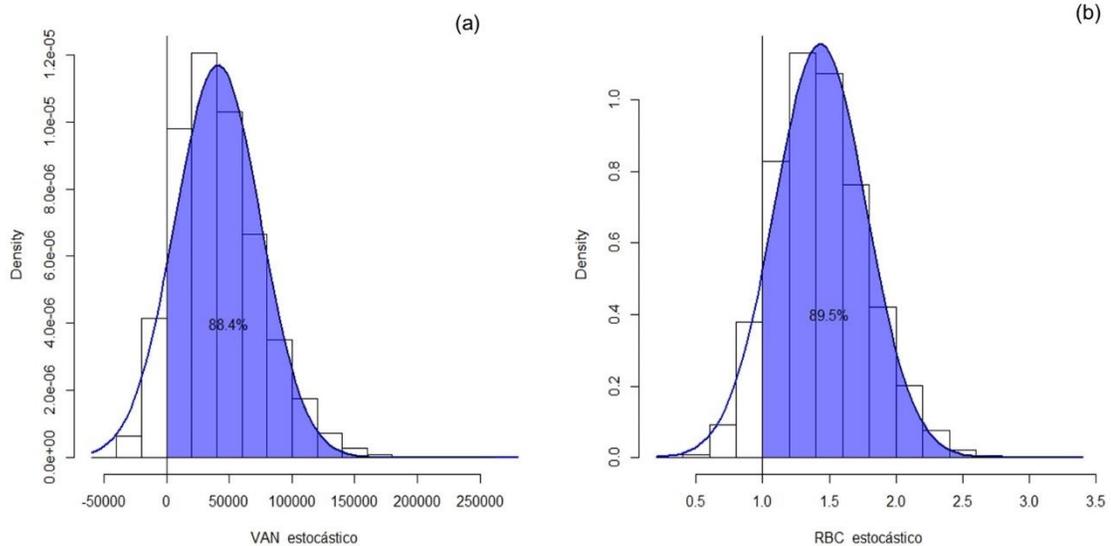


Figura 19. Histograma de los valores más posibles y probabilidad de éxito de los indicadores económicos.

En la Figura 19 (a), se visualiza gráficamente el área de éxito del proyecto con un VAN > 0 y en 19 (b) la probabilidad de que el proyecto sea exitosos desde la perspectiva que RBC > 1, además se infiere que a medida que se alarga el horizonte de planeación, esta probabilidad tiende a disminuir.

3.5. Discusión

Se efectuó una amplia evaluación a la plantación forestal “Agrosilvícola San José S.P.R. de R.L.”, que incluyó la mayor parte de los aspectos bioeconómicos de la inversión realizada, incluyendo modelos precisos para predicción de volúmenes de las especies comerciales, indicadores económicos, análisis de sensibilidad, edad de rotación y análisis de riesgo. Los modelos obtenidos en esta investigación estiman volúmenes que se ubican en el rango de los reportados en estudios precedentes; en lo referente a cedro rojo: nuestro hallazgo es inferior a los registrados por González-Rojas, Murillo-Cruz, Virginio-Filho, & Ávila-Arias (2017), Murillo-Brito, Domínguez-Domínguez, Martínez-Zurimendi, Lagunes-Espinoza, & Aldrete (2017), Carvajal-Arroyo, Murillo-Cruz, González Rojas, & Fonseca-González (2021) y superiores a los determinados por Muñoz-Flores et al. (2021); en relación con caoba: estimamos volúmenes inferiores a los

reportados por Pérez-González, Domínguez-Domínguez, Martínez-Zurimendi, & Etchevers Barra (2016), Forero-Montaña et al. (2021), Wadsworth & González (2008), superiores a los publicados por García-García et al. (2021) y similares a los determinados por Rueda Sánchez et al. (2021) para el estado de Nayarit; con relación a macuil: se obtuvieron volúmenes similares a los referidos por Rueda Sánchez et al. (2021) para el estado de Nayarit y volúmenes superiores a los publicados por los mismos autores, para los estados de Colima y Jalisco; en cuanto a primavera: los estudios previos que refieren volúmenes para esta especie son escasos por lo que no fue factible la comparación, aún con ello, los crecimientos maderables producto del manejo de la plantación son aceptables, lo cual se personifica en la rentabilidad de la inversión.

Con respecto a los números obtenidos como indicadores de bondad financiera (comparando los indicadores a un mismo año de referencia y a una misma tasa de descuento), se encuentran por debajo de lo reportado por García Cuevas et al. (2011), López-Sánchez & Musálem (2007), González-Rojas, Murillo-Cruz, & Ávila Arias (2017). El VES obtenido en esta investigación tiene un valor inferior a los hallados en estudios anteriores (actualizados al mismo año y con una misma tasa), por ejemplo, el desarrollado por Forero-Montaña et al. (2021); una peculiaridad adicional en este trabajo, es el uso de tasas de descuento reales, cuyo uso es poco frecuente (por ejemplo: Dobner Jr & Quadros, 2019). Aunque el proyecto es rentable desde esta perspectiva, sus indicadores de viabilidad económica son menores a los comúnmente obtenidos en otros proyectos similares, influyendo posiblemente la mezcla de especies comerciales con vegetación natural, demás factores climáticos necesarios para el desarrollo de las especies de interés, la variación de las tasas de actualización y los precios de madera en rollo, esto último derivado del análisis de sensibilidad.

Referente a la edad de rotación, es difícil comparar este valor con los obtenidos en la literatura, debido a que en esta investigación se trabajaron cuatro especies diferentes, de las cuales la rotación o ciclo de corta es establecido con base en la experiencia (Forero-Montaña et al., 2021). Los mismos autores mencionan que

en Filipinas, la edad de rotación para caoba es comúnmente establecida de los 15 a los 20 años de edad; Viera & Pineda (2013) proponen la cosecha a los 20 años en plantaciones de cedro rojo. Incurriendo en otras especies forestales maderables como la teca (*Tectona grandis*), la edad de rotación en centro y Sudamérica oscila entre 20 a 25 años de edad (Cubbage et al., 2010). Generalmente, Forero-Montaña et al. (2021) señalan que los ciclos recomendados de rotación se concentran en 25 años. El uso de criterios objetivos para la administración y planificación de la actividad forestal sigue siendo escaso para las especies objeto de estudio, siendo relevante determinar las edades de rotación de manera individual; un criterio adicional que debe involucrarse para determinar la cosecha es la existencia suficiente de duramen en el árbol y que además la madera a aprovechar goce de las propiedades físico-mecánicas y químicas demandadas por la industria. Se recomienda incluir esta variable en futuras evaluaciones para un alcance mayor.

Para concebir una perspectiva más pulcra sobre los resultados del análisis de riesgo, es necesaria la comparación con investigaciones similares, tanto en las especies de interés, como el método de manejo. Al no encontrarse referencias con estas características, se usaron investigaciones para otras especies comerciales. Por ejemplo, en una plantación de *Mimosa scabrella*, la probabilidad de obtener un VAN positivo es igual a 99.9% (Zamudio Sánchez et al., 2010) y en un bosque boreal bajo tres tipos de manejo, la probabilidad de obtener un VAN positivo es igual a 95%, 89.5% y 86.6% respectivamente (Moore et al., 2011). Obtuvimos una probabilidad de VAN positivo mayor que 50%, que es el mínimo requerido para que el proyecto sea rentable (Reeves & Haight, 2000); asumiendo que en el análisis se simuló todas las variables de riesgo reportadas en la primera rotación, los resultados tienen un amplio alcance y se recomienda iniciar una segunda rotación en el proyecto.

3.6. Conclusiones

Actualmente, los proyectos de plantaciones forestales, son subestimados respecto a su viabilidad financiera en la zona donde se desarrolló la investigación, practicando de manera general proyectos agropecuarios, debido al periodo relativamente largo que transcurre para el retorno de los beneficios y el riesgo intrínseco que este periodo conlleva en comparación con otras actividades primarias. Se planteó y desarrollo una evaluación conjunta, involucrando tópicos dasométricos, económicos y riesgo estocástico que determinan las probabilidades de viabilidad posible en las inversiones realizadas en una plantación específica, en donde se desarrollan actividades de manejo diferentes a las comúnmente conocidas. Referente a la modelación del crecimiento, se hizo uso de un conjunto de datos derivados de parcelas permanentes de muestreo y se ajustaron modelos de aplicación en el ámbito forestal. Los flujos de efectivo, costos erogados en toda la vida del proyecto y los precios de madera reportados por dependencias del Gobierno Federal Mexicano fueron base para la determinación de la edad de rotación económicamente óptima en tal proyecto. Se identificaron las variables financieras que conjeturan riesgo en la viabilidad del proyecto y se agregó el efecto aleatorio de factores ambientales y bióticos que fundan disturbio en la respuesta de la plantación; se estimó la probabilidad de éxito con la nueva perspectiva de incluir variables de diferentes naturalezas que generen riesgo en la viabilidad de la inversión. Los resultados muestran que la probabilidad de obtener un valor de VAN mayor que cero es del 88.4% y la probabilidad de obtener un valor de RBC mayor que uno es del 89.5%. Validado estadísticamente con el análisis de riesgo, se concluye que los resultados obtenidos demuestran que las plantaciones forestales en la región, son una opción de inversión viable y es factible su segunda rotación y replicaciones, es necesario mencionar que está propuesta está acotada a las condiciones de enriquecimiento de acahual bajo manejo para la región; la estimación para otras condiciones puede ser diferente a las obtenidas en este estudio.

3.7. Literatura citada

- Alvarado-Segura, A. A., Zamudio-Sánchez, F. J., & de La Cruz-De La Cruz, K. I. (2020). A Procedure for Choosing Tree-Stem Volume Equations Previously Fitted in a Forest. *Journal of Sustainable Forestry*, 39(6), 595–607. <https://doi.org/10.1080/10549811.2020.1711776>
- Arnold, U., & Yildiz, Z. (2015). Economic risk analysis of decentralized renewable energy infrastructures—A Monte Carlo Simulation approach. *Renewable Energy*, 77, 227–239. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.059>
- BANXICO. (2021). CETES 28 días-promedio mensual. Recuperado el 26 de julio del 2021, de <https://www.banxico.org.mx/Indicadores/consulta/Instrumentos.action>
- Borah, M., & Mahanta, D. J. (2018). An Approach to Estimate the Parameters of Von Bertalanffy Growth Models in forestry. *The Indian Forester*, 144(January), 41–53. Recuperado el 28 de julio del 2021, <http://indianforester.in/index.php/indianforester/article/view/121305>
- Brandl, S., Paul, C., Knoke, T., & Falk, W. (2020). The influence of climate and management on survival probability for Germany's most important tree species. *Forest Ecology and Management*, 458(December 2019), 117652. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117652>
- Burkhart, H. E., & Tomé, M. (2012). Indices of Individual-Tree Competition. *Modeling Forest Trees and Stands*, 201–232. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3170-9_9
- Cardoso, J., Silva, V., & Eusébio, D. (2019). Techno-economic analysis of a biomass gasification power plant dealing with forestry residues blends for electricity production in Portugal. *Journal of Cleaner Production*, 212, 741–753. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.054>
- Carvajal-Arroyo, D., Murillo-Cruz, R., González Rojas, M., & Fonseca-González, W. (2021). Evaluación del crecimiento de *Cedrela odorata* L. en sistemas agroforestales con café en Pérez Zeledón, Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(1), 230–249. <https://doi.org/10.15359/rca.55-1.11>
- Cary, M. A., & Frey, G. E. (2020). Alley cropping as an alternative under changing climate and risk scenarios: A Monte-Carlo simulation approach. *Agricultural Systems*, 185(September), 102938. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102938>
- Chang, S. J. (2020). Twenty one years after the publication of the generalized Faustmann formula. *Forest Policy and Economics*, 118, 102238. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102238>
- Cheng, Y. S., Ding, M. W., Xia, Y. M., & Zhan, W. F. (2014). Bayesian Analysis for Dynamic Generalized Linear Latent Model with Application to Tree Survival Rate. *Journal of Applied Mathematics*, 2014, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2014/783494>

- Colantoni, A., Villarini, M., Monarca, D., Carlini, M., Mosconi, E. M., Bocci, E., & Rajabi Hamedani, S. (2021). Economic analysis and risk assessment of biomass gasification CHP systems of different sizes through Monte Carlo simulation. *Energy Reports*, 7, 1954–1961. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.03.028>
- CONAGUA. (2021). Información Histórica. Recuperado el 03 de agosto del 2021, de <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica>
- CONAFOR. (2015). Precios de productos forestales maderables (Reporte trimestral enero-marzo 2015). Recuperado el 03 de agosto del 2021, de <https://snigf.cnf.gob.mx/precios-de-productos-forestales-maderables-sipre/>
- CONAFOR. (2016). Precios de productos forestales maderables (Reporte trimestral enero-marzo 2016). Recuperado el 03 de agosto del 2021, de <https://snigf.cnf.gob.mx/precios-de-productos-forestales-maderables-sipre/>
- CONAFOR. (2017). Precios de productos forestales maderables (Reporte trimestral julio-septiembre 2017). Recuperado el 03 de agosto del 2021, de <https://snigf.cnf.gob.mx/precios-de-productos-forestales-maderables-sipre/>
- CONAFOR. (2018). Precios de productos forestales maderables (Reporte semestral julio-diciembre 2018). Recuperado el 03 de agosto del 2021, de <https://snigf.cnf.gob.mx/precios-de-productos-forestales-maderables-sipre/>
- Cubbage, F., Koesbandana, S., Mac Donagh, P., Rubilar, R., Balmelli, G., Olmos, V. M., ... Kotze, H. (2010). Global timber investments, wood costs, regulation, and risk. *Biomass and Bioenergy*, 34(12), 1667–1678. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.05.008>
- Cuong, T., Chinh, T. T. Q., Zhang, Y., & Xie, Y. (2020). Economic Performance of Forest Plantations in Vietnam: Eucalyptus, Acacia mangium, and Manglietia conifera. *Forests*, 11(3), 284. <https://doi.org/10.3390/f11030284>
- de Assis, C. A., Houtman, C., Phillips, R., Bilek, E. M. T., Rojas, O. J., Pal, L., ... Gonzalez, R. (2017). Conversion Economics of Forest Biomaterials: Risk and Financial Analysis of CNC Manufacturing. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 11(4), 682–700. <https://doi.org/10.1002/bbb.1782>
- Dobner Jr, M., & Quadros, D. S. D. (2019). Economic performance of loblolly pine stands in Southern Brazil as a result of different crown thinning intensities1. *Revista Árvore*, 43(2), 1–11. <https://doi.org/10.1590/1806-90882019000200004>
- Dong, L., Lu, W., & Liu, Z. (2020). Determining the optimal rotations of larch plantations when multiple carbon pools and wood products are valued. *Forest Ecology and Management*, 474(July), 118356.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118356>

- Espinosa-Zaragoza, S., Escobar-Sandoval, M. C., Meza-Sandoval, B. E., Avendaño Arrazate, C. H., Ramírez-González, S. I., & López-Báez, O. (2016). Producción de primavera (*Roseodendron donell-smithii* syn *Tabebuia donell-smithii*), madera fina del trópico. *Agro Productividad*, 9(2), 42–49. Recuperado el 07 de agosto del 2021, de <https://www.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/719>
- Fang, L., Liu, S., & Huang, Z. (2019). Uncertain Johnson–Schumacher growth model with imprecise observations and k-fold cross-validation test. *Soft Computing*, 24(4), 2715–2720. <https://doi.org/10.1007/s00500-019-04090-4>
- Ferguson, I. (2015). Forest valuation and risk. *Australian Forestry*, 79(1), 32–42. <https://doi.org/10.1080/00049158.2015.1090111>
- Forero-Montaña, J., Zimmerman, J. K., González, E., Wadsworth, F., Ward, S., Meléndez Ackerman, E. J., ... Lee, C. A. (2021). Developing a growth and yield model for planted big-leaf mahogany (*Swietenia macrophylla* King) at advanced age in subtropical moist forest in Puerto Rico. *Trees, Forests and People*, 5, 100113. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100113>
- Frater, P. N., Hrafnkelsson, B., Elvarsson, B. T., & Stefansson, G. (2019). Drivers of growth for Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) in Icelandic waters – A Bayesian approach to determine spatiotemporal variation and its causes. *Journal of Fish Biology*, 95(2), 401–410. <https://doi.org/10.1111/jfb.14051>
- Galán Larrea, R., de los Santos Posadas, H. M., & Valdez Hernández, J. I. (2008). Crecimiento y rendimiento de *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donnell-smithii* Rose en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. *Madera y Bosques*, 14(2), 65–82. <https://doi.org/10.21829/myb.2008.1421213>
- García-Aguilar, J. A., Velasco-Velasco, V. A. Rodríguez-Ortiz, G., & Enríquez-del Valle, J. R. (2017). Influencia de la calidad de sitio sobre el crecimiento de una plantación de *Pinus patula* Schlt. et Cham. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(44). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i44.108>
- García-García, D. A., Sáenz-Reyes, J. T., Rueda-Sánchez, A., Muñoz-Flores, H. J., Castillo-Quiroz, D., & García-Mosqueda, G. E. (2021). Tablas de volumen de *Swietenia macrophylla* en plantaciones forestales del occidente de México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 17(1), 31–39. Recuperado el 12 de agosto del 2021, de <http://revista.itson.edu.mx/index.php/rlrn/article/view/302>
- García Cuevas, X., Rodríguez Santiago, B., & Islas Gutiérrez, J. (2011). Evaluación financiera de plantaciones forestales de caoba en Quintana Roo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(7), 7-26.
- González-Rojas, M., Murillo-Cruz, R., & Ávila Arias, C. (2017). Rentabilidad financiera de *Cedrela odorata* L. en sistemas agroforestales con café en Pérez Zeledón, Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 52(1), 129.

<https://doi.org/10.15359/rca.52-1.7>

- González-Rojas, M., Murillo-Cruz, R., Virginio-Filho, E. D. M., & Ávila-Arias, C. (2017). Influencia de factores biofísicos y de manejo en el crecimiento de *Cedrela odorata* L. en asocio con café en Pérez Zeledón, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 15(36), 46. <https://doi.org/https://doi.org/10.18845/rfmk.v15i36.3420>
- Grimes, A., & Cortés Acosta, S. (2021). Permanent forest investment in a climate of uncertainty. *SSRN Electronic Journal*. Published. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3937697>
- Guera, O. G. M., Silva, J. A. A. D., Ferreira, R. L. C., Álvarez Lazo, D., & Barrero Medel, H. (2019). Modelos matemáticos para la determinación del turno óptimo en plantaciones forestales. *Madera y Bosques*, 25(1). <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511636>
- Hernández-Ramos, J., García-Magaña, J. J., García-Cuevas, X., Hernández-Ramos, A., Muñoz-Flores, H. J., & Samperio-Jiménez, M. (2018). Índice de sitio para bosques naturales de *Pinus teocote* Schlecht. & Cham. en el oriente del estado de Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(27), 24–36. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i27.278>
- Hernández-Ramos, J., Tamarit-Urias, J. C., García-Cuevas, X., Hernández-Ramos, A., Reynoso-Santos, R., & Reyes-Hernández, V. (2019). Modelos alométricos altura-diámetro para *Bucida buceras* (pukté) en Quintana Roo, México. *Bosque (Valdivia)*, 40(3), 267–276. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002019000300267>
- Hildebrandt, P., & Knoke, T. (2011). Investment decisions under uncertainty-A methodological review on forest science studies. *Forest Policy and Economics*, 13(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2010.09.001>
- Honorato Salazar, J. A., & Sánchez Monsalvo, V. (2018). Variabilidad de la densidad básica de la madera de diez clones sobresalientes de cedro rojo *Cedrela odorata* L. En J. Martínez Herrera, M. Á. Ramírez Guillermo, & J. Cámara-Córdova (Eds.), *Investigaciones Científicas y Agrotecnológicas para la Seguridad Alimentaria* (pp. 221–225)
- INEGI. (2020). México en cifras: San Pedro Pochutla, Oaxaca (20324). Recuperado el 05 de agosto del 2021, de <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=20324>
- Keča, L., Keča, N., & Pantić, D. (2012). Net Present Value and Internal Rate of Return as indicators for assessment of cost-efficiency of poplar plantations: a Serbian case study. *International Forestry Review*, 14(2), 145–156. <https://doi.org/10.1505/146554812800923345>
- Kiviste, A., Álvarez González, J. G., Rojo Alboreca, A., & Ruiz González, A. D. (2002). *Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal*. Madrid, España.: INIA.
- Knoke, T., Gosling, E., & Paul, C. (2020). Use and misuse of the net present value

- in environmental studies. *Ecological Economics*, 174(July 2019), 106664. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106664>
- Knoke, T., Gosling, E., Thom, D., Chreptun, C., Rammig, A., & Seidl, R. (2021). Economic losses from natural disturbances in Norway spruce forests—A quantification using Monte-Carlo simulations. *Ecological Economics*, 185(October 2020), 107046. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107046>
- Koch, K. (2017). Monte Carlo methods. *GEM - International Journal on Geomathematics*, 9(1), 117–143. <https://doi.org/10.1007/s13137-017-0101-z>
- Liang, J., Zhong, M., Zeng, G., Chen, G., Hua, S., Li, X., ... Gao, X. (2017). Risk management for optimal land use planning integrating ecosystem services values: A case study in Changsha, Middle China. *Science of the Total Environment*, 579, 1675–1682. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.184>
- López-Sánchez, E., & Musálem, M. A. (2007). Sistemas agroforestales con cedro rojo, cedro nogal y primavera, una alternativa para el desarrollo de plantaciones forestales comerciales en los Tuxtlas, Veracruz, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 13(1), 59–66.
- López López, M. A., & Caballero Deloya, M. (2018). Análisis financiero de una plantación de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. de pequeña escala. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(46). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.116>
- Lv, J. P., Li, Y. P., & Sun, J. (2018). Monte Carlo simulation based interval chance-constrained programming for regional ecosystem management – A case study of Zhuhai, China. *Ecological Indicators*, 85(November 2017), 214–228. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.10.027>
- Mahanta, D. J., Saikia, P., & Chetia, A. (2018). A study on the height growth of different *Eucalyptus* species in India. *The Journal of Analysis*, 27(1), 293–310. <https://doi.org/10.1007/s41478-018-0125-2>
- Moog, M. (2020). Some comments on rotation modeling. *European Journal of Forest Research*, 139(1), 127–131. <https://doi.org/10.1007/s10342-019-01239-6>
- Moore, T. Y., Ruel, J. C., Lapointe, M. A., & Lussier, J. M. (2011). Evaluating the profitability of selection cuts in irregular boreal forests: an approach based on Monte Carlo simulations. *Forestry*, 85(1), 63–77. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpr057>
- Muñoz-Flores, H. J., Castillo-Quiroz, D., Sáenz-Reyes, J. T., Rueda-Sánchez, A., Castillo-Reyes, F., & García-García, D. A. (2021). Tablas de volumen de *Cedrela odorata* L. en plantaciones forestales en Colima, Jalisco y Nayarit, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 17(2), 40–48. Recuperado el 12 de septiembre del 2021, de

<http://revista.itson.edu.mx/index.php/rlrn/article/view/303>

- Murillo-Brito, Y., Domínguez-Domínguez, M., Martínez-Zurimendi, P., Lagunes-Espinoza, L. del C., & Aldrete, A. (2017). Índice de sitio en plantaciones de *Cedrela odorata* en el trópico húmedo de México. *Revista De La Facultad De Ciencias Agrarias UNCuyo*, *49(1)*, 15–31. Recuperado el 19 de septiembre del 2021, de <https://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/RFCA/article/view/3100>
- Nakajima, T., Shiraishi, N., Kanomata, H., & Matsumoto, M. (2017). A method to maximise forest profitability through optimal rotation period selection under various economic, site and silvicultural conditions. *New Zealand Journal of Forestry Science*, *47(1)*, 1–13. <https://doi.org/10.1186/s40490-016-0079-6>
- Navarro-Martínez, A., Durán-García, R., & Méndez-González, M. (2016). El impacto del huracán Dean sobre la estructura y composición arbórea de un bosque manejado en Quintana Roo, México. *Madera y Bosques*, *18(1)*, 57–76. <https://doi.org/10.21829/myb.2012.1811138>
- Navarro-Pineda, F. S., Ponce-Marbán, D. V., Sacramento-Rivero, J. C., & Barahona-Pérez, L. F. (2017). An economic model for estimating the viability of biodiesel production from *Jatropha curcas* L. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, *92(5)*, 971–980. <https://doi.org/10.1002/jctb.5058>
- Neuner, S., Albrecht, A., Cullmann, D., Engels, F., Griess, V. C., Hahn, W. A., . . . Knoke, T. (2014). Survival of Norway spruce remains higher in mixed stands under a dryer and warmer climate. *Global Change Biology*, *21(2)*, 935–946. <https://doi.org/10.1111/gcb.12751>
- Oxenyuk, V., Golam Kibria, B. M., Gulati, S., & Hamid, S. (2017). Distribution fits for various parameters in the florida public hurricane loss model. *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, *16(1)*, 481–497. <https://doi.org/10.22237/jmasm/1493598480>
- Parker, G., Martínez-Yrizar, A., Álvarez-Yépez, J. C., Maass, M., & Araiza, S. (2018). Effects of hurricane disturbance on a tropical dry forest canopy in western Mexico. *Forest Ecology and Management*, *426(November 2017)*, 39–52. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.11.037>
- Pérez-González, G., Domínguez-Domínguez, M., Martínez-Zurimendi, P., & Etchevers Barra, J. D. (2016). Caracterización dasométrica e índice de sitio en plantaciones de caoba en Tabasco, México. *Madera y Bosques*, *18(1)*, 7–24. <https://doi.org/10.21829/myb.2012.181511>
- R Core Team (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Ramírez-Martínez, A., González-Guillén, M., de Los Santos-Posadas, H., Ángeles-Pérez, G., & Santiago-García, W. (2021). Forest management with carbon scenarios in the central region of Mexico. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, *14(5)*, 413–420.

<https://doi.org/10.3832/ifor3630-014>

- Reeves, L. H., & Haight, R. G. (2000). Timber harvest scheduling with price uncertainty using Markowitz portfolio optimization. *Annals of Operations Research*, 95, 229–250. <https://doi.org/10.1023/A:1018974712925>
- Renner-Martin, K., Brunner, N., Kühleitner, M., Nowak, W. G., & Scheicher, K. (2018). On the exponent in the Von Bertalanffy growth model. *PeerJ*, 6, e4205. <https://doi.org/10.7717/peerj.4205>
- Restrepo, H. I., & Orrego, S. A. (2015). A comprehensive analysis of teak plantation investment in Colombia. *Forest Policy and Economics*, 57, 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2015.05.001>
- Romo-Lozano, J. L., García-Cruz, Y. B., Uribe-Gómez, M., & Rodríguez-Trejo, D. A. (2012). Prospectiva financiera de los sistemas agroforestales de el Fortín, municipio de Atzalan, Ver. *Revistas Chapingo Seria Ciencias Forestales y Del Ambiente*, XVIII(1), 43–55. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.09.068>
- Rueda Sánchez, A., Benavides Solorio, J. D. D., Sáenz Reyes, J. T., Muñoz Flores, H. J., Castillo Quiroz, D., & Sáenz Ceja, J. E. (2021). Evaluación de plantaciones de *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC. y *Swietenia macrophylla* King en el Centro-Occidente de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(67). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i67.866>
- Saikia, P., & Mahanta, D. J. (2020). An approach to estimate the parameters of Schnute growth model for growth of babul (*Acacia Nilotica*) trees in India. *Journal of Interdisciplinary Mathematics*, 23(February), 403–412. <https://doi.org/10.1080/09720502.2020.1737378>
- Salazar-Ruiz, A. G., Murillo-Cruz, R., Salas-Rodríguez, A., & Fonseca-González, W. (2021). Distribución de productos de *Cedrela odorata* L. en un sistema agroforestal con café en Pérez Zeledón, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 18(42), 74–80. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v16i42.5545>
- Santiago-García, W., de Los Santos-Posadas, H. M., Ángeles-Pérez, G., Valdez-Lazalde, J. R., Corral-Rivas, J. J., Rodríguez-Ortiz, G., & Santiago-García, E. (2016). Modelos de crecimiento y rendimiento de totalidad del rodal para *Pinus patula*. *Madera y Bosques*, 21(3), 95–110. <https://doi.org/https://doi.org/10.21829/myb.2015.213459>
- Sauter, P. A., & Mußhoff, O. (2018). What is your discount rate? Experimental evidence of foresters' risk and time preferences. *Annals of Forest Science*, 75(1). <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0683-5>
- Shamaki, S., Akindede, S., Isah, A., & Mohammed, I. (2016). Height-diameter Relationship Models for Teak (*Tectona grandis*) Plantation in Nimbria Forest Reserve, Nigeria. *Asian Journal of Environment & Ecology*, 1(1), 1–7. <https://doi.org/10.9734/ajee/2016/30635>
- Silva, C. S. J. E., Oliveira, A. D. D., Coelho Junior, L. M., Scolforo, J. R. S., &

- Souza, L. N. D. (2014). Viabilidad económica e rotación forestal de plantíos de candeia (*Eremanthus erythropappus*), em condições de risco. *CERNE*, 20(1), 113–122. <https://doi.org/10.1590/s0104-77602014000100015>
- Sol-Sánchez, Á., López-Juárez, S. A., Córdova-Ávalos, V., & Gallardo-López, F. (2018). Productividad potencial del SAF cacao asociado con árboles forestales. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 4(7), 862–877. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v4i7.6327>
- Svatoňová, T., Herák, D., & Kabutey, A. (2015). Financial Profitability and Sensitivity Analysis of Palm Oil Plantation in Indonesia. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 63(4), 1365–1373. <https://doi.org/10.11118/actaun201563041365>
- Tahvonen, O., & Viitala, E. J. (2006). Does faustmann rotation apply to fully regulated forests? *Forest Science*, 52(1), 23–30. <https://doi.org/10.1093/forestscience/52.1.23>
- Teimouri, M., Doser, J. W., & Finley, A. O. (2020). ForestFit: An R package for modeling plant size distributions. *Environmental Modelling and Software*, 131(February), 104668. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104668>
- Therneau, T. M. (2021). Survival: Survival Analysis. Version 3.2-13. Recuperado el 12 de mayo del 2021, de <https://cran.r-project.org/web/packages/survival/index.html>
- Tjørve, K. M. C., & Tjørve, E. (2017). A proposed family of Unified models for sigmoidal growth. *Ecological Modelling*, 359, 117–127. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.05.008>
- Trujillo Ubaldo, E., Álvarez López, P. S., Valdovinos Chávez, V. R., Benitez Molina, G., & Rodríguez González, L. O. (2018). Turnos forestales en plantaciones maderables de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, en Balancán, Tabasco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(48), 27–46. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i48.130>
- Vargas-Larreta, B., Corral-Rivas, J. J., Aguirre-Calderón, O. A., López-Martínez, J. O., De los Santos-Posadas, H. M., Zamudio-Sánchez, F. J., ... Aguirre-Calderón, C. G. (2017). SiBiFor: Sistema Biométrico Forestal para el manejo de los bosques de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(3), 437–455. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.06.040>
- Vásquez-García, I., Cetina-Alcalá, V. M., Campos-Bolaños, R., & Casal-Ángeles, L. F. (2016). Evaluación de plantaciones forestales en tres comunidades de la mixteca alta oaxaqueña. *Agroproductividad*, 9(2), 12–19. Recuperado el 17 de junio del 2021, de <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/716>
- Viera, C. J., & Pineda, A. (2013). Productividad de lindero maderable de *Cedrela odorata*. *Agronomía Mesoamericana*, 15(1), 85.

<https://doi.org/10.15517/am.v15i1.11934>

- Viitala, E. J. (2016). Faustmann formula before Faustmann in German territorial states. *Forest Policy and Economics*, 65, 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2015.11.004>
- Wadsworth, F. H., & González, E. (2008). Sustained mahogany (*Swietenia macrophylla*) plantation heartwood increment. *Forest Ecology and Management*, 255(2), 320–323. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.09.053>
- Xian, J., Xia, C., & Cao, S. (2020). Cost–benefit analysis for China’s Grain for Green Program. *Ecological Engineering*, 151(May), 105850. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105850>
- Yang, Y., Song, G., & Lu, S. (2020). Assessment of land ecosystem health with Monte Carlo simulation: A case study in Qiqihaer, China. *Journal of Cleaner Production*, 250, 119522. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119522>
- Yoshimoto, A., Asante, P., & Konoshima, M. (2016). Stand-Level Forest Management Planning Approaches. *Current Forestry Reports*, 2(3), 163–176. <https://doi.org/10.1007/s40725-016-0041-0>
- Yousefpour, R., & Augustynczyk, A. L. D. (2019). Uncertainty of Carbon Economy Using the Faustmann Model. *Journal of Forest Economics*, 34(1–2), 99–128. <https://doi.org/10.1561/112.00000444>
- Zamudio Sánchez, F. J., Romo Lozano, J. L., & Cervantes Carrillo, J. O. A. (2010). Evaluación financiera y de riesgo de una plantación forestal comercial en Zihuateutla, Puebla. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, XVI(1), 69–78. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2009.05.012>

4. DISCUSIÓN GENERAL

Se efectuó una amplia evaluación a la plantación forestal “Agrosilvícola San José S.P.R. de R.L.”, que incluyó la mayor parte de los aspectos bioeconómicos de la inversión realizada, incluyendo modelos precisos para predicción de volúmenes de las especies comerciales, indicadores económicos, análisis de sensibilidad, edad de rotación y análisis de riesgo. Los modelos obtenidos en esta investigación estiman volúmenes que se ubican en el rango de los reportados en estudios precedentes; en lo referente a cedro rojo: nuestro hallazgo es inferior a los registrados por González-Rojas, Murillo-Cruz, Virginio-Filho, & Ávila-Arias (2017), Murillo-Brito, Domínguez-Domínguez, Martínez-Zurimendi, Lagunes-Espinoza, & Aldrete (2017), Carvajal-Arroyo, Murillo-Cruz, González Rojas, & Fonseca-González (2021) y superiores a los determinados por Muñoz-Flores et al. (2021); en relación con caoba: estimamos volúmenes inferiores a los reportados por Pérez-González, Domínguez-Domínguez, Martínez-Zurimendi, & Etchevers Barra (2016), Forero-Montaña et al. (2021), Wadsworth & González (2008), superiores a los publicados por García-García et al. (2021) y similares a los determinados por Rueda Sánchez et al. (2021) para el estado de Nayarit; con relación a macuil: se obtuvieron volúmenes similares a los referidos por Rueda Sánchez et al. (2021) para el estado de Nayarit y volúmenes superiores a los publicados por los mismos autores, para los estados de Colima y Jalisco; en cuanto a primavera: los estudios previos que refieren volúmenes para esta especie son escasos por lo que no fue factible la comparación, aún con ello, los crecimientos maderables producto del manejo de la plantación son aceptables, lo cual se personifica en la rentabilidad de la inversión.

Con respecto a los números obtenidos como indicadores de bondad financiera (comparando los indicadores a un mismo año de referencia y a una misma tasa de descuento), se encuentran por debajo de lo reportado por García Cuevas et al. (2011), López-Sánchez & Musálem (2007), González-Rojas, Murillo-Cruz, & Ávila Arias (2017). El VES obtenido en esta investigación tiene un valor inferior a los hallados en estudios anteriores (actualizados al mismo año y con una misma

tasa), por ejemplo, el desarrollado por Forero-Montaña et al. (2021); una peculiaridad adicional en este trabajo, es el uso de tasas de descuento reales, cuyo uso es poco frecuente (por ejemplo: Dobner Jr & Quadros, 2019). Aunque el proyecto es rentable desde esta perspectiva, sus indicadores de viabilidad económica son menores a los comúnmente obtenidos en otros proyectos similares, influyendo posiblemente la mezcla de especies comerciales con vegetación natural, demás factores climáticos necesarios para el desarrollo de las especies de interés, la variación de las tasas de actualización y los precios de madera en rollo, esto último derivado del análisis de sensibilidad.

Referente a la edad de rotación, es difícil comparar este valor con los obtenidos en la literatura, debido a que en esta investigación se trabajaron cuatro especies diferentes, de las cuales la rotación o ciclo de corta es establecido con base en la experiencia (Forero-Montaña et al., 2021). Los mismos autores mencionan que en Filipinas, la edad de rotación para caoba es comúnmente establecida de los 15 a los 20 años de edad; Viera & Pineda (2013) proponen la cosecha a los 20 años en plantaciones de cedro rojo. Incurriendo en otras especies forestales maderables como la teca (*Tectona grandis*), la edad de rotación en centro y Sudamérica oscila entre 20 a 25 años de edad (Cubbage et al., 2010). Generalmente, Forero-Montaña et al. (2021) señalan que los ciclos recomendados de rotación se concentran en 25 años. El uso de criterios objetivos para la administración y planificación de la actividad forestal sigue siendo escaso para las especies objeto de estudio, siendo relevante determinar las edades de rotación de manera individual; un criterio adicional que debe involucrarse para determinar la cosecha es la existencia suficiente de duramen en el árbol y que además la madera a aprovechar goce de las propiedades físico-mecánicas y químicas demandadas por la industria. Se recomienda incluir esta variable en futuras evaluaciones para un alcance mayor.

Para concebir una perspectiva más pulcra sobre los resultados del análisis de riesgo, es necesaria la comparación con investigaciones similares, tanto en las especies de interés, como el método de manejo. Al no encontrarse referencias

con estas características, se usaron investigaciones para otras especies comerciales. Por ejemplo, en una plantación de *Mimosa scabrella* B., la probabilidad de obtener un VAN positivo es igual a 99.9% (Zamudio Sánchez et al., 2010) y en un bosque boreal bajo tres tipos de manejo, la probabilidad de obtener un VAN positivo es igual a 95%, 89.5% y 86.6% respectivamente (Moore et al., 2011). Obtuvimos una probabilidad de VAN positivo mayor que 50%, que es el mínimo requerido para que el proyecto sea rentable (Reeves & Haight, 2000); asumiendo que en el análisis se simularon todas las variables de riesgo reportadas en la primera rotación, los resultados tienen un amplio alcance y se recomienda iniciar una segunda rotación en el proyecto.

5. CONCLUSIÓN

Actualmente, los proyectos de plantaciones forestales, son subestimados respecto a su viabilidad financiera en la zona donde se desarrolló la investigación, practicando de manera general proyectos agropecuarios, debido al periodo relativamente largo que transcurre para el retorno de los beneficios y el riesgo intrínseco que este periodo conlleva en comparación con otras actividades primarias. Se planteó y desarrollo una evaluación conjunta, involucrando tópicos dasométricos, económicos y riesgo estocástico que determinan las probabilidades de viabilidad posible en las inversiones realizadas en una plantación específica, en donde se desarrollan actividades de manejo diferentes a las comúnmente conocidas. Referente a la modelación del crecimiento, se hizo uso de un conjunto de datos derivados de parcelas permanentes de muestreo y se ajustaron modelos de aplicación en el ámbito forestal. Los flujos de efectivo, costos erogados en toda la vida del proyecto y los precios de madera reportados por dependencias del Gobierno Federal Mexicano fueron base para la determinación de la edad de rotación económicamente óptima en tal proyecto. Se identificaron las variables financieras que conjeturan riesgo en la viabilidad del proyecto y se agregó el efecto aleatorio de factores ambientales y bióticos que fundan disturbio en la respuesta de la plantación; se estimó la probabilidad de éxito con la nueva perspectiva de incluir variables de diferentes naturalezas que generen riesgo en la viabilidad de la inversión. Los resultados muestran que la probabilidad de obtener un valor de VAN mayor que cero es del 88.4% y la probabilidad de obtener un valor de RBC mayor que uno es del 89.5%. Validado estadísticamente con el análisis de riesgo, se concluye que los resultados obtenidos demuestran que las plantaciones forestales en la región, son una opción de inversión viable y es factible su segunda rotación y replicaciones, es necesario mencionar que está propuesta está acotada a las condiciones de enriquecimiento de acahual bajo manejo para la región; la estimación para otras condiciones puede ser diferente a las obtenidas en este estudio.