

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS Y FORESTALES**  
**CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL**



**DETERMINACIÓN DEL VALOR ECOSISTÉMICO DEL  
ARBOLADO URBANO EN LAS AVENIDAS VIARIAS DE LA  
CIUDAD DE TARIJA, MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL  
SOFTWARE i-Tree eco**

**Por:**

**SIMAR LORENZO RAMIREZ DURAN**

Tesis presentada a consideración de la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”, como requisito para optar el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Forestal.

Gestión 2022

**TARIJA – BOLIVIA**

Vº Bº

.....  
Ing. Javier Ariel Castillo Gareca  
**PROFESOR GUÍA**

.....  
M.Sc. Ing. Sebastián Ramos Mejía  
**DECANO a.i.**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**AGRÍCOLAS Y FORESTALES**

.....  
M.Sc. Ing. Edwin Dellmis Florez Segovia  
**VICEDECANO a.i.**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**AGRÍCOLAS Y FORESTALES**

**APROBADO POR:**

**TRIBUNAL:**

.....  
M.Sc. Ing. Fidel Ibarra Martínez  
**TRIBUNAL**

.....  
M.Sc. Ing. Carlos Alberto Cossío Narváz  
**TRIBUNAL**

.....  
M.Sc. Ing. Edwin Fernando Hiza Sánchez  
**TRIBUNAL**

El tribunal calificador de la presente tesis de grado, no se solidariza con la forma, términos, modos y expresiones vertidas en el trabajo, siendo las mismas únicamente responsabilidades del autor.

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis a mis padres, quienes siempre me han apoyado y animado en todos mis desafíos. Su amor inquebrantable y su fe en mí han sido mi luz y guía a lo largo de este camino. Gracias por todo.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por brindarme todas las bendiciones que he recibido en mi vida y por darme la fuerza y la guía para superar los desafíos.

A mis padres, por su inquebrantable apoyo durante mi trayectoria académica. Su aliento, orientación y amor han sido invaluable para ayudarme a alcanzar este hito. Sin sus sacrificios, no habría podido completar esta etapa. Gracias, mamá, papá y hermanita.

A mi novia Dina, por su apoyo y sacrificio constante, principalmente por su ayuda en la toma de los datos en campo.

A mi profesor guía y todos mis docentes, por su orientación, enseñanza y guía constante a lo largo de todo el proceso. También quiero agradecer a mi familia y amigos por su apoyo incondicional, y a mis compañeros de estudio por su colaboración y motivación.

Al equipo de i-Tree, por permitirme adaptar el software de i-Tree Eco para mi ciudad y obtener los resultados requeridos.

Agradezco a todas las fuentes que he utilizado en mi investigación por su contribución al desarrollo de mi trabajo y a los profesionales de mi campo de estudio que generosamente compartieron su tiempo y conocimientos para ayudarme en mi tesis. Por último, agradezco a todos los lectores que se tomarán el tiempo de leer esta tesis y espero que encuentren valor y significado en mi trabajo.

## **PENSAMIENTO**

"Los árboles enseñan a las personas un gran valor: a permanecer enraizados mientras se elevan hacia el cielo".

Paulo Coelho

## ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

PENSAMIENTO

Resumen

INTRODUCCIÓN ..... 1

JUSTIFICACIÓN ..... 4

OBJETIVOS ..... 5

    Objetivo general ..... 5

    Objetivos específicos..... 5

### CAPÍTULO I

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA ..... 6

    1.1. El papel esencial de las áreas verdes y el arbolado urbano ..... 6

    1.2. Contexto de áreas verdes y del arbolado urbano en la ciudad de Tarija ..... 10

    1.3. Los servicios ecosistémicos proporcionados por el arbolado urbano ..... 12

    1.4. El papel del arbolado urbano en la mitigación del cambio climático ..... 24

    1.5. El pago por servicios ecosistémicos..... 25

    1.6. i-Tree eco, como un modelo de cuantificación de servicios ecosistémicos ..... 26

    1.7. Casos de estudio y aplicaciones del software i-tree eco en ciudades similares 27

### CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS ..... 30

    2.1. Descripción de la zona de estudio ..... 30

    2.2. Materiales y equipos..... 39

    2.3. Metodología ..... 40

### CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN ..... 87

    3.1. Análisis y caracterización de la estructura arbórea ..... 87

    3.2. Determinación y valoración de los servicios ecosistémicos ..... 98

    3.3. Discusión ..... 111

## CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	115
4.1. Conclusiones .....	115
4.2. Recomendaciones .....	116
BIBLIOGRAFÍA .....	117
ANEXOS .....	126

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. El ciclo hidrológico en un ecosistema forestal.</i> .....	23
<i>Ilustración 2. Levantamiento florístico durante el censo forestal</i> .....	42
<i>Ilustración 3. Medición de la altura del árbol</i> .....	59
<i>Ilustración 4. Visual del operador entre la cima y la base del árbol.</i> .....	60
<i>Ilustración 5. Visual del operador por debajo de la base del árbol.</i> .....	61
<i>Ilustración 6. Visual del operador por encima del ápice del árbol.</i> .....	61
<i>Ilustración 7. Variables para la medida de copa de un árbol</i> .....	62
<i>Ilustración 8. Toma de medidas para el diámetro de copa.</i> .....	63
<i>Ilustración 9. Tipos de forma geométrica de copa.</i> .....	64
<i>Ilustración 10. Medición de copa faltante.</i> .....	66
<i>Ilustración 11. Ejemplos de clasificación de muerte regresiva y condición de copa.</i> .....	68
<i>Ilustración 12. Ejemplos de grados de exposición de la copa hacia la luz solar</i> .....	69
<i>Ilustración 13. Medición del Diámetro a la Altura de Pecho (DAP) a 1,3 metros.</i> .....	70
<i>Ilustración 14. Medición del diámetro a la altura del pecho (DAP) de los árboles</i> .....	71

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Variables de temperatura media (1962 -2020)</i> .....	35
<i>Tabla 2. Atributos de los transectos establecidos</i> .....	41
<i>Tabla 3. Datos de precipitación anual de NASA y SENAMHI</i> .....	50
<i>Tabla 4. Análisis estadístico de los datos de precipitación</i> .....	52
<i>Tabla 5. Análisis estadístico de los datos de precipitación para la gestión 2019.</i> .....	54

<b>Tabla 6.</b> Ejemplo de plantilla de datos de precipitación (metros/hora).....	55
<b>Tabla 7.</b> Rangos de clasificación de la salud de copa.....	67
<b>Tabla 8.</b> Valoración de los árboles según los lados por los que recibe luz solar .....	69
<b>Tabla 9.</b> Ejemplo de datos para la simulación individual de especies.....	86
<b>Tabla 10.</b> Especies forestales identificadas dentro del área de estudio.....	87
<b>Tabla 11.</b> Número de especies forestales por familia.....	89
<b>Tabla 12.</b> Valor de importancia de las especies arbóreas .....	92
<b>Tabla 13.</b> Estadística descriptiva de los parámetros dasométricos del censo forestal .....	93
<b>Tabla 14.</b> Las 10 especies más pobladas en el área de estudio .....	95
<b>Tabla 15.</b> Influencia individual para la captura y secuestro de carbono.....	100

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1.</b> Distribución de la precipitación durante la gestión 2019 .....	36
<b>Gráfico 2.</b> Climograma de la ciudad de Tarija (1962 - 2020).....	38
<b>Gráfico 3.</b> Concentración horaria de PM <sub>2,5</sub> para 2019. ....	46
<b>Gráfico 4.</b> Concentración horaria de O <sub>3</sub> para 2019. ....	47
<b>Gráfico 5.</b> Concentración horaria de NO <sub>2</sub> para 2019.....	48
<b>Gráfico 6.</b> Comparación de datos de NASA con SENAMHI .....	51
<b>Gráfico 7.</b> Análisis de correlación lineal de los datos de precipitación .....	52
<b>Gráfico 8.</b> Precipitación por hora para la gestión 2019.....	53
<b>Gráfico 9.</b> Composición de especies en la valoración ecosistémica .....	90
<b>Gráfico 10.</b> Origen nativo o exótico .....	90
<b>Gráfico 11.</b> Estatus de origen de la especie por continente .....	91
<b>Gráfico 12.</b> Porcentaje de la población de árboles por clase de diámetro.....	94
<b>Gráfico 13.</b> Distribución de las especies por clase de DAP.....	95
<b>Gráfico 14.</b> Cobertura de dosel del estrato arbóreo .....	96
<b>Gráfico 15.</b> Composición de área y biomasa foliar.....	97
<b>Gráfico 16.</b> Biomasa arbórea .....	97
<b>Gráfico 17.</b> Secuestro bruto anual de carbono (barras) y valor (puntos).....	98
<b>Gráfico 18.</b> Almacenamiento de carbono (barras) y valor (puntos) .....	99
<b>Gráfico 19.</b> Especies que más oxígeno producen al año.....	101

<i>Gráfico 20. Eliminación anual de la contaminación (barras) y valor (puntos).....</i>	102
<i>Gráfico 21. Principales especies forestales que eliminan PM<sub>2.5</sub>.....</i>	103
<i>Gráfico 22. Principales especies forestales que eliminan O<sub>3</sub>.....</i>	104
<i>Gráfico 23. Principales especies forestales que eliminan NO<sub>2</sub>. ....</i>	105
<i>Gráfico 24. Especies que más contribuyen a la emisión de COVBs anual .....</i>	106
<i>Gráfico 25. Escurrimiento evitado por los árboles para el 2019.....</i>	108
<i>Gráfico 26. Efectos hidrológicos del arbolado urbano .....</i>	109

## ÍNDICE DE MAPAS

<i>Mapa 1. Ubicación del área de estudio .....</i>	31
<i>Mapa 2. Ubicación y esquematización de los transectos variables para el censo forestal. ....</i>	149

## ÍNDICE DE ANEXOS

<i>Anexo 1. Especies forestales evaluadas. ....</i>	126
<i>Anexo 2. Valor de Importancia de las especies arbóreas. ....</i>	127
<i>Anexo 3. Población total por clases diamétricas. ....</i>	129
<i>Anexo 4. Composición de cobertura, área foliar, biomasa foliar y área basal. ....</i>	130
<i>Anexo 5. Cuantificación de servicios ecosistémicos en carbono y oxígeno. ....</i>	131
<i>Anexo 6. Eliminación de contaminantes por parte del arbolado urbano. ....</i>	133
<i>Anexo 7. Efectos hidrológicos del arbolado urbano. ....</i>	136
<i>Anexo 8. Emisión de COVBs del arbolado de urbano. ....</i>	138
<i>Anexo 9. Simulación de la capacidad de captura de carbono y eliminación de contaminantes .....</i>	139
<i>Anexo 10. Recopilación de datos digitalmente con Mobile Data Collection (MDC). ....</i>	143
<i>Anexo 11. Mensuración de datos de estructura del arbolado urbano. ....</i>	143
<i>Anexo 12. Planilla de recopilación de datos en campo. ....</i>	145
<i>Anexo 13. Inicio del software i-Tree Eco .....</i>	146
<i>Anexo 14. Ventana principal del software i-Tree Eco .....</i>	146
<i>Anexo 15. Reportes del proyecto en el software i-Tree Eco .....</i>	147
<i>Anexo 16. Vista del arbolado urbano.....</i>	148

## APÉNDICES

1. **Apéndice 3:** Coeficientes de sombreado de las copas, disponible en: <https://doi.org/10.2737/NRS-GTR-200-2021-Appendix3>
2. **Apéndice 4:** Factores de conversión de área foliar a biomasa, disponible en: <https://doi.org/10.2737/NRS-GTR-200-2021-Appendix4>
3. **Apéndice 10:** Nuevas ecuaciones alométricas de biomasa arbórea, disponible: en <https://doi.org/10.2737/NRS-GTR-200-2021-Appendix10>
4. **Apéndice 11:** Densidades de madera en estado anhidro, disponible en: <https://doi.org/10.2737/NRS-GTR-200-2021-Appendix11>
5. **Apéndice 12:** Tasas de emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV), disponible en: <https://doi.org/10.2737/NRS-GTR-200-2021-Appendix12>