

# ARTÍCULO 5

# Análisis multitemporal del cambio de uso de suelo y vegetación natural en la Reserva Nacional de Flora y Fauna Tariquía

Leaño Sanabria Juan Jacobo<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup> *Docente Carrera de Ingeniería en Medio Ambiente Sub Sede Entre Ríos. Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales, Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.*

\* **Correspondencia del autor:** [jleanosanabria@gmail.com](mailto:jleanosanabria@gmail.com)

## Resumen:

El presente estudio es sobre el análisis multitemporal de los cambios de uso de suelo y la vegetación natural mediante un monitoreo utilizando imágenes satelitales Landsat para conocer el estado en que se encuentra la cobertura vegetal en el periodo 1989 – 2020 de la Reserva Natural de Flora y Fauna Tariquía los cuales han experimentado importantes transformaciones antes de su creación por la excesiva extracción de madera y sus consecuencias. La metodología partió de la utilización y digitalización de imágenes satelitales Landsat debidamente georreferenciadas, se trabajó con una escala 1:400000; así mismo, se utilizó el programa ArcGIS para el procesamiento de la información. En el análisis se estableció como han sido las variaciones en las coberturas vegetales en el tiempo, la deforestación sobre las áreas boscosas, la tasa de deforestación es bastante baja, la caracterización de la cobertura vegetal boscosa mediante el índice de vegetación de diferencia normalizada vegetal, la vegetación alta para el año 1989 con 69.2% indica plantas medianamente sanas a muy sanas, cambia el año 2020 a vegetación media con 90.8% con plantas enfermas. En el caso de la evaluación de la biodiversidad vegetal, el índice de Margalef indica cantidad significativa de especies con alta biodiversidad, Menhinick indica alta

diversidad del ecosistema, Simpson indica que no hay especies dominantes, Shannon-Wiener indica una comunidad equitativa, y Pielou indica que todas las especies son abundantes. Los que tienen mayor índice de valor de importancia son las especies Barroso (*Blepharocalyx salicifolius*), Arrayan (*Eugenia multiflora*), Tipa (*Tipuana tipu*), Laurel (*Ocotea* sp.) y cebil (*Anadenanthera colubrina*). Las clases diamétricas no presentan la J invertida, la cual indica que no existe buena regeneración natural, esto principalmente es porque se encuentran en un hábitat que presenta una alta fragilidad a la intervención, ya sea por deforestación, trashumancia de ganado o por actividades agrícolas. En general de toda la superficie considerada se estima que el 50% del área tiene muy buen estado de conservación.

## Abstract

This study is about the multitemporal analysis of changes in land use and natural vegetation through monitoring using Landsat satellite images to know the state of the vegetation cover in the period 1989-2020 of the Natural Reserve of Flora and Fauna

**Palabras clave:** Análisis multitemporal, Análisis de coberturas, Imágenes satelitales, Deforestación.

**Keywords:** Multitemporal analysis, Coverage analysis, Satellite images, Deforestation.

Tariquia which have undergone important transformations before their creation due to the excessive extraction of wood and its consequences. The methodology started from the use and digitization of properly georeferenced Landsat satellite images, working with a scale of 1: 400000; likewise, the ArcGIS program was used for information processing.

In the analysis, it was established how the variations in vegetation cover have been over time, deforestation on forested areas, the deforestation rate is quite low, the characterization of the forest vegetation cover by means of the vegetation index of normalized vegetal difference, the tall vegetation for the year 1989 with 69.2% indicates moderately healthy plants to very healthy, changes the year 2020 to medium vegetation with 90.8% with diseased plants. In the case of the evaluation of plant biodiversity, the Margalef index indicates a significant number of species with high biodiversity, Menhinick indicates high ecosystem diversity, Simpsons indicates that there are no dominant species, Shannon-Wiener indicates an equitable community, and Pielou indicates that all species are abundant. Those with the highest index of importance value are the Barroso (*Blepharocalyx salicifolius*), Arrayan (*Eugenia multiflora*), Tipa (*Tipuana tipu*), Laurel (*Ocotea* sp.) And cebil (*Anadenanthera colubrina*) species. The diameter classes do not present the inverted J, which indicates that there is no good natural regeneration, this is mainly because they are in a habitat that presents a high fragility to the intervention, either due to deforestation, cattle transhumance or agricultural activities. In general, of the entire area considered, it is estimated that 50% of the area has a very good state of conservation.

## 1. Introducción

La deforestación es la mayor amenaza para la subsistencia de los bosques en Bolivia. En las últimas tres décadas, las tasas de deforestación se han incrementado notoriamente en el país in-

cluyendo las áreas protegidas, como resultado de distintas fuerzas económicas y sociales propias de las regiones del mundo en desarrollo. Las mayores causas para la destrucción de los bosques son la migración de campesinos que practican la agricultura de subsistencia, la agricultura mecanizada y el establecimiento de pasturas para la ganadería (Resnikowski, 2010).

Durante el siglo XX, Bolivia convirtió entre 3 y 4 millones de hectáreas de bosque para expandir la frontera agrícola en las tierras bajas. Otros 3 millones de hectáreas se perdieron durante la primera década del siglo XXI. Si no se cambian estas tendencias de deforestación acelerada, Bolivia estaría totalmente deforestada antes de llegar al final de este siglo. (Andersen, 2014).

De acuerdo al último reporte realizado por Global Forest Watch el 31 de marzo del 2021, Bolivia perdió más de 430 mil hectáreas de cobertura arbórea, de las cuales 277 mil hectáreas corresponden a bosque primario, es decir bosques que mantenían su estado original, sin haber sido afectados por la acción humana. Bolivia perdió 6.11 millones de hectáreas de bosques, lo que equivale a una disminución del 9.5% de la cobertura arbórea desde el 2000. Esta cifra es realmente alarmante ya que son muy pocos los países que han visto disminuir sus bosques en un periodo de tiempo tan corto. Cabe resaltar que, Santa Cruz es responsable del 68% de la pérdida de bosques en el país.

Esta situación aparentemente ineludible de pérdida de la biodiversidad genera la siguiente pregunta: ¿para qué esforzarse para reducir la deforestación, si la selva desaparecerá de todos modos? Sin embargo, resulta que existen fuertes interacciones entre la deforestación y el cambio climático que indicarían que la deforestación podría aumentar aún más los impactos adversos del cambio climático (Suarez, 2006). La deforestación, por ejemplo, aumenta la probabilidad de inundaciones y erosión de suelos, así como también afecta el microclima además del clima regional y global.

La mayoría de estos bosques se encuentran bajo influencia humana por diferentes motivos y factores. El presente trabajo, se enmarca en una aplicación de tecnologías espaciales para el estudio de la tierra, recursos naturales y medio ambiente, a través de un análisis espacial en entorno SIG Ráster (álgebra de mapas), complementado con un SIG vectorial. En este sentido, el presente documento abarca la definición de áreas propensas a ser deforestadas por orden de grado (mayor o menor susceptibilidad); y a la susceptibilidad de los ecosistemas de entrar en procesos de desertificación, por efecto de los cambios climáticos globales.

El área, actualmente con intervención agrícola y ganadera, presenta una gama variada de factores que influyen en el uso del territorio. La mayor actividad agrícola es la producción del cultivo de maíz.

## 2. Materiales y métodos

Las características generales de la Reserva Nacional de Flora y Fauna Tariquia se indican a continuación:

<b>Creación</b>	2 de agosto de 1.989
<b>Base Legal</b>	D.S. N°22277 en 1.989 y bajo Ley N° 1328 del 23 de abril de 1.992.
<b>Objetivos de Creación</b>	Conservar la biodiversidad del ecosistema de Yungas Andinos (Bosque Nublado) y de sus fundones ecológicas como la producción y purificación de agua de los ríos Bermejo y Grande de Tarija, además de sus funciones económicas.
<b>Estratos de Manejo</b>	Reserva Nacional de Flora y Fauna, equivalente a Reserva de Vida Silvestre de acuerdo al Reglamento General de Áreas Protegidas (RGAP).
<b>Ubicación</b>	Situada al suroeste del departamento de Tarija en las provincias Arce, Cercado, Burnet O'Connor y Gran Chaco, involucra a los municipios de Padcaya, Tarija, Entre Ríos y Caraparí.
<b>Coordenadas Geográficas</b>	Coordenadas geográficas del cuadrante de referencia 21° 45' 17,2" latitud Sur; 64° 36' 10,6" longitud Oeste a 22° 20' 11,3" latitud Sur; 64° 05' 13,1 "longitud Oeste.
<b>Superficie</b>	Según Decreto de Creación: 246.870 ha
<b>Accesibilidad</b>	El ingreso al área es muy complicado debido a sus características topográficas. Se puede ingresar desde Tarija hasta Emborozú e ingresar por Sidras o por Bermejo por la región del Cajón. El ingreso al interior de la reserva se realiza por sendas o caminos de herradura, no existen caminos para transporte vehicular.

Cuadro N°1: Datos generales de la RNFFT

Fuente: (SERNAP, 2019)

Para la obtención de imágenes de satélite, primero se ubicó el área de estudio para luego extraer las imágenes de diferentes años o temporadas de la página Web Earthexplorer.usgs.gov Además, se seleccionaron los sensores Landsat con nubosidad 10%, de los cuales se obtuvieron resultados de imágenes en diferentes fechas. De acuerdo a esta adquisición se obtuvieron y se utilizaron seis imágenes, cuatro del sensor Landsat 5 TM y dos de Landsat 8 OLI/TIRS, con diferencia de cuatro y cinco años en cada imagen satelital.

Para el procesamiento de las imágenes satelitales se usaron el programa ArcGis 10.5. La secuencia de trabajo se inicia con la importación y combinación de banda 7 (infrarrojo medio) en rojo, banda 4 (infrarrojo cercano) en verde y banda 3 (rojo), obteniendo un único archivo por imagen.

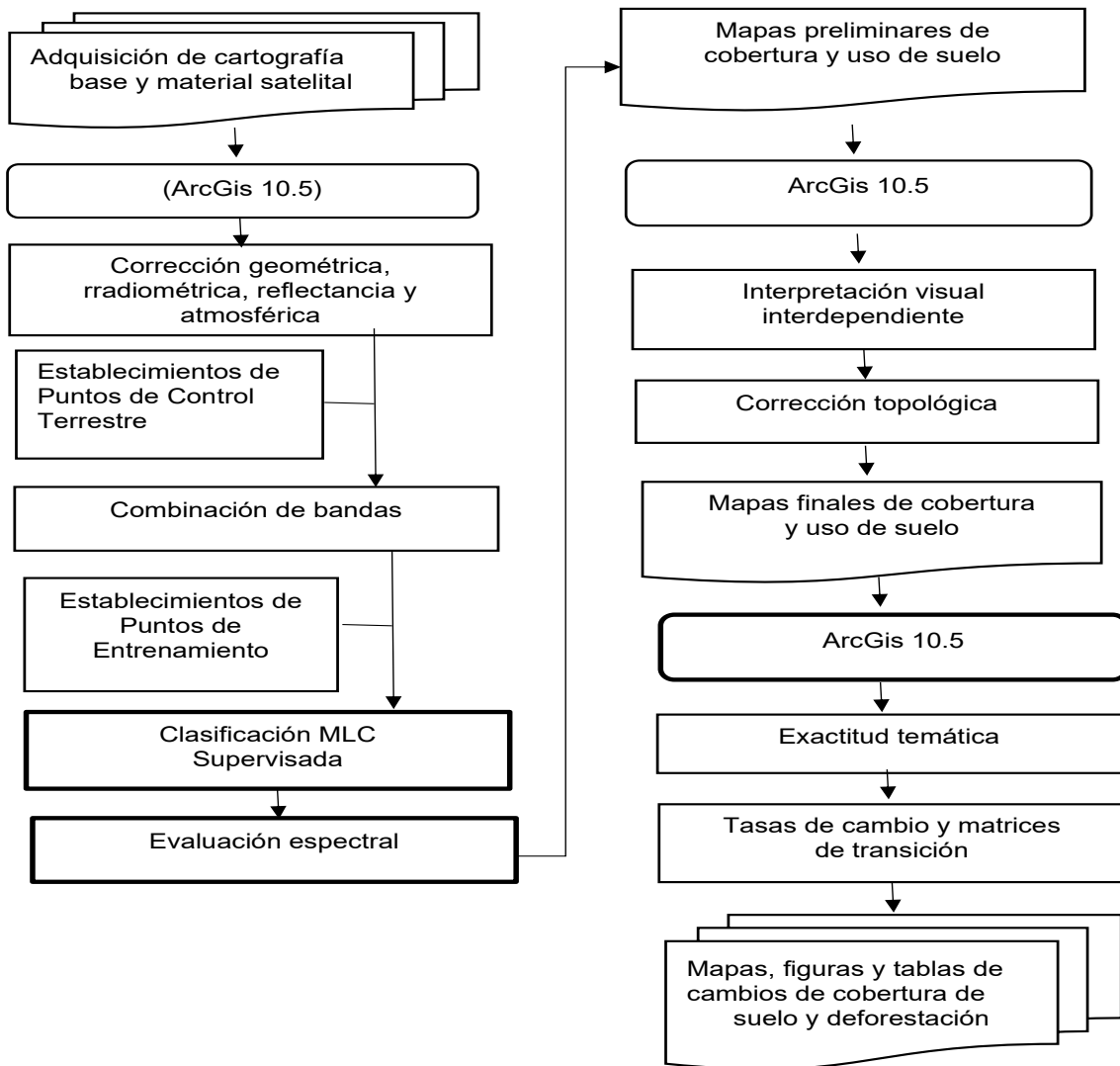


Figura N°1: Diseño metodológico para para el procesamiento de las imágenes satelitales

Fuente: Elaboración Propia

El pre procesamiento de las imágenes satelitales fue procesado de manera automática en el software ArcGis, con los siguientes pasos:

a. Corrección geométrica

Las imágenes Landsat descargadas del Departamento Geológico de los Estados Unidos de Norte América, U.S. Geological Survey USGS, ya están georreferenciados, pero están en una proyección WGS\_1984\_UTM zona \_20S, al encontrarse proyectado en la zona 20 Norte debemos reproyectar la imagen a 20 Sur que es la zona a la que pertenece el área de estudio.

b. Corrección radiométrica

Se usó el método de ganancia y sesgo, los valores o niveles digitales ND se convierten en valores de radiancia espectral en el sensor. El primer paso para la corrección es la conversión a radiancia. Para esto en ENVI 5.3 se debe ir a la opción de Toolbox/Radiometric Correction/ Radiometric Calibration/ Tipo de calibración: radiance; la imagen inicialmente se despliega dividida en 5 segmentos: multiespectral (que posee los infrarrojos), la banda cirrus, térmica, pancromática y calidad. De todas las opciones que se muestran se debe seleccionar la que termina con MultiSpectral y asignar los diferentes valores de calibración radiométrica.

c. Corrección reflectancia

Una vez obtenida la radiancia espectral se procedió a realizar la corrección de la reflectancia aparente para lo cual se usó la herramienta ENVI 5.3 opción de Toolbox/Radiometric Correction/ Radiometric Calibration/ Tipo de calibración: reflectance.

d. Corrección atmosférica

La corrección atmosférica se realizó con software ArcGis 10.5, herramienta atmospheric correction mediante un proceso automático por sus algoritmos propios del software, se realizó la remoción atmosférica de partículas en suspensión.

Para Landsat 8 además de ayudarnos a corregir

atmosféricamente nuestras imágenes, también nos permite trabajar a través del refinado o técnica pansharpening aumentando la resolución espacial de las bandas, realizar recortes mediante AOI o desempeñar funciones de reclasificación de usos del suelo. La gran mayoría de aplicaciones de corrección, requerirá de los metadatos anexos a las bandas Landsat a corregir y desde el que disponer de los parámetros de radiancia y reflectancia. Por tanto, junto a las bandas de trabajo a corregir atmosféricamente, requeriremos del archivo TXT de metadatos asociado. Los resultados de GEOBIA nos devolverán un repertorio de bandas generadas en cascada que serán corregidas a nivel de radiancia y reflectancia (junto al refinado pansharpening inicial).

### 3. Identificación de las clases de Cobertura y Uso del Suelo (CUS)

Para el cambio de cobertura y uso del suelo se identificaron seis clases de CUS de acuerdo a la clasificación de la vegetación de Bolivia de Navarro 2011, para los años 1989, 1996, 2001, 2005, 2010, 2014, 2018 y 2020 las clases son: Bosque Subhúmedo Subandino, Bosque Subhúmedo, Pajonal Altoandino, Bosque Seco, Bosque Freatófilo y Áreas antrópicas.

### 4. Clasificación de máxima verosimilitud o probabilidad máxima

El algoritmo que utiliza la herramienta Clasificación de máxima verosimilitud se basa en dos principios:

- ⊙ Las celdas en cada muestra de clases del espacio multidimensional que se distribuyen normalmente
- ⊙ El teorema de Bayes de toma de decisiones

La herramienta tiene en cuenta las varianzas y covarianzas de las firmas de clases cuando asigna cada celda a una de las clases representadas en el archivo de firma.

Si se asume que la distribución de una muestra de clases es normal, una clase puede estar caracterizada por el vector del valor medio y la matriz de covarianza. Dadas estas dos características para cada valor de celda, se calcula la probabilidad estadística para cada clase a fin de determinar la pertenencia de las celdas a la clase. Cuando se especifica de forma predeterminada la opción Ponderación de la probabilidad a priori Igual, cada celda se asigna a la clase a la que tiene mayor probabilidad de pertenecer. Si la probabilidad de ocurrencia de algunas clases es mayor (o menor) que el promedio, se debe usar la opción Archivo a priori con un Archivo de probabilidades a priori de entrada. Los pesos de las clases con probabilidades especiales se especifican en el archivo a priori. En este caso, un archivo a priori ayuda a asignar las celdas que se superponen estadísticamente entre dos clases. Estas celdas se asignan con mayor exactitud a la clase adecuada, dando como resultado una mejor clasificación. Este enfoque de ponderación para la clasificación se conoce como el clasificador bayesiano.

Al elegir la opción Muestra a priori, las probabilidades a priori asignadas a todas las muestras de clases en el archivo de firma de entrada son proporcionales a la cantidad de celdas capturadas en cada firma. Por consiguiente, las clases que tienen menos celdas que el promedio en la muestra reciben pesos menores que el promedio, y las que tienen más celdas reciben pesos mayores que el promedio. Como resultado, las clases respectivas tienen más o menos celdas asignadas.

Cuando se realiza una clasificación de máxima verosimilitud, también se puede producir un ráster de confianza de salida opcional. Este ráster muestra los niveles de confianza de la clasificación. La cantidad de niveles de confianza es 14, que se relaciona directamente con la cantidad de

valores de fracción de rechazo válidos. El primer nivel de confianza, codificado en el ráster de confianza como 1, comprende celdas con la menor distancia hasta cualquier vector de valor medio almacenado en el archivo de firma de entrada; por lo tanto, la clasificación de estas celdas tiene una mayor certeza. Las celdas que constituyen el segundo nivel de confianza (valor de celda 2 en el ráster de confianza) se clasificarán solo si la fracción de rechazo es 0,99 o menor. El nivel de confianza más bajo tiene un valor de 14 en el ráster de confianza y muestra las celdas que posiblemente estén mal clasificadas. Las celdas de este nivel no se clasificarán cuando la fracción de rechazo sea 0,005 o mayor. Si no hay celdas clasificadas en un nivel de confianza determinado, ese nivel de confianza no estará presente en el ráster de confianza de salida.

## 5. Deforestación para el periodo 1989 – 2020

Para comprobar la deforestación se utilizó la clasificación supervisada la cual permite explorar diferentes tipos de atributos o clases por medio del análisis estadístico multivariado, este proceso identifica los valores de cada píxel de una o varias bandas de una imagen ráster, crea y evalúa las clases o clúster (firmas), finalmente reclasifica de acuerdo a las probabilidades de cada clase. Este procedimiento es muy práctico para crear de forma automática un mapa de uso del suelo o de cobertura vegetal.

La clasificación supervisada en ArcGIS permite clasificar el ráster por medio de cada píxel de una celda, es necesario tener conocimiento previo de las clases del área de estudio de acuerdo a los sistemas ecológicos de Navarro. Se debe marcar puntos y asignar un valor numérico para cada clase.

Posteriormente se genera y guarda una firma espectral con la herramienta Create Signatures.

Con la herramienta Maximum Likelihood Classification usar la imagen ráster y el shapefile con el campo de los valores numéricos de cada clase.

Para convertir la imagen ráster a vector formato shapefile (sea a partir de la clasificación supervisada o no supervisada) se usa la herramienta Raster to Polygon.

El problema de los archivos \*.shp tipo poligonal obtenidos a partir de un ráster, es la gran cantidad de polígonos sin importancia significativa (micropolígonos), pero a su vez generan errores en cálculos y visualmente muestran las imperfecciones, para corregir este error con la herramienta de generalización Elimínate, se selecciona todos los registros en la tabla de atributos de acuerdo a un valor mínimo previamente establecido (ejemplo: marcar todos los valores menores a 100 metros cuadrados), para generalizar el shapefile, se puede aplicar cuantas veces sea necesario hasta conseguir el resultado deseado.

Todo esto se realizó para cada uno de las imágenes satelitales Landsat 5 de 1989, 1996, 2001, 2005 y 2010, Landsat 8 de 2014, 2018 y 2020.

## 6. Deforestación y su incremento para el periodo 1989 – 2020

Para el incremento de la deforestación fueron seleccionadas y preparadas, dos imágenes de satélite de muy alta resolución espacial, correspondientes al satélite Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI/TIRS.

En el análisis de detección de cambios, existió un lapso de 31 años que es significativo entre la toma de las imágenes que fueron comparadas, los cuales se apreciaron y cuantificaron los cambios ocurridos. Teniendo en cuenta la disponibilidad de imágenes y los cambios ocurridos en el territorio, la diferencia entre una imagen y otra es de tres años, pues fueron tomadas en los años 1989 y 2020.

Para el procesamiento digital de las imágenes se utilizó ArcGIS (versión 10.5).

Ambas imágenes fueron recortadas de las imágenes originales, siguiendo el criterio de obtener un área de estudio lo suficientemente variada en cuanto a variedades de uso de la tierra y que cubriera un territorio de dimensiones adecuadas, de unos 2469 km<sup>2</sup>, para su manejo automatizado y que además, permitiera el cumplimiento de los objetivos trazados para la investigación.

Una vez recortadas las imágenes que se emplearían en el trabajo, se pasó a la corrección geométrica de las bandas con las que se trabajaría (verde, roja e IR), Se escogió el procedimiento de corrección de imagen-mapa, mediante puntos de control, utilizando como base el mapa topográfico digital del área de estudio.

El ajuste geométrico se basó en la localización de una serie de puntos de control imagen a mapa. En consecuencia, resulta más sencilla la selección de puntos comunes al mapa y a las dos imágenes, destacando la ventaja de poder encontrar rasgos característicos de la vegetación.

Los puntos de control considerados fueron fundamentalmente cruces de caminos, que no varían con el tiempo. Se escogieron numerosos puntos de control (85), en correspondencia con el grado de complejidad de la imagen, con un nivel de error poco significativo, eliminándose todos aquellos que tuvieran un error marcado y considerando una distribución uniforme de estos sobre todo el territorio de la imagen.

Este proceso se dividió en cuatro etapas:

1. Selección de la proyección y el sistema de coordenadas: se utilizó la proyección Universal Transversal de Mercator (WGS 84, zona 20 Sur).
2. Selección de los puntos de control: en total se seleccionaron 85 puntos para ambas imágenes.
3. Selección del método de interpolación: vecino más cercano.
4. Análisis del error medio cuadrático obtenido: error medio 2.00 (en píxeles).

Cada imagen fue clasificada por separado, aplicando el método de clasificación supervisada,

disponible en las herramientas de procesamiento digital de imágenes, presentes en este SIG.

### 7. Tasas de cambio

Una vez generados los mapas de coberturas / usos del suelo de las distintas fechas se llevó a cabo la sobre posición cartográfica. Con esta información se determinaron las áreas correspondientes a los diferentes tipos de coberturas / usos del suelo. de esta manera se pudieron obtener las tasas anuales de cambio para los periodos 1989 – 2020.

Para obtener las tasas anuales de cambio, se utilizó la ecuación propuesta por FAO (1996):

$$\rho = \left(\frac{S2}{S1}\right)^{1/n} - 1 \quad \text{Ecuación N° (1)}$$

Donde:

$\rho$  = tasa anual de cambio

S1 = Superficie en la fecha 1

S2 = Superficie en la fecha 2

n = número de años entre las dos fechas

y también se utilizó la ecuación propuesta por Puyravaud (2003)

$$r = \frac{1}{t_2 - t_1} * \ln \frac{S2}{S1} \quad \text{Ecuación N° (2)}$$

Donde;

r = tasa anual de cambio

t2 y t1 = año final y inicio del estudio

S1 = Superficie en la fecha 1

S2 = Superficie en la fecha 2

### 8. Índice de vegetación de diferencia normalizada

Para calcular el índice de vegetación de diferencia normalizada se puede determinar a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, y es particularmente sensible a la cubierta vegetal, proporcionando una medida sobre la cantidad, calidad y desarrollo de la cobertura vegetal y vigorosidad en áreas extensas.

Es el índice de vegetación más utilizado para todo tipo de aplicaciones. La razón fundamental es su sencillez de cálculo, y disponer de un rango de variación fijo (entre -1 y +1), lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes, etc.

$$NDVI = \frac{(\rho_{SNIR} - \rho_{SRED})}{(\rho_{SNIR} + \rho_{SRED})} \quad \text{Ecuación N° (3)}$$

Donde:

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

$\rho_{SNIR}$ : Reflectancia de la banda Infrarrojo cercano – NIR.

$\rho_{SRED}$  : Reflectancia de la banda roja - RED

Ecuaciones para Landsat 5 y Landsat 8:

$$NDVI_{L5} = \frac{(\rho_{SB4} - \rho_{SB3})}{(\rho_{SB4} + \rho_{SB3})} \quad \text{Ecuación N° (4)}$$

$$NDVI_{L8} = \frac{(\rho_{SB5} - \rho_{SB4})}{(\rho_{SB5} + \rho_{SB4})} \quad \text{Ecuación N° (5)}$$

### Calcular NDVI en ArcGIS

Para calcular el NDVI simplemente se aplica su respectiva ecuación, cabe mencionar que dicho proceso se lo puede realizar en diferentes aplicaciones que cuenten con una calculadora de imágenes ráster (ArcGIS).

El primer paso luego de abrir la aplicación ArcMap 10.4 es cargar las bandas 3 y 4 para Landsat 5, 4 y 5 para Landsat 8 con la herramienta Add Data desde el directorio donde se encuentren almacenadas, seguidamente se muestra una ventana solicitando la creación de pirámides, en este caso dejar los valores por defecto y aceptar, cabe señalar que se requiere una licencia activa de la extensión Spatial Analyst, para ejecutar el Raster Calculator.

Una vez cargadas las bandas, desde la caja ArcToolbox, abrir la siguiente herramienta:

ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Map Algebra > Raster Calculator

Para obtener los valores NDVI en imágenes Landsat 5 usando ArcGIS se aplica la siguiente ecuación:

$$\text{NDVI} = \text{Float}(\text{banda } 4 - \text{banda } 3) / \text{Float}(\text{banda } 4 + \text{banda } 3)$$

Y para obtener NDVI en imágenes Landsat 8 usando ArcGIS se aplica la siguiente ecuación:

$$\text{NDVI} = \text{Float}(\text{banda } 5 - \text{banda } 4) / \text{Float}(\text{banda } 5 + \text{banda } 4)$$

El resultado es una imagen ráster que contiene valores que van desde -1 a 1 (siendo los valores más cercanos a 1 la vegetación más vigorosa). Generalmente la imagen del NDVI se muestra en una escala de grises, para dar un aspecto más agradable y de fácil interpretación, dirigirse a las propiedades del ráster y seleccionar una paleta de colores en la pestaña de simbología (clic derecho > Properties > Symbology).

Los resultados del cálculo del NDVI varían de -1 a 1. Los valores negativos corresponden a áreas con superficies de agua, estructuras artificiales,

rocas, nubes, nieve; el suelo desnudo generalmente cae dentro del rango de 0.1 a 0.2; y las plantas siempre tendrán valores positivos entre 0.2 y 1. El dosel de vegetación sano y denso debería estar por encima de 0.5, y la vegetación dispersa probablemente caerá dentro de 0.2 a 0.5. Sin embargo, es solo una regla general y siempre debe tener en cuenta la temporada, el tipo de planta y las peculiaridades regionales para saber exactamente qué significan los valores de NDVI.

Los valores de NDVI se agruparon utilizando como valores de referencia propuestos por Merg et al (2011).

Clasificación	Valor
<b>Nubes y Agua</b>	<0,01
<b>Suelo desnudo</b>	0,01-0,1
<b>Vegetación escasa</b>	0,1-0,2
<b>Vegetación media</b>	0,2-0,4
<b>Vegetación alta</b>	>0,4

Tabla N° 1: Clasificación de valores de NDVI

Fuente: Merg et al (2011)

## 9. Diversidad y el valor de importancia de la vegetación natural

En cada una de las parcelas se registró el número de especies, el número de individuos y la cobertura. Luego se calcularon la densidad, la dominancia y la frecuencia, tanto absoluta como relativa. Se obtuvo el índice de riqueza específica de Margalef; índice de diversidad de Menhinick, el índice de dominancia y diversidad de Simpson, el índice de equidad de Shannon-Wiener y Pielou y el Índice de Valor de Importancia (IVI) de cada especie.

La diversidad es el número de especies en una unidad de área que se mide a través de dos métodos: la riqueza específica basada en la cantidad de especies presentes y la estructura que mide la distribución proporcional del valor de importan-

cia. Este último se clasifica en la dominancia y en equidad de la comunidad (Moreno, 2001). Existen distintos tipos de diversidad: la local o diversidad  $\alpha$  (alfa), la diferenciación de la diversidad entre áreas o diversidad  $\beta$  (beta) y la diversidad (gamma) que reúne a las dos anteriores. En este estudio se utiliza la diversidad alfa que es la riqueza de especies de una comunidad particular a la que se considera homogénea (Smith, 2001).

### 10. Riqueza específica

El índice de Margalef (DMg) es una forma sencilla de medir la biodiversidad ya que proporciona datos de riqueza de especies de la vegetación. Mide el número de especies por número de individuos especificados o la cantidad de especies por área en una muestra (Margalef, 1969). el cual menciona que un índice con valores menores a 2,00 denotan una baja riqueza de especies y por el contrario valores cercanos a 5,00 o superiores reflejan una riqueza de especies alta. Su fórmula es:

$$D_{Mg} = \frac{S - 1}{\ln N} \quad \text{Ecuación N° (6)}$$

Donde:

S = número de especies

N = número total de individuos

El índice de diversidad de Menhinick (DMn) al igual que el índice de Margalef se basa en la relación entre el número de especies y el número total de individuos observados, que aumenta al aumentar el tamaño de la muestra.

$$D_{Mn} = \frac{S}{\sqrt{N}} \quad \text{Ecuación N° (7)}$$

Donde:

S = número de especies

N = número total de individuos

### 11. Estructura – índice de abundancia proporcional - Diversidad

El índice de dominancia de Simpson (DSi) considera la probabilidad que dos individuos de la población seleccionados al azar sean de la misma especie. Indica la relación existente entre riqueza o número de especies y la abundancia o número de individuos por especie los resultados entre 0 a 1 en el cual los valores cercanos a 1 explican la dominancia de una especie por sobre las demás Su expresión es:

$$D_{Si} = \sum_{i=1}^s p_i^2 \quad \text{Ecuación N° (8)}$$

Donde:

$p_i$  = igual a la proporción entre  $n_i$  y N

$n_i$  = número de individuos de la especie i

El índice de Shannon- Wiener ( $H'$ ) tiene en cuenta la riqueza de especies y su abundancia. Este índice relaciona el número de especies con la proporción de individuos pertenecientes a cada una de ellas presente en la muestra. Además, mide la uniformidad de la distribución de los individuos entre las especies. Su fórmula es:

$$H' = - \sum p_i \cdot \ln p_i \quad \text{Ecuación N° (9)}$$

Donde:

$p_i$  = igual a la proporción entre  $n_i$  y N

### 12. Índice de equidad

El índice de Pielou ( $J'$ ) se expresa como el grado de uniformidad en la distribución de individuos entre especies. Se puede medir comparando la diversidad observada en una comunidad contra la diversidad máxima posible de una comunidad hipotética con el mismo número de especies (Mo-

reno, 2001), posee valores que pueden variar de 0 a 1 siendo cercanos a 1 los que corresponden a situaciones donde todas las especies son igualmente abundantes. La fórmula es:

$$J' = \frac{H'}{H'max} \quad \text{Ecuación N° (10)}$$

Donde:

H'max = es el logaritmo natural de S

### 13. Índice de Valor de Importancia

Para el cálculo de los parámetros como densidad relativa, frecuencia relativa y dominancia relativa se empleó las siguientes fórmulas que se muestran a continuación: Desarrollado por Lamprecht 1990.

Cálculo del diámetro:

$$DAP = \frac{CAP}{\pi} \quad \text{Ecuación N° (11)}$$

Donde:

DAP = Diámetro Altura de pecho

CAP = Circunferencia altura pecho

Π = 3,1416

$$Db = \frac{n}{nt} \quad \text{Ecuación N° (12)}$$

Densidad absoluta:

Donde:

Db= abundancia absoluta

n= número de individuos por especie

nt= número total de individuos encontrados en el área de estudio

Densidad relativa:

$$Ar = \frac{ni}{nit} * 100 \quad \text{Ecuación N° (13)}$$

Donde:

Dr= abundancia relativa

ni= número de individuos de una enésima especie

nit= número de individuos totales en la muestra

Frecuencia absoluta:

$$Fra = \frac{np}{tp} \quad \text{Ecuación N° (14)}$$

Donde:

Fra= frecuencia absoluta

np= número de parcelas en que aparece una determinada especie

tp= total de parcelas inventariadas

Frecuencia relativa:

$$fr = \frac{fra\ esp}{tfm} * 100 \quad \text{Ecuación N° (15)}$$

Donde:

Fr = frecuencia relativa

fra esp= frecuencia absoluta de la enésima especie

tfm = total de las frecuencias en el muestreo

Dominancia absoluta:

$$Dom\ ab = \frac{ab\ esp}{abt\ esp} \quad \text{Ecuación N° (16)}$$

Donde:

Dom ab = dominancia absoluta

ab esp = área basal de la enésima especie

abt esp = área basal de todas las especies

Dominancia relativa:

Donde:

$$Dom\ rel = \frac{daesp}{dat} * 100 \quad \text{Ecuación N° (17)}$$

Dom rel = dominancia relativa

daesp = dominancia absoluta de una especie

dat = dominancia absoluta de todas las especies

Área basal:

Donde:

$$AB = \frac{\pi}{4} * DAP^2 \quad \text{Ecuación N° (18)}$$

AB= área basal

π = 3,1416

DAP = diámetro altura pecho (1,30)

Para el cálculo del índice de valor de importancia se aplicó la siguiente fórmula propuesta por Curtis & Mc Intosh (1951).

## 14. Índice de valor de importancia

$$IVI = Den\ rel + Fre\ rel + Dom\ rel \quad \text{Ecuación N° (19)}$$

Donde:

IVI= índice de valor de importancia

Den rel = densidad relativa

Fre rel = frecuencia relativa

Dom rel = dominancia relativa

## 15. Resultados

De acuerdo al análisis realizado, en la Reserva Nacional de Flora y Fauna Tariquia para el año 1989 la cobertura boscosa fue de 240150 has con el 97%, el que tiene mayor superficie es el Bosque húmedo. Para el año 2020 la cobertura boscosa fue de 235997 has con el 96% durante estos 31 años se perdió 4153 has representando el 1,7% de la superficie total, con una deforestación por año de 134 has, con lo cual se puede decir que hay una disminución continua, debida a la presión de la comunidad que habita en la reserva.

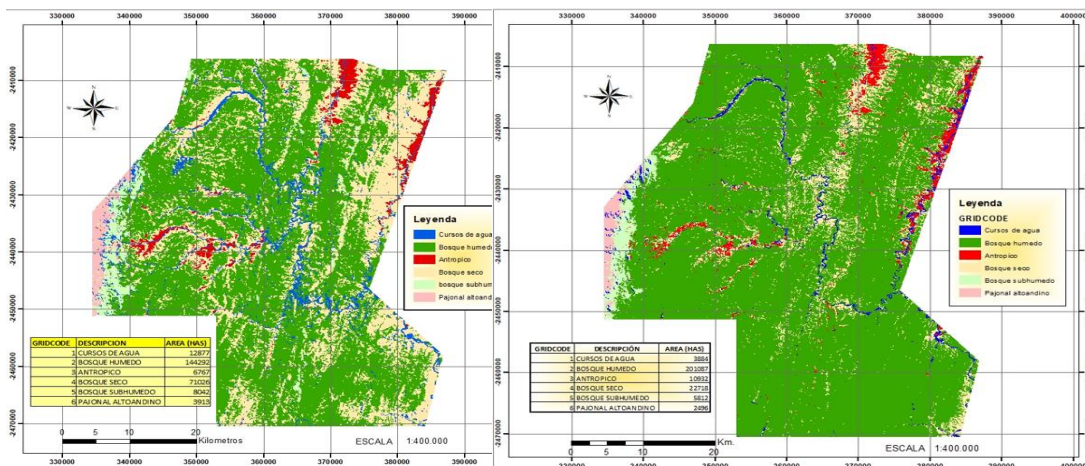


Figura N° 2: Cambio de cobertura y uso de suelo 1989–2020

Fuente: Elaboración Propia

Para calcular la tasa anual de deforestación se utilizó las tasas anuales de cambio propuesta por la FAO (1996) y por Puyravaud (2003):

Método	Tasa anual de cambio (ha/año)	Tasa anual de cambio (%)
FAO	0,016	1,6
Puyravaud	0,015	1,5

Tabla N° 2: Tasa de deforestación

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a la tabla N° 2 la tasa anual de cambio ambos son similares y bastante bajos.

De acuerdo a la tabla N° 3 y 4, el NDVI para el año 1989 es de 0.3 - 0.93 que corresponde a la vegetación alta con un 69.2% de la superficie total esto significa que las plantas se encuentran medianamente sanas a muy sanas, seguido de vegetación media con un NDVI de 0.2 – 0.3 con un 27.6% de la superficie total se encuentran con plantas enfermas.

En cambio, en la tabla N° 3 y 5, el NDVI para el año 2020 es de 0.2 – 0.3 que corresponde a la vegetación media con 90.8% de la superficie total con plantas enfermas, seguido de la vegetación escasa con un NDVI de 0.1 – 0.2 con un 6.6% de la superficie total con plantas enfermas.

COBERTURA	NDVI_1989		NDVI_2020	
Suelo desnudo	-0,86	0,1	-0,15	0,1
Vegetación escasa	0,1	0,2	0,1	0,2
Vegetación media	0,2	0,3	0,2	0,3
Vegetación alta	0,3	0,93	0,3	0,53

Tabla N° 3: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada 1989 - 2020

Fuente: Elaboración Propia

N°	DESCRIPCIÓN	ÁREA (HAS)	%
1	Suelo desnudo	2785,00	1,1
2	Vegetación escasa	5166,14	2,1
3	Vegetación media	68058,80	27,6
4	Vegetación alta	170908,40	69,2
TOTAL		246918,35	100,0

Tabla N° 4: Superficie y porcentaje NDVI 1989

Fuente: Elaboración Propia

N°	DESCRIPCIÓN	ÁREA (HAS)	%
1	Suelo desnudo	1654,07	
2	Vegetación escasa	16381,79	
3	Vegetación media	224209,15	
4	Vegetación alta	4671,53	

Tabla N° 5: Superficie y porcentaje NDVI 2020

Fuente: Elaboración Propia

La riqueza, diversidad y equidad de la vegetación natural mediante el índice de Margalef se obtuvo un resultado de 5,98 lo cual demuestra que la Reserva Nacional de Flora y Fauna Tariquia es una zona que tiene una significativa cantidad de especies vegetales, ya que valores inferiores a 2 son zonas de baja biodiversidad y valores superiores a 5 son zonas de alta biodiversidad. El índice de diversidad de Menhinick es de 1,45 por lo que verifica que la riqueza dentro de la muestra analizada es alta la diversidad del ecosistema en relación con la vegetación. El índice de dominancia de Simpson muestra resultados entre 0 a 1 en el cual los valores cercanos a 1 explican la dominancia de una especie por sobre las demás; son ecosistemas más homogéneos. La aplicación de la fórmula dio como resultado 0,063 por lo tanto no muestra especies dominantes medias. Si bien el Arrayan (*Eugenia uniflora*) es la especie que cuenta con mayor cantidad de individuos hay otras como Palo barroso (*Blepharocalix giganteus*), Laurel (*Phoebe purphyria*), Cebil (*Anadenanthera colubrina*) y Tipa (*Tipuana tipu*) que también están representadas de la misma forma.

El índice de Shannon-Wiener adquiere valores entre 0 y 4.5. El resultado de la aplicación de dicho índice es de 3,052 por lo tanto demuestra que esta comunidad es equitativa y esta entre diversidad media a alta. El índice de equidad de Pielou posee valores que pueden variar de 0 a 1 siendo cercanos a 1 los que corresponden a situaciones donde todas las especies son igualmente abundantes. El resultado de la aplicación de este índice en las parcelas de vegetación es igual a 0,822. Para la fórmula se utilizó  $H'$  previamente obtenida en el índice de Shannon-Wiener.

En la figura N° 3 se puede verificar que, dentro de las parcelas muestreadas en la RNFFT, de las 805 especies existen 22 familias, la especie con mayor presencia está el Arrayan (*Eugenia multiflora*) con 94 individuos, Barroso (*Blepharocalyx salicifolius*) 72 individuos, Laurel (*Ocotea sp.*) con 68 individuos, cebil (*Anadenanthera colubrina*) 68 individuos, Tipa (*Tipuana tipu*) 67 individuos y así sucesivamente continuando con las demás especies, las primeras cinco especies han sido las más encontradas dentro del área de estudio.

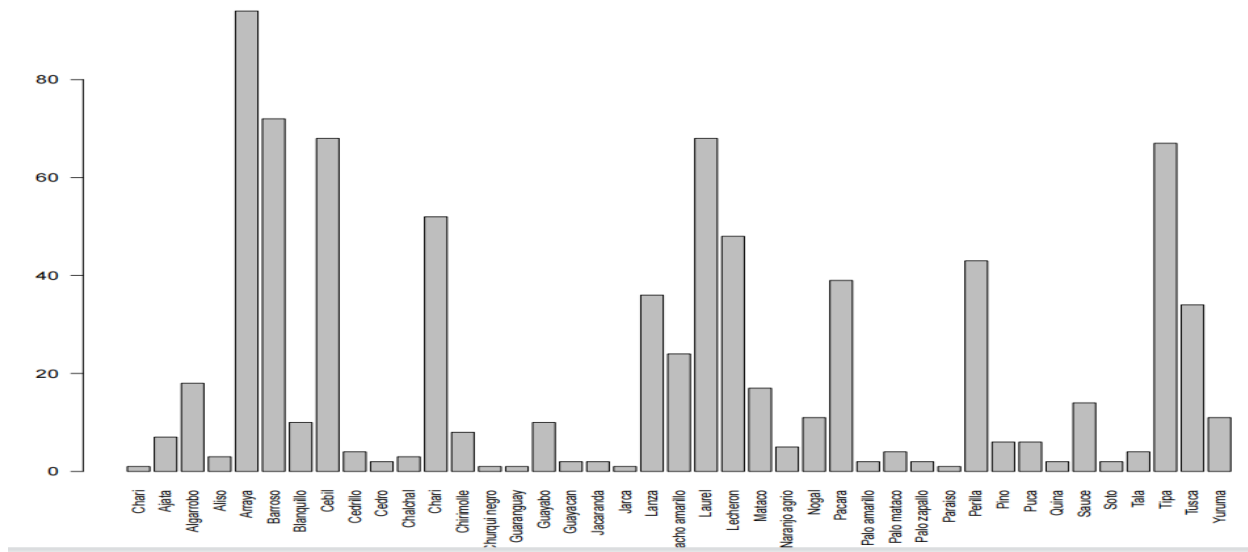


Figura N° 3: Especies registradas en el trabajo de investigación

Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 4, se puede verificar que las especies con mayor índice de valor de importancia están las especies Barroso (*Blepharocalyx salicifolius*), Arrayan (*Eugenia multiflora*), Tipa (*Tipuana tipu*), laurel (*Ocotea sp.*), Cebil (*Anadenanthera colubrina*) y Pacara (*Enterolobium cortortisiliquum*). La media es de 2.5, la desviación estándar es de 2.706 y la varianza es de 7.32 nos indica que las especies están más dispersadas, y el coeficiente con 1.27 es asimétrico hacia la derecha.

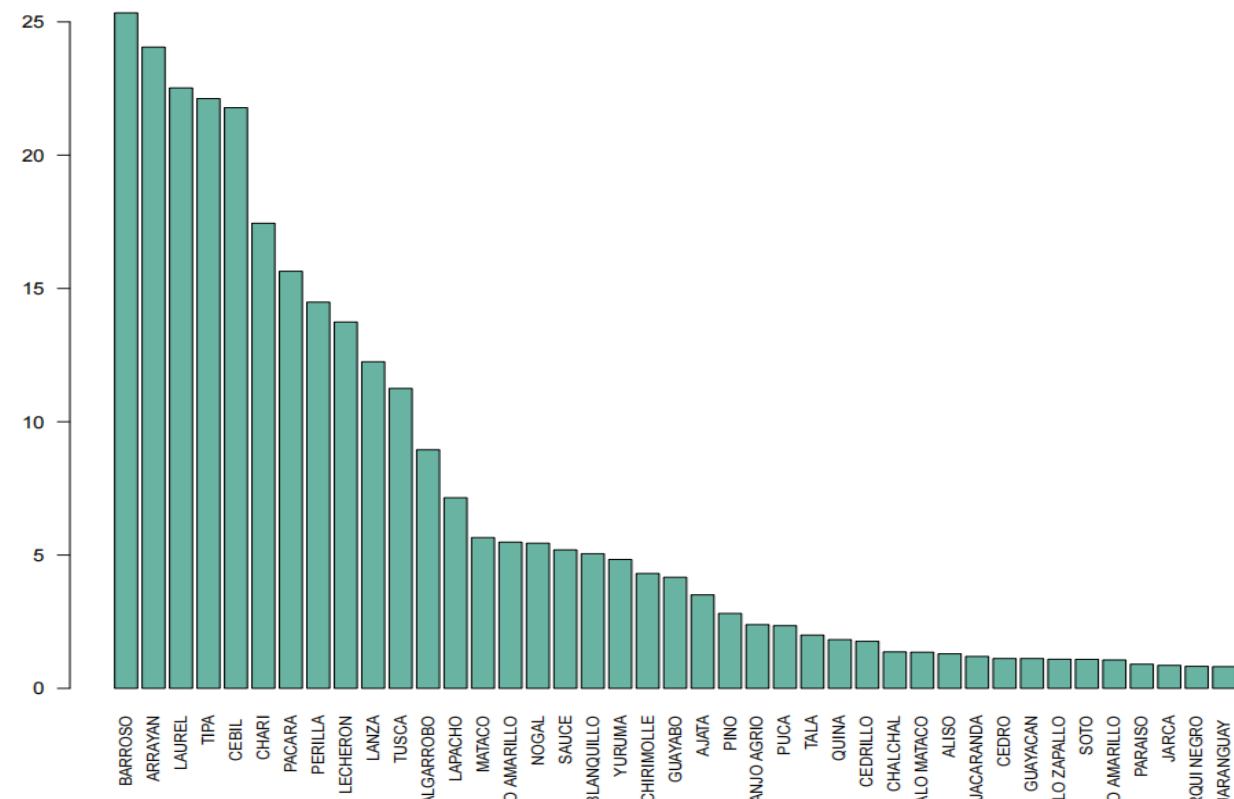


Figura N° 4: Índice de Valor de Importancia

Fuente: Elaboración propia

## 16. Discusión

De acuerdo al análisis realizado, en la Reserva Nacional de Flora y Fauna Tariquia, el cambio de cobertura y uso de suelo se realizó mediante la clasificación de la vegetación de Bolivia de Navarro 2011, para el año 1989 el 58% corresponde a bosque húmedo, bosque seco 29% y antrópico (Agricultura múltiple) con 3% y para el año 2020 bosque húmedo 81%, bosque seco 9% y antrópico 4%.

La deforestación para el año 1989 es de 6767 has, el año 1996 se observa un aumento a 8526 ha., el año 2001 hay un descenso a 6460 ha., esto se debe a que ya es declarada área protegida y cuenta ya con un plan de manejo, a partir de ese año el aumento es mínimo con 6707 has para el año 2005, 9421 has para el año 2010, luego el año 2014 a 9834 has y asciende el año 2020 llegando a 10932 has.

En lo que respecta a la caracterización de la cobertura vegetal boscosa el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para el año 1989 la vegetación alta esta entre 0.3 a 0.93 con una superficie de 170908.40 has representando el 69.2% con plantas medianamente sanas a muy sanas. Para el año 2020 la vegetación media está entre 0.2 a 0.3 con una superficie de 224209.15 has representando el 90.8% con plantas enfermas. Aquí se puede observar que cambia la cobertura vegetal boscosa de vegetación alta del año 1989 a vegetación media el año 2020.

El índice de riqueza en base al índice de Margalef obtuvo 5,98 el cual indica una zona que cuenta con una significativa cantidad de especies con alta biodiversidad, como el índice de Menhinick indica que cuenta con una alta diversidad del ecosistema. De acuerdo al índice de dominancia de Simpson el resultado es de 0.063 lo cual nos indica que no hay especies dominantes ya que la interpretación es de 0 a 1, valores cercanos a uno nos indica dominancia de especies. De acuerdo al índice de Shannon-Wiener arroja un valor de 3.052 lo cual demuestra que la comunidad es equitativa. El índice de equidad de Pielou tiene un valor de 0,822 que es un valor cercano a 1, por lo tanto todas las especies son abundantes.

En lo que respecta al índice de valor de importancia (IVI), las especies con mayor presencia está el Arrayan (*Eugenia multiflora*) con 94 individuos, Barroso (*Blepharocalyx salicifolius*) 72 individuos, Laurel (*Ocotea* sp.) con 68 individuos, cebil (*Anadenanthera colubrina*) 68 individuos, Tipa (*Tipuana tipu*) 67 individuos, las especies con mayor índice de valor de importancia (IVI) está el Barroso (*Blepharocalyx salicifolius*) con 18.58, Arrayan (*Eugenia multiflora*) con 18.51, Tipa (*Tipuana tipu*) con 18.09, Laurel (*Ocotea* sp.) con 16.83 y cebil (*Anadenanthera colubrina*) con 16.24.

Las clases diamétricas no presentan la J invertida, la cual indica que no existe buena regeneración natural, esto principalmente es porque se

encuentran en un hábitat que presenta una alta fragilidad a la intervención, ya sea por deforestación, trashumancia de ganado o por actividades agrícolas.

En general de toda la superficie considerada (RNFFT y ZEA) se estima que el 50% del área tiene muy buen estado de conservación (muy poca o ninguna intervención o conversión) y entre 20 – 30% tiene buen estado de conservación (es decir poca alteración). En síntesis, la RNFFT y su ZEA poseen un estado de conservación que justifica su protección para la biodiversidad.

## 17. Bibliografía

- ❑ Andersen. (2014). La economía del cambio climático en Bolivia, Impactos en el sector agropecuario. Washington.
- ❑ Bluske, R. A. (2004). Áreas protegidas del departamento de Tarija. Creativa.
- ❑ BOLFOR. (2000). Manual de Métodos Básicos de Muestreo y Análisis en Ecología Vegetal. Santa Cruz de la Sierra.
- ❑ Castillo. (2009). Análisis con imágenes satelitales de los recursos forestales en el trópico húmedo de Chiapas: un estudio de caso en Marqués de Comillas.
- ❑ Chuvieco. (2016). Fundamentals of satellite remote sensing: An environmental approach.
- ❑ Congedo. (2016). Documentation of Semi-automatic Classification Plugin.
- ❑ FAO. (2013). Los Bosques y el Cambio Climático. Trabajando con los Países para hacer frente al Cambio Climático por medio de la Gestión Forestal Sostenible. Roma, Italia.
- ❑ FAO. (2014). El Estado de los Bosques en el Mundo. Potenciar los beneficios socioeconómicos de los Bosques. Roma,

- Italia.
- ❑ FAO. (2018). El estado de los bosques del mundo - Las vías forestales hacia el desarrollo sostenible. . Roma.
  - ❑ Galindo. (2014). Monitoreo del Cambio en la Superficie Cubierta por Bosque Natural. Bogotá.
  - ❑ ICRAF. (2009). Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. Lima - Perú.
  - ❑ Macedo. (2010). Clasificación no supervisada con imágenes a color de cobertura terrestre.
  - ❑ Miranda. (2013). Monitoreo de la deforestación mediante técnicas geomáticas en una porción de la región centro norte de México.
  - ❑ Moreno. (2001). Métodos para medir la biodiversidad. Zaragoza: La Sociedad Entomológica Aragonesa.
  - ❑ NASA. (2013). Landsat 7 Science Data Users Handbook.
  - ❑ Okdiario. (20 de Julio de 2019). Que es el método descriptivo. Obtenido de <https://okdiario.com/curiosidades/que-metodo-descriptivo-2457888>
  - ❑ Olaya. (2012). Sistemas de Información Geográfica. Cancillería de Infraestructuras de la General Valenciana. Valencia.
  - ❑ Ordoñez. (1998 y 1999). Captura de carbono ante el cambio climático.
  - ❑ Pacheco. (2010). The evolution of the timber sector in lowland Bolivia: Examining the influence of three disparate policy approaches.
  - ❑ Pece, C. G.-M. (2011). Muestreo y técnicas de evaluación de vegetación y fauna. Santiago del Estero - Argentina.
  - ❑ Ramos, G. M. (2013). Técnicas de Investigación de Campo. Obtenido de SlideShare: <https://es.slideshare.net/griseldamedinaramos/tcnicas-de-investigacin-de-campo>
  - ❑ Ramos, I. a. (2018). Valoracion economica del servicio de secuestro de carbono aportado por la vegetacion existente en el centro ecoturistico de Seccsachaca. Huancayo.
  - ❑ Ramos, I. A. (2018). Valoracion economica del servicio de secuestro de carbono aportado por la vegetacion existente en el centro ecoturistico de Seccsachaca, Huancavelica, Peru - 2017. Huancayo - Peru.
  - ❑ Resnikowski. (2010). Monitoreo de las Principales amenazas de la biodiversidad en el oeste de Pando. Manejo Integral de la Cuenca Arroyo Baia. La Paz.
  - ❑ Richards. (2006). Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction.
  - ❑ Rudel. (1997). The paths to rain forest destruction: crossnational patterns of tropical deforestation, 1975–1990.
  - ❑ Saldaña. (2010). Determinación del cambio de cobertura vegetal en el área de conservación municipal “Bosques de Huamantanga”.
  - ❑ Schlegel, B. (2002). Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempre verde. Universidad Austral de Chile.
  - ❑ Segovia, M. A. (2017). Estimación de Biomasa y Carbono, Bajo un Sistema Silvopastoril, en la Comunidad de Yaguacua de la Provincia Gran Chaco, Tarija. Agrociencias, 23.

- ❏ SERNAP. (2015). Plan de Manejo de la Reserva Nacional de Flora y Fauna Tariquia - Tarija - Bolivia 2015 - 2025. Tarija.

❏ SERNAP. (16 de Julio de 2019). Reserva Nacional de Flora y Fauna Tariquia. Obtenido de <http://sernap.gob.bo/tariquia>
- ❏ Silva, G. &. (2006). Análisis y tendencia de la deforestación de la provincia de Zamora en base a interpretación de imágenes satelitales. Loja, Ecuador.

❏ Silvina Manrique, J. F. (2009). Estimación de densidad de biomasa aérea en ecosistemas naturales de la Provincia de Salta. Salta - Argentina: Instituto de Investigación en Energías No Convencionales.