



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



FACULTAD DE  
INGENIERÍA

# Análisis de decisiones de inversión sustentables en el sector agropecuario.

**Caso de Estudio: inversión silvopastoril.**

Informe de Proyecto de Grado presentado por

Maximiliano Fernández y Mario Alfaro

en cumplimiento parcial de los requerimientos para la graduación de la carrera de  
Ingeniería en Computación de Facultad de Ingeniería de la Universidad de la  
República

Supervisores

Antonio Mauttone  
Franco Robledo

Montevideo, 28 de mayo de 2024



Análisis de decisiones de inversión sustentables en el sector agropecuario.

**Caso de Estudio: inversión sil-**  
**vopastoril.** por Maximiliano Fernández y Mario Alfaro tie-  
ne licencia [CC Atribución 4.0](#).

## Integrantes del tribunal de defensa de tesis de grado

---

Dr. Héctor Cancela

---

Dr. Roberto Scoz

---

Dr. Libertad Tansini

Montevideo, 28 de mayo de 2024

# Agradecimientos

Quisiéramos agradecer, inicialmente a nuestras familias por apoyarnos durante toda esta carrera.

A su vez agradecemos enormemente a Franco Robledo y Antonio Mauttone por la oportunidad del proyecto y habernos guiado durante todo el proceso.

Por otra parte, un saludo especial a José “Pepe” Dutra, Roberto Scoz y Gustavo Amoza por el tiempo y dedicación, fueron una pieza fundamental para lograr llevar adelante este proyecto.

Por último, gracias a todos los que han estado presente, ayudándonos de una forma u otra y apoyando en este camino.

# Resumen

En el actual panorama de inversiones, caracterizado por una amplia gama de oportunidades, surge el desafío fundamental de tomar decisiones financieras efectivas. La tarea de invertir el capital de manera estratégica se presenta como un reto significativo para los inversores, que deben navegar a través de diversas opciones con el objetivo de maximizar sus rendimientos sin comprometer la seguridad de su capital. Este proyecto de grado aborda este problema y busca asistir en la toma de decisiones acerca de la conformación de un portafolio de inversiones, proponiendo una solución específica para el contexto uruguayo. El enfoque utilizado es el sector agroforestal, reconocido como un motor económico crucial en el país, el cual ofrece oportunidades significativas en tal sentido. La propuesta elaborada dentro de este sector incluye la forestación, ganadería y silvopastoreo, y complementa el portafolio con actividades puramente financieras como lo son los bonos, las letras de regulación monetaria y el bono ganadero. El objetivo principal es maximizar el valor actual neto mediante un modelo de programación lineal entera, implementado con las herramientas AMPL y CPLEX, seleccionando la combinación óptima de inversiones y considerando las particularidades del entorno nacional. La metodología utilizada garantiza precisión y eficiencia en los resultados, cuya validación se llevará a cabo mediante pruebas, que abarcan escenarios realistas, análisis de sensibilidad y verificación de resultados.

**Palabras clave:** programación lineal entera, decisiones de inversión, forestación, silvopastoreo, ganadería, optimización de portafolio, bonos, letras de regulación monetaria

# Índice general

|                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Introducción</b>                                             | <b>3</b>  |
| 1.1. Motivación y presentación del problema                        | 3         |
| 1.2. Objetivo general                                              | 4         |
| 1.3. Objetivos específicos                                         | 4         |
| 1.4. Organización del documento                                    | 5         |
| <b>2. Revisión de antecedentes</b>                                 | <b>6</b>  |
| 2.1. Decisiones de inversión                                       | 6         |
| 2.2. Inversiones en el Uruguay                                     | 7         |
| 2.2.1. Silvopastoreo                                               | 7         |
| 2.2.2. Forestación                                                 | 9         |
| 2.2.3. Ganadería                                                   | 11        |
| 2.2.4. Inversiones financieras                                     | 13        |
| 2.2.4.1. Bonos                                                     | 14        |
| 2.2.4.2. Letras de regulación monetarias                           | 14        |
| 2.2.4.3. Ganadería a través de un sistema de inversiones           | 14        |
| 2.3. Modelado matemático de decisiones de inversión                | 16        |
| 2.4. Programación lineal en optimización                           | 17        |
| 2.4.1. Herramientas para resolución                                | 18        |
| 2.5. Programación lineal aplicada a la optimización de portafolios | 18        |
| 2.5.1. Modelos de portafolios y decisiones de inversión            | 18        |
| 2.5.2. Modelos de optimización agroforestal                        | 20        |
| 2.5.3. Estudios relacionados a la actividad silvopastoril          | 21        |
| 2.5.4. Modelo tomado como base                                     | 22        |
| <b>3. Definición del problema y modelado</b>                       | <b>26</b> |
| 3.1. Supuestos                                                     | 26        |
| 3.1.1. Factores considerados                                       | 26        |
| 3.1.1.1. Sistemas forestales                                       | 26        |
| 3.1.1.2. Sistemas ganaderos                                        | 27        |
| 3.1.1.3. Sistemas silvopastoriles                                  | 27        |
| 3.1.1.4. Inversiones financieras                                   | 27        |
| 3.2. Modelo                                                        | 27        |
| 3.2.1. Conjuntos del modelo                                        | 27        |
| 3.2.2. Parámetros del modelo                                       | 28        |
| 3.2.3. Función objetivo                                            | 29        |
| 3.2.4. Variables del modelo                                        | 29        |
| 3.2.5. Definición del problema de programación lineal entera       | 30        |
| 3.3. Valores                                                       | 31        |
| 3.3.1. Forestación                                                 | 31        |
| 3.3.1.1. Inversión inicial forestal                                | 32        |
| 3.3.1.2. Costo operativo forestal                                  | 33        |

|           |                                                                                                     |           |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3.1.3.  | Retorno forestal . . . . .                                                                          | 34        |
| 3.3.2.    | Ganadería . . . . .                                                                                 | 35        |
| 3.3.2.1.  | Inversión inicial ganadera . . . . .                                                                | 35        |
| 3.3.2.2.  | Costo operativo ganadero . . . . .                                                                  | 37        |
| 3.3.2.3.  | Retorno ganadero . . . . .                                                                          | 38        |
| 3.3.3.    | Silvopastoreo . . . . .                                                                             | 39        |
| 3.3.3.1.  | Inversión inicial silvopastoril . . . . .                                                           | 39        |
| 3.3.3.2.  | Costo operativo silvopastoril . . . . .                                                             | 39        |
| 3.3.3.3.  | Retorno silvopastoril . . . . .                                                                     | 41        |
| 3.3.4.    | Bonos . . . . .                                                                                     | 41        |
| 3.3.4.1.  | Inversión inicial bonos . . . . .                                                                   | 42        |
| 3.3.4.2.  | Costos de bonos . . . . .                                                                           | 42        |
| 3.3.4.3.  | Retorno bonos . . . . .                                                                             | 43        |
| 3.3.5.    | Letras de regulación monetaria . . . . .                                                            | 43        |
| 3.3.5.1.  | Inversión inicial LRM . . . . .                                                                     | 43        |
| 3.3.5.2.  | Costos de LRM . . . . .                                                                             | 43        |
| 3.3.5.3.  | Retorno LRM . . . . .                                                                               | 44        |
| 3.3.6.    | Bono Ganadero . . . . .                                                                             | 44        |
| 3.3.6.1.  | Inversión inicial bono ganadero . . . . .                                                           | 44        |
| 3.3.6.2.  | Costos de bono ganadero . . . . .                                                                   | 44        |
| 3.3.6.3.  | Retorno bono ganadero . . . . .                                                                     | 44        |
| 3.3.7.    | Otros parámetros . . . . .                                                                          | 45        |
| 3.4.      | Codificación . . . . .                                                                              | 45        |
| <b>4.</b> | <b>Experimentos numéricos</b>                                                                       | <b>46</b> |
| 4.1.      | Diseño de pruebas . . . . .                                                                         | 46        |
| 4.1.1.    | Pruebas de validación y verificación . . . . .                                                      | 46        |
| 4.1.2.    | Pruebas con escenarios realistas . . . . .                                                          | 47        |
| 4.1.3.    | Pruebas de sensibilidad . . . . .                                                                   | 49        |
| 4.2.      | Resultados . . . . .                                                                                | 50        |
| 4.2.1.    | Pruebas de validación y verificación . . . . .                                                      | 51        |
| 4.2.2.    | Pruebas con escenarios realistas . . . . .                                                          | 52        |
| 4.2.3.    | Pruebas de sensibilidad . . . . .                                                                   | 53        |
| 4.2.3.1.  | Cantidad de zonas . . . . .                                                                         | 53        |
| 4.2.3.2.  | Presupuesto inicial . . . . .                                                                       | 54        |
| 4.2.3.3.  | Porcentaje de la inversión inicial utilizado para cada una de las actividades financieras . . . . . | 55        |
| 4.2.3.4.  | Presupuesto operativo anual . . . . .                                                               | 55        |
| 4.2.3.5.  | Actividades aceptadas . . . . .                                                                     | 56        |
| 4.2.3.6.  | Compra o alquiler del terreno . . . . .                                                             | 57        |
| 4.2.3.7.  | Comparación de compra y alquiler al disminuir la inversión inicial . . . . .                        | 58        |
| <b>5.</b> | <b>Conclusiones y Trabajo Futuro</b>                                                                | <b>61</b> |
|           | <b>Referencias</b>                                                                                  | <b>63</b> |
|           | <b>Anexos</b>                                                                                       | <b>67</b> |
| <b>A.</b> | <b>Precios de alquiler y compra</b>                                                                 | <b>68</b> |
| <b>B.</b> | <b>Terrenos</b>                                                                                     | <b>69</b> |
| B.1.      | Florida . . . . .                                                                                   | 69        |
| B.2.      | Tacuarembó . . . . .                                                                                | 70        |
| B.3.      | Maldonado . . . . .                                                                                 | 70        |

|                                          |           |
|------------------------------------------|-----------|
| <b>C. Resultados extendidos</b>          | <b>71</b> |
| C.1. Verificación y validación . . . . . | 71        |
| C.2. Realistas . . . . .                 | 73        |
| C.3. Sensibilidad . . . . .              | 76        |
| <b>D. Modelo en AMPL</b>                 | <b>78</b> |

# Lista de figuras

|                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Mapa del Uruguay con suelos aptos para silvopastoreo . . . . .                                                                                                       | 9  |
| 2.2. Exportaciones de productos primarios en valor de rubros principales con zona franca 2012-2022 en miles dólares corrientes . . . . .                                  | 10 |
| 2.3. Exportaciones en valor de productos primarios sin zona franca 2000-2022 en miles dólares corrientes . . . . .                                                        | 11 |
| 2.4. Uruguay XXI en base a datos de la Dirección Nacional de Aduanas, Nueva Palmira, Montes del Plata. . . . .                                                            | 12 |
| 2.5. Información de inversión ganadera - Conexión Ganadera. . . . .                                                                                                       | 15 |
| 2.6. Información de inversión ganadera renta fija - Silveira Inversiones Agropecuarias. . . . .                                                                           | 16 |
| 4.1. Relación lineal entre el la inversión inicial disponible y el VAN . . . . .                                                                                          | 55 |
| 4.2. Presupuesto anual disponible VS VAN . . . . .                                                                                                                        | 56 |
| 4.3. Actividades realizadas al disminuir el presupuesto anual . . . . .                                                                                                   | 56 |
| 4.4. Porcentaje de zonas en las que se realiza cada actividad y el valor del VAN total . . . . .                                                                          | 58 |
| 4.5. Evolución del VAN al aceptar parcialmente o no aceptar la actividad para alquiler de terreno, con detalle de actividades realizadas en las distintas zonas . . . . . | 59 |
| 4.6. Valor del VAN al disminuir presupuesto de inversión inicial para el caso de compra y alquiler. . . . .                                                               | 59 |
| 4.7. Valor del VAN. Alquiler VS compra. . . . .                                                                                                                           | 60 |
| 4.8. Actividades realizadas al disminuir la inversión inicial en los casos de compra y alquiler. . . . .                                                                  | 60 |
| B.1. Vista superior terreno Florida . . . . .                                                                                                                             | 69 |
| B.2. Vista superior terreno Tacuarembó . . . . .                                                                                                                          | 70 |
| B.3. Vista superior terreno Maldonado . . . . .                                                                                                                           | 70 |

# Lista de tablas

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1. Expresión al calcular el VAN vs notación del modelo . . . . .                                    | 29 |
| 3.2. Costos de compra y arrendamiento de terreno para forestación . . . . .                           | 32 |
| 3.3. Costos de la inversión inicial forestal . . . . .                                                | 32 |
| 3.4. Costos operativos forestal . . . . .                                                             | 33 |
| 3.5. Volumen y peso de madera producido por las especies . . . . .                                    | 33 |
| 3.6. Efecto porcentual del suelo sobre el volumen de madera producido . . . . .                       | 34 |
| 3.7. Precio de venta por metro cúbico según especie . . . . .                                         | 34 |
| 3.8. Unidad combinada de ganado por hectárea . . . . .                                                | 36 |
| 3.9. Producción de materia seca diaria . . . . .                                                      | 36 |
| 3.10. Costos de compra y arrendamiento de terreno para ganadería . . . . .                            | 37 |
| 3.11. Precios de referencia mercado de semillas . . . . .                                             | 37 |
| 3.12. Peso del ganado . . . . .                                                                       | 38 |
| 3.13. Costos de compra de ganado . . . . .                                                            | 38 |
| 3.14. Volumen y peso de madera producido por las especies . . . . .                                   | 40 |
| 3.15. Unidad combinada de ganado por hectárea para el silvopastoreo . . . . .                         | 40 |
| 3.16. Precio de venta por metro cúbico según especie y calidad de la madera . . . . .                 | 41 |
| 3.17. Costos de asesoramiento . . . . .                                                               | 42 |
| 3.18. Costos de mantenimiento de cuenta . . . . .                                                     | 42 |
| 3.19. Tasas de interés de las LRM . . . . .                                                           | 43 |
| 3.20. Tasas de interés para el bono ganadero . . . . .                                                | 44 |
| 4.1. Casos de prueba de validación y verificación . . . . .                                           | 47 |
| 4.2. Establecimientos reales considerados . . . . .                                                   | 48 |
| 4.3. Casos de prueba realistas . . . . .                                                              | 48 |
| 4.4. Casos de prueba de sensibilidad . . . . .                                                        | 50 |
| 4.5. Resultados de las pruebas de verificación y validación . . . . .                                 | 51 |
| 4.6. Resultados de las pruebas con escenarios realistas . . . . .                                     | 53 |
| 4.7. Resultados de las pruebas de sensibilidad . . . . .                                              | 54 |
| A.1. Costos de compra y arrendamiento de terreno por departamento . . . . .                           | 68 |
| C.1. Resultados de las pruebas de verificación y validación extendidos . . . . .                      | 71 |
| C.2. Balances anuales de las pruebas de verificación y validación . . . . .                           | 72 |
| C.3. Resultados de las pruebas realistas extendidos . . . . .                                         | 73 |
| C.4. Balances anuales de las pruebas realistas . . . . .                                              | 74 |
| C.5. Utilización de hectáreas según actividad y tipo de pastura de las pruebas<br>realistas . . . . . | 75 |
| C.6. Resultados de las pruebas de sensibilidad extendidos . . . . .                                   | 76 |
| C.7. Balances anuales de las pruebas de sensibilidad . . . . .                                        | 77 |

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación y presentación del problema

Uruguay es un país con una trayectoria de estabilidad en el ámbito político, social y con una economía sólida, lo que crea el ambiente adecuado para desarrollar inversiones exitosas. A su vez, la localización estratégica como puerta de entrada a la región ofrece el trampolín perfecto hacia América Latina ([UruguayXXI, 2021](#)). A raíz de ello resulta interesante y desafiante determinar cómo invertir el capital de manera estratégica de forma de maximizar el rendimiento y con bajos riesgos.

El sector agroforestal, reconocido como un motor económico del país, contiene dentro de sus actividades a la forestación, la cual representa el 3.8 % del PIB y ha mostrado un crecimiento continuo en las últimas dos décadas. Cuenta con importantes empresas instaladas actualmente en el país que se dedican a la producción de celulosa y al aserrado. Sin embargo para obtener retornos en esta actividad se debe esperar al menos 10 años, y durante ese periodo tener los fondos para sustentar el mantenimiento de los árboles ([UruguayXXI, 2021](#)).

Por su parte, la ganadería ofrece menores retornos, pero continuos, ocupando un lugar central en la economía y la identidad de Uruguay. En el país hay más de 38.000 establecimientos ganaderos, con casi 13 millones de hectáreas de pastoreo, sobre las que se maneja ganado vacuno y ovino ([Gómez, R, 2006](#)).

Por último el Silvopastoreo, actividad que hace una década era una práctica casi desconocida e inusual entre los productores ganaderos uruguayos, hoy capta cada vez mayor interés. Trata de incorporar el árbol en los sistemas ganaderos, teniendo como premisa el hecho de cómo sumar el árbol para que aporte un beneficio a esta actividad y que actúe como una fuente productiva y de ingreso. Combina las actividades ya mencionadas, y una de las principales ventajas es el bienestar animal. El ganado tiene sombra en verano y abrigo en invierno, que es cada día más importante por el cambio climático. A su vez, si bien hay menos cantidad de pastura, son más ricas en proteínas ([RevistaForestalUY, 2024](#)).

La estabilidad económica ya mencionada no solo ofrece buenas oportunidades de inversión en las actividades agroforestales, sino también en otro tipo de activos de bajo

riesgo como lo son los bonos, letras de regulación monetaria y bonos ganaderos. Las cuales llegan a tener retornos anuales de hasta un 10 % en dólares.

En marzo del 2023 la circulación de valores en el Uruguay ascendió enormemente y se estimó que la operativa total del mercado fue de alrededor del 88 % del PIB y estuvo constituido en un 80 % por emisiones de valores como certificados de depósitos bancarios y letras de regulación monetaria del Banco central del Uruguay ([Banco Central del Uruguay, 2023b](#)).

De esta forma se genera una gama de opciones para los inversores que permite diversificar su capital maximizando así sus rendimientos.

Encontrar la mejor forma de escoger y generar un portafolio de inversión fue una de las motivaciones más importantes para llevar adelante este trabajo. Otro punto fundamental para destacar y que también fue gran motivador, es que este proyecto surge de una línea de investigación llevada adelante por el actual Ing. Rodrigo Conde, quien realizó un estudio muy interesante para su proyecto de grado, realizando un modelado para la optimización de un portafolio de actividades agroforestales ([Conde, 2022](#)). En la sección [2.5.4](#) se explicará en detalle este trabajo.

A continuación se detallarán los objetivos generales y específicos definidos.

## 1.2. Objetivo general

- Realizar una investigación detallada de las actividades agroforestales del caso de estudio, y de actividades puramente financieras, estableciendo una base sólida de datos.
- Construir un modelo de programación lineal entera que a partir de una cierta cantidad de variables determine la mejor forma de generar un portafolio de inversión considerando las actividades ya estudiadas.

## 1.3. Objetivos específicos

- Obtener información precisa sobre los procesos operativos, costos involucrados y rendimientos esperados de las actividades forestación, silvopastoreo y ganadería, así como de las operaciones puramente financieras como lo son los bonos, letras de regulación monetaria y el bono ganadero, logrando determinar cuáles son los principales factores a considerar en cada una de las inversiones.
- Construir un modelo de programación lineal entera, implementado con las herramientas AMPL y CPLEX para calcular y optimizar el Valor Actual Neto (VAN), considerando las restricciones del mundo real.
- Realizar pruebas computacionales exhaustivas para evaluar la robustez y confiabilidad del sistema implementado.
- Analizar la rentabilidad resultante de combinar diferentes actividades financieras y evaluar su viabilidad en escenarios diversos.

## 1.4. Organización del documento

El documento está organizado en cuatro capítulos. Bibliografía y estado del arte de las áreas que tienen relación con el trabajo en el capítulo 2. Las decisiones tomadas e implementación del modelo en el capítulo 3, la puesta a prueba y evaluación del modelo junto con los resultados del mismo capítulo 4, las conclusiones finales y posible mejoras en el futuro, en el capítulo 5 y por último los anexos A donde se presentan datos extras y resultados extendidos.

## Capítulo 2

# Revisión de antecedentes

### 2.1. Decisiones de inversión

Como punto de partida, una inversión implica el consumo en un futuro inmediato de un conjunto de recursos escasos, o al menos limitados, con la perspectiva de obtener como contrapartida, en un futuro mediano y durante un lapso de cierta duración, una ventaja financiera o de otra índole. El patrocinio de una inversión puede estar a cargo de una persona física o jurídica, e inclusive puede hacerse la distinción de que el inversor sea una empresa privada o un organismo público. El objeto puede ser tanto un bien material como un inmaterial, y se agrupan en distintas categorías de acuerdo con su pertenencia a un determinado sector de la actividad socio-económica (Porteiro, J, 2016).

En otras palabras, las decisiones de inversión son elecciones relacionadas con la asignación de recursos financieros a diferentes activos, proyectos o negocios con el objetivo de obtener un retorno o beneficio económico en el futuro. Estas decisiones son cruciales para el crecimiento y la rentabilidad de cualquier entidad, ya sea un individuo, una empresa o incluso un gobierno.

El esquema desarrollado para dar un adecuado fundamento a la adopción de este tipo de decisiones se conoce como metodología de proyectos, integrada por una secuencia de actividades que cubre todo el desarrollo de la inversión, y es dividido en tres fases: Planeamiento, evaluación y ejecución. La fase inicial procura predecir con un razonable grado de seguridad el comportamiento futuro de la inversión bajo estudio y de la realidad en la cual habrá que insertarse, así como las posibilidades y formas de resolver su instrumentación en la práctica. Conduce hacia una disminución progresiva del riesgo y la incertidumbre de los resultados esperados. La fase de evaluación implica tomar la decisión de invertir o en su defecto abandonar o postergar la iniciativa. En la fase de ejecución se realiza la instalación, montaje y la puesta en marcha del sistema productivo, comercial, financiero y administrativo de esta nueva unidad económica (Porteiro, J, 2016).

En el contexto de la toma de decisiones financieras, el Valor Actual Neto (VAN) emerge como una herramienta fundamental para evaluar la rentabilidad de una inversión a lo largo del tiempo. Esta medida informa respecto al grado en que el proyecto bajo estudio remunera, en términos absolutos, al factor productivo capital. Esto es

así porque el indicador mide el retorno excedente, expresado en valor presente, que la inversión sería capaz de generar por encima de la tasa de descuento empleada para el cálculo de los flujos de fondos pronosticados, la cual se correlaciona con la devaluación del dólar o la rentabilidad mínima requerida por los inversores.

La retribución del capital expresada en el VAN se compone de dos elementos.

- Se computa el retorno mínimo requerido, el cual comprende la recuperación del capital invertido más el interés ganado; este último se incluye en los cálculos a través de la tasa de actualización seleccionada.
- Se determina un valor de capital calculado al momento cero, equivalente al valor actual de las rentas anuales pronosticadas que superan el nivel necesario para alcanzar el retorno mínimo requerido.

A continuación se detalla la fórmula del cálculo del VAN:

$$VAN = \sum_{j=1}^H \frac{FC_j}{(1+i)^j} - I \quad (2.1)$$

Siendo:

- $j$  el período de tiempo.
- $H$  el último período.
- $FC_j$  el flujo de efectivo neto en el periodo  $j$ .
- $I$  la inversión inicial.
- $i$  la tasa de descuento o tasa de rendimiento requerida.

Por lo tanto, un proyecto cuyo VAN es nulo gana exactamente el rendimiento necesario para compensar a quienes financian el proyecto. Si el VAN es positivo, el proyecto gana más que la tasa requerida de rendimiento y los accionistas reciben todos los flujos excesivos, y si el VAN es negativo, la actividad no llega a compensar la inversión inicial, y esto implica que no es rentable.

## 2.2. Inversiones en el Uruguay

### 2.2.1. Silvopastoreo

Según FAO (Food and Agriculture Organization) el sistema silvopastoril, es aquel que combina la producción forestal con las pasturas y los animales en la misma unidad de terreno.

Es una práctica que combina la ganadería con la plantación de árboles, generando beneficios ambientales, sociales y económicos. De esta forma, los árboles proporcionan sombra y protección contra el viento, mejoran la calidad del suelo y contribuyen a la captura de carbono. Los pastos, a su vez, suministran forraje para el ganado y ayudan a mantener el equilibrio del sistema. Los animales pueden aprovechar los pastos y contribuir a la fertilización del suelo a través de sus excrementos.

Los objetivos de incorporar el componente arbóreo en sistemas ganaderos pueden ser múltiples y diversos. En algunos casos se busca incrementar la productividad del suelo y el beneficio neto del sistema en el largo plazo; en otros reducir el riesgo a través de la diversificación de salidas del sistema, o atenuar los efectos trimestrales del estrés climático sobre las plantas y los animales.

En la última década, todos los países de la región han incorporado el desarrollo sostenible. Estos sistemas crean un marco para los sistemas de producción animal, que no solo deban incrementar la productividad, si no, también tendrán que ser más compatibles con el uso racional de la base de los recursos naturales. De esta forma, la incorporación de árboles en los sistemas de producción ganadera, es una estrategia que responde a los propósitos planteados, así como el de contribuir a contrarrestar los impactos ambientales negativos característicos de los sistemas tradicionales (Gallo, L, 2006).

Destacando como beneficios la sostenibilidad ambiental, el silvopastoreo promueve la conservación de suelos, previene la erosión, mejora la calidad del agua y reduce la contaminación. Los árboles actúan como barreras contra el viento, evitando la pérdida de humedad y protegiendo los cultivos. A su vez, la combinación de árboles y pastos contribuye a la captura de carbono, ayudando a mitigar el cambio climático.

Por último, teniendo en cuenta el silvopastoreo como inversión y como contrapartida de la ganadería pura, permite reducir la dependencia exclusiva de los productores a la propia ganadería, diversificando sus ingresos.

En la figura 2.1 se presenta un mapa del Uruguay con los grupos de suelos con buenas aptitudes para sistemas silvopastoriles en las tres zonas agroecológicas y ubicación de las principales industrias procesadoras de madera, habiéndose utilizado algunos criterios previamente definidos para realizar la categorización de cada uno de ellos: tipo de suelo, especie forestal adaptada, destino del principal producto maderable y sistema ganadero prevalente (de Lima, 2020).

En cuanto a su funcionamiento, los sistemas silvopastoriles tanto en Uruguay como Argentina parten de la premisa de que la vaca y la pastura ya están en el predio. La idea es incorporar el árbol sin desplazar la ganadería, proporcionando un abrigo y sombra sin eliminar el pasto.

Las densidades de árboles son bajas en comparación con los sistemas forestales, se consideran entre 250 y 300 árboles por hectárea, los cuales son distribuidos estratégicamente para mantener el ingreso de sol, para que se siga generando pastura y se mantenga el suelo sano.

En lo que respecta a las especies forestales, el pino y el eucalipto son las más elegidas, utilizándose principalmente el eucalipto, lo cual varía dependiendo de las zonas, y en cuanto a las especies ganaderas, no existen limitaciones al respecto (Dutra, J, 2023).

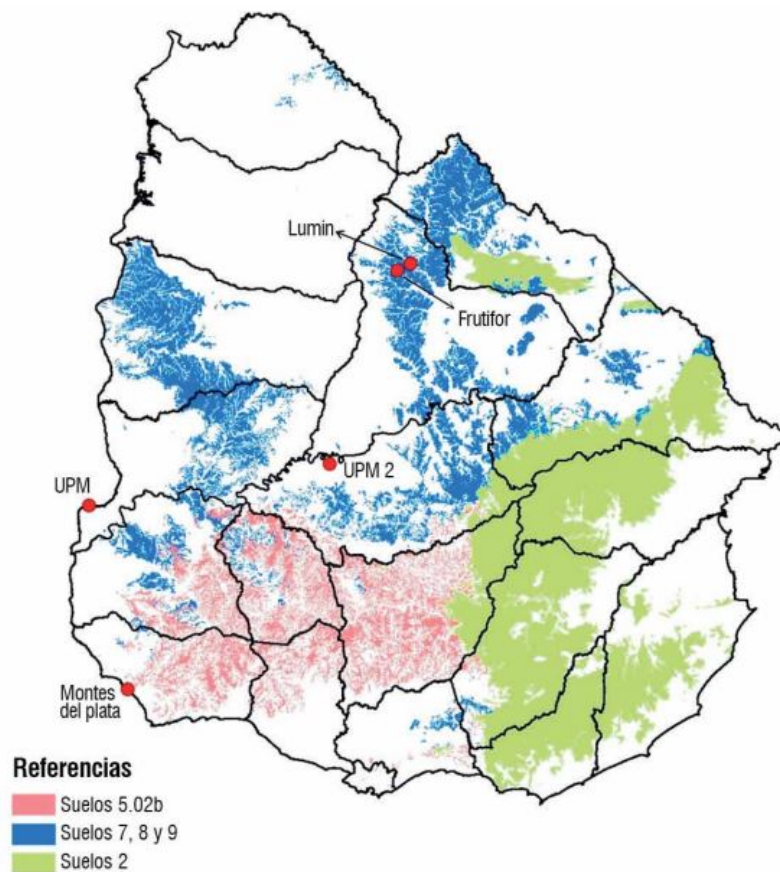


Figura 2.1: Mapa del Uruguay con suelos aptos para silvopastoreo (de Lima, 2020)

### 2.2.2. Forestación

La forestación en Uruguay es muy particular, ya que no funciona en bosques nativos como en muchas partes, sino que se inclina más a la siembra de árboles donde no había árboles antes. Esta representa el 3.8% del PIB del Uruguay y ha mostrado un crecimiento continuo en las últimas dos décadas. Cuenta con importantes empresas instaladas actualmente en el país como UPM, Montes del Plata y Lumin que se dedican a la producción de celulosa y otras como Urufor, Arboreal/Frutifor y Fyma/Dank que se dedican al aserrado (Uruguay XXI, 2022).

Los principales tipos de árboles que se utilizan en Uruguay son dos grupos: Eucaliptus y Pino. El primero teniendo una vida de 10-12 años y su principal destino siendo pulpa de celulosa y el segundo de 18-24 y su principal destino es aserrío (Uruguay XXI, 2022). Actualmente, se está imponiendo cada vez más el cultivo del Eucalipto debido a que el tiempo de vida del mismo es casi la mitad. Estos se siembran con densidades de alrededor de 1600 árboles por hectárea cuando su destino es celulosa (Scoz, R, 2023).

Es un sector que ha mostrado un crecimiento económico y en producción en los últimos años como se puede ver en 2.2 Donde se presentan los ingresos incluyendo

la Zona franca con la que operan las principales empresas de celulosa; sin embargo, también se puede ver en 2.3 cómo los niveles de exportación sin incluir la Zona franca han sido de alto incremento. Los valores relevantes para este trabajo, sobre todo, son los de venta de rollos de Eucalipto, que pueden ser destinados tanto a celulosa como a construcción, dependiendo del cuidado, mantenimiento (podas y raleos) y densidad de sembrado que se emplee (Scoz, R, 2023).

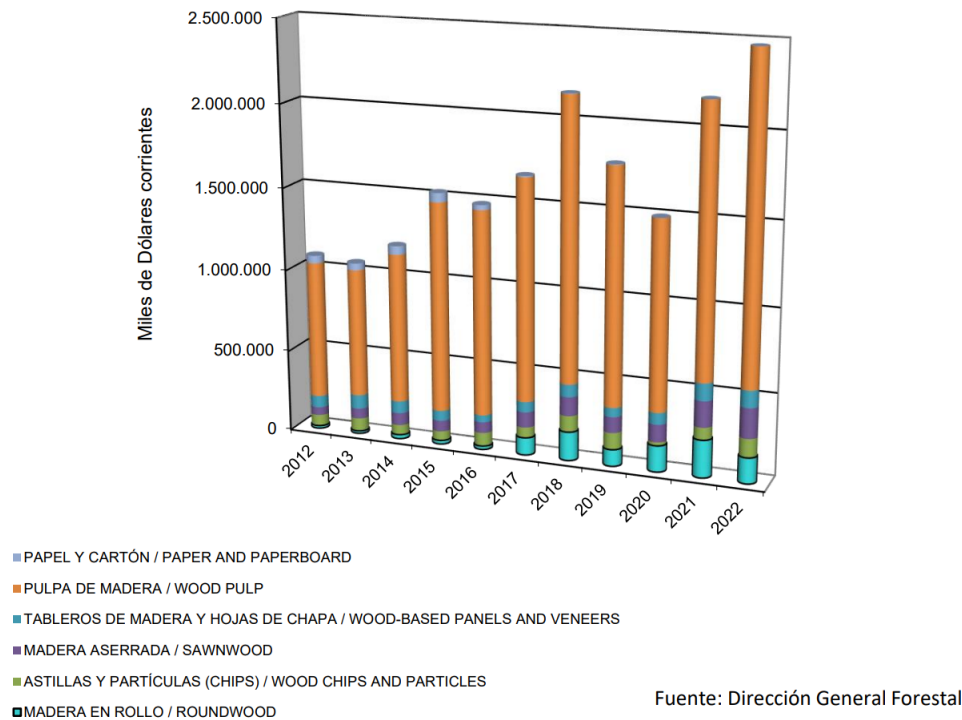


Figura 2.2: Exportaciones de productos primarios en valor de rubros principales con zona franca 2012-2022 en miles dólares corrientes (Boscana, M. y Faroppa, C, 2023)

La mayoría de madera rolliza de eucalipto es exportada a las zonas francas, por las principales empresas que se mencionaron anteriormente que se dedican a la producción de celulosa, mientras que el resto son destinados a países extranjeros como Finlandia, China, Vietnam, Portugal, entre otros (Boscana, M. y Faroppa, C, 2023).

La actividad forestal es fomentada por varias leyes como la Ley Forestal (15.939) que designó más de cuatro millones de hectáreas de prioridad forestal, debido a que el tipo de suelo que tienen no es bueno para otro tipo de actividades. Otras leyes son la de promoción de inversiones (16.906) y la ley de parques industriales (19.784) que ofrecen importantes beneficios fiscales a la actividad industrial; gracias a estas leyes las empresas exportadoras se puede acoger al régimen de admisión temporaria esto les permite importar insumos libres de impuestos (IVA y tributos de importación) y además se puede combinar con la devolución de tributos a la exportación que equivale

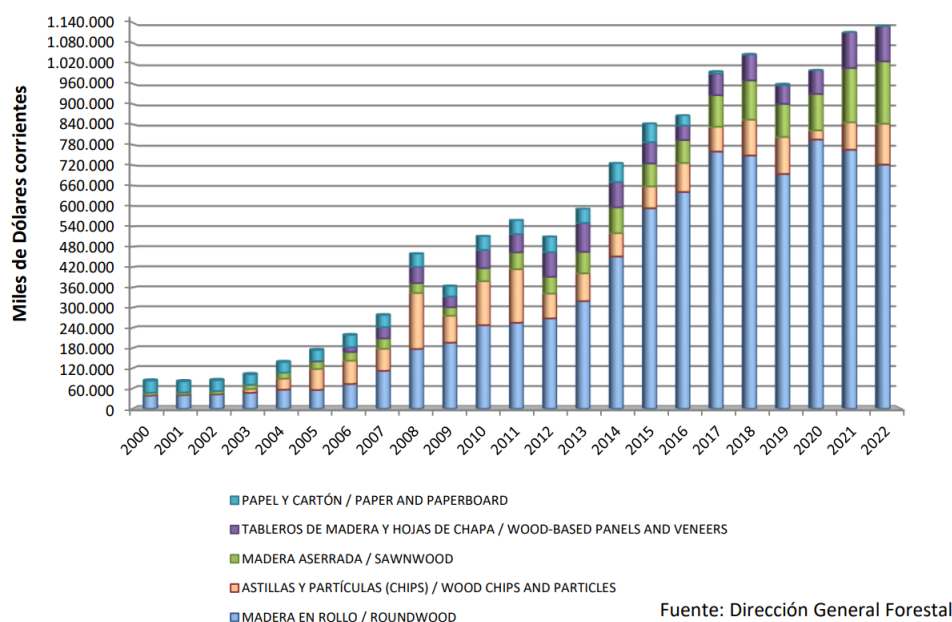


Figura 2.3: Exportaciones en valor de productos primarios sin zona franca 2000-2022 en miles dólares corrientes. (Boscana, M. y Faroppa, C, 2023)

a un 3-6 % del valor FOB<sup>1</sup> (free on board). Todo esto hace que la actividad forestal sea muy rentable para empresas extranjeras y por eso se ha visto el gran crecimiento en este rubro, destacando la segunda planta de UPM que fue inaugurada en junio del 2023. La cual representó una inversión de alrededor de US\$ 3.000 millones (5.4 % del PIB) siendo la inversión extranjera más grande que ha recibido el país y la más grande de la empresa en más de 100 años de historia (Uruguay XXI, 2022).

A pesar de todo este crecimiento y rentabilidad que está presentando el sector, sigue siendo bastante cerrado y no hay un mercado abierto como por ejemplo al compararlo con el sector ganadero, en el sentido de que los precios de compra/venta de los distintos productos maderables no son de fácil acceso a menos que se esté muy involucrado en el rubro (Scoz, R, 2023).

### 2.2.3. Ganadería

La ganadería ocupa un lugar central en la economía y la identidad de Uruguay, desempeñando un papel fundamental en su historia, cultura y desarrollo socio-económico. En el país hay más de 38.000 establecimientos ganaderos, ocupando casi 13 millones de hectáreas de pastoreo, sobre las que se maneja ganado vacuno y ovino. El hecho de ser Uruguay el tercer país en el mundo en cuanto a calidad ambiental, el que los animales consuman pasturas naturales libremente durante todo el año, y que no consuman proteínas de origen animal, ni hormonas, le da a nuestras carnes características especiales. Se trata de un producto natural, con bajo contenido de grasa y colesterol y una alta concentración de vitamina E, lo que la hace muy adecuada para una dieta

<sup>1</sup>Es el valor de la mercancía puesta a bordo de un transporte marítimo. Este valor incluye el costo de la mercancía en el país de origen, el transporte de los bienes y los derechos de exportación

sana y nutritiva (Gómez, R, 2006).

El sector ganadero mantuvo su liderazgo como el principal sector exportador de Uruguay al generar ingresos por USD 3.614 millones en 2021, siendo un récord histórico por parte del sector, con un crecimiento del 60 % en la comparación interanual. Dentro de las exportaciones del sector ganadero, los productos cárnicos totalizaron USD 3.047 millones en 2021, lo que correspondió a 717.000 toneladas, un incremento interanual del 34 % en volumen. Las exportaciones uruguayas de productos ganaderos en 2021 ingresaron a casi 100 destinos, como se puede ver en 2.4 con una fuerte participación de los países de Asia y Medio Oriente (63 %), Europa (18 %) y América del Norte (11 %). China fue el principal destino de exportación para la ganadería uruguaya. En 2021 concentró el 60 % de las ventas externas del sector, al totalizar USD 2.162 millones de productos ganaderos, prácticamente duplicando el valor exportado en 2020 (41 % superior a 2019) (Uruguay XXI, 2023).

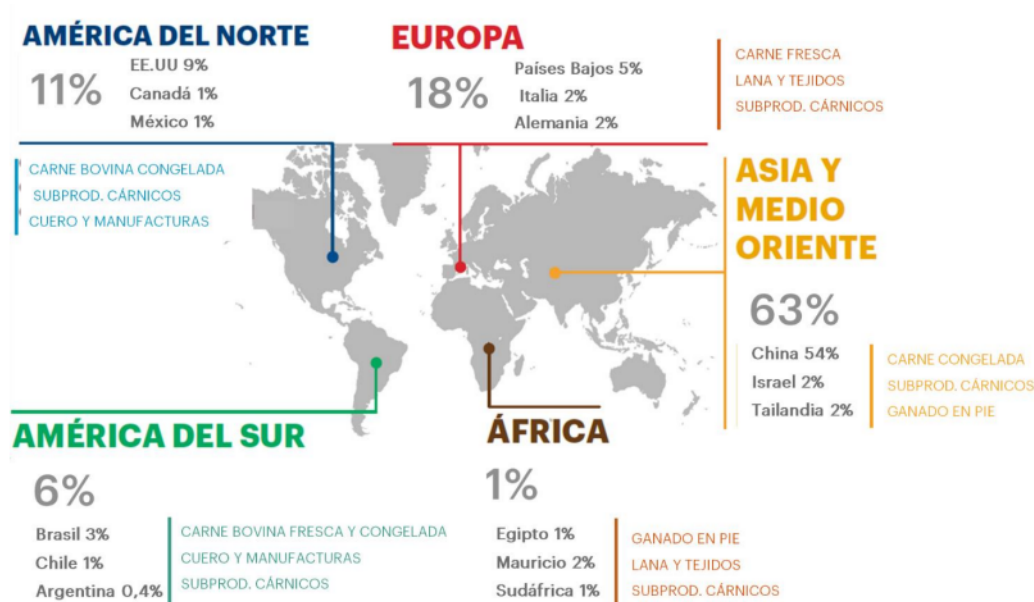


Figura 2.4: Uruguay XXI en base a datos de la Dirección Nacional de Aduanas, Nueva Palmira, Montes del Plata. (Uruguay XXI, 2023)

Algo adicional a mencionar es que, si bien la producción ganadera en su conjunto es cuestionada desde el punto de vista ambiental, en vinculación a la producción en sistemas confinados, destrucción de hábitats naturales y el cambio climático, los sistemas de producción ganadera uruguayos reservan un entorno natural amenazado donde más del 60 % del área de producción ganadera ocurre sobre pastizales naturales (campo natural). La ganadería no desplaza bosques o humedales, por el contrario, preserva hábitats amenazados a nivel global: el pastizal natural y el bosque nativo (INIA, 2023b).

## 2.2.4. Inversiones financieras

Las inversiones financieras son el proceso de comprar activos que aumentan de valor con el tiempo y proporcionan rendimientos en forma de pagos de ingresos o ganancias de capital. Los instrumentos más comunes son acciones, bonos, letras de cambio, entre otros (BBVA, 2023).

En Uruguay, la Bolsa de Valores de Montevideo (BVM) es el organismo encargado de brindar una plataforma para realizar los procesos de colocación, negociación y custodia de valores (Bolsa de Valores de Montevideo, 2023a). Existen dos tipos de valores: públicos, son aquellos que son emitidos por el gobierno o entes gubernamentales tanto en el mercado local como en los mercados internacionales. En el primero se colocan Bonos del Tesoro, Bonos Previsionales y Letras de Tesorería. En el segundo, Eurobonos y Bonos Globales. Mientras que los privados son emitidos por empresas y se llaman acciones, tienen valor nominal fijo y su cotización en el mercado depende de la solvencia y rentabilidad de las empresas (Bolsa de Valores de Montevideo, 2023c).

Independientemente de qué tipo de valores se deseen adquirir, en Uruguay es necesario contratar a un intermediario, ya sea un corredor de bolsa o un socio especial de la BVM según corresponda, estos son los únicos autorizados para realizar operaciones en la BVM. Actualmente, hay más de 20 corredores de bolsa operando en el país (Bolsa de Valores de Montevideo, 2023b). Los socios especiales más usuales son los bancos, las administradoras de fondos de pensión, las instituciones de seguridad social y las compañías de seguros (Bolsa de Valores de Montevideo, 2023a).

Hoy en día también existen otro tipo de inversiones financieras en Uruguay que son un poco más directas, es decir no existe un instrumento financiero como los mencionados anteriormente, pero que igual operan con rentas fijas, uno de los ejemplos más claros y populares es la inversión ganadera la cual se explica con más claridad en la sección 2.2.4.3 (Amoza, G, 2023).

En 2022 Uruguay logró la mejor calificación crediticia de riesgo soberano al alcanzar la calificación BBB+ según la agencia japonesa R&I Inc. y además obtuvo un riesgo por debajo de 100 puntos básicos ambos los mejores de su historia, lo cual la sitúa en un momento bastante bueno en lo que respecta su contexto económico. Por otro lado, para marzo del 2023 la circulación de valores en el Uruguay ascendió a UYU 2.0 billones, de los cuales el 93 % fueron emitidos por entes públicos, además se estimó que la operativa total del mercado fue de alrededor de UYU 2.6 billones lo cual corresponde al 88 % del PIB y estuvo constituido en un 80 % por emisiones de valores (UYU 2.1 billones), de las cuales un 55 % fueron emisiones de certificados de depósitos bancarios y un 40 % por la colocación de letras de regulación monetaria del Banco central del Uruguay. Cabe destacar que la operativa del mercado secundario ascendió a UYU 0.5 billones, lo que representa casi la tercera parte del total del mercado y de los cuales un 86 % son montos operados por letras de regulación monetaria (Banco Central del Uruguay, 2023b).

Para este trabajo serán relevantes 3 tipos de inversiones: bonos, letras de regulación monetaria y bono ganadero, los cuales serán explicados a continuación.

#### 2.2.4.1. Bonos

Los bonos son uno de los instrumentos más comunes. En este, el inversor le otorga un préstamo a la empresa o país emisor del bono, y este se compromete a hacer pagos fijos o variables a lo largo de la vida del bono, pagando un interés y devolviendo el capital. Los bonos no tienen un precio único, sino que cotizan en el mercado con un precio comprador y un precio vendedor. El rendimiento de la inversión depende siempre del precio de compra y la forma de pago de los intereses y del capital (V́ctor Paullier & Cía. Soc. de Bolsa, 2023). En Uruguay se suelen emitir bonos en tres monedas: Pesos, Dólares y Unidades indexadas, y sus duraciones pueden variar, pero por lo general duran como mínimo más de 10 años.

Los riesgos más comunes al invertir en bonos son tres, primero el riesgo de liquidez en el cual la entidad que se comprometió a pagar los intereses y retornar el capital no tiene capacidad de honrar el préstamo, esto es poco común sobre todo cuando se tratan de los bonos emitidos por un gobierno. En Uruguay luego de la crisis del 2002 por ejemplo los bonos cuyo vencimiento eran en esas fechas no pudieron ser pagados en el momento pautado, sin embargo, se puso otra fecha para devolver el capital (Amoza, G, 2023) y este es un ejemplo perfecto del segundo riesgo que es el de mercado, el cual está dado por la situación socio-económica y política de los países donde son emitidos los bonos. Por último, tenemos el riesgo de la tasa de interés, el cual ocurre cuando la tasa de interés de los bonos que se poseen bajan o suben respecto a la tasa actual del mercado, lo cual puede producir que su precio varíe en el mercado secundario, haciéndolo más o menos atractivo (Grupo Bursátil Uruguayo Sociedad de Bolsa S.A, 2023).

#### 2.2.4.2. Letras de regulación monetarias

Las letras de regulación monetarias (LRM) también forman parte de la categoría de bonos, son emitidos por el Banco Central del Uruguay (BCU) en pesos uruguayos para retirar el dinero circulante y así poder controlar la inflación, sus plazos suelen ser de 30 días a 2 años. Estos funcionan a tasa de descuento, es decir, al comprarlo se paga menos de lo que se recibirá al vencimiento, esta diferencia serán los intereses. Existe un mercado primario donde el BCU licita directamente una nueva oferta de LRM, y un mercado secundario en el cual los distintos agentes del mercado comercializan estos instrumentos (V́ctor Paullier & Cía. Soc. de Bolsa, 2023).

Al ser este instrumento un bono también sufre de los mismos riesgos explicados anteriormente, pero a este se le suma uno nuevo, el riesgo del tipo de cambio que viene atado a la cotización del dólar respecto al peso Uruguayo, dependiendo de la variabilidad de las monedas puede resultar mejor comprar dólares en lugar de invertir en LRM o viceversa (Grupo Bursátil Uruguayo Sociedad de Bolsa S.A, 2023).

#### 2.2.4.3. Ganadería a través de un sistema de inversiones

Los bonos ganaderos son instrumentos para financiar proyectos relacionados con la cría y producción de ganado. Estos bonos son emitidos tanto por entidades gu-

bernamentales, instituciones financieras o empresas agropecuarias y funcionan como una forma de inversión que busca atraer capital para el desarrollo y crecimiento de la industria ganadera.

Los inversores ingresan al sistema mediante aporte de dinero, con el cual adquieren un contrato de capitalización. La ganancia se obtiene una vez finalizado el contrato y en función de ella el inversor tendrá la posibilidad de retirar su ganancia o capitalizarla en un nuevo contrato (Silveira inversiones agropecuarias, 2024).

El bono mínimo de inversión varía dependiendo del emisor, encontrándose firmas con bonos a partir de los USD 5000. Por lo general, la inversión tiene un plazo de 1 o 2 años, existiendo plazos mínimos de 6 meses y cláusulas de retiro anticipado de la inversión (Silveira. R, 2021).

El riesgo, al igual que con otros instrumentos financieros, está presente y está relacionado con el desempeño del sector ganadero y la capacidad del emisor para cumplir con los pagos de intereses y la devolución del capital al vencimiento.

En las figuras 2.6 y 2.5 se detallan opciones disponibles de algunas firmas que operan en Uruguay

| TERNEROS                      |                            | Leer más... | ENGORDE                       |                            | Leer más... |
|-------------------------------|----------------------------|-------------|-------------------------------|----------------------------|-------------|
| RENTA FIJA ANUAL (TEA):       | 7%                         |             | RENTA FIJA ANUAL (TEA):       | 8%                         |             |
| TIPO DE TASA:                 | FIJA                       |             | TIPO DE TASA:                 | FIJA                       |             |
| MINIMO DE INVERSION EN USS:   | 15.000,00                  |             | MINIMO DE INVERSION EN USS:   | 20.000,00                  |             |
| PLAZO DE LA INVERSION:        | 6 MESES (EXACTOS)          |             | PLAZO DE LA INVERSION:        | 12 A 18 MESES (APROX.)     |             |
| DISPONIBILIDAD DEL INVERSION: | TOTAL                      |             | DISPONIBILIDAD DEL INVERSION: | TOTAL                      |             |
| COBRO DEL BENEFICIO:          | FINAL DEL CONTRATO         |             | COBRO DEL BENEFICIO:          | FINAL DEL CONTRATO         |             |
| RECUPERACION DEL CAPITAL:     | FINAL DEL CONTRATO         |             | RECUPERACION DEL CAPITAL:     | FINAL DEL CONTRATO         |             |
| CATEGORIA ANIMAL:             | TERNEROS/AS                |             | CATEGORIA ANIMAL:             | NOVILLOS Y VAQUILLONAS     |             |
| BONO GANADERO                 |                            | Leer más... | POOL GANADERO                 |                            | Leer más... |
| RENTA FIJA ANUAL (TEA):       | 9%                         |             | TIPO DE TASA:                 | VARIABLE (ENTRE 9% Y 11%)  |             |
| TIPO DE TASA:                 | FIJA                       |             | PARAMETRO CALCULO DE TASA:    | PRECIO TERNERO             |             |
| MINIMO DE INVERSION EN USS:   | 25.000,00                  |             | MINIMO DE LA INVERSION EN USS | 50.000,00                  |             |
| PLAZO DE LA INVERSION:        | 24 MESES (EXACTOS)         |             | PLAZO DE LA INVERSION:        | 24 MESES (EXACTOS)         |             |
| DISPONIBILIDAD DEL INVERSION: | TOTAL                      |             | DISPONIBILIDAD DEL DINERO:    | TOTAL                      |             |
| COBRO DEL BENEFICIO:          | 12 M. Y FINAL DEL CONTRATO |             | COBRO DE BENEFICIO:           | 12 M. Y FINAL DEL CONTRATO |             |
| RECUPERACION DEL CAPITAL:     | FINAL DEL CONTRATO         |             | RECUPERACION DE CAPITAL:      | FINAL DEL CONTRATO         |             |
| CATEGORIA ANIMAL:             | VACAS PREÑADAS O PARIDAS   |             | CATEGORIA ANIMAL:             | VACAS PREÑADAS O PARIDAS   |             |

Figura 2.5: Información de inversión ganadera - (Conexión Ganadera, 2024)

| Condiciones de negocio      |                                                            |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------|
| Producto                    | Inversión Ganadera                                         |
| Renta fija anual (TEA)      | Ver tabla: renta fija anual (TEA) según plazo de inversión |
| Tipo de tasa                | Fija                                                       |
| Mínimo de inversión en U\$S | 5000                                                       |
| Plazo de inversión          | 6, 12, 24 meses (exactos)                                  |
| Cobro del beneficio         | Semestral                                                  |
| Recuperación del capital    | Final del contrato                                         |
| Categoría animal            | Terneros/as - Novillos - Vaq. - Vacas de cría              |

| Renta fija anual (TEA) según plazo de inversión |         |          |          |
|-------------------------------------------------|---------|----------|----------|
| Monto de inversión USD                          | 6 meses | 12 meses | 24 meses |
| Desde 5.000,00 hasta 15.000,00                  | 6%      | 7%       | 8%       |
| Desde 15.000,00 hasta 50.000,00                 | 7%      | 8%       | 9%       |
| Inversión mayor a 50.000,00                     | -       | 9%       | 10%      |

Figura 2.6: Información de inversión ganadera renta fija - (Silveira inversiones agropecuarias, 2024)

## 2.3. Modelado matemático de decisiones de inversión

Los primeros avances importantes en el modelado de portafolio fueron dados por Harry Markowitz en 1952 con su artículo llamado “Portfolio Selection”, en el cual se introduce la teoría moderna de portafolios donde se busca la diversificación y generar un modelo basado en los retornos esperados y la volatilidad de cada inversión en el portafolio. Asumiendo que los inversores siempre buscan el mayor retorno con el menor riesgo posible, es decir, si se les da a elegir entre dos portafolios con el mismo retorno, siempre será mejor elegir el que tenga menor riesgo (Markowitz, 1952).

Para 1964-1965 William Sharpe, Jack Treynor y Jhon Lintner empezaron a trabajar en el modelo de valoración de activos financieros (o CAPM por sus siglas en inglés) (Sharpe, 1964) el cual para 1990 resulta en un premio nobel para Sharpe. Este modelo utiliza como base los resultados de Markowitz y como su nombre lo indica, provee de una manera fácil de medir el riesgo y la relación entre el retorno esperado y el riesgo (Fama y French, 2004). Además, este establece que no todo riesgo debería afectar los precios, sobre todo aquellos que pueden ser diversificados (Perold, 2004).

Estos modelos son aún los más relevantes y estudiados en la actualidad a la hora de pensar en modelado de portafolios. El modelo de Markowitz para portafolio es naturalmente un problema cuadrático, pero puede ser reformulado para presentarlo de

forma lineal y ser resuelto a través del método SIMPLEX o cualquier algoritmo de resolución exacta de un problema de programación lineal (Vanderbei, 2020). Todo lo expuesto por estos autores ha sido utilizado para expandir en otras áreas y tratar de hacer modelos para resolver problemas de portafolios con distintos métodos, ya sean programación cuadrática, estocástica, inteligencia artificial, entre otros. Pero el foco de este trabajo será la programación lineal, dado que es un enfoque que cuenta con algoritmos muy eficientes de resolución, y se detallarán algunos trabajos relacionados en la sección 2.5.

## 2.4. Programación lineal en optimización

Esta es una de las técnicas de modelado más comunes, tiene algunas variantes como Programación lineal entera, la cual es utilizada para modelar problemas que involucran decisiones sobre conjuntos discretos. Muchos de los problemas clásicos pueden ser modelados con esta técnica, por ejemplo problemas de planificación, el problema del viajero, etc. (Vanderbei, 2020).

Los problemas de programación lineal buscan maximizar o minimizar una función objetivo  $f$  la cual se encuentre sujeta al conjunto de ecuaciones, notar que tanto la función objetivo como las restricciones son lineales. Estas ecuaciones están compuestas por parámetros  $c_j$  y  $a_{ij}$  que denotan valores relacionados con el problema en concreto que se busca optimizar y las variables  $x_j$  que se busca maximizar o minimizar según sea el caso. En 2.2 se define matemáticamente el problema de programación lineal (Fedosova, Buitrago, y Britto, 2011).

$$\begin{aligned} \max/\min f(x) &= \sum_{j=1}^n c_j x_j, \\ \text{Sujeto a: } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j &\leq b_i, \quad i = 1, \dots, m \\ x_j &\geq 0 \quad j = 1, \dots, n \end{aligned} \tag{2.2}$$

Donde  $n$  indica la cantidad de variables y  $m$  la cantidad de restricciones. El modelado anterior también se puede expresar en forma matricial, de esta forma los  $x_j$  pasan a ser un vector en  $\mathbb{R}^n$  los coeficientes  $c_j$  y  $a_{ij}$  de las restricciones y pasan a ser matrices  $C$  y  $A$  respectivamente y por último los  $b_i$  pasan también a ser un vector y así se forma el sistema que se puede ver en 2.3 (Puente y Gavilánez, 2018).

$$\begin{aligned} \max/\min C^T x, \\ \text{Sujeto a: } Ax &\leq b \end{aligned} \tag{2.3}$$

En el caso particular de modelado de portafolio se suele utilizar el caso particular en el cual las variables solo pueden valer 1 o 0 denotando la posibilidad de invertir o no en dicha actividad. Este modelo en particular se conoce como programación lineal binaria

y es uno de los 21 problemas que fueron probados por Karp que son NP-completos (Karp, 1972). Esto es muy importante, porque muestra que no es viable generar y evaluar todas las combinaciones posibles.

#### 2.4.1. Herramientas para resolución

Para resolver los problemas de programación lineal hoy en día existe una gran variedad de tecnologías, las cuales son complementarias y que se dividen en dos grandes grupos.

Los lenguajes de programación matemática o modelado matemático, los cuales ofrecen una sintaxis que se asemeja mucho a la notación matemática con la cual son escritos y presentados en el ámbito académico. Alguno de ellos son GEKKO (Beal, L. y Heden-gren, J, 2023), AMPL (AMPL Optimization, Inc., 2023), GAMS (GAMS Development Corp., 2023), etc.

Por otro lado, tenemos los *solvers* que son aquellos que se encargan de resolver el problema, estos cuentan con una variedad de algoritmos ya implementados para resolver de forma eficiente distintos tipos de problemas de programación lineal. No se usan directamente, ya que el lenguaje que usan estos es bastante complejo y poco amigable para los usuarios, por lo tanto, se dispone los lenguajes de modelado que son traducidos al lenguaje nativo del *solver*. Entre los más utilizados se pueden nombrar CPLEX (IBM, 2023), MINOS (Wisconsin Institutes for Discovery, 2023), GUROBI (GUROBI OPTIMIZATION, LLC, 2023), etc.

Para el contexto de este trabajo, se utilizará como lenguaje de modelado AMPL que es un software de modelado matemático de uso muy común en la industria, y como *solver* CPLEX el cual es el software de optimización y resolución de programación lineal que provee IBM. Cabe destacar que el Instituto de Computación de la Facultad de Ingeniería cuenta con una licencia de uso académico, lo cual permitió acceder a esta herramienta.

### 2.5. Programación lineal aplicada a la optimización de portafolios

Existen muchos trabajos que tratan de abordar los temas de modelado de portafolios y optimización de negocios agroforestales, ya que son áreas de mucha relevancia en la economía y los negocios; sin embargo, en esta sección se revisarán algunos artículos y estudios relevantes para el trabajo en cuestión y otros que se enfocan en estas temáticas usando como foco de solución la programación lineal.

#### 2.5.1. Modelos de portafolios y decisiones de inversión

En el marco de modelado de portafolios (Park, Song, y Lee, 2018), proponen dos modelos de optimización computacionalmente eficientes para la construcción de portafolios utilizando otros portafolios de referencia. Los portafolios principales propuestos son modificaciones de los portafolios MAD (el riesgo se mide por la desviación absoluta

(media)) y de Dantzig (el riesgo se mide a través de la varianza) a través de perturbaciones. Los autores proponen dos tipos de perturbaciones a estos portafolios clásicos para remover los términos cuadráticos en los modelos y resolverlos como problemas lineales: La *West-perturbation* constituye un portafolio basado en el riesgo, mientras que la *North-perturbation* está basada en el rendimiento y el riesgo. La cartera óptima depende de las preferencias de riesgo y rendimiento de los inversores. Si alguien está interesado en reducir el riesgo, puede utilizar el método de *West-perturbation*. Si se busca un balance entre riesgos y retornos *North-perturbation* es más indicada. Uno de los resultados obtenidos por estos autores fue que los portafolios propuestos pueden superar a los otros portafolios tomados como referencia en varias medidas de desempeño, incluido el rendimiento medio y el índice de Sharpe.

Otro ejemplo de modelado lineal de portafolio de inversión propuesto por (Oladejo, Abolarinwa, y Salawu, 2020) considera las siguientes actividades: inversión en petróleo crudo, valores hipotecarios, cultivos comerciales, certificados de depósitos, depósitos a plazo fijo, letras del tesoro y préstamos para la construcción. El modelo cuenta con conocimiento de las tasas de retorno de cada una de las actividades, riesgos, etc. Y está sujeto a un conjunto de restricciones sobre los montos a invertir en cada actividad y el riesgo que los inversores están dispuestos a asumir. El objetivo es obtener una inversión óptima de un capital en ese portafolio que proporcione el máximo rendimiento posible. El problema final de programación lineal fue modelado y resuelto en MATLAB. Los resultados fueron medidos frente a los datos originales proporcionados, lo que se hizo fue disminuir y aumentar las tasas de interés en un 5 % para ver como varían los retornos finales. En general, se observó una disminución del 15 % del retorno para el caso de disminución y un aumento en un 17 % del retorno para el caso de aumento de la tasa de interés, todo esto manteniendo el riesgo dentro de lo estipulado. Este modelo es muy aplicable para empresas que se dedican al negocio y gestión de portafolios tanto para pequeña y gran escala para la mejora y evaluación de sus portafolios actuales.

(Papahristodoulou, 2002) formula dos tipos de modelos lineales *maximin* y *minimization of absolute deviation* y los compara con uno *cuadrático*. Se tomaron datos a lo largo de doce meses de cinco tipos de acciones del mercado financiero de Estocolmo para comparar los resultados y ver si dan resultados similares o no. La formulación estándar de rendimiento/riesgo, que usa el modelo *cuadrático*, considera la varianza como una medida de volatilidad del riesgo. Hay muchos investigadores y comerciantes que se preguntan si esta es una medida adecuada del riesgo. Esto debido a que la opinión del inversor normal en cuanto al riesgo, se aleja mucho de la simetría o distribución normal. Por lo tanto, una formulación alternativa es maximizar el rendimiento mínimo exigido por el inversor, esto es lo que se usa como partida para realizar el modelo *maximin* y por último como su nombre lo indica para el modelo *minimization of absolute deviation* se utiliza la minimización de la desviación estándar como base para realizarlo. Los resultados finales fueron que el *maximin* tiene un retorno y riesgo más alto, mientras que el modelo *cuadrático* tiene un retorno y riesgo más bajo, mientras que el *minimization of absolute deviation* se encuentra en el medio entre estos dos, lo cual estaba dentro de lo esperado. La gran diferencia está en que los modelos lineales son mucho más simples y rápidos tanto para formular como para resolver.

(Kuhn, Calbert, Garanovich, y Weir, 2023) realizaron un modelo de portafolio para el departamento de defensa de Australia, en este caso la complejidad de desarrollar un portafolio es aún mayor porque las capacidades de defensa de un país son bienes públicos y no tienen un retorno financiero per se. En este trabajo se define matemáticamente el problema de portafolio de inversiones de Defensa como un problema de la mochila Set-Union (*SUKP*), por lo tanto, se utilizó una medida de *peso* o *valor* que fue determinada a través de escenarios de exploración, actividades de juegos de guerra, razonamiento bayesiano, juicios y simulaciones de pequeñas empresas. En las actividades del *Defence Capability Assessment Program* en 2021, la principal herramienta utilizada para la evaluación de las actividades dentro del portafolio fue a través de un *Bayesian Reasoning Value Model* (BRVM) diseñado para modelar la estructura de fuerza de defensa del país. Y con todos estos datos y las restricciones de presupuesto conocidas se procedió a construir el modelo. El cual fue realizado en Python utilizando una herramienta de código abierto llamado PuLP y como motor para resolver el problema se utilizó GUROBI. Como resultado final, el departamento de defensa de Australia muestra cómo funciona el modelo implementado como motor de optimización de la herramienta *New Investment to Risked Options* (NITRO) utilizada actualmente para la determinación y análisis del portafolio de defensa Australiano.

### 2.5.2. Modelos de optimización agroforestal

Todos los modelos anteriores, están pensados para portafolios o actividades concretas asociadas con un riesgo o valor conocido, además de su retorno. Sin embargo, ninguna trata con actividades agroforestales, son más orientadas a la vista desde el lado de portafolio y negocios. En esta sección veremos dos modelos que se enfocan más en el modelado lineal y optimización de actividades agroforestales.

(Bhatia y Rana, 2020) realizaron un trabajo buscando obtener resultados óptimos en actividades agrícolas; decisiones como tipo de cultivo, cantidad de cultivos, asignación de cultivos, variedad de cultivos, rotación de cultivos y combinaciones de cultivos desempeñan un papel importante en la optimización de los ingresos agrícolas. Así, este estudio toma datos de diferentes distritos de Rajasthan (India). Se utilizó un enfoque de programación lineal para determinar la solución del modelo de granja propuesto. Se utilizó el método SIMPLEX para resolver el problema modelado que consistió en colaborar con dos granjas las cuales informaron cuáles eran las cantidades de hectáreas que iban a utilizar para cultivos y ganado, además de proporcionar todos los datos necesarios tanto sus restricciones e insumos como fertilizantes, laboreo, tierra, semillas, etc. Estos datos se utilizaron para modelar y determinar las hectáreas óptimas para cada actividad de manera de maximizar las ganancias. Los resultados del modelo matemático formulado mostraron un aumento en la producción agrícola mediante la adopción de métodos rotación de cultivos optimizados informados por el modelo, resultando en un aumento del retorno en un 68% y 16.5% para la primera y segunda granja comparándolos con los resultados que hubieran obtenido con la distribución que planeaban originalmente.

(Reeves, 1991) realizó tres investigaciones, de las cuales dos, están modeladas de

forma lineal. La primera de ella siendo:

- En la sección II se plantean dos métodos lineales utilizados frecuentemente para modelar interacciones entre cultivos agroforestales (policultivo). El enfoque del sistema continuo supone interacciones lineales entre los rendimientos de los cultivos y una gama de posibles mezclas de cultivos, esto quiere decir que el modelo podrá asignar cualquier número del total de hectáreas disponibles para cada especie de cultivo y utiliza el mismo coeficiente de rendimiento para cada cultivo respectivo. El enfoque del sistema discreto define las variables de decisión como mezclas fijas de cultivos cuyos rendimientos reflejan cualquier interacción entre los componentes de los mismos, y su objetivo termina siendo el mismo de asignar las hectáreas de forma tal que se maximice ese beneficio entre las especies cultivadas. Entre los resultados encontrados fue resaltado que el enfoque del sistema continuo es solo adecuado cuando las interacciones entre cultivos son insignificantes, mientras que el enfoque del sistema discreto es más adecuado cuando se producen muchas interacciones entre cultivos.
- En la sección III se realiza un modelo lineal basado en la desviación media absoluta, que utiliza las fluctuaciones pasadas de los ingresos netos de sistemas de cultivo alternativos para reducir el riesgo de retornos futuros. Utilizando un estudio de caso en Costa Rica, se exploró la planificación de la asignación de tierras a diversos sistemas de cultivo con el objetivo de minimizar el riesgo para una granja hipotética. Los resultados del modelo indican un comportamiento reactivo al riesgo por parte de la mayoría de los agricultores entrevistados, y cualquier reducción adicional del riesgo requeriría una reducción relativamente grande en los ingresos netos esperados. Este tipo de análisis de riesgos puede ser útil en la planificación agrícola, donde se encuentran disponibles datos de ingresos netos de años anteriores.

### 2.5.3. Estudios relacionados a la actividad silvopastoril

(Quaresma, Cordeiro, Bastos, y Carvalho, 2008) realizaron un trabajo interesante que estudia la actividad silvopastoril con paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber) en el nordeste de Pará, Brasil. Se centra en la evaluación económica de sistemas silvopastoriles (SSP) que involucran la plantación de paricá con pasturas de *Brachiaria humidicola* para la crianza de ganado bovino en dicha región.

El estudio compara económicamente el SSP con un monocultivo forestal (MF) de paricá, utilizando indicadores económicos como la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Valor Actual Neto (VAN). Los resultados indican que el SSP es económicamente más atractivo que el MF. A pesar de que la diferencia en la TIR entre los sistemas es pequeña (1%), el VAN muestra una clara superioridad del SSP, siendo un 26 % mayor con una tasa de interés del 8 % y un 147 % mayor con una tasa del 12 %.

El trabajo concluye que la adopción de sistemas silvopastoriles debería ser estimulada en la región como una alternativa más ventajosa desde el punto de vista económico en comparación con el monocultivo forestal de paricá. También se sugiere considerar

economías de escala, especialmente cuando se reduce la densidad de los árboles para aumentar la participación del ganado.

Otro estudio interesante fue realizado por (Fernández y Jiménez, 2022). Este aborda la rentabilidad de las empresas pecuarias y explora el papel de los sistemas silvopastoriles como alternativa para mejorarla. Se destacan dos áreas clave: la eficiencia en el uso de concentrados y fertilizantes, y el desempeño de los animales en términos de producción de leche o carne con bajo impacto ambiental.

Se define un sistema silvopastoril como una opción que incorpora especies leñosas perennes (árboles y arbustos) que interactúan con los componentes tradicionales (forrajes herbáceos y animales) bajo un manejo integral. Se resalta que estos sistemas pueden contribuir a reducir la temperatura del aire, promoviendo un mayor consumo de forraje y mejorando la calidad nutricional.

Se destaca la capacidad de estos sistemas para fijar nitrógeno atmosférico, proteger el suelo de la erosión y disminuir la necesidad de fertilizantes nitrogenados.

Por otra parte, se aborda la importancia del tiempo óptimo de descanso en sistemas silvopastoriles, que puede variar según las especies de pasto y arbustos presentes. Se enfatiza la necesidad de estudiar las características climáticas de la finca y el tiempo necesario para que las especies arbustivas alcancen su potencial nutritivo máximo.

Se discute el papel ambiental de los sistemas silvopastoriles, señalando su capacidad para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, como el metano ( $CH_4$ ), y capturar dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Se resalta la importancia de estos sistemas como alternativa para rehabilitar la ganadería y ofrecer beneficios en la retención de  $CO_2$  y reciclaje de nutrientes.

El texto concluye mencionando principios agroecológicos beneficiosos de los sistemas silvopastoriles, como la transformación de energía solar en biomasa vegetal, la fijación de nitrógeno, la solubilización del fósforo en suelos ácidos, entre otros. Se destaca que estos sistemas pueden ofrecer beneficios directos a los animales y a las familias vinculadas al sistema productivo, así como ingresos a mediano y largo plazo mediante la inclusión de especies maderables en el sistema, sugiriendo también que podrían contribuir a sistemas productivos carbono neutral y ofrecer productos diferenciados en el mercado.

#### **2.5.4. Modelo tomado como base**

Como se pudo ver en las secciones anteriores, muchos de los modelos lineales trabajan optimizando las hectáreas para maximizar beneficios y minimizar riesgos, y otros simplemente crean portafolios de inversión óptimos, pero solo considerando inversiones de tipo financieras. El trabajo realizado por (Conde, 2022) es el modelo que se usó como base para el desarrollo del modelo que se expone en el siguiente capítulo.

Se trata de un proyecto de grado reciente, cuyo modelo crea un portafolio de inversión utilizando el VAN como función objetivo y considera las actividades de forestación,

ganadería y silvopastoreo, esta última es modelada como la unión de las dos anteriores. A continuación se mostrará dicho modelo.

Se parte de un sistema agroforestal dividido en zonas de manejo. Se define  $Z$  **el conjunto de zonas de manejo agroforestal**,  $T(z)$  **el tamaño en hectáreas** y  $S(z)$  **el tipo de suelo** de la zona  $z$ . El modelo supone que las zonas recibidas son solo las zonas explotables del establecimiento. A su vez, la implantación de un sistema forestal o ganadero puede estar restringida en ciertas zonas. Por ejemplo, una ley podría limitar la producción ganadera en cierta región o el dueño del campo puede prohibir la forestación para evitar el desgaste del suelo. Se define el parámetro binario  $A^s(z)$ , que representa si la **actividad  $s$  está permitida en la zona  $z$**  (donde  $s = f$  representa la actividad forestal y  $s = p$  la pastoril o ganadera).

Para los conjuntos forestales, se definen  $E_f$  **como el conjunto de especies forestales**  $e \in E_f$  y  $M$  **como el conjunto de marcos de plantación**  $m \in M$ , este marco se refiere a la disposición física de los árboles plantados. Esto, a su vez, determina la densidad de árboles por hectárea, lo cual impacta en el beneficio por hectárea del sistema y la cantidad de pastura disponible para silvopastoreo.

Por otra parte, para el componente pastoril se definen  $E_g$  **el conjunto de especies ganaderas**  $g \in E_g$  contempladas y  $E_p$  **el conjunto de posibles especies forrajeras**  $p \in E_p$ .

Para modelar sistemas puramente forestales o puramente ganaderos, los conjuntos de especies incluyen la especie  $\in$ , que representa la no inclusión de una componente forestal o pastoril. También, se define el marco de plantación  $\emptyset$  con el mismo objetivo.

También se le pone un límite a los fondos del inversor. Sea  $P_0$  **el presupuesto inicial** de inversión y  $P_y$  **el presupuesto para cada periodo operativo  $y$** . Por último, para calcular el VAN, se define la **tasa de descuento  $i$**  y un **periodo operativo  $H$**  discreto de 10 años.

Por otro lado, se definen  $I^s$  **como la inversión inicial**,  $C^s$  **el costo operativo por periodo** y  $R^s$  **los ingresos por periodo**, donde una vez más el superíndice  $s$  representa la componente del sistema asociada que se mencionó antes. Por lo tanto, cada una de estas funciones recibirá parámetros distintos dependiendo de la actividad, por ejemplo:  $R^f : (E_f \times M \times Z \times H \rightarrow \mathbb{R})$  se refiere a los ingresos forestales y estos dependen de la especie forestal  $e \in E_f$ , el marco de plantación  $m \in M$  el tipo de suelo  $S(z)$ ,  $z \in Z$  y el año  $y \in H$ .

El modelo plantea una única variable binaria  $x_{z,e,m,g,p}$ , que representa la decisión de implantar o no un sistema agroforestal. Cada uno de los índices representa los conjuntos definidos anteriormente. Con todos estos parámetros y conjuntos definidos se define el modelo:

$$\begin{aligned}
& \max \sum_{y \in H} \sum_{z \in Z} \sum_{f \in E_f} \sum_{m \in M} \sum_{g \in E_g} \sum_{p \in E_p} ((R^f(e, m, S(z), y) - C^f(e, m, S(z), y))T(z)(1+i)^{-y} \\
& \quad x_{z,e,m,g,p} + (R^p(g, p, m, S(z), y) - C^p(g, p, m, S(z), y))T(z)(1+i)^{-y}x_{z,e,m,g,p}) \\
& - \sum_{z \in Z} \sum_{f \in E_f} \sum_{m \in M} \sum_{g \in E_g} \sum_{p \in E_p} (I^f(e, m, S(z))T(z)x_{z,e,m,g,p} + I^p(g, p, m, S(z))T(z)x_{z,e,m,g,p})
\end{aligned} \tag{2.4}$$

Como se puede ver la función objetivo es el cálculo del VAN que fue explicada en la ecuación 2.1, en este caso los flujos de efectivo neto son representados por la resta entre los  $R^s$  y  $C^s$  y ajustados por el tamaño de la hectárea  $T(z)$  ya que todos los costos y retornos vienen expresados por hectárea.

A su vez se definen un conjunto de restricciones para ajustar el modelo más a la realidad. La primera de ellas es para evitar tomar más de una decisión por zona. Notar que el modelo permite dejar zonas sin ningún sistema asignado:

$$\sum_{e \in E_f} \sum_{m \in M} \sum_{g \in E_g} \sum_{p \in E_p} x_{z,e,m,g,p}^s \leq 1 \quad \forall z \in Z \tag{2.5}$$

También se definen restricciones para que las decisiones tomadas cumplan con las actividades permitidas en cada zona, ya sea forestación o ganadería:

$$\sum_{e \in E_f - \{\in\}} \sum_{m \in M - \{\emptyset\}} \sum_{g \in E_g} \sum_{p \in E_p} x_{z,e,m,g,p}^s \leq A^f(z) \quad \forall z \in Z \tag{2.6}$$

$$\sum_{e \in E_f} \sum_{m \in M} \sum_{g \in E_g - \{\in\}} \sum_{p \in E_p - \{\in\}} x_{z,e,m,g,p}^s \leq A^p(z) \quad \forall z \in Z \tag{2.7}$$

Una restricción presupuestaria sobre la inversión inicial y otra sobre el balance operativo del sistema para no excederse en ninguno de los dos casos a lo largo del periodo operativo de la inversión  $H$ :

$$\sum_{z \in Z} \sum_{e \in E_f} \sum_{m \in M} \sum_{g \in E_g} \sum_{p \in E_p} (I^f(e, m, S(z)) + I^p(g, p, m, S(z)))T(z)x_{z,e,m,g,p}^s \leq P_0 \tag{2.8}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{z \in Z} \sum_{e \in E_f} \sum_{m \in M} \sum_{g \in E_g} \sum_{p \in E_p} (C^f(e, m, S(z), y) + C^p(g, p, m, S(z), y) - R^f(e, m, S(z), y) \\
& \quad - R^p(g, p, m, S(z), y))T(z)x_{z,e,m,g,p}^s \leq P_y \quad \forall y = 1, \dots, H
\end{aligned} \tag{2.9}$$

El modelo fue puesto a prueba recopilando información de distintas fuentes de

Uruguay y entre los resultados principales del trabajo, el autor menciona que el modelo prefiere aplicar forestación y ganadería en zonas diferentes del mismo campo, en lugar de aplicar silvopastoreo. El modelo muestra cierta tendencia a seleccionar la actividad forestal en mayor proporción, ya que a largo plazo es la que provee mayores ingresos, pero cuando se tienen restricciones presupuestales, incorpora la actividad ganadera para hacer que la inversión total sea financieramente sustentable. Y concluye que a raíz de estos hechos se pone en duda al silvopastoreo como práctica agroforestal, especialmente en campos lo suficientemente grandes como para definir muchas zonas que se puedan manejar independientemente con actividades distintas.

## Capítulo 3

# Definición del problema y modelado

En este capítulo, se construirá el modelo de optimización utilizando ideas de los modelos presentados en las secciones anteriores. Estará dividido en cuatro secciones: supuestos, modelo, valores y codificación.

### 3.1. Supuestos

El siguiente modelo supone que el tomador de la decisión de inversión, es un inversor independiente que cuenta con un capital a invertir; este va a tomar por su cuenta la administración de las inversiones sin importar el rubro de las mismas.

Los terrenos pueden ser alquilados o comprados, y no tienen ninguna actividad en ellos actualmente. Serán divididos en zonas de distintos tamaños y para cada una de ellas el inversor tiene que decidir si: forestar, realizar actividad ganadera, silvopastoril o dejar sin uso. Además de esto, también tiene que tomar en cuenta las actividades financieras de bono, letra de regulación monetaria y bono ganadero. La decisión final que se quiere tomar es cómo invertir el capital inicial entre estas actividades para maximizar los beneficios.

#### 3.1.1. Factores considerados

Cada una de las actividades financieras tiene ingresos y costos que están determinados por distintos factores intrínsecos. Para cada una de ellas se considerarán los factores principales que determinan sus ingresos y costos, que serán explicados a continuación.

##### 3.1.1.1. Sistemas forestales

Los factores más relevantes para un sistema forestal son los siguientes:

- **Especies de árbol:** la especie de árbol que se utilizará en el sistema forestal es una de las más relevantes, ya que depende de la geografía. En Uruguay, como se mencionó antes, el *Eucalyptus* se usa cada vez más, sobre todo las especies *grandis* y *dunni*.

- **Densidad:** Otro factor muy importante es la densidad por hectárea que se utilizará a la hora de plantar la especie elegida. Esto afectará, entre otras cosas, el grosor y altura debido a la competencia por nutrientes y sol; por último, también este factor determinará el beneficio final.
- **Tipo de suelo:** el tipo de suelo determinará en general el rendimiento de la plantación, esto debido a que hay suelos que son más o menos aptos para este tipo de actividad.

#### 3.1.1.2. Sistemas ganaderos

Los factores más relevantes para sistemas ganaderos son los siguientes:

- **Pastura:** el tipo de pastura a utilizar es muy importante, ya que determinará la cantidad de materia seca producida anualmente y a partir de esto se sabe la cantidad de ganado soportada por el sistema. En Uruguay se suele utilizar *pastura natural* y *pastura mejorada* considerando algún tipo de especie de planta o combinación de ellas, como puede ser trébol blanco, rojo y el lotus corniculatos.
- **Actividad ganadera:** la actividad ganadera representa en concreto el tipo de destino del ganado. Por ejemplo: engorde, leche, reproducción, etc. Puede ser uno solo de estos o una combinación dependiendo de la capacidad del campo. A su vez, el tipo de actividad determinará la especie de ganado utilizada. Por ejemplo, para la cría de engorde en Uruguay se suelen utilizar Hereford y Aberdeen Angus.

#### 3.1.1.3. Sistemas silvopastoriles

Para los sistemas silvopastoriles se utiliza la combinación de los factores tanto forestales como ganaderos. Este tipo de sistema se ve muy afectado por la densidad y la pastura.

#### 3.1.1.4. Inversiones financieras

El factor a considerar para los bonos, letras de regulación monetaria y el bono ganadero es la **tasa de interés**, ya que esta determinará el beneficio final de la actividad en su totalidad.

## 3.2. Modelo

En esta sección se expondrá el modelo propuesto, mostrando todos sus conjuntos, parámetros, variables, función objetivo, restricciones, etc.

### 3.2.1. Conjuntos del modelo

En este modelo se consideran los siguientes conjuntos, que parten de los factores antes mencionados en [3.1.1](#):

- **Z:** conjunto de zonas de manejo agroforestal. Es decir se tiene un terreno el cual es dividido en varias zonas.

- $M$ : conjunto de densidades de árboles por hectárea para la actividad forestal.
- $N$ : conjunto de densidades de árboles por hectárea para la actividad silvopastoril.
- $F$ : conjunto de especies forestales.
- $G$ : conjunto que representa una forma de realizar actividades ganaderas por ejemplo, actividad lechera, engorde de ganado, cría de ganado para reproducción, etc.
- $P$ : conjunto de posibles pasturas (natural o mejorada).
- $W$ : conjunto de las tasas de interés de los bonos
- $Y$ : conjunto de las tasas de interés de la letra de regulación monetaria.
- $V$ : conjunto de las tasas de interés del bono ganadero
- $J$ : conjunto de períodos (horizonte de inversión en el tiempo).
- $S$ : conjunto que representa las inversiones, está compuesto por:  $f$  forestal,  $g$  ganadera,  $sp$  silvopastoril,  $bt$  bonos del tesoro,  $bg$  bono ganadero y  $l$  letra de regulación monetaria.

Todos estos son conjuntos discretos y están dados por enumeración. Al definir costos y retornos de cada actividad 3.3, se dará en concreto qué elementos conforma cada conjunto.

Para modelar sistemas totalmente forestales, ganaderos y financieros se incluyeron en los conjuntos ( $Z, M, N, F, G, P, W, Y$  y  $V$ ) valores  $\epsilon$ (nulo) en cada conjunto, que se utilizan como auxiliares para representar que los valores de un conjunto en particular no están definidos para un cálculo particular. Por ejemplo, para la actividad forestal, no es relevante iterar en el conjunto  $G$  que representa una forma de realizar actividades ganaderas.

### 3.2.2. Parámetros del modelo

- $t_z : Z \rightarrow \mathbb{R}$ , es el tamaño en hectáreas de la zona  $z \in Z$ .
- $s_z : Z \rightarrow \mathbb{R}$ , es el efecto sobre el volumen producido (árboles y forraje) por el tipo de suelo de la zona  $z \in Z$ .
- $a_z^s : S - \{bt, l, bg\} \times Z \rightarrow 0, 1$ , representa si la actividad  $s$  está aceptada en la zona  $z \in Z$ .
- $d_z : Z \rightarrow \{0, 1\}$ , representa si se es dueño o se alquila la zona  $z \in Z$ , dependiendo de este valor se usa un precio/hectárea de compra o alquiler de la zona.
- $P_0 \in \mathbb{R}$ , es el presupuesto inicial de inversión.
- $P_j \in \mathbb{R}$ , es el presupuesto para cada periodo operativo  $j$ .

### 3.2.3. Función objetivo

Para medir el beneficio económico del portafolio se utiliza el Valor Actual Neto (VAN), definido anteriormente en 2.1, pero ajustado a nuestro problema definimos el  $VAN^s : Z \times F \times P \times M \times N \times G \times W \times Y \times V \rightarrow \mathbb{R}$  (se utiliza “...” para no escribir todos los subíndices):

$$VAN^s(z, f, p, m, n, g, w, y, v) = \sum_{j=1}^{15} \frac{R_j^s(z, \dots, v) - C_j^s(z, \dots, v)}{(1+i)^j} - I^s(z, \dots, v) \quad (3.1)$$

Donde:

- $J = \{1, \dots, 15\}$  es el mismo conjunto que ya se definió anteriormente 3.2.1
- $S = \{f, g, sp, bt, bg, l\}$  es el conjunto de actividades financieras que ya se definió anteriormente 3.2.1. Se utiliza como supraíndice  $s$  para determinar la actividad en los cálculos del VAN.
- $I^s : Z \times F \times P \times M \times N \times G \times W \times Y \times V \rightarrow \mathbb{R}$ , es la inversión inicial de la inversión  $s \in S$
- $R^s : Z \times F \times P \times M \times N \times G \times W \times Y \times V \rightarrow \mathbb{R}$ , son los retornos en el periodo  $j \in J$  de la inversión  $s \in S$
- $C^s : Z \times F \times P \times M \times N \times G \times W \times Y \times V \rightarrow \mathbb{R}$ , son los costos en el periodo  $j \in J$  de la inversión  $s \in S$
- $i \in \mathbb{R}$  y  $i_{UYU} \in \mathbb{R}$ , tasa de descuento en USD y UYU definida en 2.1 al explicar el VAN. Notar que estas son intercambiadas dependiendo de la moneda de la inversión. La única inversión que utiliza UYU son las letras de regulación monetaria.

En la tabla 3.1 se muestra a modo de ejemplo el cálculo del VAN forestal: (se dejan solo los subíndices relevantes / no nulos cuando corresponda).

| Expresión al calcular el VAN                                                                 | Notación del modelo                                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| $R_j^s(f, m, s_z, d_z)$                                                                      | Retorno forestal ( $R^f(z, f, m, \dots, j)$ )                                       |
| $C_j^s(f, m, s_z, d_z)$                                                                      | Costo forestal ( $C^f(z, f, m, \dots, j)$ )                                         |
| $\sum_{j=1}^{15} \frac{R^f(z, f, m, \dots, j) - C^f(z, f, m, \dots, j) \times t_z}{(1+i)^j}$ | Suma total de los flujos de caja descontados forestales ( $FCD^f(z, f, m, \dots)$ ) |
| $I^s(f, m, s_z, d_z) \times t_z$                                                             | Inversión inicial forestal ( $I^f(z, f, m, \dots)$ )                                |
| $FCD^f(z, f, m, \dots) - I^f(z, f, m, \dots)$                                                | VAN forestal ( $VAN^f(z, f, m, \dots)$ )                                            |

Tabla 3.1: Expresión al calcular el VAN vs notación del modelo

### 3.2.4. Variables del modelo

Este modelo plantea una única variable binaria  $x_{z,f,p,m,n,g,w,y,v}^s$ , que representa la toma de decisión de realizar o no la inversión, teniendo dentro de las opciones de

inversión el sistema forestal, ganadero, silvopastoril, bono, letra de regulación monetaria y bono ganadero, con la especie forestal  $f$ , densidad de árboles por hectárea  $m$ (forestación) y  $n$ (silvopastoreo), actividad ganadera  $g$ , tasas de interés  $w$ ,  $y$  y  $v$  de cada una de las inversiones financieras, tipo de pastura  $p$  y la zona  $z$ .

Cabe destacar que los subíndices de la variable del modelo, dependiendo del tipo de actividad financiera, tienen o no sentido. A modo de ejemplo, en el caso de la forestación, los subíndices  $z$ ,  $f$  y  $m$  son los únicos relevantes para la actividad y por lo tanto el resto valen  $\epsilon$ .

### 3.2.5. Definición del problema de programación lineal entera

A partir de los elementos definidos en las secciones anteriores, se define el siguiente modelado de programación lineal entera:

$$\max \sum_{s \in S} \sum_{z \in Z} \sum_{f \in F} \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} \sum_{g \in G} \sum_{w \in W} \sum_{y \in Y} \sum_{v \in V} VAN^s(z, f, p, m, n, g, w, y, v) x_{z, f, p, m, n, g, w, y, v}^s \quad (3.2)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

- No tomar más de una decisión por zona. El modelo permite dejar zonas sin ningún sistema asignado:

$$\sum_{s \in S} \sum_{f \in F} \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} \sum_{g \in G} \sum_{w \in W} \sum_{y \in Y} \sum_{v \in V} x_{z, f, p, m, n, g, w, y, v}^s \leq 1 \quad \forall z \in Z \quad (3.3)$$

Notar que los valores de  $w$ ,  $y$  y  $v$  no son relevantes para esta restricción; por lo tanto, los valores de  $s$  de las actividades financieras no son relevantes tampoco.

- Las decisiones tomadas cumplen con las actividades aceptadas para cada zona:
  - En el caso de la actividad forestal ( $s = f$ )

$$\sum_{f \in F - \{\epsilon\}} \sum_{p \in P} \sum_{m \in M - \{\epsilon\}} \sum_{n \in N} \sum_{g \in G} \sum_{w \in W} \sum_{y \in Y} \sum_{v \in V} x_{z, f, p, m, n, g, w, y, v}^s \leq a_z^s \quad \forall z \in Z - \{\epsilon\} \quad (3.4)$$

Notar que los valores de  $p$ ,  $n$ ,  $g$ ,  $w$ ,  $y$  y  $v$  no son relevantes para esta restricción.

- En el caso de la actividad ganadera ( $s = g$ )

$$\sum_{f \in F} \sum_{p \in P - \{\epsilon\}} \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} \sum_{g \in G - \{\epsilon\}} \sum_{w \in W} \sum_{y \in Y} \sum_{v \in V} x_{z, f, p, m, n, g, w, y, v}^s \leq a_z^s \quad \forall z \in Z - \{\epsilon\} \quad (3.5)$$

Notar que los valores de  $f$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $w$ ,  $y$  y  $v$  no son relevantes para esta restricción.

- En el caso de la actividad silvopastoril ( $s = sp$ )

$$\sum_{f \in F - \{\epsilon\}} \sum_{p \in P - \{\epsilon\}} \sum_{m \in M} \sum_{n \in N - \{\epsilon\}} \sum_{g \in G - \{\epsilon\}} \sum_{w \in W} \sum_{y \in Y} \sum_{v \in V} x_{z,f,p,m,n,g,w,y,v}^s \leq a_z^s \quad \forall z \in Z - \{\epsilon\} \quad (3.6)$$

En este caso los valores de  $m, w, y$  y  $v$  no son relevantes para esta restricción.

Notar que  $\epsilon$  se excluye de varios conjuntos en las restricciones, esto es porque no tiene sentido en el contexto de la actividad considerar dicho valor. Por ejemplo, no tiene sentido iterar en el conjunto de especie forestales considerando la especie  $\epsilon$ , ya que esta no existe y no aporta al evaluar la restricción.

- El conjunto de la suma de las inversiones iniciales tiene que ser menor o igual al presupuesto inicial de inversión

$$\sum_{s \in S} \sum_{z \in Z} \sum_{f \in F} \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} \sum_{g \in G} \sum_{w \in W} \sum_{y \in Y} \sum_{v \in V} I^s(z, f, p, m, n, g, w, y, v) \quad (3.7)$$

$$x_{z,f,p,m,n,g,w,y,v}^s \leq P_0$$

- La diferencia entre costos operativos y retornos anuales tiene que ser menor que el presupuesto operativo anual para cada uno de los periodos  $j$ .

$$\sum_{s \in S} \sum_{z \in Z} \sum_{f \in F} \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} \sum_{g \in G} \sum_{w \in W} \sum_{y \in Y} \sum_{v \in V} (C^s(z, f, p, m, n, g, w, y, v) - R^s(z, f, p, m, n, g, w, y, v)) x_{z,f,p,m,n,g,w,y,v}^s \leq P_j \quad \forall j = 1, \dots, 15 \quad (3.8)$$

### 3.3. Valores

A continuación se presentarán los cálculos y valores de los parámetros y conjuntos para cada una de las actividades consideradas en el modelo.

Hay que notar que obtener los datos de cada una de las actividades fue una actividad bastante compleja debido a la poca disponibilidad de datos de algunos de los sectores y el resguardo de varios de ellos por temas del mercado/negocio. Sin embargo, a través de una búsqueda exhaustiva y consulta con expertos en el caso de no contar con respuesta de algunos sectores, se lograron obtener datos reales de distintos años, que van desde finales del 2021 hasta el 2023.

#### 3.3.1. Forestación

Para el modelo presentado se utilizarán solo dos especies de árboles que, como se mencionó anteriormente, están ganando cada vez más relevancia en Uruguay. Estas son *eucalyptus dunni* y *grandis*. La densidad utilizada para la forestación será de 1600 árboles por hectárea y el destino final de la actividad será venta para celulosa

Se parte de que el campo no tiene plantación de árboles, y se plantará el mismo en su totalidad en el año 0, donde se realiza la inversión inicial.

En las siguientes secciones se presentarán los valores utilizados para el cálculo de los parámetros de la forestación.

### 3.3.1.1. Inversión inicial forestal

El primer costo a tomar en cuenta es el de compra y arrendamiento, el cual se puede ver en la tabla 3.2 (solo se ven los departamentos a considerar en los casos de prueba, para mayor detalle ver A.1).

| Departamento | Compra (US\$/ha) | Arrendamiento (US\$/ha) |
|--------------|------------------|-------------------------|
| Florida      | 4.172            | 143                     |
| Maldonado    | 3.888            | 145                     |
| Tacuarembó   | 2.825            | 146                     |

Tabla 3.2: Costos de compra y arrendamiento de terreno para forestación extraído de (MGAP, 2023c) y (MGAP, 2023b)

Luego de tener un terreno alquilado o comprado, se procede a las siguientes actividades que tienen, por lo general, tres etapas:

1. Preparación del predio: entre las actividades de esta etapa está la marcación de rodales, control de malezas, hormigas, tocones, laboreo y el despejo de residuos. Además de la compra de los insumos, herbicida y hormiguicida.
2. Plantación: consiste en la compra y plantación de los plantines, y tiene como insumo el fertilizante que se utilizará.
3. Post-plantación: esta etapa implica mantener el control de hormigas y malezas.

Todos los costos de estas actividades se pueden ver en la tabla 3.3.

| Actividad                | Costo estimado (US\$/ha) |
|--------------------------|--------------------------|
| Marcación de rodales     | 24                       |
| Control hormigas inicial | 41                       |
| Control malezas inicial  | 56                       |
| Control de tocones       | 102                      |
| Despejado de residuos    | 244                      |
| Laboreo                  | 90                       |
| Fertilizantes            | 186                      |
| Herbicida                | 22,5                     |
| Hormiguicida             | 7                        |
| Plantación               | $0,14 \times m$          |

Tabla 3.3: Costos de la inversión inicial forestal extraído de (MGAP, 2023d), (MGAP, 2023e) y (Agrourbano, 2023)

Si se realiza el cálculo de la inversión inicial necesaria para plantar una hectárea ( $m = 1600$ ), tomando los datos de la tabla 3.3 el total sería 996,5 US\$/ha, a esto se le tendría que sumar el costo del alquiler o compra, por lo tanto, se puede esperar un mínimo y un máximo aproximado de 1.139,5 - 1.142,5 US\$/ha si se alquila y 3.821,5 - 5.168,5 US\$/ha si se compra.

### 3.3.1.2. Costo operativo forestal

Luego de la etapa inicial, existen dos actividades importantes: el mantenimiento de los árboles a lo largo del horizonte temporal, que implica los controles de maleza y sobre todo el de hormigas, y en el último año la cosecha, extracción y carga. Los costos asociados de estas actividades y sus insumos se pueden ver en la tabla 3.4.

| Actividad                   | Costo estimado (US\$/ha) |
|-----------------------------|--------------------------|
| Control hormigas anual      | 55                       |
| Control malezas anual       | 63                       |
| Herbicida                   | 22,5                     |
| Hormiguicida                | 7                        |
| Cosecha, extracción y Carga | $17 \times V$            |

Tabla 3.4: Costos operativos forestal extraído de (MGAP, 2023e) y (Agrourbano, 2023)

En esta tabla se utiliza  $V$ . Esto se refiere al volumen de madera producido por el árbol. En la tabla 3.5 se puede ver el volumen de madera producido según la especie. La información fue calculada con los datos de altura ( $h$ ) y diámetro a la altura del pecho ( $d$ ) y con la fórmula de volumen siguiente:

$$V = \frac{\pi \times d^2 \times h \times \frac{3}{4} \times f}{4} \quad (3.9)$$

Esta fórmula es utilizada por (UNLP, 2023) para estimación de volumen de madera, se le agregó la multiplicación por tres cuartos para aproximar la altura comercial de árboles destinados a celulosa y  $f$  es el factor de forma 0,65, que refiere a cómo los árboles se van haciendo más finos a medida que crecen.

| Especie            | Volumen producido $m^3$ | Peso del fuste $t$ |
|--------------------|-------------------------|--------------------|
| Eucalyptus dunnii  | 0,32                    | 0,3446             |
| Eucalyptus grandis | 0,51                    | 0,4857             |

Tabla 3.5: Volumen y peso de madera producido por las especies, calculado a partir de datos de (Hirigoyen y cols., 2021)

En la tabla 3.5 se hace referencia al fuste del árbol, que es la parte del tronco entre las raíces y las ramas principales. El fuste es la sección del tronco que se utiliza comúnmente para medir la altura del árbol y es una parte esencial para fines comerciales.

Notar que este volumen es afectado por el suelo según la zona en la cual se encuentre, de forma que se establece en la tabla 3.6.

| Región               | Efecto (%) |
|----------------------|------------|
| Basalto              | -11        |
| Centro sur           | 0          |
| Colinas del este     | 12         |
| Cuenca litoral       | -6         |
| Cuenca noroeste      | 5          |
| Sierras del este     | 7          |
| Sistema de planicies | -1         |

Tabla 3.6: Efecto porcentual del suelo sobre el volumen de madera producido extraído, de (INIA, 2023c)

Por último, se tiene que considerar el costo del flete x tonelada que, para simplificar, se asumió que se está a 150 - 300 km aproximadamente del destino final y el costo para esa distancia es de 25 US\$ la tonelada. Se utilizan los pesos de la tabla 3.5 (Scoz, R, 2023).

Como ejemplo, si se está en Florida, que se encuentra ubicada en el Centro Sur, y se quiere estimar el costo anual, tomando los datos de la tabla 3.6 se tiene que el costo anual es 147,5 US\$/ha.

Para calcular el valor del último año, hace falta calcular el volumen total producido en una hectárea, el cual es ajustado tomando en cuenta un 2 % de mortalidad anual. Asumiendo que es una cosecha de grandis el resultado será  $606,30 \text{ m}^3/\text{ha}$ , por lo tanto, la cosecha, extracción y carga será 10.307,10 US\$/ha y el traslado será 14.435,29 US\$/ha llegando a un total de 24.742,39 US\$/ha, por lo tanto, sumando todos los costos serían 24.889,89 US\$/ha el último año. Recordar que, si se arrienda, se le suma a los costos anteriores el costo anual de arrendamiento de la tabla 3.2.

### 3.3.1.3. Retorno forestal

La inversión forestal cierra con la venta de la madera producida, este precio está determinado fuertemente por la calidad de la madera, en este caso los cuidados que se le dan son los mínimos esperados anuales porque el destino es celulosa y los precios de venta se pueden ver en la tabla 3.7.

| Especie            | Precio (US\$/ $\text{m}^3$ ) |
|--------------------|------------------------------|
| Eucalyptus dunnii  | 62                           |
| Eucalyptus grandis | 62                           |

Tabla 3.7: Precio de venta por metro cúbico según especie extraído de (Acebedo, F, 2023)

Una vez más, la venta depende del volumen; por lo tanto, para continuar con el

ejemplo, si se quiere vender toda la madera producida en una hectárea (606,30 m<sup>3</sup>/ha) se obtendría 37.590,60 US\$/ha. Para los casos en los cuales se opta por compra del terreno, hay que tomar en cuenta que en el último año se vende el mismo. Se hace una valuación del terreno a la hora de la venta del 261 % que es lo mismo que han aumentado en promedio los precios de los terrenos en Uruguay del 2007-2022 (MGAP, 2023c).

### 3.3.2. Ganadería

En el marco del modelo ganadero adoptado, se ha enfocado en un sistema que comprende la cría y venta de ganado, incorporando terneros, novillos de 1 a 2 años, de 2 a 3 años y aquellos mayores de 3 años. El ciclo de vida del ganado se gestiona cuidadosamente, con la adquisición anual de terneros y la venta planificada de novillos mayores de 3 años. Año a año se realiza la adquisición de terneros, renovando el ganado de manera continua.

Algo importante para destacar es que la ganadería se despliega en una amplia variedad de modelos, cada uno adaptado a diferentes necesidades y objetivos. Un enfoque común implica la cría y engorde del ganado bovino, donde los terneros se desarrollan hasta alcanzar un peso o edad deseada antes de ser vendidos, que es el que se lleva adelante en el trabajo realizado. Pero este no es el único modelo en la práctica, existen enfoques centrados en la producción de carne de calidad, producción de leche y modelos que llevan adelante ambas, buscando tanto la producción de carne como de leche (Dutra, J, 2023). A su vez, la cría de ganado ovino ocupa el segundo lugar en importancia dentro del sector ganadero uruguayo, donde los principales productos son lanas, carnes y cueros (EconomíaUY, 2024a).

#### 3.3.2.1. Inversión inicial ganadera

En el marco de la estrategia ganadera implementada, la inversión inicial desempeña un papel crucial, centrada principalmente en la adquisición de terneros, así como en novillos de 1 a 2 años y de 2 a 3 años. Esta cuidadosa elección permite que, al finalizar el primer año, el ganadero cuente con novillos que han superado los 3 años de edad y están listos para su comercialización. Este enfoque se traduce en un ciclo anual continuo, donde cada año se incorporan nuevos terneros al sistema mientras se procede a la venta de novillos que han alcanzado la edad óptima.

En la tabla 3.8 se detalla la carga de ganado por región, con la distinción del tipo de pastura, que para el caso de estudio se considera la pastura natural y mejorada. Cabe aclarar que la unidad de ganado, tal como se detalla, incluye un ternero, un novillo de 1 a 2 años y un novillo de 2 a 3 años.

En la tabla 3.9 se puede ver la producción de materia seca<sup>1</sup> diaria por tipo de suelo, utilizando como guía (INIA, 2023a) y con los pesos de las especies descritos en la tabla 3.12 se determinaron las unidades soportadas por hectárea. Los cálculos se hicieron

---

<sup>1</sup>Es el contenido de un alimento menos su contenido de agua.

| Región               | Tipo de Pastura | Carga de Ganado (UG/ha) |
|----------------------|-----------------|-------------------------|
| Basalto              | Mejorada        | 1,066                   |
| Basalto              | Natural         | 0,866                   |
| Centro sur           | Mejorada        | 1,133                   |
| Centro sur           | Natural         | 0,866                   |
| Colinas del este     | Mejorada        | 1,200                   |
| Colinas del este     | Natural         | 0,866                   |
| Cuenca litoral       | Mejorada        | 1,333                   |
| Cuenca litoral       | Natural         | 0,933                   |
| Cuenca noroeste      | Mejorada        | 1,200                   |
| Cuenca noroeste      | Natural         | 0,866                   |
| Sierras del este     | Mejorada        | 1,266                   |
| Sierras del este     | Natural         | 0,933                   |
| Sistema de planicies | Mejorada        | 1,200                   |
| Sistema de planicies | Natural         | 0,866                   |

Tabla 3.8: Unidad combinada de ganado por hectárea

tomando el promedio entre lo que soportarían las pasturas si tuvieran las unidades con su peso original y con su peso final, resultando en los datos que se pueden ver en 3.8.

| Región               | Tipo de Pastura | P.M.S por día (Kg/ha) |
|----------------------|-----------------|-----------------------|
| Basalto              | Mejorada        | 16                    |
| Basalto              | Natural         | 13                    |
| Centro sur           | Mejorada        | 17                    |
| Centro sur           | Natural         | 13                    |
| Colinas del este     | Mejorada        | 18                    |
| Colinas del este     | Natural         | 13                    |
| Cuenca litoral       | Mejorada        | 20                    |
| Cuenca litoral       | Natural         | 14                    |
| Cuenca noroeste      | Mejorada        | 18                    |
| Cuenca noroeste      | Natural         | 13                    |
| Sierras del este     | Mejorada        | 19                    |
| Sierras del este     | Natural         | 14                    |
| Sistema de planicies | Mejorada        | 18                    |
| Sistema de planicies | Natural         | 13                    |

Tabla 3.9: Producción de materia seca diaria (Morales, H. y Pereira, M , 2021)

Dentro de la estrategia ganadera, la inversión inicial abarca aspectos adicionales como lo es la compra o alquiler de terrenos adecuados para la cría de ganado. En la tabla 3.10 se pueden ver los costos de compra y arrendamiento (solo se ven los de los departamentos a considerar en los casos de prueba, para mayores detalles ver A.1).

Además, se destina una porción significativa de la inversión inicial al acondicionamiento del terreno mediante la instalación de alambrados. Este paso es esencial para delimitar áreas de pastoreo, gestionar la rotación de pastizales y mantener un control efectivo sobre el ganado. Para definir dicho gasto, se promedió el valor del alambrado eléctrico de 2 hilos y de 7 hilos, estableciéndose como costo US\$ 1.588 por perímetro de hectárea (400 mts) (Almacen Rural, 2023).

| Departamento | Compra (US\$/ha) | Arrendamiento (US\$/ha) |
|--------------|------------------|-------------------------|
| Florida      | 4.172            | 96                      |
| Maldonado    | 3.888            | 86                      |
| Tacuarembó   | 2.825            | 69                      |

Tabla 3.10: Costos de compra y arrendamiento de terreno para ganadería extraído de (MGAP, 2023c) y (MGAP, 2023b)

Si se quisiera implantar un sistema ganadero con el formato descrito anteriormente en el centro sur del país el costo de inversión inicial con base en esto ascendería a 2511.83 (US\$/ha) con pastura natural y 3.009,22 (US\$/ha) con pastura mejorada. Notar que a estos costos les falta sumar el valor de compra y alquiler correspondiente.

### 3.3.2.2. Costo operativo ganadero

Uno de los componentes clave de estos costos radica en la adquisición de terneros, siendo la cantidad dependiente directamente del tamaño del terreno y la capacidad de carga de ganado por hectárea. Esta variable adquiere una relevancia fundamental, ya que influye directamente en la capacidad productiva del sistema ganadero. Como se pudo ver en la sección anterior cuando se explicó la carga de ganado soportada.

Adicionalmente, se debe considerar el costo asociado al personal necesario para llevar adelante las labores diarias de manejo del ganado, cuidado del terreno y supervisión general de la operación. Para ello se considera una persona especializada cada 350 hectáreas (Dutra, J, 2023), cuyo sueldo asciende a US\$ 1.050 mensual (EconomíaUY, 2024b).

| Semilla            | Precio (US\$/kg) |
|--------------------|------------------|
| Trébol blanco      | 9,7              |
| Trébol rojo        | 8,5              |
| Lotus corniculatus | 10,5             |

Tabla 3.11: Precios de referencia mercado de semillas (AnaProse, 2023)

En el escenario donde se opta por trabajar con campo mejorado se hacen tres ciclos de cultivos, por esto surge otro componente del costo operativo: la siembra, fertilización por hectárea que cuesta 76 (US\$/Ha) (Cámara Uruguaya de servicios agropecuarios, 2023) y el herbicida 91 (US\$/Ha) (Union Rural de Flores, 2023) además se tiene que adquirir semillas. En la tabla 3.11 están los costos de las distintas variantes de semillas para campo mejorado. Cabe aclarar respecto a esto último que, por hectárea, se necesitan entre 4 y 8 kgs de semillas (Barreto, S. y Bermúdez, R, 2018), por lo que se utiliza el promedio para el modelado, es decir, 6 kgs de semillas por hectárea, y se utilizan en partes iguales las tres variantes como simplificación. La inversión en la mejora del terreno mediante prácticas de siembra impacta directamente en la calidad del forraje disponible para el ganado, influyendo en su salud y productividad (Barreto, S. y Bermúdez, R, 2017).

| Ganado        | Peso (kg) |
|---------------|-----------|
| Ternero       | 70        |
| Novillo 1 a 2 | 190       |
| Novillo 2 a 3 | 310       |
| Novillo 3 mas | 430       |

Tabla 3.12: Peso del ganado

La tabla 3.12 detalla el peso del ganado, se tomó como base 70kg (Conde, 2022), los demás niveles se calculan incrementando en 120kg por año (Dutra, J, 2023) y en la tabla 3.13 se ve el costo promedio del ganado. Notar que hay que incluir el precio de destare que es un 5 % que se cobra cada vez que se realiza compra de ganado (Pantalla Uruguay, 2023).

En la tabla 3.10 se pueden ver los costos de compra y arrendamiento (solo se ven los de los departamentos a considerar en los casos de prueba para mayores detalles, ver A.1).

| Ganado        | Precio (US\$/kg) |
|---------------|------------------|
| Ternero       | 2,173            |
| Novillo 1 a 2 | 1,83             |
| Novillo 2 a 3 | 1,69             |
| Novillo 3 mas | 1,587            |

Tabla 3.13: Promedio de precios de compra y venta de ganado extraído de los portales (Pantalla Uruguay, 2023) y (Asociación de Consignatarios de Ganado, 2023)

Por lo tanto continuando con el ejemplo anterior los costos operativos del sistema ganadero por año sería de 170,862 (US\$/ha) cuando se opta por pastura natural y 212,358 (US\$/ha) cuando se opta por pastura mejorada y los años de siembra el costo asciende hasta 436,758 (US\$/ha). Notar que a estos costos le faltaría el alquiler de corresponder.

### 3.3.2.3. Retorno ganadero

En cuanto al retorno ganadero, el modelo propuesto ofrece un flujo constante de ingresos a través de la venta anual de novillos mayores a 3 años. Esta estrategia permite generar retornos regulares a lo largo de los ciclos de producción.

Adicionalmente, el año de cierre de la inversión, que se sitúa en el decimoquinto año según la estructura de trabajo planteada, presenta una oportunidad significativa de retorno. En este periodo, se procede a la venta de todo el ganado, lo que incluye novillos de 1 a 2 años, novillos de 2 a 3 años y aquellos mayores a 3 años. Esta venta masiva constituye un punto culminante en la estrategia, generando un retorno integral de la inversión realizada a lo largo del tiempo.

En la tabla 3.13 se pueden ver los precios para compra y venta de ganado. Por lo tanto, los retornos del sistema ganadero serían de 773,39 (US\$/Ha) para el campo

mejorado y 591,42 (US\$/Ha) para el campo natural, ascendiendo a 1761,21 (US\$/Ha) y 1346,80 (US\$/Ha) respectivamente el último año cuando se vende todo el ganado. Notar que si se está en el caso de compra de terreno, el mismo también es vendido, como se explicó anteriormente en el caso de forestación.

### **3.3.3. Silvopastoreo**

El enfoque adoptado para el silvopastoreo se centra en la plantación de 250 árboles por hectárea, dicha decisión es respaldada por información recogida de portales y revistas oficiales, con el aval del experto José Dutra entrevistado durante la investigación (Dutra, 2023).

En cuanto al manejo del ganado en este sistema, se ha seguido lo mismo que se emplea en la ganadería pura modelada, de forma de mantener la consistencia en el trabajo y simplificar el problema.

#### **3.3.3.1. Inversión inicial silvopastoril**

En lo que respecta a la inversión inicial para la implementación de esta técnica, es fundamental destacar que el modelo diseñado comparte elementos esenciales con los enfoques tradicionales de forestación y ganadería pura. No obstante, se realizan ajustes específicos teniendo en cuenta las particularidades del silvopastoreo.

En primer lugar, se considera el alquiler o compra del terreno a trabajar. Respecto a la actividad forestal, se tiene la adquisición de los insumos necesarios para la plantación de árboles, tomando en cuenta la densidad seleccionada de 250 árboles por hectárea. A diferencia de la forestación convencional, la cantidad de árboles por hectárea es significativamente menor. Por lo tanto, se utilizaron los mismos costos de la tabla 3.3, pero estos fueron divididos en cuatro para aproximar la densidad menor, exceptuando el del plantín.

En lo que respecta al ganado, la inversión inicial implica considerar la cantidad de animales necesarios para cubrir el área disponible después de restar el espacio ocupado por los árboles plantados. Este enfoque se diferencia de la ganadería pura, donde la totalidad del terreno está dedicada exclusivamente al pastoreo. De esta forma, la reducción en la cantidad de ganado (en comparación con la ganadería convencional) influye en los costos asociados con la compra de animales. Los resultados y el método utilizado para calcular la unidad ganadera para silvopastoreo se pueden ver en la siguiente sección.

Por lo tanto, usando cálculos similares a los de las secciones anteriores la inversión inicial de un sistema silvopastoril en el centro sur del país sería de 3.177,94 (US\$/Ha) para el campo mejorado y 2.683,47 (US\$/Ha) para el campo natural, una vez más falta sumarle a estos costos el monto de alquiler o compra que corresponda.

#### **3.3.3.2. Costo operativo silvopastoril**

Respecto a los costos operativos, al igual que en la inversión inicial, se comparten los gastos implicados tanto en forestación y ganadería. Cabe destacar en este punto

que el terreno utilizado compartirá ambas actividades, por lo que los gastos implicados para la actividad forestal, así como los de la actividad ganadera, serán de acuerdo con los espacios utilizados.

En el caso de los gastos forestales, como el objetivo del silvopastoreo es generar madera de calidad, hay que incluir el costo de poda por árbol, el cual es 0.63 US\$ (MGAP, 2023d), de los cuales se realizan tres en toda la vida de cada árbol (Dutra, J, 2023). Además de esto, se tuvieron que ajustar los valores de madera producida, ya que por el tipo de cuidado y densidad no es la misma que en forestación. Suponiendo altura comercial de 7m y usando cálculos similares a la sección de forestación se obtienen los resultados de la tabla 3.14, notar que luego de los 7m comerciales “sobra” un volumen de madera el cual es 0,15  $m^3$  para dunnii y 0,26  $m^3$  para grandis, Esto es importante resaltarlo, ya que esta madera también se vende en el modelo, pero a un precio menor como se verá en la siguiente sección.

| Especie            | Volumen producido $m^3$ | Peso del fuste $t$ |
|--------------------|-------------------------|--------------------|
| Eucalyptus dunnii  | 0,21                    | 0,2956             |
| Eucalyptus grandis | 0,28                    | 0,4090             |

Tabla 3.14: Volumen y peso de madera producido por las especies calculado a partir de datos de (Hirigoyen y cols., 2021)

En esta instancia cabe mencionar que para realizar el modelado se calcula la unidad de ganado soportada con base en la producción de materia seca como en ganadería convencional, usando los datos de la tabla 3.9. Dicha producción está sujeta al tamaño del terreno disponible, es decir, el tamaño total menos el espacio ocupado por el árbol. Se toma como criterio restar al espacio total el doble del diámetro a la altura del pecho del árbol. Por lo tanto, la nueva unidad ganadera soportada se puede ver en la tabla 3.15.

| Región               | Tipo de Pastura | Carga de Ganado (UG/ha) |
|----------------------|-----------------|-------------------------|
| Basalto              | Mejorada        | 1,055                   |
| Basalto              | Natural         | 0,857                   |
| Centro sur           | Mejorada        | 1,121                   |
| Centro sur           | Natural         | 0,857                   |
| Colinas del este     | Mejorada        | 1,187                   |
| Colinas del este     | Natural         | 0,857                   |
| Cuenca litoral       | Mejorada        | 1,319                   |
| Cuenca litoral       | Natural         | 0,923                   |
| Cuenca noroeste      | Mejorada        | 1,187                   |
| Cuenca noroeste      | Natural         | 0,857                   |
| Sierras del este     | Mejorada        | 1,253                   |
| Sierras del este     | Natural         | 0,923                   |
| Sistema de planicies | Mejorada        | 1,187                   |
| Sistema de planicies | Natural         | 0,857                   |

Tabla 3.15: Unidad combinada de ganado por hectárea para el silvopastoreo

Tomado en cuenta todo lo anterior el costo de realizar actividades silvopastoriles en el centro sur del país serían 206,29 (US\$/Ha) para campo natural y 247,34 (US\$/Ha) para campo mejorado. Este último asciende a 471,74 (US\$/Ha) en los años de siembra y a 404,84 (US\$/Ha) para los años con podas en campo mejorado y 363,79 (US\$/Ha) en campo natural. El último año los costos pueden llegar a 5894,69 (US\$/Ha) para campo mejorado y 5853,64 (US\$/Ha) para campo natural donde se incluyen los costos de traslado, cosecha, extracción y carga. Usando los mismos valores que en forestación 3.4.

### 3.3.3.3. Retorno silvopastoril

En lo que respecta al retorno silvopastoril se tiene de manera anual la venta del ganado novillo mayor a tres años, al igual que fue modelado en el sistema ganadero. En lo que respecta a la actividad forestal en el silvopastoreo, el retorno adquiere una dimensión adicional a través de la gestión destinada a la exportación de madera, en contraste con el enfoque previamente explicado en la sección 3.3.1 para forestación centrado en la producción de celulosa.

Para simplificar el costo de la madera que sobra luego de los 7 metros, se tomó como precio un tercio del valor original.

| Especie            | Precio Calidad (US\$/ $m^3$ ) | Precio Resto (US\$/ $m^3$ ) |
|--------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Eucalyptus dunnii  | 179                           | 59,66                       |
| Eucalyptus grandis | 179                           | 59,66                       |

Tabla 3.16: Precio de venta por metro cúbico según especie y calidad de la madera extraído de (Acebedo, F, 2023)

Finalmente, para los retornos de esta actividad se consideran: para la ganadería se utilizan los precios de 3.13 y para la forestación se usan los precios de la tabla 3.16 en conjunto con los datos de las secciones anteriores para el cálculo del volumen, de la madera de distinta calidad. Por lo tanto, a través de cálculos similares se obtienen los retornos de 13.934,01 (US\$/Ha) para campo mejorado y 13.524,03 (US\$/Ha) para campo natural.

Notar que si se está en el caso de compra de terreno, el mismo también es vendido, como se explicó en el caso de forestación.

### 3.3.4. Bonos

Para este modelado solo se tomaron en cuenta bonos Uruguayos en US\$ cuya fecha de vencimiento a partir del 2023 estuviera al menos a 15 años. Las tasas de bonos que fueron consideradas son las siguientes: 4,97 %, 5,75 % y 7,625 % (GBU Corredor de Bolsa, 2023a). Notar que los rendimientos de los intereses de bonos varían dependiendo de las tasas de cambio y la inflación en comparación con cuando fueron emitidos y cuando se vencen. Tal cálculo no es trivial, ya que requiere predecir al menos 15 años

de mercado. Para simplificar, se tomó como rendimiento la misma tasa de interés inicial, ya que el VAN cumple con ese objetivo de sustraer las pérdidas por el tiempo e inflación.

#### 3.3.4.1. Inversión inicial bonos

A diferencia de las inversiones anteriores, que están limitadas por factores del negocio, como tierra, ganado, insumos por hectárea, etc. Este tipo de inversión solamente se ve limitado por el capital que se quiera destinar a la misma.

Los corredores de bolsa usualmente cobran un porcentaje por la operación de la compra del bono según el tarifario de (GBU Corredor de Bolsa, 2023b) el costo de comprar un bono es de un 3 %, con un mínimo de 50 US\$ por operación.

Por lo tanto, si se fuera a destinar 10000 US\$ para la compra de un bono, la inversión inicial sería de 10300 US\$.

#### 3.3.4.2. Costos de bonos

Los costos anuales asociados al bono luego de su compra son el costo de mantenimiento de la cuenta y el costo de asesoramiento, ambos debido a la dependencia que sí tiene con los corredores de bolsa. En las tablas 3.17 y 3.18 se pueden ver estos costos que dependen del monto que se tiene en la cuenta actualmente según (GBU Corredor de Bolsa, 2023b).

| Monto en cuenta (US\$)      | Costo anual |
|-----------------------------|-------------|
| Menores a 100.000           | 1 %         |
| Entre 100.001 y 500.000     | 0,90 %      |
| Entre 500.001 y 1.000.000   | 0,75 %      |
| Entre 1.000.001 y 3.000.000 | 0,60 %      |
| Mayores a 3.000.000         | 0,50 %      |

Tabla 3.17: Costos de asesoramiento tomado de (GBU Corredor de Bolsa, 2023b)

| Monto en cuenta (US\$)  | Costo anual (US\$) |
|-------------------------|--------------------|
| Menores a 20.000        | 50                 |
| Entre 20.001 y 50.000   | 100                |
| Entre 50.001 y 100.000  | 200                |
| Entre 100.001 y 250.000 | 300                |
| Entre 250.001 y 500.000 | 400                |
| Mayores a 500.000       | 600                |

Tabla 3.18: Costos de mantenimiento de cuenta tomado de (GBU Corredor de Bolsa, 2023b)

Por lo tanto, siguiendo con el ejemplo anterior del bono a 10.000 US\$ a una tasa de 7,625 %, se tendría un costo el primer año de 57,625 US\$. Este costo hay que actualizarlo año a año luego de cobrar los intereses; por lo tanto, ambos pueden variar dependiendo del monto de la cuenta.

### 3.3.4.3. Retorno bonos

El retorno anual es lo más fácil de determinar en un bono, ya que solo depende de la tasa de interés, por lo tanto, para el ejemplo anterior, 10.000 US\$ a una tasa de 7,625 %, el retorno anual sería de 762,5 US\$ y el último año se retorna también el capital inicial 10.000 US\$ invertido en el bono.

### 3.3.5. Letras de regulación monetaria

Para las letras de regulación monetaria (LRM) se consideraron solamente aquellas que van entre 30-360 días, como se pueden ver en la 3.19 tasas tomadas de (GBU Corredor de Bolsa, 2023a). A diferencia de los bonos que son simplemente anuales, las operaciones con letras fueron modeladas dependiendo de su duración, es decir, una letra de 360 días tendrá costos asociados a una sola operación de LRM en un año y una de 30 días tendrá costos asociados a 12 operaciones en un solo año.

| Letras del Tesoro (días) | Tasa de interés |
|--------------------------|-----------------|
| 30                       | 9,88 %          |
| 90                       | 9,48 %          |
| 180                      | 9,72 %          |
| 360                      | 9,55 %          |

Tabla 3.19: Tasas de interés de las LRM tomado de (GBU Corredor de Bolsa, 2023b)

Notar que las LRM solamente operan en UYU\$ En el modelo se utiliza una tasa de cambio de 40 UYU\$ por US\$. Esto luego de realizarse el cálculo del VAN que utiliza el  $i_{UYU}$  por ser una inversión en esta moneda.

#### 3.3.5.1. Inversión inicial LRM

El costo asociado a la inversión inicial puede variar mucho dependiendo del monto y la duración para simplificar. Se dejó en 1 % el costo de operación para la compra de LRM para todas las tasas (GBU Corredor de Bolsa, 2023b).

Por lo tanto, si se quisiera invertir 10.000 UYU\$ en LRM, se tiene que contar con un capital de 10.100 UYU\$

#### 3.3.5.2. Costos de LRM

A diferencia del bono para las LRM, solo se toma en cuenta el costo de mantenimiento de la cuenta 3.18 y no el de asesoramiento, ya que siempre se está reinvertiendo en la letra, es decir, el dinero pasa siempre menos de 1 día en la cuenta.

Por lo tanto, para el ejemplo de invertir 10.000 UYU\$ en LRM a una tasa de 9,55 % (360 días), el costo sería de 50 US\$ que equivalen a 2.000 UYU\$ el primer año más el costo de operación de la letra, dejando en total 2.100 UYU\$.

Para los casos de LRM a plazos menores se tiene que sumar los costos de operación dependiendo de la cantidad que se opere en un año, notar que siempre se reinvierte en

LRM todo el capital de la cuenta una vez que se resten los costos.

### 3.3.5.3. Retorno LRM

El retorno de la LRM depende de la tasa de interés continuando con el ejemplo de 10.000 UYU\$ a una tasa de 9,55 % (360 días) tomando en cuenta que las LRM funcionan a descuento cuando se lícita la letra uno compra una LRM de retorno final 10.955 UYU\$, pero solamente tiene que invertir 10.000 UYU\$.

Notar que esto es solo el retorno de un año, los años siguientes se sigue operando con letras y reinvertiendo el capital luego de restarle los costos, por lo tanto, el retorno el resto de los años será variable.

### 3.3.6. Bono Ganadero

En la conceptualización del esquema del “Bono Ganadero”, se han establecido diversas categorías de interés, cada una correlacionada con el monto de inversión realizado. Estas se pueden ver en la tabla 3.20.

| Bono ganadero (USD)   | Tasa de interés |
|-----------------------|-----------------|
| Entre 5.000 y 15.000  | 7 %             |
| Entre 15.001 y 50.000 | 8 %             |
| Mayores a 50.001      | 9 %             |

Tabla 3.20: Tasas de interés para el bono ganadero

#### 3.3.6.1. Inversión inicial bono ganadero

La inversión inicial se caracteriza por su flexibilidad, ya que está directamente vinculada a la disposición del inversor para participar en este tipo de instrumento financiero. En este modelo, no existe un monto predeterminado de inversión, sino que se adapta de manera personalizada a las preferencias y capacidades de cada inversionista.

#### 3.3.6.2. Costos de bono ganadero

El costo anual se define por la cantidad que se invierte en el bono durante ese período. El modelo se caracteriza por la reinversión del valor retornado cada año, lo que resulta en un aumento progresivo de la inversión anual. Esta estrategia refleja un ciclo continuo donde los intereses obtenidos se suman al capital invertido, generando una progresión compuesta que contribuye al crecimiento sostenido de la inversión a lo largo del tiempo. A modo explicativo, si se decide en el primer año invertir 10.000 US\$ en bono ganadero, al cabo del siguiente año la inversión sería ese valor más el interés generado en ese período, (en este caso tasa de interés del 7 %) por lo que sería de 10.700 US\$

#### 3.3.6.3. Retorno bono ganadero

En este contexto, el retorno se manifiesta como el resultado acumulado de la estrategia de reinversión anual. A medida que se incrementa la inversión anual mediante

la adición de los intereses obtenidos, se crea un flujo constante de retornos que se acumulan y se reinvierten de manera sistemática.

Este enfoque estratégico da como resultado un retorno significativo al término de los 15 años, capitalizando la acumulación compuesta a lo largo del tiempo.

Continuando con el ejemplo anterior, el retorno luego del primer año es de 10.700 US\$, y al cabo de los quince años se totaliza un retorno de 28.449,85 US\$.

### 3.3.7. Otros parámetros

Entre los otros parámetros que se consideran en el modelo están:

La tasa de descuento  $i$  que se utiliza en el cálculo, para aplicar el descuento a los flujos de caja para cada uno de los años del horizonte de inversión. Este valor se fijó en 4,75 % (Valor de bono del tesoro a 20-30 años en Estados Unidos en 2023 ([U.S. Department of the Treasury, 2023](#))) para el cálculo del VAN en dólares y en 6 % (como se utilizaron bonos Uruguayos se tomó como tasa de descuento la expectativa de inflación ([Banco Central del Uruguay, 2023a](#))) para el cálculo del VAN en pesos que solo es utilizada para el caso de las LRM. Estos valores tienen dos objetivos: uno es representar el interés de un crédito, en caso de que el capital se solicite a través de un préstamo, y el otro es representar el costo de oportunidad, en caso de que el capital sea propiedad del inversor.

Y el otro parámetro a considerar es el horizonte de inversión, el cual va de 1-15 años, esto es debido a los periodos de cultivo de los árboles, que en realidad pueden llegar hasta los 12 años ([2.2.2](#)).

## 3.4. Codificación

Utilizando todas las consideraciones antes expuestas en esta sección se construyó un modelo en AMPL, cuyo código principal se puede ver en el Anexo [D](#) y también es posible acceder al mismo en el siguiente [repositorio](#)

## Capítulo 4

# Experimentos numéricos

En este capítulo se mostrarán las pruebas diseñadas y los resultados de las mismas. Para el diseño de las pruebas se consideraron tres tipos: (i) verificación y validación que tienen el objetivo de comprobar que es correcto tanto el modelado como sus correspondientes restricciones, (ii) realistas que tienen el objetivo de ver cómo se comporta el modelo frente a escenarios muy cercanos a la realidad y (iii) sensibilidad, similar al anterior, pero busca ver qué tan sensibles son las decisiones al modificar únicamente un parámetro a la vez.

### 4.1. Diseño de pruebas

En cada una de las pruebas algunos parámetros son variados, con distintos objetivos dependiendo de la prueba, entre ellos se encuentran:

- $P_0$  inversión inicial
- $P_j$  presupuesto anual
- $a_z^f$  ¿permite la forestación en la zona?
- $a_z^g$  ¿permite la ganadería en la zona?
- $a_z^{sp}$  ¿permite la silvopastoreo en la zona?
- $d_z$  si se compra o alquila la zona
- $\%P_0$  porcentaje del presupuesto inicial que puede ser destinado a la/las actividad/des financiera/s

#### 4.1.1. Pruebas de validación y verificación

El objetivo de estas pruebas es justamente validar y verificar la implementación computacional del modelo y cada una de las restricciones, y para esto se tomaron las siguientes consideraciones:

- Se deja solo un elemento en los conjuntos del modelo, exceptuando  $|Z|$ , el cual se deja fijo en 3 y  $S$  que no se modifica, esto debido a que tener más de un elemento en los conjuntos no aporta para verificar las restricciones.

- Las inversiones iniciales financieras se fijan en 25 % del presupuesto inicial.
- Se hacen pruebas solo para alquiler ( $d_z$  con valor 0), ya que seleccionar compra lo único que cambia son costos fijos y no es relevante para verificar que se cumplen las restricciones.
- El tamaño de la hectárea  $t_z$  se deja fijo en 1 por el mismo motivo que lo anterior.

En la tabla 4.1 se pueden observar los 24 casos contruidos para estas pruebas. Cada uno de los parámetros fue variado específicamente para verificar que las restricciones de la sección 3.2.5 se cumplen. Notar que se resaltan en negrita los parámetros que se están variando respecto al caso base 1 o 13 según corresponda.

| Caso | Z | $P_0(\text{US\$})$ | $P_j(\text{US\$})$ | $a_z^f$                                              | $a_z^g$                                              | $a_z^{sp}$                                                    |
|------|---|--------------------|--------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 1    | 3 | 10.000             | 1.000              | Todas las zonas                                      | Todas las zonas                                      | Todas las zonas                                               |
| 2    | 3 | <b>6.000</b>       | 1.000              | Todas las zonas                                      | Todas las zonas                                      | Todas las zonas                                               |
| 3    | 3 | <b>3.000</b>       | 1.000              | Todas las zonas                                      | Todas las zonas                                      | Todas las zonas                                               |
| 4    | 3 | 10.000             | 1.000              | <b>Ninguno permitido</b>                             | <b>Ninguno permitido</b>                             | <b>Ninguno permitido</b>                                      |
| 5    | 3 | 10.000             | 1.000              | Todas las zonas                                      | <b>Ninguno permitido</b>                             | <b>Ninguno permitido</b>                                      |
| 6    | 3 | 10.000             | 1.000              | <b>Ninguno permitido</b>                             | Todas las zonas                                      | <b>Ninguno permitido</b>                                      |
| 7    | 3 | 10.000             | 1.000              | <b>Ninguno permitido</b>                             | <b>Ninguno permitido</b>                             | Todas las zonas                                               |
| 8    | 3 | 10.000             | 1.000              | Todas las zonas                                      | Todas las zonas                                      | <b>Ninguno permitido</b>                                      |
| 9    | 3 | 10.000             | 1.000              | Todas las zonas                                      | <b>Ninguno permitido</b>                             | Todas las zonas                                               |
| 10   | 3 | 10.000             | 1.000              | <b>Ninguno permitido</b>                             | Todas las zonas                                      | Todas las zonas                                               |
| 11   | 3 | 10.000             | 1.000              | $a_z^f[1] = 0$                                       | $a_z^g[2] = 0$                                       | $a_z^{sp}[3] = 0$                                             |
| 12   | 3 | 10.000             | 1.000              | $a_z^f[1] = 1, a_z^f[2] = 1 \text{ y } a_z^f[3] = 0$ | $a_z^g[2] = 1, a_z^g[3] = 1 \text{ y } a_z^g[1] = 0$ | $a_z^{sp}[3] = 1, a_z^{sp}[1] = 1 \text{ y } a_z^{sp}[2] = 0$ |
| 13   | 3 | 10.000             | 0                  | Todas las zonas                                      | Todas las zonas                                      | Todas las zonas                                               |
| 14   | 3 | <b>6.000</b>       | 0                  | Todas las zonas                                      | Todas las zonas                                      | Todas las zonas                                               |
| 15   | 3 | <b>3.000</b>       | 0                  | Todas las zonas                                      | Todas las zonas                                      | Todas las zonas                                               |
| 16   | 3 | 10.000             | 0                  | <b>Ninguno permitido</b>                             | <b>Ninguno permitido</b>                             | <b>Ninguno permitido</b>                                      |
| 17   | 3 | 10.000             | 0                  | Todas las zonas                                      | <b>Ninguno permitido</b>                             | <b>Ninguno permitido</b>                                      |
| 18   | 3 | 10.000             | 0                  | <b>Ninguno permitido</b>                             | Todas las zonas                                      | <b>Ninguno permitido</b>                                      |
| 19   | 3 | 10.000             | 0                  | <b>Ninguno permitido</b>                             | <b>Ninguno permitido</b>                             | Todas las zonas                                               |
| 20   | 3 | 10.000             | 0                  | Todas las zonas                                      | Todas las zonas                                      | <b>Ninguno permitido</b>                                      |
| 21   | 3 | 10.000             | 0                  | Todas las zonas                                      | <b>Ninguno permitido</b>                             | Todas las zonas                                               |
| 22   | 3 | 10.000             | 0                  | <b>Ninguno permitido</b>                             | Todas las zonas                                      | Todas las zonas                                               |
| 23   | 3 | 10.000             | 0                  | $a_z^f[1] = 0$                                       | $a_z^g[2] = 0$                                       | $a_z^{sp}[3] = 0$                                             |
| 24   | 3 | 10.000             | 0                  | $a_z^f[1] = 1, a_z^f[2] = 1 \text{ y } a_z^f[3] = 0$ | $a_z^g[2] = 1, a_z^g[3] = 1 \text{ y } a_z^g[1] = 0$ | $a_z^{sp}[3] = 1, a_z^{sp}[1] = 1 \text{ y } a_z^{sp}[2] = 0$ |

Tabla 4.1: Casos de prueba de validación y verificación

#### 4.1.2. Pruebas con escenarios realistas

El objetivo de estas pruebas es observar el comportamiento del modelo en escenarios lo mas similares posibles a la realidad.

En esta sección y la 4.1.3 se utilizan tres establecimientos que se puede ver en 4.2, cada uno de ellos ubicados en distintas regiones del país, con suelos, terrenos y tamaños muy diferentes. Se utilizó la herramienta Geoportal Forestal (MGAP, 2023a) para obtener los datos referentes a zonas, tamaños y ubicación de los predios y a partir de su ubicación geográfica se determinó el tipo de suelo/región. En los anexos B se pueden ver las ubicaciones de los terrenos en detalle y una vista superior de los mismos.

Para determinar los parámetros de presupuesto inicial y anual de estas pruebas, se hicieron algunos cálculos. Para el primero se hizo el cálculo de cuánto costaría invertir en

| Establecimiento | Departamento | Z  | Suelo (región)   | Hectáreas | Coordenadas geográficas      |
|-----------------|--------------|----|------------------|-----------|------------------------------|
| 1               | Florida      | 23 | Centro sur       | 180,81    | 33°39'57.6" S, 55°36'50.4" W |
| 2               | Tacuarembó   | 16 | Cuenca noroeste  | 267,77    | 32°26'41.4" S, 55°48'33.8" W |
| 3               | Maldonado    | 42 | Sierras del este | 337,17    | 34°41'24.0" S, 55°08'20.4" W |

Tabla 4.2: Establecimientos reales considerados

ganadería, forestación o silvopastoreo en su totalidad y se tomó como presupuesto inicial el máximo de los tres montos, a partir de este número se determinan los presupuestos anuales que son el 10 % del presupuesto anual.

Luego hay casos en los cuales tanto el presupuesto inicial como el presupuesto anual se reducen, en escalas: presupuesto anual pasa a la mitad y luego a cero y el presupuesto inicial pasa a valer la mitad y luego 25 % del valor original. Esto es para ver como se comporta el modelo en el caso ideal cuando se dispone de mucho capital, caso intermedio, y caso con recursos “escasos” para el tipo de inversión.

Por otro lado, la inversión inicial dedicada a las inversiones financieras, tiene tres escalas que aumentan a medida que el presupuesto anual disminuye, esto es justamente para ver si estas inversiones podrían cumplir el rol que cumpliría ese presupuesto anual, las escalas son del 25 %, 50 % y 75 % del presupuesto inicial.

Cada uno de los establecimientos considerados aceptan la actividad forestal, pero no se cuenta con información de si son aptos para ganadería. A fines de evaluarlo, se toman casos en los cuales se permiten las actividades y otros en los que no, dependiendo de cuántas zonas tiene el terreno, todo esto de forma arbitraria. Los casos de prueba realistas se pueden observar en la tabla 4.3.

| Caso | Establecimiento | $P_0(\text{US\$})$ | $P_f(\text{US\$})$ | $a_z^f$         | $a_z^g$         | $a_z^{gP}$      | $d_z$    | Financieras % $P_0(\text{US\$})$ |
|------|-----------------|--------------------|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|----------------------------------|
| 1    | 1               | 1.400.000          | 140.000            | Todas las zonas | Todas las zonas | Todas las zonas | Compra   | 25                               |
| 2    | 1               | 1.400.000          | 70.000             | Todas las zonas | Todas las zonas | Todas las zonas | Compra   | 50                               |
| 3    | 1               | 1.400.000          | 0                  | Todas las zonas | Todas las zonas | Todas las zonas | Compra   | 75                               |
| 4    | 1               | 700.000            | 0                  | Todas las zonas | Todas las zonas | Todas las zonas | Compra   | 25                               |
| 5    | 1               | 700.000            | 70.000             | Todas las zonas | Todas las zonas | Todas las zonas | Alquiler | 25                               |
| 6    | 1               | 700.000            | 35.000             | Todas las zonas | Todas las zonas | Todas las zonas | Alquiler | 50                               |
| 7    | 1               | 700.000            | 0                  | Todas las zonas | Todas las zonas | Todas las zonas | Alquiler | 75                               |
| 8    | 1               | 350.000            | 0                  | Todas las zonas | Todas las zonas | Todas las zonas | Alquiler | 25                               |
| 9    | 2               | 2.000.000          | 200.000            | 3 zonas no      | 3 zonas no      | 3 zonas no      | Compra   | 25                               |
| 10   | 2               | 2.000.000          | 100.000            | 3 zonas no      | 3 zonas no      | 3 zonas no      | Compra   | 50                               |
| 11   | 2               | 2.000.000          | 0                  | 3 zonas no      | 3 zonas no      | 3 zonas no      | Compra   | 75                               |
| 12   | 2               | 1.000.000          | 0                  | 3 zonas no      | 3 zonas no      | 3 zonas no      | Compra   | 25                               |
| 13   | 2               | 1.000.000          | 100.000            | 3 zonas no      | 3 zonas no      | 3 zonas no      | Alquiler | 25                               |
| 14   | 2               | 1.000.000          | 50.000             | 3 zonas no      | 3 zonas no      | 3 zonas no      | Alquiler | 50                               |
| 15   | 2               | 1.000.000          | 0                  | 3 zonas no      | 3 zonas no      | 3 zonas no      | Alquiler | 75                               |
| 16   | 2               | 500.000            | 0                  | 3 zonas no      | 3 zonas no      | 3 zonas no      | Alquiler | 25                               |
| 17   | 3               | 2.500.000          | 250.000            | 5 zonas no      | 5 zonas no      | 5 zonas no      | Compra   | 25                               |
| 18   | 3               | 2.500.000          | 125.000            | 5 zonas no      | 5 zonas no      | 5 zonas no      | Compra   | 50                               |
| 19   | 3               | 2.500.000          | 0                  | 5 zonas no      | 5 zonas no      | 5 zonas no      | Compra   | 75                               |
| 20   | 3               | 1.250.000          | 0                  | 5 zonas no      | 5 zonas no      | 5 zonas no      | Compra   | 25                               |
| 21   | 3               | 1.250.000          | 125.000            | 5 zonas no      | 5 zonas no      | 5 zonas no      | Alquiler | 25                               |
| 22   | 3               | 1.250.000          | 62.500             | 5 zonas no      | 5 zonas no      | 5 zonas no      | Alquiler | 50                               |
| 23   | 3               | 1.250.000          | 0                  | 5 zonas no      | 5 zonas no      | 5 zonas no      | Alquiler | 75                               |
| 24   | 3               | 625.000            | 0                  | 5 zonas no      | 5 zonas no      | 5 zonas no      | Alquiler | 25                               |

Tabla 4.3: Casos de prueba realistas

### 4.1.3. Pruebas de sensibilidad

En el contexto del proyecto, que se está modelando, se llevan a cabo pruebas de sensibilidad con la finalidad de evaluar el impacto de diversos parámetros en la maximización del Valor Actual Neto (VAN) en varias actividades financieras. Para ello, se toma un caso base y se hace variar los parámetros involucrados uno a la vez.

Los parámetros sometidos a prueba abarcan el presupuesto de inversión, el presupuesto operativo anual, la cantidad de zonas involucradas, el porcentaje de la inversión inicial asignado a las actividades puramente financieras y la aceptación de las actividades por zona. Estas pruebas permiten identificar los factores que más influyen en el valor objetivo del modelo y ofrecen una visión detallada de cómo variaciones en parámetros específicos afectan los resultados.

En un entorno económico dinámico, la capacidad para realizar pruebas de sensibilidad proporciona una valiosa herramienta de preparación para escenarios futuros. Esta práctica no solo valida la robustez del modelo, sino que también contribuye a la construcción de confianza al demostrar la capacidad del modelo de este proyecto para adaptarse a condiciones adversas y favorables.

En la tabla 4.4 se pueden ver los casos de prueba de sensibilidad. Notar que se resaltan en negrita los parámetros que se están variando respecto al caso base 1 o 23 según corresponda para compra o alquiler, respectivamente. A continuación será explicado cómo se construyeron estas pruebas.

Se tomó como base el establecimiento 3 (4.2) y como caso base una combinación de los casos realistas 17 y 28, donde se toma el presupuesto anual igual al 50 % del 10 % del presupuesto inicial, en las zonas se permiten todas las actividades, y se parte de un presupuesto para las inversiones financieras en un 25 % del presupuesto inicial. A partir de esto se hace variar un parámetro a la vez sobre este caso base para ver cómo afectan los resultados, por lo tanto se consideran:

- Zonas ( $|Z|$ ): varían las cantidades de zonas, pero dejando el metraje total del terreno sin variar.
- El presupuesto inicial  $P_0$ : Se deja igual que en el caso realista, pero se consideran 3 niveles más, 75 %, 50 % y 25 % del presupuesto del caso.
- Presupuesto anual  $P_j$ : para el presupuesto anual del valor del caso base se toman 4 niveles 75 %, 50 %, 25 % y 0 %.
- Actividad permitida  $a_z^s$ : para la prohibición por zona se toman casos variados en donde se acepta todo, la mitad o nada. Las zonas fueron seleccionadas arbitrariamente.
- Presupuesto inversión financiera  $\%P_0$ : para el presupuesto de las inversiones financieras se decidió separarlas para ver como compiten entre ellas y se tomaron tres porcentajes del presupuesto inicial 75 %, 50 % y 25 % que se hacen variar.

| Caso | Z  | $P_0(\text{US\$})$ | $P_j(\text{US\$})$ | $a_{\varepsilon}^f$ | $a_{\varepsilon}^g$ | $a_{\varepsilon}^{sp}$ | Bono $\%P_0(\text{US\$})$ | LRM $\%P_0(\text{US\$})$ | BG $\%P_0(\text{US\$})$ | $d_z$    |
|------|----|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|----------|
| 1    | 42 | 2.500.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Compra   |
| 2    | 31 | 2.500.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Compra   |
| 3    | 21 | 2.500.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Compra   |
| 4    | 42 | 1.875.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Compra   |
| 5    | 42 | 1.250.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Compra   |
| 6    | 42 | 625.000            | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Compra   |
| 7    | 42 | 2.500.000          | 93.750             | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Compra   |
| 8    | 42 | 2.500.000          | 62.500             | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Compra   |
| 9    | 42 | 2.500.000          | 31.250             | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Compra   |
| 10   | 42 | 2.500.000          | 0                  | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Compra   |
| 11   | 42 | 2.500.000          | 125.000            | No acepta           | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Compra   |
| 12   | 42 | 2.500.000          | 125.000            | Acepta en la mitad  | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Compra   |
| 13   | 42 | 2.500.000          | 125.000            | Todas las zonas     | No acepta           | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Compra   |
| 14   | 42 | 2.500.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Acepta en la mitad  | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Compra   |
| 15   | 42 | 2.500.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | No acepta              | 25                        | 25                       | 25                      | Compra   |
| 16   | 42 | 2.500.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Acepta en la mitad     | 25                        | 25                       | 25                      | Compra   |
| 17   | 42 | 2.500.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 50                        | 25                       | 25                      | Compra   |
| 18   | 42 | 2.500.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 75                        | 25                       | 25                      | Compra   |
| 19   | 42 | 2.500.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 50                       | 25                      | Compra   |
| 20   | 42 | 2.500.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 75                       | 25                      | Compra   |
| 21   | 42 | 2.500.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 50                      | Compra   |
| 22   | 42 | 2.500.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 75                      | Compra   |
| 23   | 42 | 2.500.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Alquiler |
| 24   | 31 | 2.500.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Alquiler |
| 25   | 21 | 2.500.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Alquiler |
| 26   | 42 | 1.875.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Alquiler |
| 27   | 42 | 1.250.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Alquiler |
| 28   | 42 | 625.000            | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Alquiler |
| 29   | 42 | 2.500.000          | 93.750             | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Alquiler |
| 30   | 42 | 2.500.000          | 62.500             | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Alquiler |
| 31   | 42 | 2.500.000          | 31.250             | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Alquiler |
| 32   | 42 | 2.500.000          | 0                  | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Alquiler |
| 33   | 42 | 2.500.000          | 125.000            | No acepta           | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Alquiler |
| 34   | 42 | 2.500.000          | 125.000            | Acepta en la mitad  | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Alquiler |
| 35   | 42 | 2.500.000          | 125.000            | Todas las zonas     | No acepta           | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Alquiler |
| 36   | 42 | 2.500.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Acepta en la mitad  | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 25                      | Alquiler |
| 37   | 42 | 2.500.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | No acepta              | 25                        | 25                       | 25                      | Alquiler |
| 38   | 42 | 2.500.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Acepta en la mitad     | 25                        | 25                       | 25                      | Alquiler |
| 39   | 42 | 2.500.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 50                        | 25                       | 25                      | Alquiler |
| 40   | 42 | 2.500.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 75                        | 25                       | 25                      | Alquiler |
| 41   | 42 | 2.500.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 50                       | 25                      | Alquiler |
| 42   | 42 | 2.500.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 75                       | 25                      | Alquiler |
| 43   | 42 | 2.500.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 50                      | Alquiler |
| 44   | 42 | 2.500.000          | 125.000            | Todas las zonas     | Todas las zonas     | Todas las zonas        | 25                        | 25                       | 75                      | Alquiler |

Tabla 4.4: Casos de prueba de sensibilidad

- Alquiler o Compra  $d_z$ : Por último, se decidió ejecutar exactamente los mismos casos, uno para el caso con compra y otro para el caso de alquiler, para ver cómo este factor afecta al modelo.

## 4.2. Resultados

En esta sección se presentan los resultados de las pruebas expuestas en las secciones anteriores. Todas las pruebas fueron ejecutadas en la misma computadora cuyas especificaciones son las siguientes: posee un procesador Intel(R) Core(TM) i9-9900K CPU @ 3.60GHz, que cuenta con 16 núcleos, tiene 64GB de RAM y el sistema operativo instalado en dicha computadora es Rocky Linux 8.4. Para el modelado se utilizó el lenguaje AMPL específicamente su versión 20231031 y como solver se utilizó CPLEX 22.1.1.0.

En el [repositorio](#) se pueden encontrar todos los logs de ejecución de cada una de las pruebas, si se desea ver mas detalles.

#### 4.2.1. Pruebas de validación y verificación

En la tabla 4.5 se detallan los resultados de las pruebas de verificación y validación. En cada una de las columnas de forestación, ganadería y silvopastoreo se expresa la cantidad de zonas que fueron destinadas a dicha actividad, y para las actividades financieras se marca con una “x” si fue utilizada. Por último, se tienen columnas para el VAN y la inversión inicial utilizada.

| Caso | Forestación | Ganadería | Silvopastoreo | Bono | LRM | Bono ganadero | VAN (US\$) | Inversión Inicial (US\$) |
|------|-------------|-----------|---------------|------|-----|---------------|------------|--------------------------|
| 1    | 1           |           | 2             |      |     | x             | 10.707,920 | 9.409,476                |
| 2    | 3           |           |               |      |     | x             | 8.346,402  | 5.924,500                |
| 3    | 2           |           |               |      |     |               | 4.351,361  | 2.283,000                |
| 4    |             |           |               | x    | x   | x             | 2.151,390  | 7.600,000                |
| 5    | 3           |           |               |      | x   | x             | 8.674,861  | 8.449,500                |
| 6    |             | 2         |               |      |     | x             | 5.103,948  | 7.832,161                |
| 7    |             |           | 3             |      |     |               | 10.069,318 | 8.651,965                |
| 8    | 3           |           |               |      | x   | x             | 8.674,861  | 8.449,500                |
| 9    | 1           |           | 2             |      |     | x             | 10.707,920 | 9.409,476                |
| 10   |             |           | 3             |      |     |               | 10.069,318 | 8.651,965                |
| 11   | 1           |           | 2             |      |     | x             | 10.707,920 | 9.409,476                |
| 12   | 1           |           | 2             |      |     | x             | 10.707,920 | 9.409,476                |
| 13   | 1           |           | 2             |      |     | x             | 10.707,920 | 9.409,476                |
| 14   |             |           | 2             |      |     |               | 6.712,878  | 5.767,976                |
| 15   |             |           | 1             |      |     |               | 3.356,439  | 2.883,988                |
| 16   |             |           |               | x    | x   | x             | 2.151,390  | 7.600,000                |
| 17   | 1           |           |               | x    | x   | x             | 4.327,070  | 8.741,500                |
| 18   |             | 2         |               |      |     | x             | 5.103,948  | 7.832,161                |
| 19   |             |           | 3             |      |     |               | 10.069,318 | 8.651,965                |
| 20   | 2           | 1         |               |      | x   | x             | 8.141,474  | 9.974,081                |
| 21   | 1           |           | 2             |      |     | x             | 10.707,920 | 9.409,476                |
| 22   |             |           | 3             |      |     |               | 10.069,318 | 8.651,965                |
| 23   | 1           |           | 2             |      |     | x             | 10.707,920 | 9.409,476                |
| 24   | 1           |           | 2             |      |     | x             | 10.707,920 | 9.409,476                |

Tabla 4.5: Resultados de las pruebas de verificación y validación

Los objetivos de los casos 1-3 y 13-15 eran determinar la validez de la restricción 3.3 referente a la unicidad de las zonas. Los resultados fueron los esperados, incluso con presupuestos muy altos no se seleccionan zonas de más y cuando se disminuye, el mismo es capaz de dejar zonas sin asignar.

Los casos de prueba del 4-12 buscan verificar que las restricciones 3.4, 3.5 y 3.6 se cumplan, estas son las referentes a prohibición de las actividades parcialmente o en su totalidad. Podemos resaltar que claramente estas restricciones están funcionando cuando se prohíben en su totalidad dos de las actividades la restante es seleccionada como se puede ver en los casos 5-7 y luego se puede resaltar que en los casos 11-12 el resultado es el mismo, pero hay un pequeño detalle debido a que el programa rotó las zonas seleccionadas para cada una actividad a raíz de las prohibiciones, esto no se ve reflejado en los costos porque se termina utilizando exactamente las mismas actividades y los parámetros como se expuso anteriormente son los mismos para todas las zonas.

Las pruebas 13-24 fueron realizadas para verificar las restricciones restantes 3.7 y 3.8 que son referentes al límite de presupuesto inicial y al anual. Se puede ver que el presupuesto inicial nunca es excedido en todos los casos y los presupuestos operativos

anuales se pueden verificar en C.2 y como se puede ver el balance nunca queda por debajo de -1.000 en los casos del 1-13 y siempre son positivos en los casos del 13-24 tal como se esperaba.

Por último, en todos los casos se verificó que el cálculo del VAN fuera correcto, es decir, que el resultado fuera el esperado.

#### 4.2.2. Pruebas con escenarios realistas

En la tabla 4.6 se pueden ver los resultados de las pruebas realistas, siguiendo el mismo formato que la prueba anterior. A su vez, en las tablas C.3, C.4 y C.5 se pueden ver los resultados extendidos de estas pruebas, donde se encuentran los balances anuales, tiempos de ejecución y distribución por hectárea y tipo de pastura de las actividades.

El tiempo de ejecución total de estas pruebas nunca superó los 538 ms; por lo tanto, fueron bastante rápidas las ejecuciones para obtener los resultados. También se puede resaltar que el modelo siempre se inclina a usar pastura mejorada cuando puede un poco distinto a lo visto en las entrevistas e información investigada donde se ve que en Uruguay la mayoría de las actividades relacionadas con ganado se realizan en campo natural, pero tiene sentido ya se ve reflejado en los retornos.

Lo primero que se puede observar en la tabla es la poca frecuencia con la cual se selecciona tanto la ganadería como el bono, esto estaba dentro de lo esperado porque el bono es la actividad más segura, pero menos rentable que da retornos por encima de la tasa de descuento del modelo y la ganadería de la forma que fue modelada no es tan rentable como las otras actividades.

Otro aspecto a resaltar es que la LRM solo es seleccionada en el caso 5 con tasa de interés 9,72 % la cual es semestral, esto es porque en este caso particular al optar por alquiler en lugar de compra se disponía de más del capital inicial luego de forestar y aplicar silvopastoreo y, por lo tanto, se seleccionó la LRM.

Se puede apreciar que, en general, los casos de compra tienen un VAN mucho más alto que los de alquiler; esto es debido a la venta del terreno y los ahorros del alquiler en las actividades. Se puede observar cómo el modelo tiende principalmente a seleccionar silvopastoreo y forestación, incluyendo la actividad de bono ganadero. En los pocos casos que no la incluye como el 3, 12, 18-20 y 23 es porque o el  $\%P_0$  es 50 % o 75 % que es muy alto y ya no dejaría invertir en las otras actividades que son más rentables o son los casos en los cuales se redujo considerablemente el monto de inversión inicial y, por lo tanto, pasan a ser más rentables las actividades agroforestales, principalmente notar como en estos casos se seleccionan muchas más zonas para silvopastoreo en lugar de forestación cuando hay capital disponible para invertir y si se restringe pasa a aplicar forestación, esto tiene sentido, ya que el capital necesario para invertir en forestación es mucho menor.

Por último, se puede ver cómo el VAN aumenta en proporción a la inversión inicial y la cantidad de hectáreas trabajadas. Además, en todos los casos siempre es alto y

| Caso | Forestación | Ganadería | Silvopastoreo | Bono | LRM | Bono ganadero | VAN (US\$)    | Inversión Inicial (US\$) |
|------|-------------|-----------|---------------|------|-----|---------------|---------------|--------------------------|
| 1    | 15          |           | 8             |      |     | x             | 1.242.504,510 | 1.399.971,999            |
| 2    | 16          |           |               |      |     | x             | 1.201.186,902 | 1.399.969,955            |
| 3    |             |           | 23            |      |     |               | 1.147.719,935 | 1.337.440,854            |
| 4    | 12          |           |               |      |     | x             | 646.166,816   | 699.964,545              |
| 5    | 11          |           | 12            |      | x   | x             | 719.762,843   | 699.925,673              |
| 6    | 12          |           | 11            |      |     | x             | 737.160,718   | 699.942,640              |
| 7    | 19          |           |               |      |     | x             | 719.734,828   | 699.993,015              |
| 8    | 9           |           | 8             |      |     | x             | 409.683,145   | 349.996,161              |
| 9    | 8           |           | 8             |      |     | x             | 2.002.209,789 | 1.999.740,311            |
| 10   | 10          |           | 5             |      |     | x             | 2.030.540,617 | 1.999.802,238            |
| 11   | 6           |           |               |      |     | x             | 1.748.512,296 | 1.999.813,985            |
| 12   | 5           |           | 3             |      |     |               | 1.164.419,080 | 999.993,751              |
| 13   | 9           |           | 7             |      |     | x             | 1.145.461,941 | 999.807,633              |
| 14   | 10          |           | 5             |      |     | x             | 1.141.688,068 | 999.888,538              |
| 15   | 10          |           |               |      |     | x             | 1.089.391,334 | 999.979,000              |
| 16   | 4           | 1         | 9             |      |     | x             | 635.347,411   | 499.966,209              |
| 17   | 28          |           | 13            |      |     | x             | 2.444.822,735 | 2.499.736,612            |
| 18   | 4           | 1         | 37            |      |     |               | 2.365.618,942 | 2.407.701,832            |
| 19   | 4           | 1         | 37            |      |     |               | 2.365.618,942 | 2.407.701,832            |
| 20   | 17          |           | 7             |      |     |               | 1.313.988,942 | 1.249.989,958            |
| 21   | 18          |           | 23            |      |     | x             | 1.514.677,682 | 1.249.978,373            |
| 22   | 30          |           | 11            |      |     | x             | 1.506.203,295 | 1.249.991,460            |
| 23   | 4           | 1         | 37            |      |     |               | 1.430.005,673 | 1.126.638,172            |
| 24   | 14          |           | 10            |      |     | x             | 864.705,593   | 624.979,922              |

Tabla 4.6: Resultados de las pruebas con escenarios realistas

positivo siendo el menor 409.683,140 y el mayor 2.444.822,735 correspondientes a los casos 8 y 17, lo cual tiene sentido, ya que el primer es el caso más restringido en presupuestos y de menor metraje y el segundo caso es el de más presupuesto y mayor metraje. El resultado de un VAN positivo además implica que todos estos portafolios son rentables a lo largo de un periodo de 15 años.

### 4.2.3. Pruebas de sensibilidad

Se toma como base el establecimiento 3 de la tabla 4.2, se considera como medio de adquisición la compra, el monto de la inversión inicial US\$ 2.500.000, presupuesto operativo de US\$ 125.000, todas las actividades aceptadas en las 42 zonas y como porcentaje de la inversión inicial para las actividades financieras un 25 %. Tal como se mencionó, se hacen variar, uno a la vez, cada uno de estos parámetros, analizándose los resultados obtenidos.

En la tabla 4.7 se pueden ver los resultados de las pruebas de sensibilidad. A su vez, en las tablas C.6 y C.7 se pueden ver los resultados extendidos de estas pruebas, donde se encuentran los tiempos de ejecución y los balances anuales.

En las siguientes subsecciones se explicará cómo cada uno de los parámetros afecta de una forma u otra los resultados obtenidos por el modelo.

#### 4.2.3.1. Cantidad de zonas

En este caso se consideran 42, 31 y 21 zonas. Para los distintos casos, el VAN se mantiene inalterado, al igual que la inversión inicial necesaria para operar. Se considera

| Caso | Forestación | Ganadería | Silvopastoreo | Bono | LRM | Bono ganadero | VAN total (US\$) | Inversión inicial (US\$) |
|------|-------------|-----------|---------------|------|-----|---------------|------------------|--------------------------|
| 1    | 33          |           | 9             |      |     | x             | 2.461.478,622    | 2.499.816,833            |
| 2    | 27          |           | 4             |      |     | x             | 2.461.579,460    | 2.499.958,641            |
| 3    | 16          |           | 5             |      |     | x             | 2.462.723,913    | 2.499.686,043            |
| 4    | 28          |           | 14            |      |     |               | 2.006.722,312    | 1.874.935,007            |
| 5    | 28          |           |               |      |     |               | 1.400.021,024    | 1.249.992,395            |
| 6    | 16          |           |               |      |     |               | 699.983,158      | 624.971,775              |
| 7    | 33          |           | 9             |      |     | x             | 2.461.478,622    | 2.499.816,833            |
| 8    | 33          |           | 9             |      |     | x             | 2.461.478,622    | 2.499.816,833            |
| 9    | 17          |           | 25            |      |     | x             | 2.461.529,041    | 2.499.887,737            |
| 10   | 24          |           | 18            |      |     | x             | 2.461.579,460    | 2.499.958,641            |
| 11   |             |           | 43            |      |     |               | 2.411.234,442    | 2.443.799,988            |
| 12   | 21          |           | 17            |      |     | x             | 2.421.637,877    | 2.499.884,917            |
| 13   | 36          |           | 6             |      |     | x             | 2.461.461,816    | 2.499.793,198            |
| 14   | 36          |           | 6             |      |     | x             | 2.461.461,816    | 2.499.793,198            |
| 15   | 42          |           |               |      |     | x             | 2.299.414,952    | 2.271.906,865            |
| 16   | 32          |           | 10            |      |     | x             | 2.461.374,645    | 2.499.994,908            |
| 17   | 30          |           | 12            |      |     | x             | 2.461.411,397    | 2.499.722,294            |
| 18   | 30          |           | 12            |      |     | x             | 2.461.411,397    | 2.499.722,294            |
| 19   | 36          |           | 6             |      |     | x             | 2.461.461,816    | 2.499.793,198            |
| 20   | 36          |           | 6             |      |     | x             | 2.461.461,816    | 2.499.793,198            |
| 21   |             |           | 42            |      |     |               | 2.411.234,442    | 2.443.799,988            |
| 22   |             |           | 42            |      |     |               | 2.411.234,442    | 2.443.799,988            |
| 23   |             |           | 42            |      | x   | x             | 2.325.849,258    | 2.418.129,648            |
| 24   |             |           | 31            |      | x   | x             | 2.325.849,258    | 2.418.129,648            |
| 25   |             |           | 21            |      | x   | x             | 2.328.772,923    | 2.420.438,451            |
| 26   |             |           | 42            |      |     | x             | 1.926.142,053    | 1.786.879,648            |
| 27   | 35          |           | 7             |      |     | x             | 1.520.841,802    | 1.249.982,885            |
| 28   | 35          |           | 7             |      |     |               | 1.065.984,064    | 624.959,840              |
| 29   |             |           | 42            |      | x   | x             | 2.325.849,258    | 2.418.129,648            |
| 30   |             |           | 42            |      | x   | x             | 2.325.849,258    | 2.418.129,648            |
| 31   |             |           | 42            |      | x   | x             | 2.325.849,258    | 2.418.129,648            |
| 32   |             |           | 42            |      | x   | x             | 2.325.849,258    | 2.418.129,648            |
| 33   |             |           | 42            |      | x   | x             | 2.325.849,258    | 2.418.129,648            |
| 34   |             |           | 42            |      | x   | x             | 2.325.849,258    | 2.418.129,648            |
| 35   |             |           | 42            |      | x   | x             | 2.325.849,258    | 2.418.129,648            |
| 36   |             |           | 42            |      | x   | x             | 2.325.849,258    | 2.418.129,648            |
| 37   | 42          |           |               |      | x   | x x           | 2.008.781,034    | 2.266.129,555            |
| 38   | 36          |           | 6             |      | x   | x x           | 2.185.249,647    | 2.499.895,576            |
| 39   |             |           | 42            |      | x   | x             | 2.325.849,258    | 2.418.129,648            |
| 40   |             |           | 42            |      | x   | x             | 2.325.849,258    | 2.418.129,648            |
| 41   | 12          |           | 30            |      | x   | x             | 2.312.102,862    | 2.499.992,626            |
| 42   | 35          |           | 7             |      | x   |               | 2.253.478,597    | 2.499.928,362            |
| 43   |             |           | 42            |      |     | x             | 2.380.982,394    | 2.411.879,648            |
| 44   | 34          |           | 8             |      |     | x             | 2.430.487,693    | 2.499.936,795            |

Tabla 4.7: Resultados de las pruebas de sensibilidad

en la mayor cantidad de zonas forestación y en el resto silvopastoreo, así como se selecciona como actividad financiera el bono ganadero.

#### 4.2.3.2. Presupuesto inicial

En este caso de prueba se utiliza el 75 %, 50 % y 25 % de la inversión inicial del caso base. En los tres casos la actividad más realizada es la forestación, e inclusive en los dos últimos es la única actividad realizada.

Se observa en la figura 4.1 una disminución lineal del VAN respecto al presupuesto inicial. No se realiza ninguna actividad financiera, por lo que se entiende que no es necesario el bono ganadero como sustento para la forestación, sino que basta con el

presupuesto operativo que ya se tenía.

Por otra parte, se ve cómo al disminuir el presupuesto inicial disminuye la cantidad de zonas en las que se realiza actividad, pasando de 33 en el caso 1 a 28 en los casos 4-5 y a 16 en el caso 6.

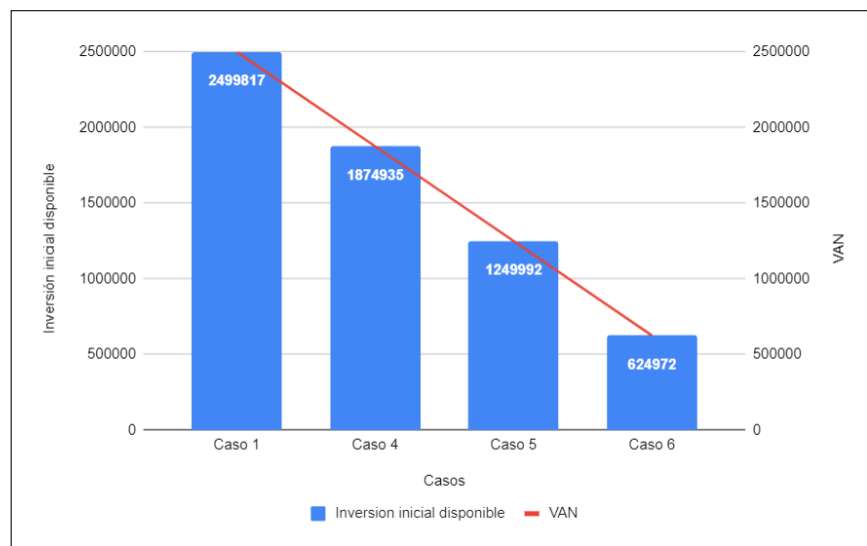


Figura 4.1: Relación lineal entre el la inversión inicial disponible y el VAN

#### 4.2.3.3. Porcentaje de la inversión inicial utilizado para cada una de las actividades financieras

En estas pruebas se varió la cantidad utilizada de la inversión inicial para las actividades financieras, pasando a ser el 50 % y el 75 %. Como ya se observó en los casos anteriores, el modelo nunca opta por bono y letra de regulación monetaria, por lo que los casos en los que aumentan estos parámetros no son la excepción, manteniéndose el bono ganadero como elección. En los otros dos casos en los que el bono ganadero aumenta, el modelo opta por no realizar ninguna de estas actividades financieras, y en todas las zonas realiza silvopastoreo. Esto último se fundamenta en la siguiente forma: si bien la forestación tiene una gran rentabilidad, esta se ve reflejada en el año 15, por lo que se necesita otro tipo de inversiones que operen generando rentabilidades anuales para cubrir los gastos generados. Al no utilizarse el bono ganadero, termina siendo necesario para que el sistema sea sustentable, y que en todas las zonas se realice el silvopastoreo.

#### 4.2.3.4. Presupuesto operativo anual

En esta prueba se utiliza el 75 %, 50 %, 25 % y 0 % del presupuesto operativo anual del caso base. En los primeros dos casos, la actividad más realizada es la forestación, seguida del silvopastoreo, utilizándose bono ganadero como actividad puramente financiera. Al disminuir al 25 % y a 0 % el presupuesto anual, se incrementan las zonas en las que se realiza silvopastoreo. Analizándose este resultado, se concluye que al reducirse

de tal manera el presupuesto disponible anual, se necesita una actividad que genere dicha rentabilidad para que sea sustentable la estrategia financiera, no alcanzando únicamente con el bono ganadero. Por otra parte, se observa en la figura 4.2 que al disminuir el presupuesto operativo no disminuye el VAN, sino que se resuelve realizar otro tipo de actividad para maximizarlo, como se puede ver en la figura 4.3.

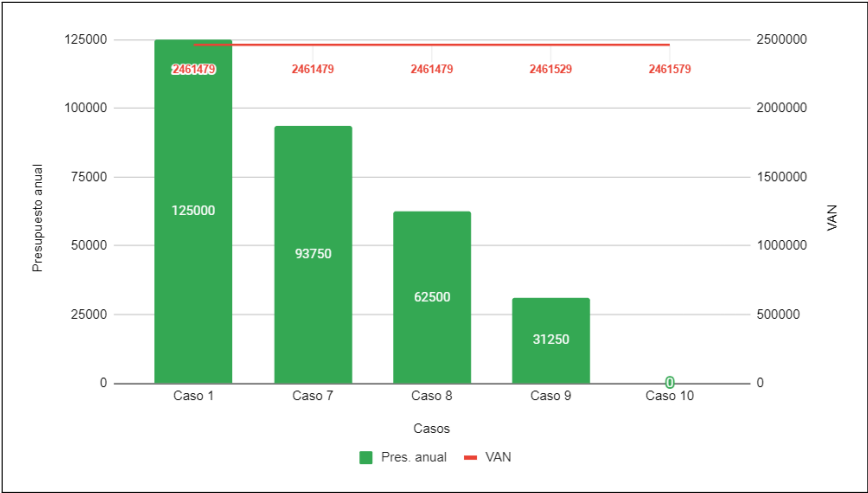


Figura 4.2: Presupuesto anual disponible VS VAN

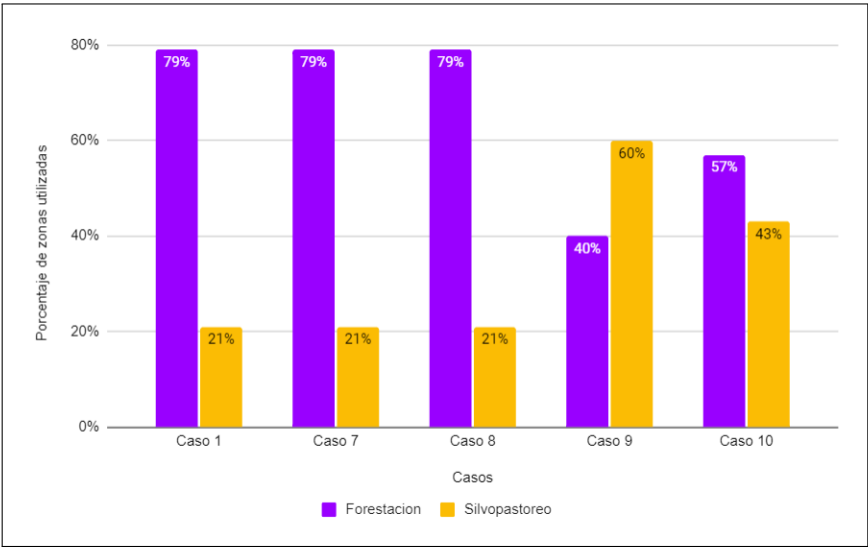


Figura 4.3: Actividades realizadas al disminuir el presupuesto anual

#### 4.2.3.5. Actividades aceptadas

El objetivo de estas pruebas fue evaluar el impacto de la aceptación o rechazo de estas actividades teniendo en cuenta la cantidad de zonas. Como base se toman las 42 zonas y se realizan seis escenarios distintos, considerando dos situaciones extremas: la aceptación de la actividad en la mitad de las zonas y la no aceptación en ninguna de ellas.

Caso 11, 12: Al no permitirse forestación, se realiza silvopastoreo como única actividad. Cabe destacar que el VAN, en comparación con el caso base, es de orden similar y difiere en USD 50.000. Al no permitir en la mitad de las zonas la forestación, se realiza en la mitad de las zonas exactamente forestación y en el resto silvopastoreo, realizándose también bono ganadero. Hay un leve aumento en el VAN.

Caso 13, 14: Al no permitirse ganadería como actividad, se observó el resultado menos esperado. Si bien el resultado es similar al caso base, no es el mismo, y la ganadería no es considerada por el modelo como actividad financiera a realizar. Para entender esta situación se investigó documentación de CPLEX la cual permitió explicar este suceso. CPLEX es un software de optimización determinístico, esto implica que el resultado es exactamente el mismo cuando ejecuta el mismo modelo dos veces en la misma plataforma y con la misma configuración de parámetros (IBM, 2024). En estos casos de estudio, la configuración de parámetros es distinta al caso base, dado que se restringen las zonas no permitiendo desarrollar a la actividad ganadera, modificándose así las técnicas de optimización utilizadas internamente por el *solver*.

Caso 15, 16: Al no permitirse silvopastoreo, únicamente se realiza forestación y al aceptarse en la mitad de las zonas silvopastoreo se utilizan 32 zonas para forestación y 10 para silvopastoreo.

En todos los casos se realiza como actividad puramente financiera, bono ganadero.

#### 4.2.3.6. Compra o alquiler del terreno

En esta etapa de estudio los resultados se modifican drásticamente. Esto se debe a que a partir de este punto se genera un nuevo costo anual, el cual tiene un peso muy importante, que es el alquiler del terreno.

La forestación deja de ser la inversión más atractiva por lo explicado anteriormente, y el silvopastoreo comienza a ser la actividad más realizada en la gran mayoría de las zonas. Algo importante que se observa es que se incorporan dentro de la gama de inversiones las letras de regulación monetaria.

Como se puede ver en la figura 4.4 al comparar el caso 1 vs el caso 23 ambos los casos base de compra y alquiler respectivamente, se ve lo expuesto anteriormente.

Continuando con este análisis y repitiendo las pruebas ya realizadas para el caso de alquiler, al disminuir la cantidad de zonas, el modelo opta por mantener silvopastoreo en todas las zonas disponibles.

Al disminuir la inversión inicial en un 25 %, 50 % y 75 %, vemos cómo disminuye el VAN de forma lineal, de la misma forma que ocurría con la compra del terreno. En los casos de 50 y 75 de disminución, el modelo opta por realizar forestación en la mayoría de las zonas. Esto se fundamenta en que el silvopastoreo implica una inversión más alta que la forestación para comenzar a trabajar.

En los casos en los que el presupuesto anual disminuye llegando a 0, se realizan igualmente en todas las zonas silvopastoreo, LRM y bono ganadero. En este punto

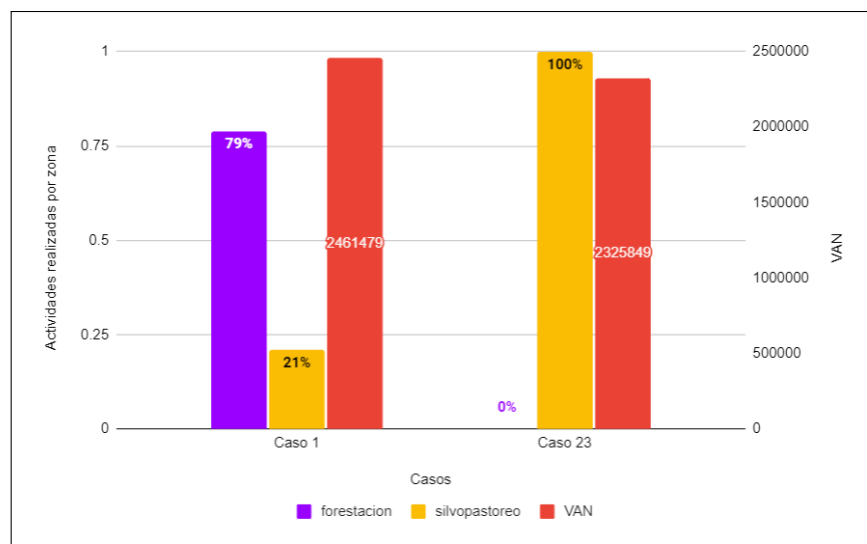


Figura 4.4: Porcentaje de zonas en las que se realiza cada actividad y el valor del VAN total

vemos cómo, invirtiendo el capital inicial, de esta forma no es necesario contar con un presupuesto anual para que sea sostenible la inversión.

En las pruebas siguientes nuevamente tenemos la no aceptación de la actividad en las zonas o únicamente en la mitad de ellas, los resultados se pueden ver en 4.5. En el caso de forestación y ganadería, los resultados se mantienen al igual que en el caso base, pero al prohibir en la mitad de las zonas silvopastoreo o en todas ellas, nuevamente la actividad realizada es forestación. En este caso se tiene LRM y bono ganadero, pero el bono ganadero se realiza dos veces. Es decir, con el 25 % del capital con una tasa de interés del 9 % y con otro 25 % del capital con una tasa del 8 %. Esto ocurre de esta manera porque se configuró el parámetro de inversión financiera en 25 % y porque el modelo no permite sumar estos porcentajes de ser posibles para optar por la opción de mejor interés. Lo razonable en este caso es que se realice la compra de bonos de ganado por el 50 % del capital inicial al 9 % de interés. Lo último a mencionar en este punto es que se ve una desmejora del VAN al no aceptarse o aceptarse en un 50 % silvopastoreo.

Volviendo al caso del aumento del capital destinado a las actividades puramente financieras, tenemos que las actividades realizadas continúan siendo bono ganadero y letras de regulación monetaria, alternándose dependiendo del caso.

#### 4.2.3.7. Comparación de compra y alquiler al disminuir la inversión inicial

Resulta muy interesante observar en contraposición los casos de compra y alquiler de zonas al disminuir la inversión inicial disponible. Para este análisis se tomaron los resultados de los casos 1, 4, 5 y 6, que corresponden a la compra de terreno, y 23, 26, 27 y 28, que corresponden a alquiler. Tanto para los casos de compra, como de alquiler se varía el presupuesto inicial disponible, el cual se reduce caso a caso en un 25 %.

Se observa en el gráfico 4.6 que, disminuyendo la inversión inicial, también disminuye

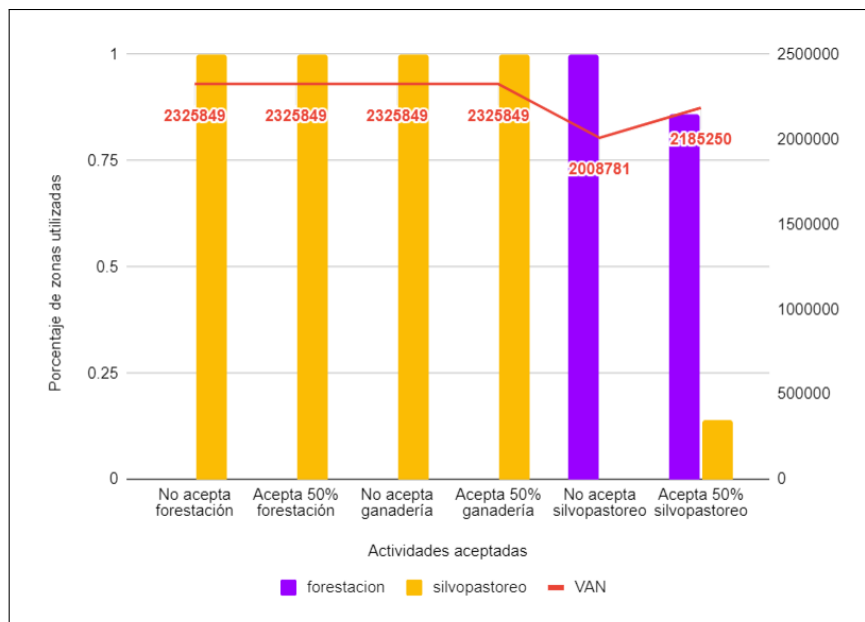


Figura 4.5: Evolución del VAN al aceptar parcialmente o no aceptar la actividad para alquiler de terreno, con detalle de actividades realizadas en las distintas zonas

el VAN, pero no de la misma forma. En el caso de una mayor inversión inicial (USD 2.500.000), resulta más rentable la compra del terreno, siendo el VAN casi un 6 % mayor. Por el contrario, con menor inversión inicial (USD 625.000) vemos que ocurre lo opuesto, teniendo una mayor rentabilidad el alquiler del terreno, estando un 52 % por encima.

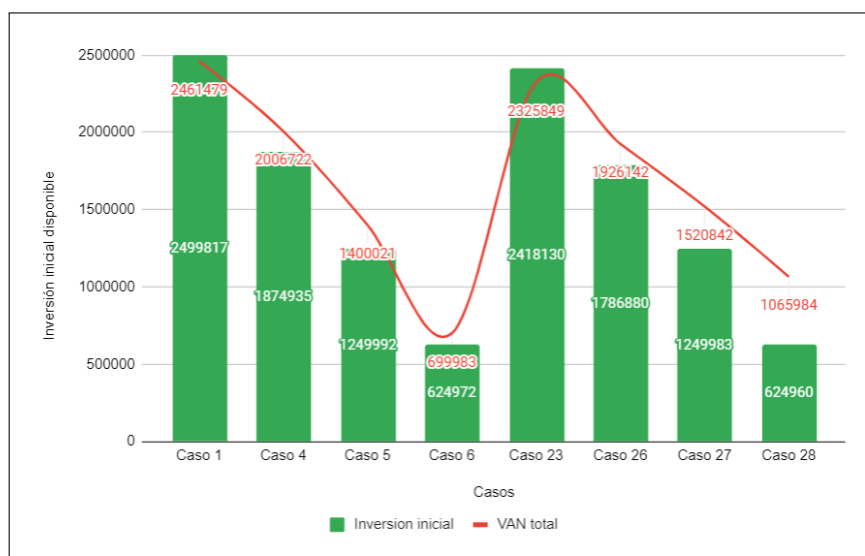


Figura 4.6: Valor del VAN al disminuir presupuesto de inversión inicial para el caso de compra y alquiler.

Es importante analizar el gráfico 4.7 donde se representa la función de cada VAN

con los experimentos realizados, observándose el corte en un VAN aproximando de USD 1.750.000. En un VAN por debajo de esa cifra resulta más rentable el alquiler del terreno.

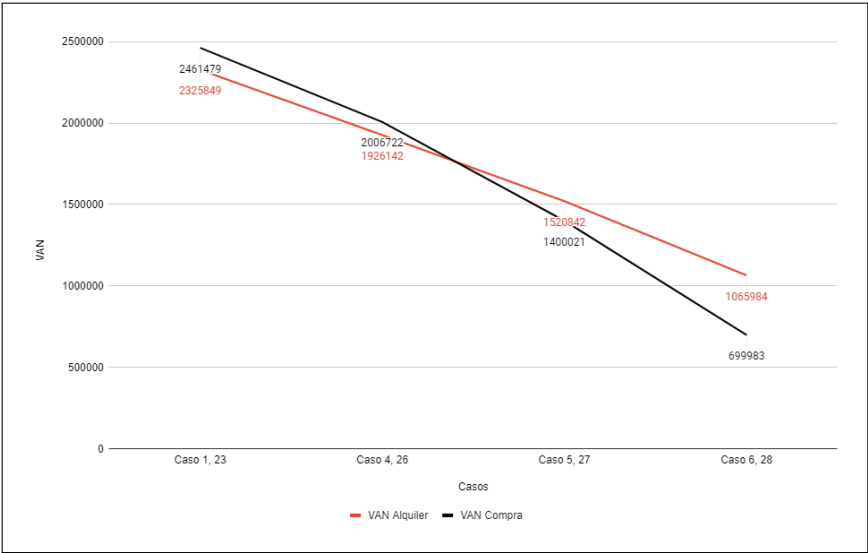


Figura 4.7: Valor del VAN. Alquiler VS compra.

Finalmente, el gráfico 4.8 permite ver como a medida que la inversión inicial disminuye en el caso de compra quedan más zonas sin actividad, lo que implica que no se tienen fondos para llevarlas adelante, y a diferencia de ello en el caso de alquiler siempre se mantienen todas las zonas con actividad.

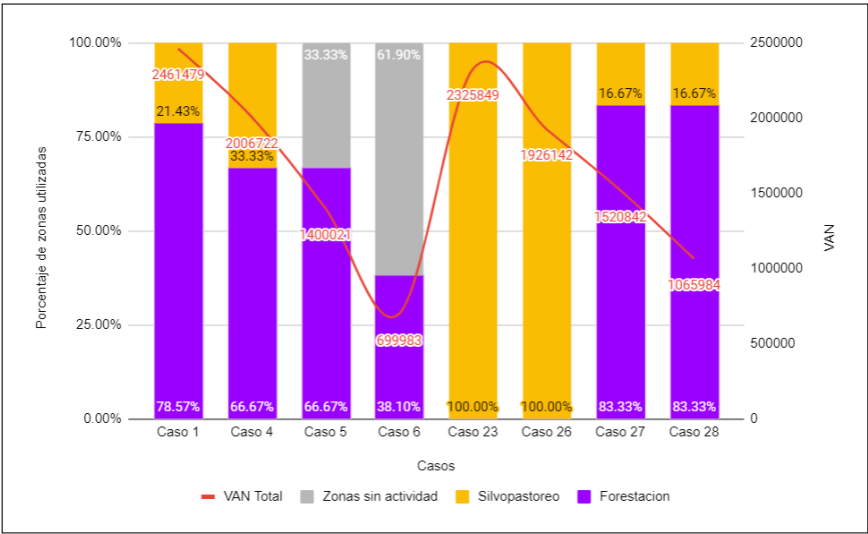


Figura 4.8: Actividades realizadas al disminuir la inversión inicial en los casos de compra y alquiler.

## Capítulo 5

# Conclusiones y Trabajo Futuro

En el presente proyecto de grado se logró construir un modelo de programación lineal entera que permite generar un portafolio de inversión de rendimiento máximo, considerando las actividades estudiadas. Para alcanzar este objetivo, se llevó a cabo una investigación exhaustiva de cada una de las inversiones y se destaca la importancia de las entrevistas con especialistas en cada una de ellas para obtener información valiosa y detallada. Esto permitió no solo recopilar datos que no estaban disponibles en fuentes convencionales, sino también adelantar posibles resultados, los cuales fueron posteriormente validados mediante la ejecución de las pruebas. Uno de estos resultados esperados fue respecto a la actividad ganadera. Tal como lo observó el experto José Dutra, la ganadería tal como fue modelada no resulta rentable. Esto se debe a que en la práctica el engorde y venta de ganado no es lo único llevado adelante. Existen enfoques centrados en la producción de carne, producción de leche, modelos que llevan adelante ambas, combinan actividades, entre otras. Y a su vez, el destino de la producción es la venta al exterior y no al mercado interno. Para incluir esto en el modelo, bastaría con agregar nuevos elementos al conjunto de actividades ganaderas que consideren este tipo de actividades, el desafío es obtener todos los datos relevantes de cada actividad en cuanto a costos y retornos para poder realizar el cálculo del VAN.

Continuando con los resultados, tanto la forestación como el silvopastoreo han demostrado ser actividades altamente rentables. Con inversiones iniciales elevadas para la adquisición de terreno y materia prima, y presupuesto anual suficiente, la forestación se destaca como generadora de retorno significativo a largo plazo. Sí, en cambio, el destino es el alquiler de terreno, el silvopastoreo es la actividad elegida, ya que no debe invertirse el dinero en la compra, logrando destinarlo a la materia prima de la actividad.

Siguiendo esta misma comparación, en el caso de compra, cuando disminuye el presupuesto operativo anual, se incorpora en la mayor cantidad de las zonas el silvopastoreo, esto se debe a que la venta de ganado anual, en combinación con actividades financieras logra sustentar el desarrollo de la forestación, y mantener un VAN inalterado.

En relación con las actividades financieras puras, si bien presentan rentabilidades más bajas en comparación con las agroforestales, su bajo requerimiento de capital inicial

y la capacidad para sustentar otras actividades con ingresos anuales, las posicionan como elementos estratégicos en la maximización de ganancias y la diversificación de inversiones.

Como punto interesante de las pruebas de sensibilidad, cabe mencionar el resultado obtenido al restringir la aceptación de las distintas actividades en las zonas. Se logró observar que el VAN únicamente disminuye al prohibir el silvopastoreo de forma total o parcial. En nuestro caso de estudio con compra de terreno, al prohibir totalmente el silvopastoreo en las 42 zonas, el VAN disminuye un 16 %. Por lo tanto hay que resaltar que para obtener máximos retornos es importante poder realizar esta actividad.

Un aspecto importante a señalar es que en todas las instancias de prueba se logró una solución óptima, y con VAN positivo. Esto sugiere que, a pesar de las diversas restricciones impuestas, el modelo siempre logró encontrar una combinación de inversiones que garantizara la rentabilidad del portafolio.

Las mayores dificultades encontradas a lo largo del trabajo fueron el acceso a la información. Fuentes confiables para obtener esos datos son escasas. Respecto al silvopastoreo esto puede deberse a que se trata de una actividad impulsada en estos últimos años y no tan conocida en Uruguay, particularmente. Por otra parte, la forestación es una actividad cerrada y los datos son reservados por quienes están involucrados en el negocio. Sin la ayuda y colaboración de los expertos hubiese sido muy difícil lograr los objetivos de este trabajo.

Continuando con esto último, si se quisiera medir el esfuerzo realizado para llevar adelante este trabajo, sin dudas la etapa de estudio, conformación de datos y análisis sobre las actividades fue la que tuvo mayor impacto. El proyecto se desarrolló a lo largo de un año de trabajo, y los primeros 5 meses se utilizaron específicamente para ello. Se recopilaron decenas de documentos, entre ellos, estudios de las distintas actividades agroforestales, entrevistas a referentes en periódicos, informes científicos con estudios similares al realizado, así como información en diversos portales con datos de compra y venta. A su vez, se realizaron entrevistas con 3 especialistas (siendo necesaria más de una instancia de reunión en alguno de los casos), las cuales fueron fundamentales para asentar el conocimiento, y obtener información que no se encontraba disponible en los medios investigados. Esta etapa de estudio exhaustiva proporcionó una comprensión profunda de las actividades y los factores que influyen en su rentabilidad, lo que permitió identificar de manera precisa las variables y restricciones necesarias para el modelado. La precisión de los datos obtenidos durante esta fase proporcionaron la base necesaria para el desarrollo del modelo, brindando confianza respecto a los resultados.

Si se hace referencia a posibles mejoras o avances a futuro, la ganadería sería una actividad clave para trabajar. Obteniendo mayor información sobre las distintas prácticas realizadas, sería interesante que sean incluidas en el modelo y observar cómo se comportan en comparación entre ellas y con el resto de las actividades. Continuando con esto, sería sumamente interesante incorporar árboles a estas variables de prácticas ganaderas, para ver cómo se comportan en un entorno silvopastoril.

# Referencias

- Acebedo, F. (2023). *Exportaciones del sector forestal uruguayo durante el mes de agosto 2023*. <https://panoramaforestal.uy/>. (Consultado: 2023-12-04)
- Agroubano. (2023). *Precio de herbicidas y fertilizantes*. <https://agroubano.uy/>. (Consultado: 2023-12-04)
- Almacen Rural. (2023). *Precios de alambrado*. <https://www.almacenrural.com.uy/>. (Consultado: 2023-12-04)
- Amoza, G. (2023). *Comunicacion personal*. (Entrevista: 2023-06-29)
- AMPL Optimization, Inc. (2023). *The fastest optimization toolchains run ampl*. <https://ampl.com/>. (Consultado: 2023-07-15)
- AnaProse. (2023). *Precios de referencia mercado de semillas*. <https://www.anaprose.com.uy/precios-de-referencia-mercado-de-semillas/>. (Consultado: 2024-01-28)
- Asociación de Consignatarios de Ganado. (2023). *Precios de ganado*. <https://acg.com.uy/>. (Consultado: 2023-11-01)
- Banco Central del Uruguay. (2023a). *Encuesta de expectativas de inflación*. <https://www.bcu.gub.uy/Estadisticas-e-Indicadores/Paginas/Encuesta-Inflacion.aspx>. (Consultado: 2023-11-11)
- Banco Central del Uruguay. (2023b). *Reporte del sistema financiero 1er trimestre 2023*. <https://www.bcu.gub.uy/Servicios-Financieros-SSF/Paginas/Reporte-Estabilidad-Financiera.aspx>. (Consultado: 2023-09-05)
- Barreto, S. y Bermúdez, R. (2017). Mejoramientos de campo (parte 1) preparando la siembra de otoño. *Plan Agropecuario N° 164 URUGUAY*, 40–42. [https://www.planagropecuario.org.uy/uploads/magazines/articles/178\\_2728.pdf](https://www.planagropecuario.org.uy/uploads/magazines/articles/178_2728.pdf). (Consultado: 2023-11-12)
- Barreto, S. y Bermúdez, R. (2018). Mejoramientos de campo (parte 2) siembra y manejo inmediato. *Plan Agropecuario N° 165 URUGUAY*, 54–56. [https://www.planagropecuario.org.uy/uploads/magazines/articles/179\\_2753.pdf](https://www.planagropecuario.org.uy/uploads/magazines/articles/179_2753.pdf). (Consultado: 2023-11-12)
- BBVA. (2023). *¿qué son las inversiones financieras y qué tipos existen?* <https://www.bbva.com/es/salud-financiera/que-son-las-inversiones-financieras-y-que-tipos-existen/>. (Consultado: 2023-09-05)
- Beal, L. y Hedengren, J. (2023). *Gekko optimization suite*. <https://gekko.readthedocs.io/>. (Consultado: 2023-07-15)
- Bhatia, M., y Rana, A. (2020). A mathematical approach to optimize crop allocation – a linear programming model. *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics* 15, 245–252. <https://doi.org/10.18280/ijdne.150215>.
- Bolsa de Valores de Montevideo. (2023a). *Quienes somos*. <https://www.bvm.com.uy/html/quienesSomos>. (Consultado: 2023-09-05)
- Bolsa de Valores de Montevideo. (2023b). *¿como invertir en bolsa?* <https://www.bvm.com.uy/html/comoInvertir>. (Consultado: 2023-09-05)
- Bolsa de Valores de Montevideo. (2023c). *¿que son los valores?* <https://www.bvm.com.uy/html/queSonLosValores>. (Consultado: 2023-09-05)

- Boscana, M. y Faroppa, C. (2023). *Boletín estadísticas forestales 2023*. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/estadisticas/boletin-estadisticas-forestales-2022/>. (Consultado: 2023-08-20)
- Conde, R. (2022). Optimización de ciclos de silvopastoreo en Uruguay. *Proyecto de Grado de Ingeniería en Computación. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería*, 1–93. <https://doi.org/20.500.12008/36122>.
- Conexión Ganadera. (2024). *Bono ganadero conexión ganadera*. <https://conexionganadera.com/nuestros-productos/>. (Consultado: 2024-01-29)
- Cámara Uruguaya de servicios agropecuarios. (2023). *Precios sugeridos de labores agrícolas período agosto 2022 - febrero 2023*. <https://cusa.org.uy/sitio/precios/Labores%20Agricolas%20Febrero%202023.pdf>. (Consultado: 2023-11-12)
- de Lima, J. M. S. (2020). Sistemas de producción silvopastoriles: cuando 1 + 1 es igual a 3. *Revista INAI Marzo 2020*, 61–65. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/14374/1/Rev-INIA-60-Marzo-2020-p-61-65.pdf>.
- Dutra, J. (2023). Silvopastoreo: “incorporar el árbol a la ganadería sin desplazarla”. *El País*. Descargado 2024-01-31, de <https://rurales.elpais.com.uy/valor-agregado/silvopastoreo-incorporar-el-arbol-a-la-ganaderia-sin-desplazarla>
- Dutra, J. (2023). *Comunicación personal*. (Entrevista: 2023-05-08)
- EconomíaUY. (2024a). *Ovinos en Uruguay. lanas, carnes y cueros*. <https://www.economiauy.net/ovinos-en-uruguay/>. (Consultado: 2024-02-02)
- EconomíaUY. (2024b). *Salarios rurales julio 2023*. <https://palenqueagropecuario.com.uy/salarios-rurales-julio-2023/#:~:text=Altamente%20especializado%20E2%80%93%202432.818%20E2%80%93%20241.313.,Ver%20aqu%C3%AD%20salarios%20rurales%20completos>. (Consultado: 2024-02-02)
- Fama, E. F., y French, K. R. (2004). The capital asset pricing model: Theory and evidence. *Journal of Economic Perspectives*, 18(3), 25–46. <http://www.jstor.org/stable/3216804>.
- Fedossova, A., Buitrago, O., y Britto, R. (2011). *Introducción a la programación lineal con aplicaciones en administración de operaciones*. Bogotá, D.C. Colombia: Colegio de estudios superiores de administración (CESA), ISBN: 978-958-97648-7-9. <https://books.google.com.co/books?id=WYF-DwAAQBAJ>(visited 2023-07-15).
- Fernández, E., y Jiménez, J. (2022). *El sistema silvopastoril como alternativa ante la rentabilidad*. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Av-2056.pdf>. (Consultado: 2023-10-04)
- Gallo, L. (2006). *Sistemas silvopastoriles (revista n° 119 setiembre 2006)*. [https://www.planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R119/R119\\_30.pdf](https://www.planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R119/R119_30.pdf). (Consultado: 2023-07-17)
- GAMS Development Corp. (2023). *Best in class mathematical modeling. performant, scalable, easy to learn*. <https://www.gams.com/>. (Consultado: 2023-07-15)
- GBU Corredor de Bolsa. (2023a). *Informe de mercado semanal*. [https://gbu.com.uy/pdf/resumen\\_mercado\\_06-10-2023.pdf](https://gbu.com.uy/pdf/resumen_mercado_06-10-2023.pdf). (Consultado: 2023-10-06)
- GBU Corredor de Bolsa. (2023b). *Tarifario 2023*. [https://www.gbu.com.uy/docs/GBU-Tarifario\\_2023.pdf](https://www.gbu.com.uy/docs/GBU-Tarifario_2023.pdf). (Consultado: 2023-10-06)
- Google. (2023a). *Vista superior terreno en Florida*. <https://www.google.com/maps/place/33%C2%B039'57.6%22S+55%C2%B036'50.4%22W/@-33.661749,-55.6108356,3904m/data=!3m1!1e3!4m4!3m3!8m2!3d-33.666!4d-55.614?entry=ttu>. (Consultado: 2023-11-28)
- Google. (2023b). *Vista superior terreno en Maldonado*. <https://www.google.com/maps/place/34%C2%B041'24.0%22S+55%C2%B008'20.4%22W/@-34.6873663>

- , -55.1473142, 3857m/data=!3m1!1e3!4m4!3m3!8m2!3d-34.69!4d-55.139?entry=ttu. (Consultado: 2023-11-28)
- Google. (2023c). *Vista superior terreno en tacuarembó*. <https://www.google.com/maps/place/32%C2%B026'41.4%22S+55%C2%B048'33.8%22W/@-32.443695,-55.8152538,3959m/data=!3m1!1e3!4m4!3m3!8m2!3d-32.4448333!4d-55.8093889?entry=ttu>. (Consultado: 2023-11-28)
- Grupo Bursátil Uruguayo Sociedad de Bolsa S.A. (2023). *Educación financiera*. <https://www.gbu.com.uy/ed-financiera.php>. (Consultado: 2023-09-05)
- GUROBI OPTIMIZATION, LLC. (2023). *Gurobi optimization*. <https://www.gurobi.com/solutions/gurobi-optimizer/>. (Consultado: 2023-07-15)
- Gómez, R. (2006). *Ganadería en el Uruguay*. <http://www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/ara/ara.192.pdf>. (Consultado: 2023-08-22)
- Hirigoyen, A., Resquin, F., Navarro-Cerrillo, R., Franco, J., y Rachid-Casnat, C. (2021). Métodos de estimación de biomasa en rodales para eucalyptus grandis y eucalyptus dunnii en Uruguay. *Bosque (Valdivia) vol 42*, 53–66. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002021000100053>.
- IBM. (2023). *Ibm ilog cplex optimization studio*. <https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio>. (Consultado: 2023-07-15)
- IBM. (2024). *Estudio de optimización ilog cplex*. <https://www.ibm.com/docs/en/icos/22.1.1?topic=parameters-parallel-mode-switch>. (Consultado: 2024-01-27)
- INIA. (2023a). *Ficha técnica no 35*. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/11190/1/Ficha-tecnica-35-El-concepto-de-carga-o-dotacion.pdf>. (Consultado: 2023-11-12)
- INIA. (2023b). *Producción ganadera - hábitats naturales - bienestar humano*. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/15381/1/INIA-Produccion-Carne-Habitats-Bienestar-Humano-WEB.pdf>. (Consultado: 2023-08-29)
- INIA. (2023c). *Simulador forestal ganderó*. <http://www.desarrollofv.uy/SIMFORGAN/simfororgan.aspx>. (Consultado: 2023-12-04)
- Karp, R. (1972). Reducibility among combinatorial problems. in: Miller, r.e., thatcher, j.w., bohlinger, j.d. (eds) complexity of computer computations. *The IBM Research Symposia Series*. Springer, Boston, MA., 85–103. [https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2001-2\\_9](https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2001-2_9).
- Kuhn, C. C. N., Calbert, G., Garanovich, I., y Weir, T. (2023). Integer linear programming supporting portfolio design. *Defence Science and Technology Group, Department of Defence, Canberra, ACT 2610, Australia*, 1–13. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.14364>.
- Markowitz, H. (1952). Portfolio selection. *The Journal of Finance*, 7(1), 77–91. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.1952.tb01525.x>.
- MGAP. (2023a). *Geoportal forestal del Uruguay*. <https://web.snig.gub.uy/arcgisportal/apps/webappviewer/index.html?id=b90f805255ae4ef0983c2bfb40be627f>. (Consultado: 2023-11-28)
- MGAP. (2023b). *Serie precio de la tierra arrendamientos 2021*. [https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2022-07/COMUNICADO\\_Arrendamientos\\_Anual\\_2021.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2022-07/COMUNICADO_Arrendamientos_Anual_2021.pdf). (Consultado: 2023-12-04)
- MGAP. (2023c). *Serie precio de la tierra compraventas año 2022*. [https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2023-05/DIEA-COMPRAVENTAS-A%C3%910-2022\\_Definitivo.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2023-05/DIEA-COMPRAVENTAS-A%C3%910-2022_Definitivo.pdf). (Consultado: 2023-12-04)
- MGAP. (2023d). *Tercer encuesta de servicios forestales*. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio>

- ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/Informe%20final\_3era\_encuesta\_2021.pdf. (Consultado: 2023-12-04)
- MGAP. (2023e). *Vigésima segunda encuesta de viveros forestales aÑo 2022*. [https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2023-08/Informe\\_final.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2023-08/Informe_final.pdf). (Consultado: 2023-12-04)
- Morales, H. y Pereira, M. (2021). La producción forrajera en Uruguay. 20 años de mediciones satelitales. *Plan Agropecuario N° 180 URUGUAY*, 44–45. <https://www.planagropecuario.org.uy/uploads/magazines/articles/196.3067.pdf>. (Consultado: 2023-11-12)
- Oladejo, N. K., Abolarinwa, A., y Salawu, S. O. (2020). Linear programming and its application techniques in optimizing portfolio selection of a firm. *Journal of Applied Mathematics*, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2020/8817909>.
- Pantalla Uruguay. (2023). *Precios de ganado*. <https://www.pantallauruguay.com.uy/promedios/>. (Consultado: 2023-11-01)
- Papahristodoulou, C. (2002). Optimal portfolios using linear programming models. *Mälardalen University*, 1–13. <https://optimization-online.org/2002/10/549/>.
- Park, S., Song, H., y Lee, S. (2018). Linear programming models for portfolio optimization using a benchmark. *European Journal of Finance* 25, 1–23. <https://doi.org/10.1080/1351847X.2018.1536070>.
- Perold, A. F. (2004). The capital asset pricing model. *Journal of Economic Perspectives*, 18(3), 3–24. <http://www.jstor.org/stable/3216804>.
- Porteiro, J. (2016). *Evaluación de proyectos de inversión*. (Consultado: 2023-07-17)
- Puente, M., y Gavilánez, O. (2018). *Programación lineal para la toma de decisiones*. Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), ISBN: 978-9942-30-840-5. <http://cimogsys.esPOCH.edu.ec/direccion-publicaciones/public/search-books>(visited 2023-07-15).
- Quaresma, R., Cordeiro, A., Bastos, J., y Carvalho, G. (2008). Análisis económico de sistema silvopastoriles con paricá (*schizolobium amazonicum* huber) en el nordeste de Pará, Brasil. *Zootecnia Tropical* Vol.26, 403–405. [https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0798-72692008000300055](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-72692008000300055).
- Reeves, L. H. (1991). Mathematical programming applications in agroforestry planning. *Utah State University*, 1–50. <https://doi.org/10.26076/8966-e7ee>.
- RevistaForestalUY. (2024). *Árboles y ganado: sinergia que funciona*. <https://www.revistaforestal.uy/silvicultura/arboles-y-ganado-sinergia-que-functiona.html>. (Consultado: 2024-02-02)
- Scoz, R. (2023). *Comunicación personal*. (Entrevista: 2023-05-24)
- Sharpe, W. F. (1964). Capital asset prices: A theory of market equilibrium under conditions of risk\*. *The Journal of Finance*, 19(3), 425–442. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1540-6261.1964.tb02865.x>.
- Silveira inversiones agropecuarias. (2024). *Bono ganadero silveira*. <https://www.bonoganadero.com.uy/>. (Consultado: 2024-01-29)
- Silveira, R. (2021). *Bonos ganaderos, una forma de invertir en el agro*. <https://www.elobservador.com.uy/nota/bonos-ganaderos-una-forma-de-invertir-en-el-agro-202179222258>. (Consultado: 2023-10-09)
- Union Rural de Flores. (2023). *Costos pasturas*. <https://www.urf.com.uy/documents/Costo-Pasturas.pdf>. (Consultado: 2023-11-12)
- UNLP. (2023). *Estimación y medición del volumen*. [https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/76156/mod\\_folder/content/0/Cubicacion%20Yner.pdf](https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/76156/mod_folder/content/0/Cubicacion%20Yner.pdf). (Consultado: 2023-12-04)
- Uruguay XXI. (2022). *Sector forestal en Uruguay*. <https://www.uruguayxxi.gub.uy/es/centro-informacion/articulo/sector-forestal/>. (Consultado: 2023-08-20)

- Uruguay XXI. (2023). *Sector ganadero en el uruguay*. <https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/b28305203e10f6d7bb3689eb619160dd922b2036.pdf>. (Consultado: 2023-08-06)
- UruguayXXI. (2021). *Sector forestal en uruguay*. <https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/a29771e03cc49e42fe516c01b0d271dc0fcf4cbe.pdf>. (Consultado: 2023-02-02)
- U.S. Department of the Treasury. (2023). *Treasury bonds*. <https://www.treasurydirect.gov/marketable-securities/treasury-bonds/>. (Consultado: 2023-11-11)
- Vanderbei, R. J. (2020). *Linear programming: Foundations and extensions*. Princeton, New Jersey, USA: Springer Cham, ISBN: 978-3-030-39417-2. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-39415-8>(visited 2023-07-15).
- Víctor Paullier & Cía. Soc. de Bolsa. (2023). *Instrumentos financieros*. <https://www.paullier.com/paullier-educa/>. (Consultado: 2023-09-05)
- Wisconsin Institutes for Discovery. (2023). *Neos server solvers minos*. <https://neos-server.org/neos/solvers/nco:MINOS/AMPL.html>. (Consultado: 2023-07-15)

## Anexo A

# Precios de alquiler y compra

Los precios de Artigas, Canelones, Maldonado, Salto, San José y Treinta y Tres fueron asignados usando el promedio ya que no se contaban con los datos en las tablas

| Departamento   | Compra (US\$/ha) | Arrendamiento ganadero(US\$/ha) | Arrendamiento forestal(US\$/ha) |
|----------------|------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Artigas        | 2.476            | 68                              | 145                             |
| Canelones      | 5.509            | 90                              | 145                             |
| Cerro Largo    | 2.770            | 71                              | 79                              |
| Colonia        | 6.904            | 80                              | 179                             |
| Durazno        | 3.605            | 78                              | 159                             |
| Flores         | 5.693            | 83                              | 175                             |
| Florida        | 4.172            | 96                              | 143                             |
| Lavalleja      | 3.084            | 74                              | 71                              |
| Maldonado      | 3.888            | 86                              | 145                             |
| Paysandú       | 3.580            | 63                              | 145                             |
| Río Negro      | 5.763            | 83                              | 166                             |
| Rivera         | 2.397            | 52                              | 116                             |
| Rocha          | 3.487            | 76                              | 146                             |
| Salto          | 2.244            | 67                              | 145                             |
| San José       | 5.002            | 63                              | 145                             |
| Soriano        | 6.926            | 111                             | 177                             |
| Tacuarembó     | 2.825            | 69                              | 146                             |
| Treinta y Tres | 2.520            | 68                              | 145                             |

Tabla A.1: Costos de compra y arrendamiento de terreno por departamento extraído de (MGAP, 2023c) y (MGAP, 2023b)

## Anexo B

# Terrenos

A continuación se presenta una perspectiva superior de cada uno de los terrenos seleccionados para este estudio de grado.

### B.1. Florida



Figura B.1: Vista superior terreno Florida (Google, 2023a)

## B.2. Tacuarembó



Figura B.2: Vista superior terreno Tacuarembó (Google, 2023c)

## B.3. Maldonado

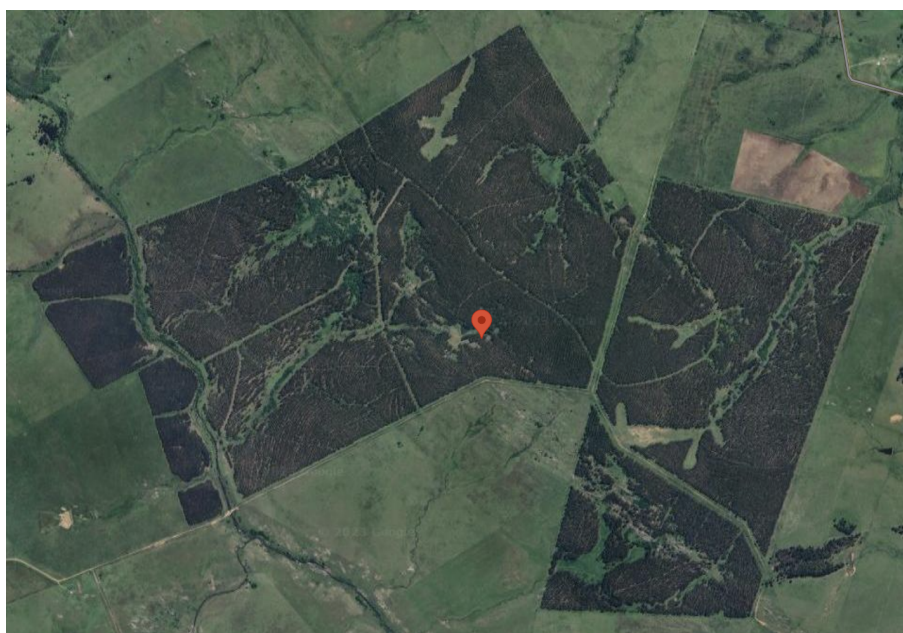


Figura B.3: Vista superior terreno Maldonado (Google, 2023b)

# Anexo C

## Resultados extendidos

C.1. Verificación y validación

| Caso | Forestación | Ganadería | Silvopastoreo | Bono | LRM | Bono ganadero | VAN (US\$) | Inversión Inicial (US\$) | T <sub>carga</sub> ms | T <sub>resolución</sub> ms | T <sub>total</sub> ms |
|------|-------------|-----------|---------------|------|-----|---------------|------------|--------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|
| 1    | 1           |           | 2             |      |     | x             | 10.707,920 | 9.409,476                | 3,846                 | 22,881                     | 26,727                |
| 2    | 3           |           |               |      |     | x             | 8.346,402  | 5.924,500                | 4,242                 | 22,732                     | 26,974                |
| 3    | 2           |           |               |      |     |               | 4.351,361  | 2.283,000                | 4,142                 | 12,725                     | 16,867                |
| 4    |             |           |               | x    | x   | x             | 2.151,390  | 7.600,000                | 4,372                 | 5,437                      | 9,809                 |
| 5    | 3           |           |               |      | x   | x             | 8.674,861  | 8.449,500                | 4,382                 | 5,356                      | 9,738                 |
| 6    |             | 2         |               |      |     | x             | 5.103,948  | 7.832,161                | 4,284                 | 10,965                     | 15,249                |
| 7    |             |           | 3             |      |     |               | 10.069,318 | 8.651,965                | 4,472                 | 7,544                      | 12,016                |
| 8    | 3           |           |               |      | x   | x             | 8.674,861  | 8.449,500                | 4,336                 | 5,764                      | 10,100                |
| 9    | 1           |           | 2             |      |     | x             | 10.707,920 | 9.409,476                | 4,341                 | 11,144                     | 15,485                |
| 10   |             |           | 3             |      |     |               | 10.069,318 | 8.651,965                | 4,335                 | 23,996                     | 28,331                |
| 11   | 1           |           | 2             |      |     | x             | 10.707,920 | 9.409,476                | 4,415                 | 11,056                     | 15,471                |
| 12   | 1           |           | 2             |      |     | x             | 10.707,920 | 9.409,476                | 4,152                 | 10,694                     | 14,846                |
| 13   | 1           |           | 2             |      |     | x             | 10.707,920 | 9.409,476                | 4,343                 | 23,673                     | 28,016                |
| 14   |             |           | 2             |      |     |               | 6.712,878  | 5.767,976                | 4,140                 | 11,915                     | 16,055                |
| 15   |             |           | 1             |      |     |               | 3.356,439  | 2.883,988                | 4,235                 | 5,452                      | 9,687                 |
| 16   |             |           |               | x    | x   | x             | 2.151,390  | 7.600,000                | 4,197                 | 5,434                      | 9,631                 |
| 17   | 1           |           |               | x    | x   | x             | 4.327,070  | 8.741,500                | 4,317                 | 5,846                      | 10,163                |
| 18   |             | 2         |               |      |     | x             | 5.103,948  | 7.832,161                | 4,397                 | 11,077                     | 15,474                |
| 19   |             |           | 3             |      |     |               | 10.069,318 | 8.651,965                | 4,547                 | 7,455                      | 12,002                |
| 20   | 2           | 1         |               |      | x   | x             | 8.141,474  | 9.974,081                | 4,465                 | 11,490                     | 15,955                |
| 21   | 1           |           | 2             |      |     | x             | 10.707,920 | 9.409,476                | 4,607                 | 23,700                     | 28,307                |
| 22   |             |           | 3             |      |     |               | 10.069,318 | 8.651,965                | 4,553                 | 12,618                     | 17,171                |
| 23   | 1           |           | 2             |      |     | x             | 10.707,920 | 9.409,476                | 4,525                 | 7,917                      | 12,442                |
| 24   | 1           |           | 2             |      |     | x             | 10.707,920 | 9.409,476                | 4,363                 | 7,922                      | 12,285                |

Tabla C.1: Resultados de las pruebas de verificación y validación extendidos

| Caso | Año 1    | Año 2    | Año 3     | Año 4     | Año 5     | Año 6     | Año 7     | Año 8     | Año 9     | Año 10    | Año 11    | Año 12    | Año 13    | Año 14    | Año 15     |
|------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 1    | 469,594  | 489,844  | 511,917   | 220,976   | 562,200   | 590,785   | 621,942   | 340,903   | 692,921   | 733,270   | 777,251   | 510,190   | 877,444   | 934,400   | 28.828,856 |
| 2    | -652,500 | -632,250 | -610,177  | -586,118  | -559,894  | -531,310  | -500,152  | -466,191  | -429,173  | -388,824  | -344,843  | -296,904  | -244,650  | -187,694  | 38.419,021 |
| 3    | -585,000 | -585,000 | -585,000  | -585,000  | -585,000  | -585,000  | -585,000  | -585,000  | -585,000  | -585,000  | -585,000  | -585,000  | -585,000  | -585,000  | 25.111,421 |
| 4    | 435,420  | 545,067  | 582,558   | 624,023   | 669,870   | 720,554   | 776,576   | 838,489   | 906,907   | 982,507   | 1.066,039 | 1.158,333 | 1.260,307 | 1.372,976 | 3.997,465  |
| 5    | -507,705 | -472,402 | -433,511  | -390,661  | -343,441  | -291,399  | -234,033  | -170,788  | -101,053  | -24,148   | 60,676    | 154,248   | 257,487   | 371,409   | 39.041,771 |
| 6    | 964,360  | 984,610  | 1.006,683 | 1.030,742 | 1.056,966 | 1.085,550 | 1.116,708 | 1.150,669 | 1.187,087 | 1.228,036 | 1.272,017 | 1.319,956 | 1.372,210 | 1.429,166 | 3.118,235  |
| 7    | 805,641  | 805,641  | 805,641   | 333,141   | 805,641   | 805,641   | 805,641   | 333,141   | 805,641   | 805,641   | 805,641   | 333,141   | 805,641   | 805,641   | 23.281,886 |
| 8    | -507,705 | -472,402 | -433,511  | -390,661  | -343,441  | -291,399  | -234,033  | -170,788  | -101,053  | -24,148   | 60,676    | 154,248   | 257,487   | 371,409   | 39.041,771 |
| 9    | 469,594  | 489,844  | 511,917   | 220,976   | 562,200   | 590,785   | 621,942   | 340,903   | 692,921   | 733,270   | 777,251   | 510,190   | 877,444   | 934,400   | 28.828,856 |
| 10   | 805,641  | 805,641  | 805,641   | 333,141   | 805,641   | 805,641   | 805,641   | 333,141   | 805,641   | 805,641   | 805,641   | 333,141   | 805,641   | 805,641   | 23.281,886 |
| 11   | 469,594  | 489,844  | 511,917   | 220,976   | 562,200   | 590,785   | 621,942   | 340,903   | 692,921   | 733,270   | 777,251   | 510,190   | 877,444   | 934,400   | 28.828,856 |
| 12   | 469,594  | 489,844  | 511,917   | 220,976   | 562,200   | 590,785   | 621,942   | 340,903   | 692,921   | 733,270   | 777,251   | 510,190   | 877,444   | 934,400   | 28.828,856 |
| 13   | 469,594  | 489,844  | 511,917   | 220,976   | 562,200   | 590,785   | 621,942   | 340,903   | 692,921   | 733,270   | 777,251   | 510,190   | 877,444   | 934,400   | 28.828,856 |
| 14   | 537,094  | 537,094  | 537,094   | 222,094   | 537,094   | 537,094   | 537,094   | 222,094   | 537,094   | 537,094   | 537,094   | 222,094   | 537,094   | 537,094   | 15.521,257 |
| 15   | 268,547  | 268,547  | 268,547   | 111,047   | 268,547   | 268,547   | 268,547   | 111,047   | 268,547   | 268,547   | 268,547   | 111,047   | 268,547   | 268,547   | 7.760,629  |
| 16   | 435,420  | 545,067  | 582,558   | 624,023   | 669,870   | 720,554   | 776,576   | 838,489   | 906,907   | 982,507   | 1.066,039 | 1.158,333 | 1.260,307 | 1.372,976 | 3.997,465  |
| 17   | 142,920  | 252,567  | 290,058   | 331,523   | 377,370   | 428,054   | 484,076   | 545,989   | 614,407   | 690,007   | 773,539   | 865,833   | 967,807   | 1.080,476 | 16.553,175 |
| 18   | 964,360  | 984,610  | 1.006,683 | 1.030,742 | 1.056,966 | 1.085,550 | 1.116,708 | 1.150,669 | 1.187,087 | 1.228,036 | 1.272,017 | 1.319,956 | 1.372,210 | 1.429,166 | 3.118,235  |
| 19   | 805,641  | 805,641  | 805,641   | 333,141   | 805,641   | 805,641   | 805,641   | 333,141   | 805,641   | 805,641   | 805,641   | 333,141   | 805,641   | 805,641   | 23.281,886 |
| 20   | 154,475  | 189,778  | 228,669   | 271,519   | 318,739   | 370,781   | 428,147   | 491,392   | 561,127   | 638,032   | 722,856   | 816,428   | 919,667   | 1.033,589 | 27.669,234 |
| 21   | 469,594  | 489,844  | 511,917   | 220,976   | 562,200   | 590,785   | 621,942   | 340,903   | 692,921   | 733,270   | 777,251   | 510,190   | 877,444   | 934,400   | 28.828,856 |
| 22   | 805,641  | 805,641  | 805,641   | 333,141   | 805,641   | 805,641   | 805,641   | 333,141   | 805,641   | 805,641   | 805,641   | 333,141   | 805,641   | 805,641   | 23.281,886 |
| 23   | 469,594  | 489,844  | 511,917   | 220,976   | 562,200   | 590,785   | 621,942   | 340,903   | 692,921   | 733,270   | 777,251   | 510,190   | 877,444   | 934,400   | 28.828,856 |
| 24   | 469,594  | 489,844  | 511,917   | 220,976   | 562,200   | 590,785   | 621,942   | 340,903   | 692,921   | 733,270   | 777,251   | 510,190   | 877,444   | 934,400   | 28.828,856 |

Tabla C.2: Balances anuales de las pruebas de verificación y validación

## C.2. Realistas

| Caso | Forestación | Ganadería | Silvopastoreo | Bono | LRM | Bono ganadero | VAN (US\$)    | Inversión Inicial (US\$) | T <sub>carga</sub> ms | T <sub>resolución</sub> ms | T <sub>total</sub> ms |
|------|-------------|-----------|---------------|------|-----|---------------|---------------|--------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|
| 1    | 15          |           | 8             |      |     | x             | 1.242.504,510 | 1.399.971,999            | 47,811                | 105,761                    | 153,572               |
| 2    | 16          |           |               |      |     | x             | 1.201.186,902 | 1.399.969,955            | 48,112                | 120,677                    | 168,789               |
| 3    |             |           | 23            |      |     |               | 1.147.719,935 | 1.337.440,854            | 48,892                | 83,050                     | 131,942               |
| 4    | 12          |           |               |      |     | x             | 646.166,816   | 699.964,545              | 48,602                | 89,548                     | 138,150               |
| 5    | 11          |           | 12            |      | x   | x             | 719.762,843   | 699.925,673              | 50,726                | 106,540                    | 157,266               |
| 6    | 12          |           | 11            |      |     | x             | 737.160,718   | 699.942,640              | 51,230                | 111,938                    | 163,168               |
| 7    | 19          |           |               |      |     | x             | 719.734,828   | 699.993,015              | 52,397                | 113,956                    | 166,353               |
| 8    | 9           |           | 8             |      |     | x             | 409.683,145   | 349.996,161              | 52,690                | 485,170                    | 537,860               |
| 9    | 8           |           | 8             |      |     | x             | 2.002.209,789 | 1.999.740,311            | 34,727                | 79,012                     | 113,739               |
| 10   | 10          |           | 5             |      |     | x             | 2.030.540,617 | 1.999.802,238            | 34,361                | 64,668                     | 99,029                |
| 11   | 6           |           |               |      |     | x             | 1.748.512,296 | 1.999.813,985            | 35,015                | 96,225                     | 131,240               |
| 12   | 5           |           | 3             |      |     |               | 1.164.419,080 | 999.993,751              | 35,295                | 104,531                    | 139,826               |
| 13   | 9           |           | 7             |      |     | x             | 1.145.461,941 | 999.807,633              | 36,606                | 72,387                     | 108,993               |
| 14   | 10          |           | 5             |      |     | x             | 1.141.688,068 | 999.888,538              | 37,204                | 80,143                     | 117,347               |
| 15   | 10          |           |               |      |     | x             | 1.089.391,334 | 999.979,000              | 37,645                | 69,751                     | 107,396               |
| 16   | 4           | 1         | 9             |      |     | x             | 635.347,411   | 499.966,209              | 37,590                | 117,409                    | 154,999               |
| 17   | 28          |           | 13            |      |     | x             | 2.444.822,735 | 2.499.736,612            | 83,134                | 131,487                    | 214,621               |
| 18   | 4           | 1         | 37            |      |     |               | 2.365.618,942 | 2.407.701,832            | 84,245                | 114,237                    | 198,482               |
| 19   | 4           | 1         | 37            |      |     |               | 2.365.618,942 | 2.407.701,832            | 85,890                | 115,184                    | 201,074               |
| 20   | 17          |           | 7             |      |     |               | 1.313.988,942 | 1.249.989,958            | 86,487                | 163,473                    | 249,960               |
| 21   | 18          |           | 23            |      |     | x             | 1.514.677,682 | 1.249.978,373            | 89,508                | 153,956                    | 243,464               |
| 22   | 30          |           | 11            |      |     | x             | 1.506.203,295 | 1.249.991,460            | 90,823                | 150,957                    | 241,780               |
| 23   | 4           | 1         | 37            |      |     |               | 1.430.005,673 | 1.126.638,172            | 92,455                | 131,115                    | 223,570               |
| 24   | 14          |           | 10            |      |     | x             | 864.705,593   | 624.979,922              | 93,214                | 452,469                    | 545,683               |

Tabla C.3: Resultados de las pruebas realistas extendidos

| Caso | Año 1       | Año 2       | Año 3       | Año 4       | Año 5       | Año 6       | Año 7       | Año 8       | Año 9       | Año 10      | Año 11      | Año 12      | Año 13      | Año 14      | Año 15        |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|
| 1    | 39.298,703  | 42.133,703  | 33.597,689  | 40.432,041  | 52.263,524  | 44.639,193  | 60.627,356  | 57.221,860  | 58.938,262  | 76.213,341  | 82.370,659  | 69.299,896  | 96.397,644  | 104.371,548 | 4.136.407,587 |
| 2    | 43.024,075  | 48.694,075  | 54.874,375  | 61.610,902  | 68.953,716  | 76.957,384  | 85.681,382  | 95.190,540  | 105.555,521 | 116.853,352 | 129.167,986 | 142.590,939 | 157.221,956 | 173.169,766 | 3.405.272,490 |
| 3    | 93.619,875  | 93.619,875  | 53.046,111  | 65.142,300  | 93.619,875  | 53.046,111  | 93.619,875  | 65.142,300  | 53.046,111  | 93.619,875  | 93.619,875  | 24.568,536  | 93.619,875  | 93.619,875  | 3.448.270,485 |
| 4    | 768.425,000 | 2.185,925   | 3.731,000   | 5.415,132   | 7.250,835   | 9.251,752   | 11.432,752  | 13.810,041  | 16.401,287  | 19.225,744  | 22.304,403  | 25.660,141  | 29.317,895  | 33.304,848  | 2.448.630,992 |
| 5    | 20.293,179  | 23.317,828  | 12.036,651  | 20.086,250  | 34.426,231  | 24.309,737  | 43.910,885  | 39.151,924  | 40.877,117  | 62.226,342  | 69.665,630  | 53.008,852  | 86.994,746  | 97.063,705  | 2.093.521,666 |
| 6    | 22.863,243  | 25.698,243  | 13.984,725  | 21.766,382  | 35.828,064  | 25.026,230  | 44.191,897  | 38.556,201  | 39.325,299  | 59.777,882  | 65.935,199  | 47.452,732  | 79.962,184  | 87.936,089  | 2.077.745,687 |
| 7    | 2.637,915   | 6.890,415   | 11.525,640  | 16.578,035  | 22.085,146  | 28.087,897  | 34.630,895  | 41.762,763  | 49.536,500  | 58.009,872  | 67.245,849  | 77.313,063  | 88.286,326  | 100.247,183 | 2.086.384,236 |
| 8    | 6.921,583   | 7.630,333   | 1.334,000   | 15.436,000  | 10.162,788  | 2.761,710   | 12.253,746  | 4.212,891   | 6.336,478   | 16.150,242  | 17.680,572  | 1.736,405   | 21.196,318  | 23.189,794  | 1.353.081,981 |
| 9    | 150.773,080 | 154.823,080 | 112.670,092 | 131.364,985 | 169.294,253 | 128.443,670 | 181.242,585 | 155.350,441 | 148.870,911 | 203.508,278 | 212.304,446 | 142.640,381 | 232.342,995 | 243.734,288 | 4.715.157,295 |
| 10   | 56.930,724  | 65.030,724  | 72.288,924  | 82.380,834  | 93.973,069  | 103.836,080 | 117.869,734 | 130.351,745 | 144.690,562 | 162.401,119 | 179.993,455 | 196.495,800 | 220.070,554 | 242.853,139 | 5.600.424,252 |
| 11   | 115.708,475 | 127.858,475 | 141.101,975 | 155.537,390 | 171.271,992 | 188.422,709 | 207.116,990 | 227.493,756 | 249.704,432 | 273.914,068 | 300.302,571 | 329.066,040 | 360.418,221 | 394.592,098 | 3.160.627,344 |
| 12   | 13.982,249  | 13.982,249  | 13.926,149  | 57.674,000  | 13.982,249  | 13.926,149  | 13.982,249  | 57.674,000  | 13.926,149  | 13.982,249  | 13.982,249  | 1.574,000   | 13.982,249  | 13.982,249  | 4.118.283,069 |
| 13   | 83.942,474  | 85.967,474  | 43.285,748  | 59.074,327  | 93.203,061  | 51.172,537  | 99.177,227  | 71.067,055  | 61.386,158  | 110.310,073 | 114.708,157 | 43.106,793  | 124.727,432 | 130.423,078 | 2.661.950,751 |
| 14   | 34.367,534  | 38.417,534  | 22.021,178  | 33.037,289  | 52.888,706  | 37.794,756  | 64.837,039  | 57.022,744  | 58.221,997  | 87.102,731  | 95.898,899  | 70.069,316  | 115.937,449 | 127.328,741 | 3.108.530,081 |
| 15   | 3.282,200   | 9.357,200   | 15.978,950  | 23.196,658  | 31.063,959  | 39.639,317  | 48.086,457  | 59.174,841  | 70.280,178  | 82.384,996  | 95.579,248  | 109.960,982 | 125.637,073 | 142.724,011 | 3.113.096,703 |
| 16   | 13.139,694  | 14.152,194  | 43.743,000  | 5.148,695   | 17.769,987  | 3.987,138   | 20.757,070  | 11.1145,059 | 9.093,948   | 26.323,493  | 28.522,535  | 4.397,340   | 33.532,173  | 36.379,996  | 1.978.307,347 |
| 17   | 91.190,897  | 96.253,397  | 76.286,414  | 89.899,003  | 114.342,362 | 96.003,386  | 129.277,778 | 119.880,822 | 121.537,438 | 157.109,894 | 168.105,104 | 136.717,499 | 193.153,291 | 207.392,406 | 7.456.478,733 |
| 18   | 187.706,462 | 187.706,462 | 115.303,802 | 138.197,912 | 187.706,462 | 115.303,802 | 187.706,462 | 138.197,912 | 115.303,802 | 187.706,462 | 187.706,462 | 65.795,252  | 187.706,462 | 187.706,462 | 6.410.545,362 |
| 19   | 187.706,462 | 187.706,462 | 115.303,802 | 138.197,912 | 187.706,462 | 115.303,802 | 187.706,462 | 138.197,912 | 115.303,802 | 187.706,462 | 187.706,462 | 65.795,252  | 187.706,462 | 187.706,462 | 6.410.545,362 |
| 20   | 34.007,913  | 34.007,913  | 14.034,069  | 19.988,838  | 34.007,913  | 14.034,069  | 34.007,913  | 19.988,838  | 14.034,069  | 34.007,913  | 34.007,913  | 14.994,000  | 34.007,913  | 34.007,913  | 4.630.324,108 |
| 21   | 111.151,025 | 113.682,275 | 61.707,933  | 81.032,890  | 122.726,757 | 71.566,419  | 130.194,465 | 96.023,800  | 84.333,445  | 144.110,523 | 149.608,128 | 62.451,288  | 162.132,222 | 169.251,779 | 3.356.545,981 |
| 22   | 39.641,311  | 44.703,811  | 25.917,172  | 39.177,867  | 62.792,776  | 45.634,144  | 77.728,192  | 69.159,686  | 71.168,195  | 105.560,307 | 116.555,517 | 87.176,707  | 141.603,704 | 155.842,820 | 4.096.692,931 |
| 23   | 139.307,102 | 139.307,102 | 66.904,442  | 89.798,552  | 139.307,102 | 66.904,442  | 139.307,102 | 89.798,552  | 66.904,442  | 139.307,102 | 139.307,102 | 17.395,892  | 139.307,102 | 139.307,102 | 2.940.652,736 |
| 24   | 11.146,896  | 12.412,521  | 4.917,000   | 27.692,000  | 16.934,763  | 4.934,160   | 20.668,617  | 7.523,147   | 11.317,673  | 27.626,646  | 30.375,448  | 4.316,457   | 36.637,495  | 40.197,274  | 2.695.645,806 |

Tabla C.4: Balances anuales de las pruebas realistas

| Caso | F      | G mejorado | SP Mejorado | SP Natural | No utilizado | VAN (US\$)    | Inversión Inicial (US\$) |
|------|--------|------------|-------------|------------|--------------|---------------|--------------------------|
| 1    | 129,00 | 0          | 51,81       | 0          | 0            | 1.242.504,510 | 1.399.971,999            |
| 2    | 140,2  | 0          | 0           | 0          | 40,61        | 1.201.186,902 | 1.399.969,955            |
| 3    | 0      | 0          | 180,81      | 0          | 0            | 1.147.719,935 | 1.337.440,854            |
| 4    | 90,73  | 0          | 0           | 0          | 90,08        | 646.166,816   | 699.964,545              |
| 5    | 115,65 | 0          | 65,16       | 0          | 0            | 719.762,843   | 699.925,673              |
| 6    | 114,84 | 0          | 65,97       | 0          | 0            | 737.160,718   | 699.942,640              |
| 7    | 153,57 | 0          | 0           | 0          | 27,24        | 719.734,828   | 699.993,015              |
| 8    | 68,76  | 0          | 37,44       | 21,16      | 53,45        | 409.683,145   | 349.996,161              |
| 9    | 60,25  | 0          | 207,52      | 0          | 0            | 2.002.209,789 | 1.999.740,311            |
| 10   | 250,42 | 0          | 7           | 0          | 10,35        | 2.030.540,617 | 1.999.802,238            |
| 11   | 130,79 | 0          | 0           | 0          | 136,98       | 1.748.512,296 | 1.999.813,985            |
| 12   | 132,55 | 0          | 0,25        | 88,16      | 46,81        | 1.164.419,080 | 999.993,751              |
| 13   | 67,73  | 0          | 200,04      | 0          | 0            | 1.145.461,941 | 999.807,633              |
| 14   | 164,68 | 0          | 92,74       | 0          | 10,35        | 1.141.688,068 | 999.888,538              |
| 15   | 218,8  | 0          | 0           | 0          | 48,97        | 1.089.391,334 | 999.979,000              |
| 16   | 100,46 | 8,15       | 59,64       | 12,17      | 87,35        | 635.347,411   | 499.966,209              |
| 17   | 215,29 | 0          | 113,57      | 0          | 8,31         | 2.444.822,735 | 2.499.736,612            |
| 18   | 14,52  | 8,31       | 314,34      | 0          | 0            | 2.365.618,942 | 2.407.701,832            |
| 19   | 14,52  | 8,31       | 314,34      | 0          | 0            | 2.365.618,942 | 2.407.701,832            |
| 20   | 123,83 | 0          | 89,01       | 0          | 124,33       | 1.313.988,942 | 1.249.989,958            |
| 21   | 84,95  | 0          | 243,91      | 0          | 8,31         | 1.514.677,682 | 1.249.978,373            |
| 22   | 220,55 | 0          | 108,31      | 0          | 8,31         | 1.506.203,295 | 1.249.991,460            |
| 23   | 14,52  | 8,31       | 314,34      | 0          | 0            | 1.430.005,673 | 1.126.638,172            |
| 24   | 135,46 | 0          | 61,44       | 35,5       | 104,77       | 864.705,593   | 624.979,922              |

Tabla C.5: Utilización de hectáreas según actividad y tipo de pastura de las pruebas realistas

### C.3. Sensibilidad

| Caso | Forestación | Ganadería | Silvopastoreo | Bono | LRM | Bono ganadero | VAN total (US\$) | Inversión inicial (US\$) | T <sub>carria</sub> ms | T <sub>resolución</sub> ms | T <sub>total</sub> ms |
|------|-------------|-----------|---------------|------|-----|---------------|------------------|--------------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 1    | 33          |           | 9             |      |     | x             | 2.461.478,622    | 2.499.816,833            | 84,074                 | 138,593                    | 222,667               |
| 2    | 27          |           | 4             |      |     | x             | 2.461.579,460    | 2.499.958,641            | 63,275                 | 143,098                    | 206,373               |
| 3    | 16          |           | 5             |      |     | x             | 2.462.723,913    | 2.499.686,043            | 45,547                 | 139,598                    | 185,145               |
| 4    | 28          |           | 14            |      |     |               | 2.006.722,312    | 1.874.935,007            | 86,731                 | 150,027                    | 236,758               |
| 5    | 28          |           |               |      |     |               | 1.400.021,024    | 1.249.992,395            | 88,142                 | 130,632                    | 218,774               |
| 6    | 16          |           |               |      |     |               | 699.983,158      | 624.971,775              | 91,371                 | 161,605                    | 252,976               |
| 7    | 33          |           | 9             |      |     | x             | 2.461.478,622    | 2.499.816,833            | 91,773                 | 142,847                    | 234,620               |
| 8    | 33          |           | 9             |      |     | x             | 2.461.478,622    | 2.499.816,833            | 92,664                 | 142,162                    | 234,826               |
| 9    | 17          |           | 25            |      |     | x             | 2.461.529,041    | 2.499.887,737            | 92,791                 | 131,273                    | 224,064               |
| 10   | 24          |           | 18            |      |     | x             | 2.461.579,460    | 2.499.958,641            | 93,726                 | 146,361                    | 240,087               |
| 11   |             |           | 43            |      |     |               | 2.411.234,442    | 2.443.799,988            | 93,328                 | 111,948                    | 205,276               |
| 12   | 21          |           | 17            |      |     | x             | 2.421.637,877    | 2.499.884,917            | 93,692                 | 123,778                    | 217,470               |
| 13   | 36          |           | 6             |      |     | x             | 2.461.461,816    | 2.499.793,198            | 93,511                 | 152,425                    | 245,936               |
| 14   | 36          |           | 6             |      |     | x             | 2.461.461,816    | 2.499.793,198            | 92,406                 | 149,248                    | 241,654               |
| 15   | 42          |           |               |      |     | x             | 2.299.414,952    | 2.271.906,865            | 92,667                 | 108,569                    | 201,236               |
| 16   | 32          |           | 10            |      |     | x             | 2.461.374,645    | 2.499.994,908            | 92,420                 | 112,198                    | 204,618               |
| 17   | 30          |           | 12            |      |     | x             | 2.461.411,397    | 2.499.722,294            | 92,638                 | 132,876                    | 225,514               |
| 18   | 30          |           | 12            |      |     | x             | 2.461.411,397    | 2.499.722,294            | 93,057                 | 133,805                    | 236,862               |
| 19   | 36          |           | 6             |      |     | x             | 2.461.461,816    | 2.499.793,198            | 94,704                 | 143,243                    | 237,947               |
| 20   | 36          |           | 6             |      |     | x             | 2.461.461,816    | 2.499.793,198            | 94,143                 | 143,674                    | 237,817               |
| 21   |             |           | 42            |      |     |               | 2.411.234,442    | 2.443.799,988            | 94,278                 | 114,270                    | 208,548               |
| 22   |             |           | 42            |      |     |               | 2.411.234,442    | 2.443.799,988            | 95,097                 | 104,634                    | 199,731               |
| 23   |             |           | 42            |      | x   | x             | 2.325.849,258    | 2.418.129,648            | 95,405                 | 106,486                    | 201,891               |
| 24   |             |           | 31            |      | x   | x             | 2.325.849,258    | 2.418.129,648            | 71,941                 | 99,677                     | 171,618               |
| 25   |             |           | 21            |      | x   | x             | 2.328.772,923    | 2.420.438,451            | 49,914                 | 94,895                     | 144,809               |
| 26   |             |           | 42            |      | x   | x             | 1.926.142,053    | 1.786.879,648            | 95,947                 | 108,438                    | 204,385               |
| 27   | 35          |           | 7             |      |     | x             | 1.520.841,802    | 1.249.982,885            | 95,621                 | 153,502                    | 249,123               |
| 28   | 35          |           | 7             |      |     |               | 1.065.984,064    | 624.959,840              | 96,039                 | 150,065                    | 246,104               |
| 29   |             |           | 42            |      | x   | x             | 2.325.849,258    | 2.418.129,648            | 95,688                 | 109,596                    | 205,284               |
| 30   |             |           | 42            |      | x   | x             | 2.325.849,258    | 2.418.129,648            | 95,440                 | 112,936                    | 208,376               |
| 31   |             |           | 42            |      | x   | x             | 2.325.849,258    | 2.418.129,648            | 95,527                 | 110,027                    | 205,554               |
| 32   |             |           | 42            |      | x   | x             | 2.325.849,258    | 2.418.129,648            | 95,565                 | 112,299                    | 207,864               |
| 33   |             |           | 42            |      | x   | x             | 2.325.849,258    | 2.418.129,648            | 95,492                 | 102,972                    | 198,464               |
| 34   |             |           | 42            |      | x   | x             | 2.325.849,258    | 2.418.129,648            | 95,937                 | 104,897                    | 200,834               |
| 35   |             |           | 42            |      | x   | x             | 2.325.849,258    | 2.418.129,648            | 95,309                 | 103,408                    | 198,717               |
| 36   |             |           | 42            |      | x   | x             | 2.325.849,258    | 2.418.129,648            | 95,712                 | 102,524                    | 198,236               |
| 37   | 42          |           |               |      | x   | x x           | 2.008.781,034    | 2.266.129,555            | 95,460                 | 99,690                     | 195,150               |
| 38   | 36          |           | 6             |      | x   | x x           | 2.185.249,647    | 2.499.895,576            | 97,477                 | 138,872                    | 236,349               |
| 39   |             |           | 42            |      | x   | x             | 2.325.849,258    | 2.418.129,648            | 95,274                 | 99,115                     | 194,389               |
| 40   |             |           | 42            |      | x   | x             | 2.325.849,258    | 2.418.129,648            | 95,083                 | 101,156                    | 196,239               |
| 41   | 12          |           | 30            |      | x   | x             | 2.312.102,862    | 2.499.992,626            | 96,727                 | 115,202                    | 211,929               |
| 42   | 35          |           | 7             |      | x   |               | 2.253.478,597    | 2.499.928,362            | 95,677                 | 147,853                    | 243,530               |
| 43   |             |           | 42            |      |     | x             | 2.380.982,394    | 2.411.879,648            | 95,563                 | 97,333                     | 192,896               |
| 44   | 34          |           | 8             |      |     | x             | 2.430.487,693    | 2.499.936,795            | 96,339                 | 129,981                    | 226,320               |

Tabla C.6: Resultados de las pruebas de sensibilidad extendidos

| Caso | Año 1       | Año 2       | Año 3        | Año 4       | Año 5       | Año 6        | Año 7       | Año 8       | Año 9        | Año 10      | Año 11      | Año 12      | Año 13      | Año 14      | Año 15        |
|------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|
| 1    | 77.371.226  | 82.433.726  | 66.312.959   | 78.778.883  | 100.522.692 | 86.029.932   | 115.458.108 | 108.760.702 | 111.563.983  | 143.290.223 | 154.285.433 | 129.443.595 | 179.333.620 | 193.572.736 | 7.735.498.162 |
| 2    | 77.415.313  | 82.477.813  | 66.343.582   | 78.813.519  | 100.566.778 | 86.060.554   | 115.502.194 | 108.795.338 | 111.594.605  | 143.334.310 | 154.329.519 | 129.464.767 | 179.377.707 | 193.616.822 | 7.735.212.250 |
| 3    | 76.214.334  | 81.276.834  | 65.479.203   | 77.848.790  | 99.365.799  | 85.196.175   | 114.301.215 | 107.830.609 | 110.730.226  | 142.133.331 | 153.128.540 | 128.886.638 | 178.176.728 | 192.415.843 | 7.758.271.050 |
| 4    | 21.157.965  | 21.157.965  | -492.147.000 | 5.962.365   | 21.157.965  | -492.147.000 | 21.157.965  | 5.962.365   | -492.147.000 | 21.157.965  | 21.157.965  | -15.687.747 | 21.157.965  | 21.157.965  | 7.547.287.757 |
| 5    | -37.746.725 | -37.746.725 | -37.746.725  | -37.746.725 | -37.746.725 | -37.746.725  | -37.746.725 | -37.746.725 | -37.746.725  | -37.746.725 | -37.746.725 | -37.746.725 | -37.746.725 | -37.746.725 | 6.077.290.659 |
| 6    | -18.872.625 | -18.872.625 | -18.872.625  | -18.872.625 | -18.872.625 | -18.872.625  | -18.872.625 | -18.872.625 | -18.872.625  | -18.872.625 | -18.872.625 | -18.872.625 | -18.872.625 | -18.872.625 | 3.038.526.591 |
| 7    | 77.371.226  | 82.433.726  | 66.312.959   | 78.778.883  | 100.522.692 | 86.029.932   | 115.458.108 | 108.760.702 | 111.563.983  | 143.290.223 | 154.285.433 | 129.443.595 | 179.333.620 | 193.572.736 | 7.735.498.162 |
| 8    | 77.371.226  | 82.433.726  | 66.312.959   | 78.778.883  | 100.522.692 | 86.029.932   | 115.458.108 | 108.760.702 | 111.563.983  | 143.290.223 | 154.285.433 | 129.443.595 | 179.333.620 | 193.572.736 | 7.735.498.162 |
| 9    | 77.393.270  | 82.455.770  | 66.328.271   | 78.796.201  | 100.544.735 | 86.045.243   | 115.480.151 | 108.778.020 | 111.579.294  | 143.312.267 | 154.307.476 | 129.454.181 | 179.355.664 | 193.594.779 | 7.735.355.206 |
| 10   | 77.415.313  | 82.477.813  | 66.343.582   | 78.813.519  | 100.566.778 | 86.060.554   | 115.502.194 | 108.795.338 | 111.594.605  | 143.334.310 | 154.329.519 | 129.464.767 | 179.377.707 | 193.616.822 | 7.735.212.250 |
| 11   | 198.009.583 | 198.009.583 | 122.348.635  | 144.905.308 | 198.009.583 | 122.348.635  | 198.009.583 | 144.905.308 | 122.348.635  | 198.009.583 | 198.009.583 | 69.244.360  | 198.009.583 | 198.009.583 | 6.400.352.198 |
| 12   | 110.662.773 | 115.725.273 | 90.336.786   | 105.565.679 | 133.814.238 | 110.053.758  | 148.749.654 | 135.547.498 | 135.587.809  | 176.581.770 | 187.576.979 | 146.962.671 | 212.625.167 | 226.864.282 | 7.064.452.599 |
| 13   | 77.363.879  | 82.426.379  | 66.307.856   | 78.773.110  | 100.515.344 | 86.024.828   | 115.450.760 | 108.754.929 | 111.558.879  | 143.282.876 | 154.278.085 | 129.440.066 | 179.326.273 | 193.565.388 | 7.735.545.814 |
| 14   | 77.363.879  | 82.426.379  | 66.307.856   | 78.773.110  | 100.515.344 | 86.024.828   | 115.450.760 | 108.754.929 | 111.558.879  | 143.282.876 | 154.278.085 | 129.440.066 | 179.326.273 | 193.565.388 | 7.735.545.814 |
| 15   | 6.517.425   | 11.579.925  | 17.098.050   | 23.112.806  | 29.668.891  | 36.815.022   | 44.604.306  | 53.094.626  | 62.349.074   | 72.436.422  | 83.431.632  | 95.416.410  | 108.479.819 | 122.718.934 | 8.195.006.226 |
| 16   | 77.422.633  | 82.485.133  | 66.442.906   | 78.798.789  | 100.574.099 | 86.159.879   | 115.509.514 | 108.780.609 | 111.693.930  | 143.341.630 | 154.336.840 | 129.542.041 | 179.385.027 | 193.624.143 | 7.734.291.490 |
| 17   | 77.341.836  | 82.404.336  | 66.292.545   | 78.755.792  | 100.493.301 | 86.009.517   | 115.428.717 | 108.737.611 | 111.543.568  | 143.260.833 | 154.256.042 | 129.429.480 | 179.304.230 | 193.543.345 | 7.735.688.770 |
| 18   | 77.341.836  | 82.404.336  | 66.292.545   | 78.755.792  | 100.493.301 | 86.009.517   | 115.428.717 | 108.737.611 | 111.543.568  | 143.260.833 | 154.256.042 | 129.429.480 | 179.304.230 | 193.543.345 | 7.735.688.770 |
| 19   | 77.363.879  | 82.426.379  | 66.307.856   | 78.773.110  | 100.515.344 | 86.024.828   | 115.450.760 | 108.754.929 | 111.558.879  | 143.282.876 | 154.278.085 | 129.440.066 | 179.326.273 | 193.565.388 | 7.735.545.814 |
| 20   | 77.363.879  | 82.426.379  | 66.307.856   | 78.773.110  | 100.515.344 | 86.024.828   | 115.450.760 | 108.754.929 | 111.558.879  | 143.282.876 | 154.278.085 | 129.440.066 | 179.326.273 | 193.565.388 | 7.735.545.814 |
| 21   | 198.009.583 | 198.009.583 | 122.348.635  | 144.905.308 | 198.009.583 | 122.348.635  | 198.009.583 | 144.905.308 | 122.348.635  | 198.009.583 | 198.009.583 | 69.244.360  | 198.009.583 | 198.009.583 | 6.400.352.198 |
| 22   | 198.009.583 | 198.009.583 | 122.348.635  | 144.905.308 | 198.009.583 | 122.348.635  | 198.009.583 | 144.905.308 | 122.348.635  | 198.009.583 | 198.009.583 | 69.244.360  | 198.009.583 | 198.009.583 | 6.400.352.198 |
| 23   | 254.499.228 | 265.322.171 | 201.615.433  | 237.377.835 | 305.072.597 | 245.534.538  | 339.014.410 | 305.606.471 | 304.824.616  | 404.561.796 | 431.186.645 | 331.869.040 | 493.208.726 | 529.247.347 | 3.349.973.702 |
| 24   | 254.499.228 | 265.322.171 | 201.615.433  | 237.377.835 | 305.072.597 | 245.534.538  | 339.014.410 | 305.606.471 | 304.824.616  | 404.561.796 | 431.186.645 | 331.869.040 | 493.208.726 | 529.247.347 | 3.349.973.702 |
| 25   | 254.795.548 | 265.618.491 | 201.761.405  | 237.568.631 | 305.368.917 | 245.680.510  | 339.310.731 | 305.797.267 | 304.970.589  | 404.858.117 | 431.482.966 | 331.909.487 | 493.505.046 | 529.543.667 | 3.355.795.926 |
| 26   | 205.369.933 | 210.432.433 | 140.289.610  | 168.861.039 | 228.521.398 | 160.006.582  | 243.456.814 | 198.842.858 | 185.540.633  | 271.288.929 | 282.284.139 | 165.503.695 | 307.332.326 | 321.571.442 | 3.117.941.428 |
| 27   | 34.183.386  | 39.245.886  | 31.383.775   | 34.368.842  | 57.334.852  | 41.100.748   | 72.270.267  | 64.350.662  | 66.634.799   | 100.102.383 | 111.097.593 | 83.292.210  | 136.145.780 | 150.384.896 | 4.228.137.308 |
| 28   | -22.073.962 | -22.073.962 | -45.451.954  | -38.482.312 | -22.073.962 | -45.451.954  | -22.073.962 | -38.482.312 | -45.451.954  | -22.073.962 | -22.073.962 | -61.860.304 | -22.073.962 | -22.073.962 | 4.040.212.815 |
| 29   | 254.499.228 | 265.322.171 | 201.615.433  | 237.377.835 | 305.072.597 | 245.534.538  | 339.014.410 | 305.606.471 | 304.824.616  | 404.561.796 | 431.186.645 | 331.869.040 | 493.208.726 | 529.247.347 | 3.349.973.702 |
| 30   | 254.499.228 | 265.322.171 | 201.615.433  | 237.377.835 | 305.072.597 | 245.534.538  | 339.014.410 | 305.606.471 | 304.824.616  | 404.561.796 | 431.186.645 | 331.869.040 | 493.208.726 | 529.247.347 | 3.349.973.702 |
| 31   | 254.499.228 | 265.322.171 | 201.615.433  | 237.377.835 | 305.072.597 | 245.534.538  | 339.014.410 | 305.606.471 | 304.824.616  | 404.561.796 | 431.186.645 | 331.869.040 | 493.208.726 | 529.247.347 | 3.349.973.702 |
| 32   | 254.499.228 | 265.322.171 | 201.615.433  | 237.377.835 | 305.072.597 | 245.534.538  | 339.014.410 | 305.606.471 | 304.824.616  | 404.561.796 | 431.186.645 | 331.869.040 | 493.208.726 | 529.247.347 | 3.349.973.702 |
| 33   | 254.499.228 | 265.322.171 | 201.615.433  | 237.377.835 | 305.072.597 | 245.534.538  | 339.014.410 | 305.606.471 | 304.824.616  | 404.561.796 | 431.186.645 | 331.869.040 | 493.208.726 | 529.247.347 | 3.349.973.702 |
| 34   | 254.499.228 | 265.322.171 | 201.615.433  | 237.377.835 | 305.072.597 | 245.534.538  | 339.014.410 | 305.606.471 | 304.824.616  | 404.561.796 | 431.186.645 | 331.869.040 | 493.208.726 | 529.247.347 | 3.349.973.702 |
| 35   | 254.499.228 | 265.322.171 | 201.615.433  | 237.377.835 | 305.072.597 | 245.534.538  | 339.014.410 | 305.606.471 | 304.824.616  | 404.561.796 | 431.186.645 | 331.869.040 | 493.208.726 | 529.247.347 | 3.349.973.702 |
| 36   | 254.499.228 | 265.322.171 | 201.615.433  | 237.377.835 | 305.072.597 | 245.534.538  | 339.014.410 | 305.606.471 | 304.824.616  | 404.561.796 | 431.186.645 | 331.869.040 | 493.208.726 | 529.247.347 | 3.349.973.702 |
| 37   | 56.757.070  | 71.580.013  | 87.854.223   | 105.725.553 | 125.354.887 | 146.919.732  | 170.615.969 | 196.659.802 | 225.289.917  | 256.769.870 | 291.390.737 | 329.474.055 | 371.375.074 | 417.486.376 | 5.103.515.265 |
| 38   | 131.292.066 | 146.115.009 | 139.626.083  | 164.283.748 | 199.889.883 | 198.691.592  | 245.150.964 | 255.217.998 | 277.061.777  | 331.304.866 | 365.925.733 | 365.269.115 | 445.910.070 | 492.021.371 | 4.620.133.558 |
| 39   | 254.499.228 | 265.322.171 | 201.615.433  | 237.377.835 | 305.072.597 | 245.534.538  | 339.014.410 | 305.606.471 | 304.824.616  | 404.561.796 | 431.186.645 | 331.869.040 | 493.208.726 | 529.247.347 | 3.349.973.702 |
| 40   | 254.499.228 | 265.322.171 | 201.615.433  | 237.377.835 | 305.072.597 | 245.534.538  | 339.014.410 | 305.606.471 | 304.824.616  | 404.561.796 | 431.186.645 | 331.869.040 | 493.208.726 | 529.247.347 | 3.349.973.702 |
| 41   | 128.511.457 | 145.102.864 | 141.338.133  | 168.352.561 | 206.544.912 | 209.493.070  | 259.519.588 | 274.881.269 | 302.586.177  | 362.834.759 | 405.111.010 | 414.325.519 | 504.158.467 | 562.026.947 | 4.718.335.834 |
| 42   | 119.429.414 | 136.726.785 | 134.503.831  | 162.521.184 | 201.771.490 | 207.177.628  | 258.843.612 | 277.368.144 | 308.539.713  | 372.094.453 | 419.026.896 | 434.790.186 | 530.051.542 | 595.510.766 | 4.775.759.211 |
| 43   | 261.619.933 | 271.744.933 | 207.120.235  | 241.706.420 | 307.922.864 | 246.554.179  | 337.793.695 | 301.670.059 | 297.622.282  | 393.457.926 | 415.448.346 | 310.652.680 | 465.544.720 | 494.022.951 | 3.305.913.573 |
| 44   | 146.668.691 | 161.856.191 | 155.034.818  | 180.048.059 | 216.123.087 | 214.185.735  | 260.929.334 | 269.993.517 | 290.787.888  | 344.425.682 | 377.411.311 | 373.583.124 | 452.555.873 | 495.273.219 | 4.604.176.903 |

Tabla C.7: Balances anuales de las pruebas de sensibilidad

## Anexo D

# Modelo en AMPL

```
1  # Conjuntos
2  set Z; # Zonas de manejo agroforestal.
3  set M; # Densidades de árboles por hectárea para la actividad forestal.
4  set N; # Densidades de árboles por hectárea para la actividad silvopastoril.
5  set F; # Especies forestales.
6  set G; # Formas de realizar las actividades ganaderas
7  set P; # Posibles pasturas (natural o mejorada).
8  set W; # Tasas de interés de bono del tesoro.
9  set Y; # Tasas de interés de letra de regulación monetaria.
10 set V; # Tasas de interés de bono ganadero.
11 param h;
12 set J := {0..h}; # Períodos (horizonte de inversión en el tiempo).
13 set S; # Representa las inversiones, está compuesto por: f forestal, g ganadera, sp
    silvopastoril, bt bonos del tesoro, bg bono ganadero y l letra de regulación monetaria.
14
15 # Parametros auxiliares epsilon/nulos para poder expresar algunas restricciones
16 param z_null, symbolic, in Z; # Zona de manejo agroforestal nula
17 param m_null, symbolic, in M; # Densidad nula de árboles por hectárea para la actividad
    forestal.
18 param n_null, symbolic, in N; # Densidad nula de árboles por hectárea para la actividad
    silvopastoril.
19 param f_null, symbolic, in F; # Especie forestal nula
20 param g_null, symbolic, in G; # Forma de realizar las actividades ganaderas nula
21 param p_null, symbolic, in P; # Posible pastura nula
22 param w_null, symbolic, in W; # Tasas de interés nula del bono del tesoro
23 param y_null, symbolic, in Y; # Tasas de interés nula del letra de regulación monetaria nula
24 param v_null, symbolic, in V; # Tasas de interés nula del bono ganadero nula
25
26 # Parametros
27 param t_z {Z}; #t_z:Z→R, es el tamaño en hectáreas de la zona z Z
28 param s_z {Z}; #s_z:Z→R, es el efecto sobre el volumen producido (árboles y forraje) por el
    tipo de suelo de la zona z Z
29 param a_z {S,Z}; #a^s_z:S-→{0,1} representan si la actividad s está aceptada en la
    zona z Z
30 param d_z {Z}; #d_z:Z→{0,1} representa si se es dueño o se alquila la zona z Z (dependiendo
    de eso y la zona se usa un precio/hectarea de compra o alquiler de uno u otro)
31 param P_j {J}; #P_0 en R, es el presupuesto inicial de inversión #P_j en R, es el presupuesto
    para cada periodo operativo j
32 param i; # tasa de descuento (para cálculo del VAN)
33 param i_uyu; # tasa de descuento pesos para LRM (para cálculo del VAN)
34
35 # Parametros para el calculo del VAN
36 param R {J, S, Z, F, P, M, N, G, W, Y, V} default 0;
37 param C {J, S, Z, F, P, M, N, G, W, Y, V} default 0;
38 param I { S, Z, F, P, M, N, G, W, Y, V} default 0;
39
40 # parametro auxiliar VAN para poner valores en concreto.
41 param VAN {S, Z, F, P, M, N, G, W, Y, V} default 0;
42
43 # Variable del modelo
44 var x {S, Z, F, P, M, N, G, W, Y, V} binary;
45
46 # Modelo
47 maximize van;
```

```

48 |     sum {s in S} sum {z in Z} sum {f in F} sum {p in P} sum {m in M} sum {n in N} sum {g in G}
    sum {w in W} sum {y in Y} sum {v in V} (
49 |         VAN[s, z, f, p, m, n, g, w, y, v] * x[s, z, f, p, m, n, g, w, y, v]);
50 |
51 | # Restricciones
52 |
53 | # No tomar más de una decisión por zona. El modelo permite dejar zonas sin ningún sistema
    asignado
54 | subject to unicidad_zona {z in Z}:
55 |     sum {s in S} sum {f in F} sum {p in P} sum {m in M} sum {n in N} sum {g in G} x[s, z, f,
    p, m, n, g, "w_null", "y_null", "v_null"] <= 1;
56 |
57 | # Las decisiones tomadas cumplen con las actividades aceptadas para cada zona
58 | # (Actividad forestal)
59 | subject to acepta_forestacion {s in S, z in Z, f in F, m in M : s == "f" && z != "z_null" && f
    != "f_null" && m != "m_null"}:
60 |     (x[s, z, f, "p_null", m, "n_null", "g_null", "w_null", "y_null", "v_null"]) <= a_z["f"
    , z];
61 |
62 | # (Actividad silvopastoril)
63 | subject to acepta_silvopastoreo {s in S, z in Z, f in F, p in P, n in N, g in G: s == "sp" &&
    z != "z_null" && f != "f_null" && p != "p_null" && n != "n_null" && g != "g_null"}:
64 |     (x[s, z, f, p, "m_null", n, g, "w_null", "y_null", "v_null"]) <= a_z["sp", z];
65 |
66 | # (Actividad ganadera)
67 | subject to acepta_ganaderia {s in S, z in Z, p in P, g in G : s == "g" && z != "z_null" && p
    != "p_null" && g != "g_null"}:
68 |     (x[s, z, "f_null", p, "m_null", "n_null", g, "w_null", "y_null", "v_null"]) <= a_z["g"
    , z];
69 |
70 | # El conjunto de la suma de los inversiones iniciales tienen que ser menor o igual al
    presupuesto inicial de inversión
71 | subject to presupuesto_inicial:
72 |     sum {s in S} sum {z in Z} sum {f in F} sum {p in P} sum {m in M} sum {n in N} sum {g in G}
    sum {w in W} sum {y in Y} sum {v in V}
73 |         (I[s, z, f, p, m, n, g, w, y, v] * x[s, z, f, p, m, n, g, w, y, v]) <= P_j[0];
74 |
75 | # La diferencia entre costos operativos y retornos anuales tienen que ser menor que el
    presupuesto operativo anual para cada uno de los periodos j.
76 | subject to presupuesto_operativo {j in 1..h}:
77 |     sum {s in S} sum {z in Z} sum {f in F} sum {p in P} sum {m in M} sum {n in N} sum {g in G}
    sum {w in W} sum {y in Y} sum {v in V}
78 |         ((C[j, s, z, f, p, m, n, g, w, y, v] - R[j, s, z, f, p, m, n, g, w, y, v]) * x[s, z, f,
    p, m, n, g, w, y, v]) <= P_j[j];

```