

**METODOLOGÍA PARA EL MONITOREO DEL BIOMA BOSQUE SECO
TROPICAL EN EL VALLE DEL CAUCA A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES
Y LA CLASIFICACIÓN DE ZONAS DE VIDA DE HOLDRIDGE**



JOSE LUIS OLIVEROS SALAS

LAURA VALENTINA RIVERA PULIDO

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA

2025

**METODOLOGÍA PARA EL MONITOREO DEL BIOMA BOSQUE SECO
TROPICAL EN EL VALLE DEL CAUCA A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES
Y LA CLASIFICACIÓN DE ZONAS DE VIDA DE HOLDRIDGE**



ESTUDIANTES

JOSE LUIS OLIVEROS SALAS CÓDIGO: 1922867

LAURA VALENTINA RIVERA PULIDO CÓDIGO: 1944212

DIRECTOR

ING. FRANCISCO LUIS HERNANDEZ

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA TOPOGRÁFICA**

**SANTIAGO DE CALI, COLOMBIA
JUNIO DEL 2025**

NOTA DE ACEPTACIÓN

DIRECTOR

JURADO

JURADO

JURADO

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo, quiero agradecer a Dios por la oportunidad, sabiduría y paciencia que me brindó para lograr tan anhelado objetivo. Cada situación y desafío durante esta etapa me brindaron aprendizajes únicos que permitieron mi crecimiento personal, académico y social; permitiéndome mejorar como persona, hijo y amigo.

Este logro es dedicado a mi madre Iginia Salas, que con sus oraciones a Dios, consejos y palabras me ha motivado a no rendirme en mis objetivos y sueños; a mi padre Efren Barona Ñañez, que durante toda mi vida ha sido un ejemplo de esfuerzo y dedicación; a mi hermana María Ximena Pineda, que ha superado innumerables obstáculos que le ha presentado la vida enseñándome cómo hacer lo mismo y a Lizeth Hernández, por apoyarme a iniciar y culminar mis estudios, acompañándome en cada paso este proceso.

Agradezco a mi familia y seres queridos por creer en mí y querer ver mis objetivos cumplidos tanto como si fueran suyos. Espero que Dios me permita recompensar todo el esfuerzo y apoyo que ellos han brindado para ayudarme a avanzar hacia mis metas y sueños.

Agradezco a cada una de las personas que se han cruzado en mi camino y aportaron su granito de arena para la construcción de este sueño; a los compañeros que durante las horas de estudio compartieron su conocimiento y a los profesores que compartieron su experiencia.

Gracias a mi compañera y colega Valentina Rivera por compartir conmigo el esfuerzo y dedicación de llevar a cabo esta investigación. También agradezco al profesor e ingeniero Francisco Hernández por su orientación y respaldo en el desarrollo de este proyecto.

- Jose Luis Oliveros Salas

Agradezco primeramente a Dios por darme la oportunidad de vivir con propósito, por armarme con valentía, coraje, sabiduría y discernimiento para enfrentar los desafíos que se presentan en el camino y lograr los objetivos que mi corazón anhela. Todo lo vivido ha hecho de mí una mejor persona, hija, pareja, amiga y profesional.

Agradezco a mi padre Freddy Rivera quien ha sido ejemplo de amor, respeto, esfuerzo y dedicación; a mi madre Diana Pulido quien ha sido ejemplo de lucha, fortaleza, superación y me ha enseñado a afrontar los desafíos siempre de la mejor manera. Ambos han trabajado incansablemente por mí felicidad, por verme crecer personal y profesionalmente, forjaron para mí un camino de oportunidades, las cuales he aprovechado y lo seguiré haciendo hasta lograr retribuir los grandes sacrificios que realizaron para que yo cumpliera mis sueños; a mi hermano que es una bendición, un motivo de orgullo y me recuerda cada día con un abrazo gigante y una sonrisa que no hay límites para el éxito.

Agradezco a mi pareja, equipo y amigo Juan Camilo Anacona, quien hizo todo lo posible para que estuviera cada vez más cerca de la meta deseada. Su amor, apoyo incondicional, palabras de aliento y compañía en los largos días de trabajo fueron fundamentales para ver realizado este sueño.

Agradezco a mis familiares quienes apoyaron mi proceso, creyeron en mí y depositaron su confianza haciendo parte de mis sueños y metas profesionales y personales; a Omaira Ospina quien fue una segunda madre y con sus palabras de amor me llenaba de fuerza y felicidad; a mis compañeros y amigos que se volvieron una familia en la cual compartimos conocimiento, horas agotadoras de trabajo y muchas risas; a los docentes que compartieron su experiencia, inteligencia, cultura y sabiduría; a cada persona que ha pasado por mi vida, de las cuales me quedado siempre con lo mejor.

Agradezco a mi colega y compañero Jose Luis Oliveros, quien fue la grandiosa persona que Dios puso en mi camino para juntos lograr con mucho empeño, disciplina y dedicación sacar adelante nuestra investigación, deseo para él grandes éxitos; al Ingeniero y docente Francisco Luis Hernández quien dirigió este proceso, transmitiéndonos sus conocimientos y brindándonos las herramientas necesarias para desarrollar este proyecto.

- Laura Valentina Rivera Pulido.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
3. OBJETIVOS.....	13
4. JUSTIFICACIÓN.....	14
5. MARCOS DE REFERENCIA.....	15
5.1 Marco Conceptual.....	15
5.2 Marco Teórico.....	18
5.3 Marco Referencial.....	20
6. METODOLOGÍA.....	23
6.1 Selección de zona de estudio.....	23
6.2 Consulta de metodologías existentes.....	25
6.3 Recolección de datos (Variables de las Zonas de vida de Holdridge).....	25
6.4 Procesamiento de los datos.....	27
6.4.1 Aplicación del sistema de clasificación para identificación de BST en la zona de estudio.....	27
6.5 Extracción de datos multitemporales.....	29
6.6 Estudio de cambios en las áreas de BST.....	30
6.6.1 Consulta de Cobertura y usos del suelo en la zona de estudio.....	30
6.6.2 Procesamiento de las capas de Cobertura y uso del suelo.....	30
6.6.3 Relación entre la presencia del BST y los usos del suelo.....	31
7. RESULTADOS.....	33
7.1 Estadísticas de validación de datos.....	33
7.2 Variables Bioclimáticas.....	38
7.2.1 Precipitaciones.....	38
7.2.2 Temperatura.....	40
7.2.3 Evapotranspiración.....	43
7.3 Biomas.....	45
7.3.1 Bosque Seco Tropical.....	48
7.3.2 Transformaciones del BST.....	55
7.4 Cobertura y uso del suelo en el departamento.....	58
8. DISCUSIONES.....	66
8.1 Biomas.....	66
8.1.1 Bosque Seco Tropical.....	66
8.1.2 Transformaciones del BST.....	67
8.2 Cobertura y uso del suelo en el departamento.....	68
8.2.1 Dinámicas de transición de Cobertura y uso del suelo delimitados por el BST..	68
8.2.2 Dinámicas de transformación del BST y cobertura boscosa.....	69

8.3 Datos estadísticos.....	70
8.4 Variables Bioclimáticas.....	71
8.4.1 Precipitación.....	71
8.4.2 Temperatura.....	71
8.4.3 Evapotranspiración.....	71
9. CONCLUSIONES.....	72
10. TRABAJOS FUTUROS.....	73
BIBLIOGRAFÍA.....	74

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de zonas de vida de Holdridge (1967)	16
Figura 2. Diagrama metodológico.	23
Figura 3. Localización de la zona de estudio.	25
Figura 4. Diagrama de procesamiento de la información.	27
Figura 5. Comparación de precipitaciones anuales estimadas por CHIRPS y observadas en estaciones IDEAM para el año 2005.	33
Figura 6. Comparación de precipitaciones anuales estimadas por CHIRPS y observadas en estaciones IDEAM para el año 2015.	34
Figura 7. Relación entre datos CHIRPS y estaciones IDEAM.	35
Figura 8. Comparación de temperaturas anuales registradas por MODIS y observadas en estaciones CVC para el año 2005.	36
Figura 9. Comparación de temperaturas anuales registradas por MODIS y observadas en estaciones CVC para el año 2015.	36
Figura 10. Relación entre datos MODIS y estaciones CVC.	37
Figura 11. Tendencia de precipitación CHIRPS promedio anual.	38
Figura 12. Distribución de precipitaciones 2000 - 2010 - 2020.	39
Figura 13. Tendencia de temperatura MODIS promedio anual.	40
Figura 14. Tendencia de temperatura basal promedio anual.	40
Figura 15. Tendencia de biotemperatura promedio anual.	41
Figura 16. Distribución de Biotemperatura 2000 - 2010 - 2020.	42
Figura 17. Tendencia de evapotranspiración promedio anual.	43
Figura 18. Distribución de Evapotranspiración 2000 - 2010 - 2020.	44
Figura 19. Relación entre variables de precipitación y biotemperatura con la evapotranspiración.	44
Figura 20. Zonas de vida de Holdridge para el Valle del Cauca 2000 - 2010 - 2020.	47
Figura 21. Variación anual del área del BST en el Valle del Cauca.	48
Figura 22. Variación porcentual interanual del BST.	50
Figura 23. Tasa de cambio del BST.	50
Figura 24. Evolución del BST y sus zonas de transición asociadas en el Valle del Cauca (2000–2020).	51
Figura 25. Distribución del BST en el Valle del Cauca 2000 - 2009.	53
Figura 26. Distribución del BST en el Valle del Cauca 2010 - 2020.	55
Figura 27. Transformaciones espaciales del BST entre el año 2010 y 2011.	55
Figura 28. Transformaciones espaciales del BST entre el año 2014 y 2015.	56
Figura 29. Transformaciones espaciales del BST entre el año 2015 y 2016.	57
Figura 30. Promedio de expansión, pérdida y permanencia del BST en el Valle del Cauca entre 2000 y 2020.	57
Figura 31. Promedio de transformaciones específicas del BST entre 2000 y 2020.	58
Figura 32. Representación de áreas ocupadas por cada categoría de la clasificación CLC entre 2000 y 2002.	58
Figura 33. Representación de áreas ocupadas por cada categoría de la clasificación CLC entre 2005 y 2009.	59
Figura 34. Representación de áreas ocupadas por cada categoría de la clasificación CLC entre 2010 y 2012.	59

Figura 35. Representación de áreas ocupadas por cada categoría de la clasificación CLC año 2020.	60
Figura 36. Dinámica de transiciones CLC sobre el BST 2000 a 2005.	62
Figura 37. Dinámica de transiciones CLC sobre el BST 2005 a 2010.	63
Figura 38. Dinámicas de transiciones CLC sobre el BST 2010 a 2020.	63
Figura 39. Dinámicas de transformación de cobertura boscosa y BST 2000 a 2005.	64
Figura 40. Dinámicas de transformación de cobertura boscosa y BST 2005 a 2010.	64
Figura 41. Dinámicas de transformación de cobertura boscosa y BST 2010 a 2020.	65

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones meteorológicas del IDEAM en el Valle del Cauca.	26
Tabla 2. Estaciones meteorológicas de la CVC en el Valle del Cauca.	26
Tabla 3. Valores promedio de Biotemperatura en grados Celsius (°C).	28
Tabla 4. Valores promedio de Precipitación anual (mm/año).	28
Tabla 5. Valores de la evapotranspiración potencial.	29
Tabla 6. Promedios estadísticos entre CHIRPS e IDEAM.	35
Tabla 7. Promedios estadísticos entre MODIS y CVC.	38
Tabla 8. Zonas de Vida de Holdridge identificados en el Valle del Cauca.	46
Tabla 9. Detalle de biomas.	48
Tabla 10. Área y porcentaje del BST en el Valle del Cauca (2000-2020).	49
Tabla 11. Transiciones CLC en los diferentes periodos de tiempo a partir de la caracterización del BST.	61

RESUMEN

El Bosque Seco Tropical (BST) constituye uno de los biomas más amenazados y transformados de Colombia, con especial presión en el Valle del Cauca, donde ha experimentado reducciones y recuperaciones en las últimas décadas. El objetivo de esta investigación fue desarrollar y aplicar una metodología de monitoreo y caracterización del BST entre 2000 y 2020, integrando la clasificación de zonas de vida de Holdridge, imágenes satelitales y análisis geoespacial mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), scripts en Python y Google Earth Engine (GEE); generando mapas anuales de biomas e intersectándolos con mapas de coberturas del suelo basadas en la clasificación Corine Land Cover adaptada para Colombia, lo que permitió evaluar las transformaciones del BST y su relación con los usos predominantes, en particular el agrícola. Los resultados mostraron una reducción del 5% en la primera década y una recuperación del 8% en el periodo 2010-2020. Durante este último intervalo, la cobertura boscosa presente en el bioma presentó una expansión de 505.444 ha frente a una pérdida de 194.067 ha, lo que representa una ganancia neta de 311.377 ha y un incremento porcentual del 20,7%. En términos climáticos, se identificó una tendencia hacia condiciones más secas, reflejada en la correlación negativa entre precipitación y evapotranspiración ($r = -0.75$) y positiva con la biotemperatura ($r = 0.63$). Estos hallazgos evidencian la influencia conjunta del clima y el uso del suelo en la dinámica del BST y respaldan la pertinencia de la metodología propuesta como herramienta de monitoreo y apoyo a la gestión y conservación de este bioma en el Valle del Cauca.

Palabras Clave: Bioma, Zonas de vida de Holdridge, Bosque Seco Tropical, Monitoreo, Transformación, Cobertura y uso del suelo, Corine Land Cover.

1. INTRODUCCIÓN

Los biomas son la unidad fundamental en ecología para describir los patrones de biodiversidad y relaciones ecológicas a nivel global, y se definen a la vez como conjuntos de ecosistemas [1]. Actualmente diversos autores reconocen al menos 14 biomas representados por emblemáticos bosques tropicales, sabanas y desiertos. Sin embargo, la constante intervención humana en estos ecosistemas ha generado deformaciones y transformaciones negativas y positivas alterando su estructura, composición y funcionalidad [2]. Monitorear y comprender el comportamiento de los biomas es crucial; y un paso importante para este monitoreo es la identificación y agrupación de segmentos ecológicos uniformes [3].

Para obtener resultados efectivos en la clasificación de estos biomas, los mecanismos se deben basar en variables cuantificables y sensibles a las condiciones ambientales que influyen en la manera como los biomas se organizan o distribuyen espacialmente [4]. Para los diseños y planes de gestión de los ecosistemas, es vital reconocer las unidades ecológicas homogéneas que lo componen; estas unidades pueden ser delimitadas y clasificadas según sus atributos básicos, como el clima, el suelo, la vegetación y la fauna [3].

En el estudio general para Colombia se reconocieron hasta 13 biomas en el país, de los cuales 3 biomas presentaron transformaciones significativas *los bosques secos tropicales (BST)*, *bosques andinos* y *formaciones pantanosas* [5]. De estos biomas, 7 se encontraron en su estado natural, 5 parcialmente perturbados, pero el BST se encontró totalmente transformado para el año 2000 [6]. Uno de los biomas más amenazados y menos estudiados en Colombia es el BST, que a pesar de ser fundamental por sus servicios ecológicos cuenta con limitada información; puesto que en Colombia se ha perdido más del 90% de este bioma [7].

A pesar de que para el periodo comprendido entre 2000 a 2004 el territorio de Colombia solo presentaba un 24% transformado, este debe ser medido considerando el cambio constante que se presenta [1]. De los aproximadamente 8 millones de hectáreas originales de BST que existían en Colombia según [5], para el año 2000 quedaba cerca del 1.5%, para el 2010 un 3% y para el 2014 un 8% contando extensiones continuas de coberturas boscosas, bosques abiertos y mosaicos transformados [6] [7] [8]. Este bioma se distribuye entre el cinturón pericaribeño, valle del río Magdalena, valle del río Cauca y en la región norandina y del Catatumbo con un 71%, 21%, 7% y 1%, respectivamente [7]. Dado que este bioma aporta múltiples servicios ecológicos, se debe evaluar como la reducción de este bioma afecta el aporte ecológico brindado.

De ese 7% del bioma presente en el valle del río Cauca mencionado por [7], para el departamento del Valle del Cauca, la transformación y reducción de este bioma se presentó principalmente entre los años 1950 y 1980, haciendo del Valle del Cauca la región con menos presencia de BST [9]. En estudios llevados a cabo por [10] en la cuenca alta del río Cauca, incluido el Valle del Cauca, encontraron que los fragmentos y relictos de BST menores a 100 ha y separados entre sí por aproximadamente 500 m o más constituyeron sólo el 1.5% del área total de estudio (608.992 ha).

Para comprender estos cambios, es necesario analizar la posible relación con la dinámica del uso del suelo, este hace parte de la categorización de la superficie terrestre; que tiene en cuenta propiedades biofísicas como la pendiente, topografía, relieve y vegetación. Es por esto por lo que su transformación se ve reflejada en los ecosistemas terrestres [11]. Los cambios en los usos del suelo proporcionan las bases para conocer las tendencias de transformación, degradación y pérdida de la biodiversidad de una zona determinada [12]. Estos pueden deberse a una migración campo - ciudad y los asentamientos informales que configuran las zonas periféricas en busca de servicios ecosistémicos [13].

El presente estudio propone desarrollar una metodología de monitoreo para el BST en el Valle del Cauca a partir de la identificación de sus transformaciones, empleando como insumo principal imágenes satelitales que aportan información sobre la precipitación y la temperatura de la zona de estudio, las cuales serán descargadas mediante scripts y procesadas en un software de información geográfica. A partir de estas variables se obtendrá la evapotranspiración como tercera variable, permitiendo su asociación bajo la metodología de zonas de vida de Holdridge para clasificar los resultados en el bioma objeto de estudio. El proceso semiautomatizado y la integración de herramientas como Python, plataformas SIG y GEE propuestos facilitará la clasificación del BST, analizar sus transformaciones entre 2000 y 2020 y establecer su relación con los cambios de cobertura y uso del suelo, aportando insumos clave para la gestión y conservación de este bioma.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La pérdida y transformación de los ecosistemas es una realidad a nivel global, que refleja la interacción entre la sociedad y el medio ambiente, resultado de la búsqueda por satisfacer las necesidades humanas [14]. Los efectos por transformación o pérdida de la cobertura vegetal se pueden apreciar a diferentes escalas, por un lado, afecta a las especies que habitan y dependen de dicha cobertura; estos efectos dependen del área de distribución de la especie y de sus requerimientos de hábitat [15]. Por otro lado, afectan la conectividad y continuidad entre ecosistemas a nivel de paisaje; este proceso es conocido como fragmentación [16][17].

La fragmentación altera procesos ecológicos como el ciclo de nutrientes, la productividad primaria y la complejidad de las redes tróficas [18][19][20]. Esta fragmentación o división de un ecosistema, inicialmente continuo, resulta en la disminución del área total del hábitat, y es considerada como una de las principales causantes de los grandes cambios en el ambiente físico-biótico; los procesos de deterioro y fragmentación han sido poco analizados en Colombia, y para los bosques secos mucho menos, lo que implica desconocer la transformación y dinámica de los cambios [21].

El Bosque Seco Tropical es considerado uno de los biomas más fragmentados y menos comprendidos [22]. A pesar de que la fragmentación y transformación conlleva un alto riesgo de pérdida, sus remanentes restantes son importantes refugios y depósitos valiosos de biodiversidad [23]. Para 1957 se consideraba que los bosques cubrían 6% del Valle geográfico, pero para 1986 se habían reducido a solo 2%; actualmente la pérdida de cobertura boscosa alcanza niveles superiores a 99% [23].

A pesar de que el Bosque Seco Tropical en Colombia es uno de los biomas más amenazados se cuentan con pocos datos sólidos que permitan diseñar herramientas para la gestión plena del BST [7]. Aunque los procesos de transformación para los ecosistemas colombianos no han sido analizados continuamente, los adelantos tecnológicos como el sensoramiento remoto han logrado destacar la importancia de la evaluación y monitoreo de los ecosistemas, en este campo se distinguen los esfuerzos del IDEAM por contribuir con mapas de coberturas vegetales, uso y ocupación del territorio [21]. A partir de los planteamientos propuestos, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo obtener las zonas de vida de Holdridge utilizando técnicas de sensoramiento remoto para la generación de datos base y monitoreo de las transformaciones del Bosque Seco Tropical en el Valle del Cauca?

3. OBJETIVOS

Objetivo general

- Desarrollar una metodología de monitoreo de las transformaciones y el estado del bioma Bosque Seco Tropical en el Valle del Cauca durante el periodo 2000-2020

Objetivos específicos

1. Caracterizar la presencia del bioma bosque seco tropical en el Valle del Cauca
2. Evidenciar los cambios que presenta el bioma a lo largo del periodo de estudio
3. Establecer una relación entre la transformación del bioma y los usos del suelo

4. JUSTIFICACIÓN

De las zonas del país que cuentan con presencia del bioma BST, el Valle del Cauca es la de menor extensión y por ende de más vulnerabilidad [10]. El BST al contar con características climáticas y de suelo propicios para diversas producciones, ha empezado a ser transformado por actividades antrópicas; sin conocer la importancia de este, lo que queda y cómo se transforma [24]. Al estar sometidos a transformaciones, los suelos del BST empiezan a ser susceptibles a diversos problemas como la desertificación de sus suelos [1]. Lo que ha ocurrido en más del 50% del bioma BST en Colombia [24].

Estimar la cantidad de BST actual a nivel mundial y de América Latina es un reto debido a su gran y acelerado nivel de transformación; aunque el BST se encuentra gravemente amenazado, aún no se cuenta con datos que permitan crear o utilizar instrumentos para su adecuada gestión; por lo que se requieren investigaciones que brinden un mejor conocimiento de las transformaciones para asegurar su conservación [7].

A pesar de que las evaluaciones globales muestran tendencias en la transformación del BST, entre 1986 y el 2012 no se contaban con estudios adecuados que revisaran el estado y transformación del bioma en la cuenca del río Cauca [10]. En los estudios llevados a cabo por [10] se utilizaron datos cartográficos y satelitales, sin embargo, no se vieron reflejadas las dinámicas de las transformaciones asociadas al bioma, donde el proceso de transformación se presentó a inicios del siglo XVI con la colonización de los españoles [9].

La transformación del BST ha continuado persistentemente [7]. Por ello, los estudios desarrollados en el Valle del Cauca muestran una tasa de transformación de BST de -3.33% por año hacia áreas cultivables en los últimos 16 años; sin detallar información relevante de donde se localizan estas mayores transformaciones, lo que representa una oportunidad para la restauración y monitoreo de estos remanentes de BST [9].

Estudiar la dinámica del cambio y la pérdida de la cobertura forestal, así como su relación actual con el uso del suelo, es importante para identificar y adaptar herramientas y estrategias para gestionar y conservar la biodiversidad y los recursos naturales, para lo cual se debe tener presente la dinámica natural del ecosistema [25][26]. El comportamiento de los ecosistemas está asociado a patrones de estructura y función que varían en el tiempo, especialmente cuando están sometidos a procesos de degradación [14].

Con base en la falta de estos datos, el estudio actual trata de ofrecer información que reconozca la presencia del BST en el Valle del Cauca y como los usos del suelo se han relacionado con los cambios presentes en el bioma, convirtiéndose en un recurso útil para instituciones educativas, autoridades de planeación territorial, instituciones ambientales y organizaciones no gubernamentales que se dediquen a la conservación y protección del medio ambiente.

5. MARCOS DE REFERENCIA

5.1 Marco Conceptual

El propósito del marco conceptual será definir claramente los conceptos clave que se utilizarán en este estudio. A continuación, se explicará cómo los componentes y tecnologías aplicadas a esta investigación se interrelacionan y contribuyen al entendimiento general del tema y el cumplimiento de los objetivos planteados.

En 1967, [19] estableció la definición de una zona de vida como un conjunto de asociaciones vegetales dentro de una división natural del clima, que se establecen según las condiciones edáficas y las etapas de sucesión, y que tienen una apariencia similar en cualquier parte del mundo. Esas asociaciones definen un conjunto de condiciones ambientales que, junto con los seres vivos, dan un conjunto único de fisonomía de las plantas y actividad de los animales.

Las zonas de vida de Holdridge obedecen a un sistema de clasificación desarrollado por el climatólogo y botánico Leslie Holdridge y su primera publicación fue en el año 1947. Este sistema permite clasificar diferentes áreas terrestres de acuerdo con su comportamiento bioclimático delimitando las zonas de vida por evapotranspiración potencial, precipitación y biotemperatura. De acuerdo con [3] este sistema se basa en factores climáticos impulsores de los procesos de los ecosistemas y reconoce las respuestas ecofisiológicas de las plantas; es jerárquico, además, puede ampliarse o contraerse sin perder la continuidad funcional entre niveles de complejidad ecológica.

Para [27] en el glosario de su libro define el bioma de la siguiente manera: "Bioma – Comunidad de plantas y animales, generalmente del rango de una formación: una comunidad biótica". Este término se ha beneficiado del progreso general de la ecología comunitaria, lo que dio forma a la comprensión actual del concepto de bioma como una entidad biológica dinámica que tiene muchos aspectos, con profundas raíces en el pasado evolutivo y que está experimentando cambios de acuerdo con [28].

Para [1], los biomas pueden ser comprendidos como regiones ecológicas donde varios factores ambientales interactúan para brindar una función a estos, especialmente variables climáticas, como la temperatura y precipitación, que a su vez están relacionados con otros factores como la latitud y la altitud sobre el nivel del mar. La latitud establece algunas zonas bioclimáticas como lo son desde las árticas hasta las tropicales; por su parte la altitud contribuye en la conformación de distintos hábitats, como los premontanos, montanos, alpinos y nival, cada uno con sus propias características climáticas. También la humedad cumple un papel crucial en la clasificación de los biomas en sistemas húmedos, semihúmedos, semiáridos y áridos.

Para clasificar los biomas existentes, estudios como los de [1][29], resaltan las interacciones y convergencias de las variables climáticas, junto a la convergencia de fauna y flora en dichas regiones; para esto se emplea el sistema de *zonas de vida de Holdridge*, definidas por el biólogo llamado *Leslie Holdridge*. Estas zonas pueden visualizarse como agrupaciones de ecosistemas interconectados, cuya relación se establece a través de los efectos de la

biotemperatura, precipitación y la humedad, usando la evapotranspiración como indicador de humedad, expresado así por [19]; como se observa en la figura 1.

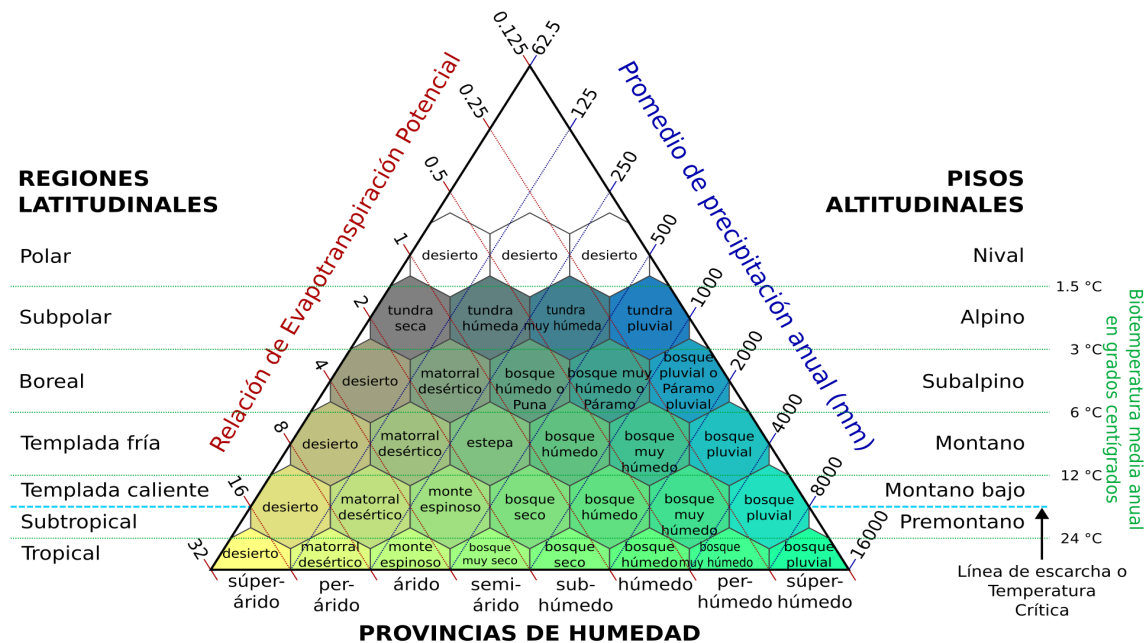


Figura 1. Diagrama de zonas de vida de Holdridge (1967)
Adaptado de: [4].

Se define la evapotranspiración (ET) como un fenómeno que combina la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas. Como cualquier proceso que implica un cambio de estado, la evapotranspiración absorbe energía para convertir el agua líquida en vapor de agua. Muchos autores han optado por suponer unas condiciones ideales de humedad del suelo y desarrollo vegetal, dos de las variables más difíciles de medir y admitidas, correlacionar la ET con uno o varios factores que influyen en ella [30].

Luego se pronuncia el término evapotranspiración potencial (EVP). Este fue introducido por separado a mediados del siglo XX por Penman y Thornthwaite [31], en un esfuerzo por maximizar el contenido de humedad en el suelo y el desarrollo vegetal. Se define así la evapotranspiración potencial como la cantidad máxima de agua que puede ser perdida por evaporación desde el suelo y por transpiración de las plantas cuando el suelo se encuentra con un contenido óptimo de humedad, cubierto por completo con un manto herbáceo de poca altura, en activo crecimiento y cuyo albedo sea aproximadamente de un 25%.

La biotemperatura (BT) se refiere a la temperatura del aire, aproximadamente entre 0°C y 30°C, que regula el ritmo e intensidad de los procesos fisiológicos de las plantas y la tasa de evaporación directa del agua contenida en el suelo y la vegetación, definiendo así el término biotemperatura media anual como un promedio de las temperaturas a las cuales se estima que tiene lugar el crecimiento vegetativo, en relación con el período anual [19].

Lo expuesto por [19] expresa la Biotemperatura basal (BTB) como la relación entre la biotemperatura promedio y la altitud estimada sobre el nivel del mar para un área

determinada. Esta relación delimita las regiones latitudinales, que son unidades geográficas naturales donde varía la radiación solar determinando así hábitats, como las fajas altitudinales que clasifican las características climáticas [1].

Para [32], la precipitación es el fenómeno meteorológico en el que el vapor de agua se condensa y se transforma en nieve, granizo, rocío y, principalmente, en agua lluvia. Se entiende como precipitación cualquier tipo de hidrometeoro que cae de la atmósfera y llega a la superficie terrestre, de acuerdo con el Instituto Geográfico de Aragón. Estos hidrometeoros están compuestos por partículas acuosas o sólidas, cristalizadas o amorfas, que se originan en una nube o grupo de nubes y alcanzan el suelo. Todas las formas de precipitación se cuantifican como la altura que alcanzaría una columna vertical de agua si permaneciera en el lugar donde cae [32].

Para [13][33], el suelo cuenta con una clasificación denominada “uso”, que se relaciona con las actividades socioeconómicas de los seres humanos; y el cambio en los usos del suelo se refiere a la transformación o transición que tiene un área influenciada por factores como el crecimiento urbano, la expansión de la frontera agropecuaria o explotación de los recursos naturales; durante los que pueden tener impactos significativos en la biodiversidad y los ecosistemas.

La página oficial de Google Earth, define Google Earth Engine (GEE) como una plataforma análisis geoespacial en la nube, diseñada para el almacenamiento, procesamiento y visualización de grandes volúmenes de datos satelitales y ambientales. Según su documentación oficial, GEE integra colecciones globales de imágenes multitemporales y multiescalares, que pueden ser procesadas mediante algoritmos propios o desarrollados por los usuarios en lenguajes como JavaScript y Python. De acuerdo con [34], esta plataforma constituye una herramienta de computación en la nube que facilita la exploración interactiva de datos, el diseño de metodologías reproducibles y la integración de información satelital con datos locales, optimizando así el análisis multitemporal y espacial de fenómenos ambientales.

ArcGIS Pro, según [35], es una herramienta de escritorio de sistemas de información geográfica (SIG) desarrollada por Esri que permite explorar, recopilar, organizar, analizar y compartir información geoespacial. A diferencia de otros SIG, ofrece la posibilidad de integrar en un mismo proyecto tanto mapas bidimensionales (2D) como escenas tridimensionales (3D), lo que amplía las capacidades de visualización y análisis espacial. Asimismo, se caracteriza por su interoperabilidad con lenguajes de programación como Python y su conexión con plataformas en la nube, lo que lo convierte en un recurso clave para estudios de modelamiento ambiental y análisis multitemporales.

Por su parte, la Agencia Europea de Medio Ambiente [36], define la metodología Corine Land Cover (CLC) como un sistema de referencia europeo iniciado en 1985 bajo el programa Coordination of Information on the Environment (CORINE), cuyo objetivo es estandarizar y monitorear la cartografía de la cobertura y uso del suelo. Esta metodología se fundamenta en la interpretación de imágenes satelitales, complementada con información auxiliar y verificaciones de campo, aplicadas bajo especificaciones técnicas que aseguran datos precisos, detallados y comparables a nivel regional. En el caso colombiano, la metodología CLC ha sido

adaptada para caracterizar las coberturas a escala nacional, convirtiéndose en una fuente esencial de información para la planificación ambiental, el seguimiento de cambios territoriales y el análisis de la transformación de biomas como el Bosque Seco Tropical (BST).

5.2 Marco Teórico

El propósito del marco teórico será presentar las revisiones literarias relacionadas con el tema de este estudio; donde se integran los conceptos claves para el entendimiento general sobre la importancia del monitoreo de este valioso pero vulnerable bioma.

En el estudio de [4] basado en las zonas de vida de Holdridge, se hace uso de la ecuación (1) para llevar los promedios mensuales de temperatura obtenidos (TPM) al rango de biotemperatura (0° - 30°C) definidos por [19], al mismo tiempo que se emplea la ecuación (2) para realizar un promedio de los datos de biotemperatura promedio mensual (BPM) y así obtener la biotemperatura promedio anual (BPA).

$$BPM = [(TPM \leq 0) * 0 + (TPM > 0) * TPM] + [(TPM \leq 30) * TPM + (TPM > 30) * 30] \quad (1)$$

$$BPA = \frac{\sum_{x=1}^{12} BPM_x}{12} \quad (2)$$

Con la información de la biotemperatura, [4] relaciona estos datos con la precipitación promedio anual (PPA) y una constante de 58.93, para mm/año, definida por [19] que determinó que el valor de esta constante al ser multiplicado por la biotemperatura media anual permite estimar la evapotranspiración potencial, resultando en un valor que coincide con la precipitación anual promedio cuando esta equivale a la evapotranspiración potencial. Este hallazgo se mantuvo válido a lo largo de distintas latitudes y elevaciones, demostrando que dicha fórmula refleja adecuadamente la distribución natural de la vegetación; finalmente por medio de la ecuación (3) se obtienen los datos de la evapotranspiración potencial necesarios.

$$EVP = \frac{BPA * 58.93}{PPA} \quad (3)$$

Para definir las regiones latitudinales y fajas altitudinales se hace uso de la biotemperatura basal promedio anual (BBPA). Para transformar los valores de BPA a su equivalente de BBPA; se utiliza un gradiente de 6° C/km a la TPM, siguiendo la ecuación (4); la capa resultante de temperatura basal promedio mensual (TBPM) se reclasifican en biotemperatura

basal promedio mensual (BBPM), ecuación (5) y posteriormente se promedian utilizando la ecuación (6) para obtener la BBPA [19][37].

$$TBPM = (DEM * 0.006) + TPM \quad (4)$$

$$BBPM = [(TBPM \leq 0) * 0 + (TBPM > 0) * TBPM] + [(TBPM \leq 30) * TBPM + (TBPM > 30) * 30] \quad (5)$$

$$BBPA = \frac{\sum_{x=1}^{12} BBPM_x}{12} \quad (6)$$

Los valores obtenidos de BBPA se representan con una línea punteada de forma horizontal en el diagrama de zonas de Holdridge, aumentando logarítmicamente desde 1.5°C hasta los 24°C y definen a su vez las regiones latitudinales presentes en el lado izquierdo del diagrama y al derecho determina las fajas altitudinales. Los valores de PPA aumentan de izquierda a derecha del diagrama y la línea representativa cruza el diagrama desde la parte inferior izquierda hasta la superior derecha formando un ángulo de 60° con las líneas guía de BBPA. Finalmente, los valores de EVP aumentan de derecha a izquierda y las líneas guía se trazaron de forma que al cruzarse con las guías de PPA y BBPA forma un ángulo de 60° [19].

Las variables climáticas BPA, EVP, PPA y BBMA se categorizan logarítmicamente según los distintos rangos de clasificación propuestos por Leslie Holdridge en el diagrama mostrado en la figura 1; posteriormente al correlacionarse entre sí estas variables, se determinan las diversas zonas de vida y se asignan a sus respectivas regiones latitudinales y fajas altitudinales [37]. Entre los hexágonos de distintas regiones latitudinales o fajas altitudinales de la clasificación de zonas de vida de Holdridge existen áreas de contacto que representan zonas de transición entre un bioma y otro; y aquellos puntos que se localizan dentro de estas zonas se asignan a la zona de vida más cercana con respecto al centroide del hexágono [19][37].

Una de estas zonas de vida representa el BST, que la investigación de [1] describe, que de la totalidad de los bosques del mundo, el BST conforma el 3% y se constituye en un ecosistema de vital importancia para la variedad de vida y los servicios que este brinda. Del total restante de BST más de la mitad (54.2%) se encuentra en América del sur [7]. El BST se caracteriza por tener un dosel más bajo y menos denso a comparación de otros bosques, debido a las dificultades de crecimiento de las plantas que se han adaptado a las condiciones climáticas de este bioma; marcadas por una irregularidad anual en las lluvias y una fuerte estación seca [1].

Para [7] y [10] el BST se caracteriza por contar con temperaturas promedio anuales mayores a los 17° y donde la evapotranspiración supera la precipitación promedio de 250 a 2000 mm por año. Sin embargo, [7] y [10] en una definición más aproximada del BST lo definen como zonas con temperaturas iguales o mayor a 25°C y donde las precipitaciones anuales están entre los 700 a 2000 mm por año [10]. Así mismo, [29] señalan que, bajo la clasificación de zonas de vida de Holdridge, el bioma BST suele tener precipitaciones entre los 1000 y 2000

mm por año, temperaturas mayores a 24°C y una evapotranspiración entre 1 a 2 veces mayor respecto a las precipitaciones, adicionando que se presentan en altitudes por debajo de los 1000 metros sobre el nivel del mar (msnm).

Para evaluar los cambios en los usos del suelo y la transformación del BST, se emplea la ecuación (7) utilizada por [38][39] y propuesta por la *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) en 1996, que permite la cuantificación porcentual de la tasa de cambio anual (TCA) en las áreas entre la primera fecha (S_1) y la segunda fecha (S_2), facilitando la identificación de tendencias de pérdida o recuperación en el número de años (n) comprendido entre las dos fechas.

$$TCA = \left[\frac{S_2}{S_1} \right]^{\frac{1}{n}} - 1 \quad (7)$$

5.3 Marco Referencial

En esta sección se encuentran referencias a investigaciones relacionadas con el tema de clasificación, en especial con sistema de zonas de vida de holdridge y el bioma BST, resaltando sus enfoques metodológicos, conocimientos existentes y conclusiones; Por lo que se constituye en el punto de partida para el actual estudio.

Un sistema de clasificación fue propuesto por [40] para determinar las zonas de vida de los Estados Unidos, con la intención de delimitar las áreas de distribución de la fauna y flora nativa para relacionar la presencia de estas con los cultivos presentes en el país. Contando con una debilidad señalada por [19], que fue la falta de bases en parámetros climáticos específicos. Así mismo [19] menciona que la división de la vegetación realizada por [41] fue bastante sólida en sus definiciones, sin embargo, estas no tuvieron relación con el clima y falla por la falta de parámetros en sus unidades.

Lo dicho por [42] señala la existencia del sistema de clasificación de Köppen que emplea fórmulas empíricas utilizando únicamente datos de temperatura y precipitación para definir 5 grupos de climas y sus subdivisiones para un total de 11 tipos climáticos fundamentales; que son de fácil aplicación para delimitar los principales grupos de plantas y seres vivos. Anteriormente [19] resaltó que, al momento de hacer un uso práctico de este sistema, se han encontrado fallas debido a la poca correlación de la vegetación con otras divisiones importantes que se encuentran presentes en el ambiente.

Para [19] uno de los principales inconvenientes para cualquier ciencia es la determinación de una unidad básica, existiendo una tendencia hacia la subjetividad; sin embargo, una vez las unidades se escogieron correctamente se logró una definición general para cada una de estas. Con estas unidades básicas establecidas y definidos sus parámetros, se formaron asociaciones que permitieron compararse con mayor facilidad y fueron denominadas zonas de vida [19].

Después de realizar estudios en las zonas del caribe [19] logró desarrollar su clasificación de zonas de vida o biomas utilizando los valores de precipitación y temperatura.

En la investigación realizada por [3], plantea la importancia del mapeo de ecosistemas para definir la transformación de los biomas presentes; donde resalta la implementación de la clasificación de zonas de vida de Holdridge y realiza una comparativa frente a otros métodos de clasificación y mapeos. Las variables de temperatura y precipitación requeridas en la metodología de Holdridge fueron obtenidas de datos satelitales debido al amplio rango de cobertura, disponibilidad y confiabilidad que estos ofrecen. [3], añade que las clasificaciones deben ser lo más homogéneas posibles utilizando la mayor cantidad de datos cuantitativos georreferenciados, menor subjetividad, reflejar fielmente los factores climáticos, debe ser jerárquico y aplicable a todo el mundo.

Así mismo [3], señala que la clasificación de zonas de vida de Holdridge destaca frente a otros métodos al presentar una mayor resolución, ya que se pueden evidenciar unidades ecológicas más pequeñas que están agrupadas en otros sistemas de clasificación. Para realizar una zonificación con base en la clasificación de zonas de vida de Holdridge en Argentina, [4] empleó el uso de los SIG y bases de datos de información climática. Señalando que la integración de las variables climatológicas por medios de los SIG permitió la delimitación de estos biomas de una manera mucho más precisa, y es fácilmente reproducible y objetiva. [4], también recalcan que esta clasificación permite comparar las transformaciones y cambios en la distribución geográfica de las zonas de vida bajo escenarios climáticos e intervalos temporales específicos.

En [7], realizaron un estudio sobre el BST donde su origen y distribución lo detallan como un bioma relativamente antiguo que dio inicio en el periodo del Eoceno medio y presentó una propagación en el Pleistoceno con los cambios de clima de este periodo; alcanzando su mayor extensión en América del Sur en los periodos secos del Pleistoceno. En Colombia la clasificación de este bioma lo distribuye en seis regiones; en el caribe, en los valles del río Cauca, Magdalena, Dagua y Patía, zonas secas del norte de los andes y algunas zonas del piedemonte de los llanos. La presencia del bioma BST en el valle geográfico del río Cauca va desde el sur del departamento del Valle del Cauca hasta el norte de Antioquia según lo expresado por [10].

Aunque en los estudios realizados por [2] y otros investigadores obtuvieron mapas del BST en el neotrópico a partir de imágenes satelitales MODIS, este mapeo obtuvo una sobreestimación de las áreas reales del BST según [7]. En el estudio relacionado con el BST en Colombia con el propósito de aportar, recopilar y consolidar información científica para sustentar una adecuada gestión del bioma, fueron utilizados datos cartográficos de coberturas Corine Land Cover (CLC) del IDEAM, el sistema nacional de áreas protegidas, vocación y conflictos de uso del suelo y degradación de tierras y suelos por desertificación [7].

En el estudio realizado por [29], para la identificación de la presencia del bioma BST en un municipio del departamento de Cundinamarca, emplearon la metodología de clasificación de zonas de vida de Holdridge e imágenes satelitales, sumado a información cartográfica existente de la zona. Esta metodología se utilizó para reconocer las transformaciones que ha

presentado el BST de la zona de estudio a través de un periodo determinado de tiempo. El propósito de este estudio fue relacionar los procesos de transformación del BST con la desertificación en el municipio.

La selección de la clasificación de zonas de vida de Holdridge por parte de [29], se basó en que la distribución del bioma BST está influenciada por las características climáticas de una zona específica y este método relaciona estas variables climáticas; adicionalmente las imágenes satelitales y la cartografía fueron usadas para corroborar la presencia del BST resultante. Finalmente, [29] usaron el software ArcGIS por la practicidad en la representación de la transformación del BST y la desertificación.

Por su parte [9], en la investigación del BST en el valle del Cauca expone el uso de imágenes satelitales y cartografía, realizando superposición de capas vectoriales e imágenes satelitales Landsat para delimitar la zona de interés. Esta combinación de insumos fue utilizada para identificar las áreas naturales de BST en el valle del Cauca, delimitarlas y asociar las dinámicas de transformación y pérdida del BST con los usos del suelo; para estos procesos [9] utilizaron el software ArcGIS desktop. Esto con el fin de mostrar cómo la estructura, composición y función del BST han presentado transformaciones en las últimas décadas.

6. METODOLOGÍA

Como soporte a la metodología empleada se presenta de forma resumida en el diagrama de la figura 5, donde se muestran la secuencia a seguir representada en fases consecutivas que ayudarán al cumplimiento del proyecto.

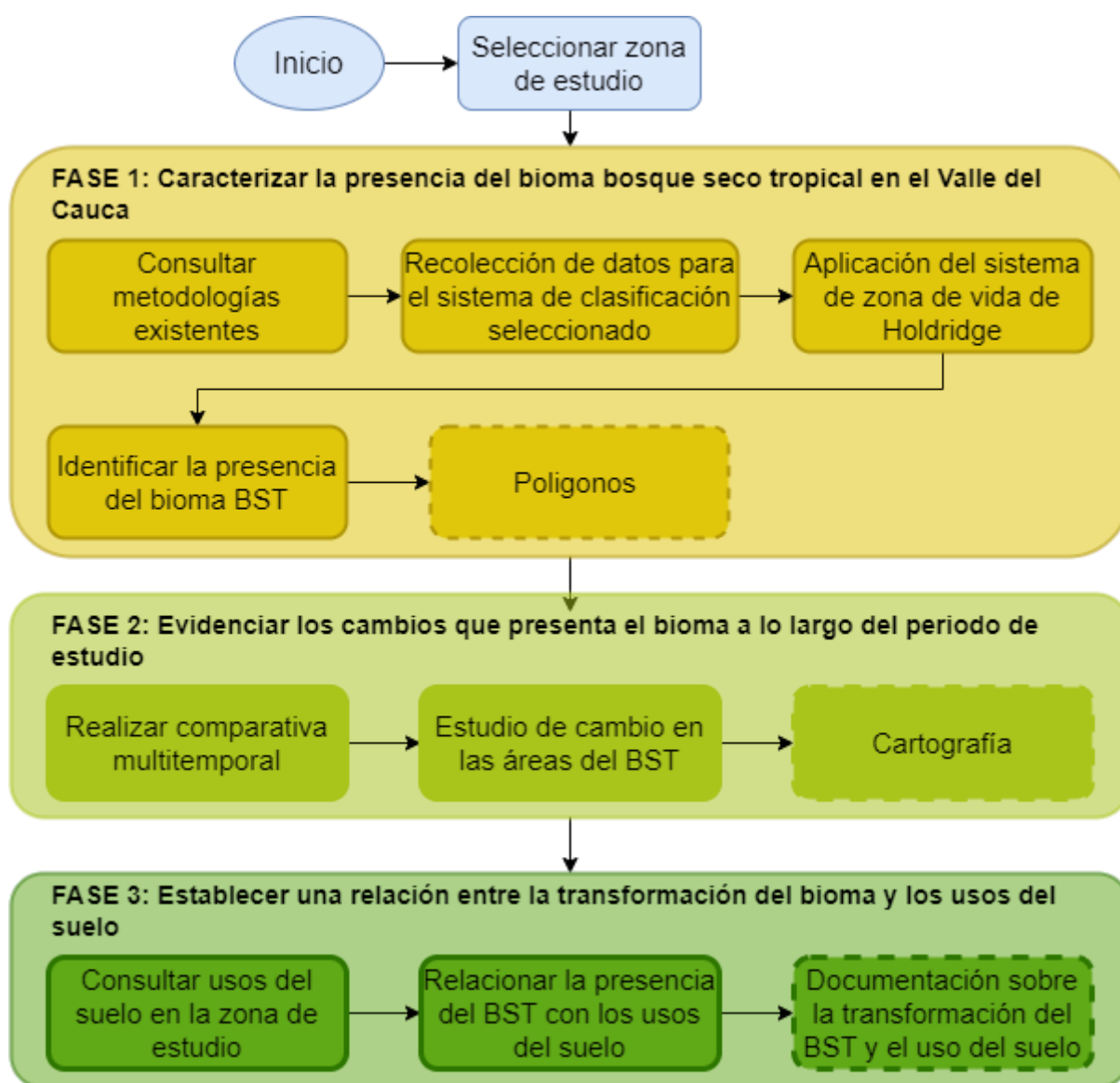


Figura 2. Diagrama metodológico.

6.1 Selección de zona de estudio.

Determinar el área de estudio fue un paso crucial ya que este establece las bases para el resto del proceso metodológico. Para garantizar que se pueda capturar el nivel de detalle necesario

para los propósitos de la investigación, esta selección se basa en un análisis de la resolución espacial de las imágenes tomando en cuenta la escala que estas ofrecen. Fue pertinente seleccionar un área idónea para abordar los objetivos del estudio.

Como zona de estudio se seleccionó el departamento del Valle del Cauca, como se observa en la figura 4, que se encuentra localizado en la parte suroccidental de Colombia; cuenta con 42 municipios y 88 corregimientos y su capital es Santiago de Cali. Se sitúa aproximadamente entre los 03°04'02" y 05°02'08" latitud norte y 72°42'27" y 74°27'13" longitud oeste; contando con una expansión territorial de 22.140 km² lo que representa el 1.9 % del territorio nacional. Los departamentos de Chocó, Caldas y Quindío marcan el límite Norte del departamento, al Este sus límites se encuentran con Quindío y Tolima. Al sur, se encuentra el departamento del Cauca y al Oeste, el Valle del Cauca se extiende hasta las costas del océano Pacífico, compartiendo frontera con Chocó [43].

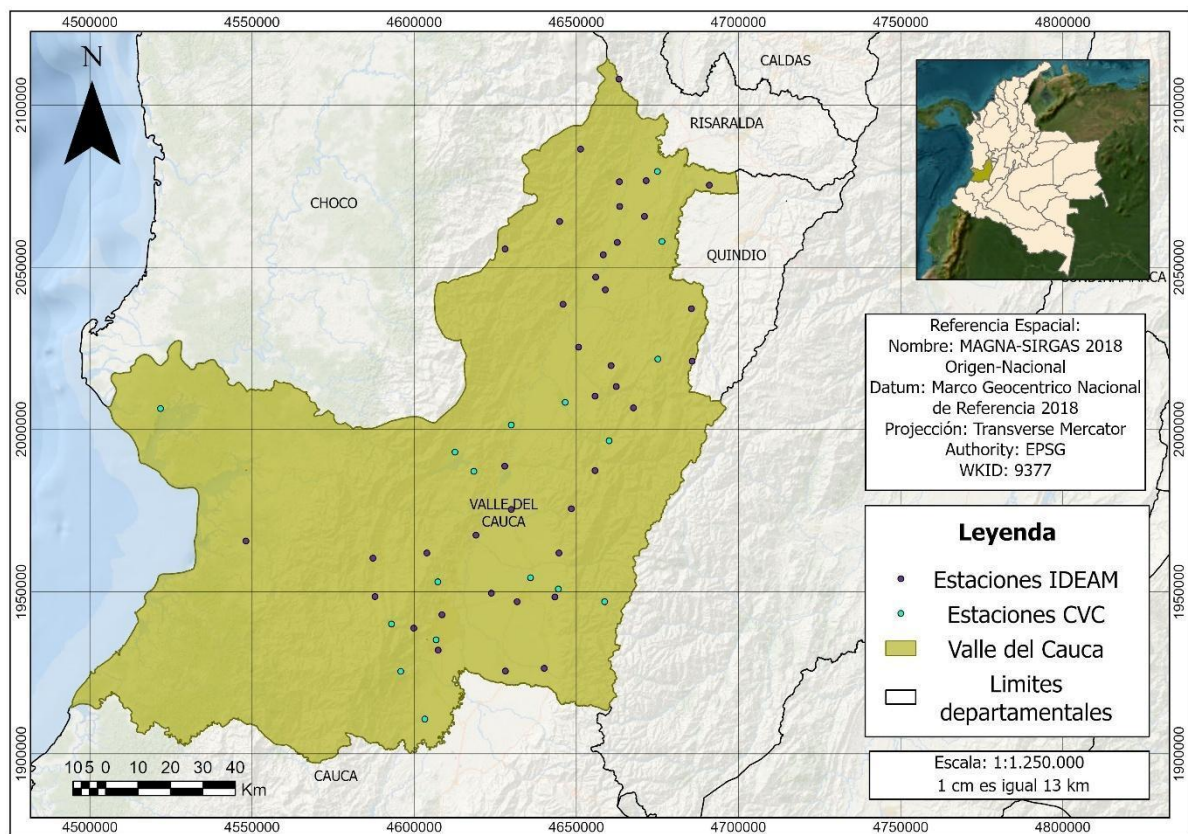


Figura 3. Localización de la zona de estudio.

El Valle del Cauca cuenta con las condiciones de área de una potencial distribución del BST, incluyendo zonas planas y parte del piedemonte de las cordilleras Occidental y Central, sobre todo en el valle geográfico del río Cauca [9][10].

6.2 Consulta de metodologías existentes.

Se realizó una búsqueda de investigaciones en las cuales se han desarrollado clasificaciones de biomas en diferentes regiones o países como Colombia, Argentina, Perú o Estados Unidos [3][4][9][29][37][44]. Adicionalmente, se llevó a cabo la revisión bibliográfica con el fin de contrastar métodos y posteriormente realizar un proceso de selección del método más objetivo [19][40][41][42].

Una vez se identificaron las diferentes metodologías existentes, se consideró la objetividad y utilidad de cada una. Finalmente se seleccionó la metodología de [19] que resultó más apropiada en función de la congruencia en los criterios de clasificación y los alcances esperados en los objetivos.

6.3 Recolección de datos (Variables de las Zonas de vida de Holdridge).

Para la información geográfica de la zona de estudio se descargó el shp de departamentos de Colombia en una escala 1:100.000 y el Dem de Colombia con resolución de 30 m; del Atlas de Colombia en mapas desarrollado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Para la recolección de datos correspondientes a los criterios de clasificación de las Zonas de vida de Holdridge, se hizo uso de la herramienta Google Earth Engine (GEE), con la que se delimitó la zona de estudio seleccionada con la herramienta “assets” en la cual se agregó el archivo shapefile. Se realizó la recopilación de datos de precipitación de CHIRPS [45] y datos de temperatura superficial de MODIS en un periodo de veintiún años (2000-2020). Posteriormente, por medio de un script en el editor de código de GEE, se realizó la recopilación y procesamiento de los datos de precipitación y temperatura para el periodo de estudio.

Para la precipitación se utilizó la colección UCSB-CHG/CHIRPS/PENTAD con una resolución espacial de 0,05° (5500m), se filtraron y seleccionaron las imágenes correspondientes a cada año; se seleccionó la banda “precipitation” y se obtuvo la precipitación total anual. Para la temperatura se empleó la colección MODIS/061/MOD11A1 con una resolución espacial de 1000 m, se seleccionó la banda “LST_Day_1km” con la que se calculó el promedio anual de temperatura y se convirtió de grados Kelvin a grados Celsius. Los resultados obtenidos de ambas colecciones fueron recortados al área de interés y finalmente se exportaron en formato Geo TIFF.

Adicionalmente a los datos de los satélites, se descargaron datos de las estaciones meteorológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) para la validación de los datos satelitales obtenidos, las estaciones IDEAM se presentan en la tabla 1 y las CVC en la tabla 2.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas del IDEAM en el Valle del Cauca.

Nombre	Categoría	Municipio	Fecha instalacion
ALCALA [26120150]	Pluviométrica	Alcalá	15/03/1972
PARDO [26100700]	Pluviométrica	Andalucía	15/01/1972
LAS BRISAS - AUT [26115090]	Climática Principal	Ansermanuevo	30/06/2005
BOLIVAR [26110040]	Pluviométrica	Bolívar (Valle del cauca)	15/04/1961
EL TIGRE [53090040]	Pluviométrica	Buenaventura	15/02/1980
EL PLACER [26100690]	Pluviométrica	Buga	15/01/1971
CEILAN [26100770]	Pluviométrica	Bugalagrande	15/11/1974
GALICIA [26100410]	Pluviométrica	Bugalagrande	15/01/1972
LUCERNA HACIENDA [26100070]	Pluviométrica	Bugalagrande	15/11/1974
LA CAMELIA [26120120]	Pluviométrica	Caicedonia	15/07/1971
UNIVERSIDAD DEL VALLE - AUT [26055120]	Climática Principal	Cali	25/11/2006
CALI SEDE IDEAM [26080310]	Pluviográfica	Cali	15/10/1996
PICHINDE [26080280]	Pluviométrica	Cali	15/01/1974
CABUYAL [26060020]	Pluviométrica	Candelaria (Valle del cauca)	15/05/1953
PALMASOLA [26100830]	Pluviométrica	Cartago	15/08/1980
QUEREMAL [53100040]	Pluviométrica	Dagua	15/01/1969
PROVIDENCIA [53110030]	Pluviométrica	Dagua	15/03/1975
VILLA NUEVA [26110120]	Pluviométrica	El Águila	15/09/1970
EL PARAISO [26090460]	Pluviométrica	El Cerrito	15/03/1970
LITUANIA [54030030]	Pluviométrica	El Dovio	15/05/1966
FLORIDA [26070760]	Pluviométrica	Florida	15/05/1953
LAS JUNTAS [26090060]	Pluviométrica	Ginebra	15/03/1975
GUACARI [26090630]	Pluviométrica	Guacarí	15/01/1972
LA CUMBRE [53110100]	Pluviométrica	La Cumbre	15/03/1975
SAN PEDRO [26100740]	Pluviométrica	La Victoria (Valle del cauca)	15/10/1969
OBANDO [26100300]	Pluviométrica	Obando	15/08/1967
AEROPUERTO A BONILLA [26075040]	Sinóptica Principal	Palmira	15/07/1971
PALMIRA ICA [26075010]	Agrometeorológica	Palmira	15/01/1930
ESPERANZA PRADERA [26070170]	Pluviométrica	Pradera	15/04/1982
CANDELARIA [26115080]	Meteorológica Especial	Roldanillo	15/01/1978
ISUGU [26110230]	Pluviográfica	Roldanillo	15/06/1971
CUMBARCO [26125130]	Climática Ordinaria	Sevilla	15/10/1973
SAN FRANCISCO [26110160]	Pluviométrica	Toro	15/06/1971
CEROS [26110300]	Pluviométrica	Toro	15/11/1979
PUERTO FRAZADAS [26100350]	Pluviométrica	Tuluá	15/02/1971
PATUMAC [54030010]	Pluviométrica	Versalles	15/03/1966
VJES [26080070]	Pluviométrica	Vijes	15/04/1946
MEDIACANOA-ALERTAS [26080290]	Pluviométrica	Yotoco	15/09/1979
ZARZAL [26100780]	Pluviométrica	Zarzal	15/11/1974

Tabla 2. Estaciones meteorológicas de la CVC en el Valle del Cauca.

Nombre	Categoría	Municipio	Fecha instalacion
BOSQUE YOTOCO [2623300201]	Climatológica	Yotoco	1/09/1983
DARIEN [5421200206]	Climatológica	Calima	1/06/1995
EL PLACER [2614100102]	Climatológica	Guadalajara de Buga	1/01/1971
EL TOPACIO [2622110201]	Climatológica	Cali	1/12/1964
GARZONERO [2620000202]	Climatológica	Yotoco	1/10/1970
ING MANUELITA [2612700201]	Climatológica	Palmira	1/01/1932
IRLANDA [2614400104]	Climatológica	Sevilla	1/02/1971
LA BUITRERA [2622600201]	Climatológica	Yumbo	1/01/1979
LA NOVILLERA [2621900201]	Climatológica	Jamundi	1/11/1995
LA SIRENA [2612810203]	Climatológica	Palmira	1/02/1988
LA TERESITA [2622400201]	Climatológica	Cali	1/12/1966
MIRAVALLS [2614900201]	Climatológica	La Victoria	1/08/1967
MONTELORO [2614100203]	Climatológica	Tuluá	1/02/1971
BAHIA MALAGA [5300000203]	Climatológica	Buenaventura	1/08/1984

6.4 Procesamiento de los datos

El procesamiento de los datos fue la etapa operativa para la aplicación del sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge en la zona de estudio. Para esto, se adecuaron los datos satelitales obtenidos. Se emplearon herramientas SIG, junto con la automatización mediante scripts. El diagrama de la figura 4 resume el procedimiento para la definición de las zonas bioclimáticas del Valle del Cauca.

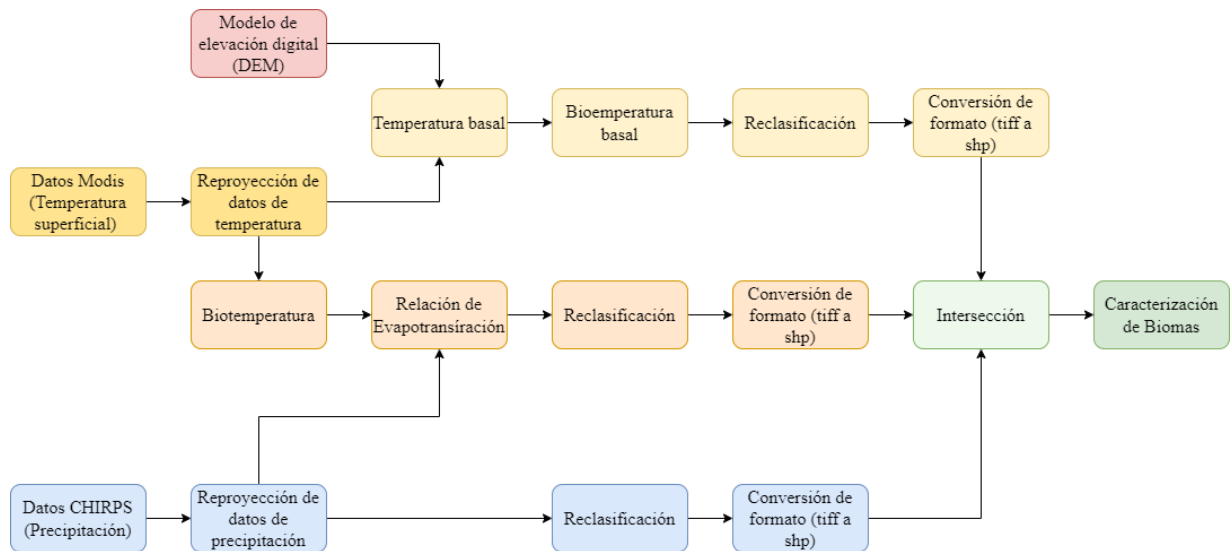


Figura 4. Diagrama de procesamiento de la información.

6.4.1 Aplicación del sistema de clasificación para identificación de BST en la zona de estudio.

Una vez se descargaron los datos satelitales se procesaron en el aplicativo ArcGIS pro, para la reproyección de los datos al sistema de referencia “Magna Sirgas: Origen Nacional” y el escalado de los ráster de precipitación CHIRPS a la misma resolución espacial que los ráster de temperatura de MODIS. Del archivo shp de los departamentos se exportó en formato shp solamente el polígono del Valle del Cauca; con el nuevo shp del Valle del Cauca se hizo una extracción por máscara del DEM de Colombia para obtener solamente la sección del Valle del Cauca. Finalmente, por medio de un script de Python que permitió automatizar el procesamiento de los datos según la metodología propuesta por Holdridge se inició la identificación de los Biomas en la zona de estudio.

Para la ejecución del script se emplearon las librerías “arcpy” y “os”; se definieron las rutas para los archivos de entrada y salida en las carpetas necesarias para organizar los resultados de precipitación, evapotranspiración, temperatura y biomas. Se generó un “DEM basal” a partir del Modelo Digital de Elevaciones del Valle del Cauca, empleando parte de la ecuación (4) para ajustar su escala; se calculó la Temperatura Basal (TB) sumando el “DEM basal” a la temperatura original. Luego, se ajustó la temperatura al rango de 0 a 30°C con la ecuación (5), obteniendo la Biotemperatura Basal, que posteriormente se reclasificó en las categorías

definidas en la tabla 3 según los intervalos bioclimáticos del sistema de Holdridge y se convirtió a formato vectorial.

Tabla 3. Valores promedio de Biotemperatura en grados Celsius (°C).

Valor de inicio (°C)	Valor final (°C)	Valor nuevo asignado
0	1.5	10
1.5	3	11
3	6	12
6	12	13
12	18	14
18	24	15
24	30	16

Los datos de precipitación (PREC) obtenidos de CHIRPS fueron reclasificados según la tabla 4 y transformados a formato vectorial. De igual manera, Para el cálculo de la EVP, se ajustó la temperatura original al rango de 0 a 30°C con la ecuación (1) para obtener la biotemperatura; con los datos de precipitación y biotemperatura se aplicó la ecuación (3) obteniendo así la EVP, esta se reclasifico en los rangos definidos en la tabla 5 convirtiendo los resultados a formato vectorial.

Tabla 4. Valores promedio de Precipitación anual (mm/año).

Valor de inicio	Valor final	Valor nuevo
62,5	125	20
125	250	21
250	500	22
500	1000	23
1000	2000	24
2000	4000	25
4000	8000	26
8000	16000	27

Tabla 5. Valores de la evapotranspiración potencial.

Valor de inicio	Valor final	Valor nuevo asignado
0,125	0,25	30
0,25	0,5	31
0,5	1	32
1	2	33
2	4	34
4	8	35
8	16	36
16	32	37

Para la clasificación de los biomas, se interseccionaron las capas vectoriales de EVP y PREC, y la capa de BTB se utilizó para determinar la región latitudinal generando los shapefile de biomas para cada año analizado. Con los resultados obtenidos tras la intersección, los polígonos con los valores de reclasificación de 16, 33 y 24 para biotemperatura, evapotranspiración y precipitación respectivamente, representarán los polígonos correspondientes al bioma BST de acuerdo con el esquema de las zonas de vida de Holdridge presentado en la figura 1.

Adicionalmente, se agregaron los campos "Bioma" y "Desc_Bio" a las capas resultantes, y se aplicó un suavizado cartográfico a los polígonos para su análisis y visualización. Este proceso permitió obtener mapas vectoriales de los biomas para cada año de estudio, proporcionando una representación espacial de las zonas de vida según la metodología de Holdridge en el Valle del Cauca.

6.5 Extracción de datos multitemporales

Para realizar el comparativo multitemporal se contrastaron los resultados obtenidos por medio de los polígonos generados en diferentes momentos temporales. Con las herramientas de ArcGIS Pro se calcularon el total de las áreas de los biomas resultantes y se exportaron en un archivo Excel (.xlsx) para generar los análisis necesarios e identificar el comportamiento y las transformaciones del BST y sus zonas de transición adyacentes. Se utilizaron herramientas para el análisis geoespacial, por medio de las cuales se identificó y cuantificó la magnitud de las transformaciones o cambios que se presentaron en la composición del bioma BST a lo largo del período de tiempo estudiado.

Este comparativo brindó la información necesaria que permitió identificar la distribución del bioma, ofreciendo una visión gráfica y detallada de cómo ha evolucionado el ecosistema en la

región de estudio, permitiendo reconocer las áreas o años críticos de cambio que pueden ser empleados para lograr una mayor comprensión de los procesos que pudieron haber conducido a estas transformaciones.

6.6 Estudio de cambios en las áreas de BST

Con ayuda de un script de Python se procesó el archivo Excel con las áreas del BST y sus zonas de transición adyacentes, y utilizando la ecuación (7) se reconoció el porcentaje de crecimiento del BST; junto a esta ecuación se implementaron otras técnicas estadísticas que permitieron no solo identificar el comportamiento del BST sino también de las variables de precipitación, temperatura y evapotranspiración asociadas a este a lo largo del periodo de estudio.

6.6.1 Consulta de Cobertura y usos del suelo en la zona de estudio.

Se consultó y recopiló información en diferentes entidades locales, regionales y nacionales, con el objetivo de obtener datos relacionados con la cobertura y uso del suelo en el departamento. Esta búsqueda estuvo orientada hacia las fuentes oficiales con datos acerca de la metodología CLC (Corine Land Cover) adaptada para Colombia, que son los informes, documentación y bases de datos que contuvieran la historicidad de la evolución y transformación de los usos del suelo a lo largo del periodo de estudio.

Se descargaron cuatro capas geográficas en formato shapefile a través del portal de datos abiertos del IDEAM que agrupaban la clasificación de cobertura del suelo a escala 1:100.000 correspondiente a los periodos del monitoreo y seguimiento de suelos y tierras en los años 2000 a 2002, 2005 a 2009, 2010 a 2012 y 2020 para Colombia.

6.6.2 Procesamiento de las capas de Cobertura y uso del suelo.

Una vez obtenidas las capas de cobertura y uso del suelo, se procesaron utilizando el aplicativo ArcGIS Pro, con el fin de delimitar el área de estudio y extraer información relevante para establecer la relación entre la presencia del Bioma BST y el seguimiento de las coberturas. Inicialmente, se realizó la preparación de las capas de entrada, asegurando que todas las coberturas del suelo estuvieran en formato poligonal y compartieran un sistema de referencia geográfico común.

Se realizó un recorte geoespacial de las capas en formato shp restringiendo la información únicamente al departamento del Valle del Cauca. Con el propósito de enfocar la relación en la zona ecológica específica BST, por medio de un script de Python, haciendo uso de las librerías “arcpy” y “os” se extrajeron de la caracterización de Biomas realizada anteriormente, los polígonos clasificados como Bosque Seco Tropical (BST), Zona de Transición Bosque Seco Tropical - Bosque Muy Seco Tropical - Bosque Seco Subtropical (ZT BST-BMST-BS SBT) y

Zona de Transición Bosque Seco Tropical - Bosque Húmedo Tropical - Bosque Húmedo Subtropical (ZT BST-BHT-BH SBT.)

Teniendo delimitada la zona ecológica de interés se procedió a recortar las capas de clasificación de cobertura y uso del suelo, tomando como capa de entrada las clasificaciones de cobertura y uso del suelo del departamento generadas previamente recortando respecto al BST y sus zonas de transición extraídas. Cada capa poseía un campo denominado “CODIGO”, que representaba la clasificación de cobertura del suelo en nivel 3 del sistema CLC. A partir de este campo, se creó un nuevo campo denominado “NIVEL1_AÑO”, que corresponde al nivel 1 de cobertura (primer dígito del código CLC y el año de la capa), esto permitió una clasificación más general, agrupando los cambios entre grandes categorías (territorio artificializado, territorio agrícola, bosques o áreas seminaturales, áreas húmedas y superficies de agua). Este nuevo campo fue calculado extrayendo el primer dígito del campo original, convirtiéndolo previamente en cadena de texto para facilitar la operación.

Se procedió a la detección de cambios a través de intersecciones espaciales de las capas previamente recortadas respecto al BST y sus zonas de transición y acopladas al sistema CLC adaptado para Colombia a nivel 1. Para ello, se emplearon las capas correspondientes a periodos de tiempo consecutivos: 2000–2002 con 2005–2009, 2005–2009 con 2010–2012, y finalmente 2010–2012 con 2020. El resultado de cada intersección fue una capa poligonal que conserva la geometría resultante de la superposición espacial entre ambas coberturas, incluyendo en su tabla de atributos los valores de código de cobertura para cada uno de los años involucrados.

Posteriormente, en cada una de las capas resultantes de la intersección se creó un campo en cada una de las tablas de atributos llamado “TRANSICION”, que representa el cambio de cobertura entre un periodo y otro. Este campo fue calculado concatenando el valor del nivel 1 de cobertura del año inicial con el del año final, separados por un guion bajo (el primer dígito indica la cobertura origen y el segundo digitó la cobertura a la cual transiciona). Para calcular las áreas que transicionaron, se creó un nuevo campo dentro de cada tabla de las tres capas llamado “AREA_HA”, calculado en hectáreas, luego se agruparon los registros por tipo de transición y sumando el área total para cada una. Esto arrojó como resultado una tabla con el resumen correspondiente a la superficie en hectáreas asociada a cada tipo de cambio de cobertura.

6.6.3 Relación entre la presencia del BST y los usos del suelo.

Para realizar el análisis espacial, a través del contraste de mapas vectoriales de cobertura en cada uno de los periodos indicados. Se llevó a cabo un análisis de transición de clases de cobertura, permitiendo identificar las categorías que fueron sustituyendo las zonas boscosas. Se continuó analizando los cambios en la cobertura del suelo a través de los datos de CLC junto con los datos de pérdida y expansión del BST para los periodos 2000-2005, 2005-2010 y 2010-2020.

Se elaboraron gráficas y tablas estadísticas que facilitaron la cuantificación de las pérdidas y las ganancias del BST, además de las áreas que no presentaban cambios a lo largo de los 20 años. Las estadísticas se calcularon tanto a nivel departamental como por subregiones con presencia significativa del bioma, lo que permitió observar patrones espaciales de transformación.

Con el fin de establecer la relación entre el comportamiento del BST y el cambio en el uso del suelo, se realizó un cruce entre las capas de delimitación del bioma y las capas multitemporales de cobertura. Este análisis permitió calcular sobre la proporción del BST las actividades iniciales que fueron reemplazadas por otras antrópicas y determinar los tipos de coberturas que ganaron terreno sobre las áreas del BST.

7. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados que se obtuvieron a partir de la aplicación de la metodología propuesta para el desarrollo del estudio. Dentro de estos resultados se generaron mapas, tablas de datos y gráficos que reflejan la dinámica espacial y temporal de la transformación del bioma BST y sus zonas de transición adyacentes durante el periodo de estudio.

7.1 Estadísticas de validación de datos

En las figuras 5 y 6; se muestra el comportamiento de los datos CHIRPS frente a los datos de las estaciones meteorológicas, se observa que existe una tendencia general entre ambas fuentes de datos para el año 2005 donde aproximadamente los valores máximos medidos fueron de 7163 mm y 8569 mm y los valores mínimos fueron 958 mm y 822 mm para CHIRPS para las estaciones respectivamente; aunque con notorias variaciones en algunas estaciones para el año 2015; por ejemplo “El tigre” cuyo valor estimado por CHIRPS fue de 3861 mm, mientras que en la estación in situ fue de 11903 mm.

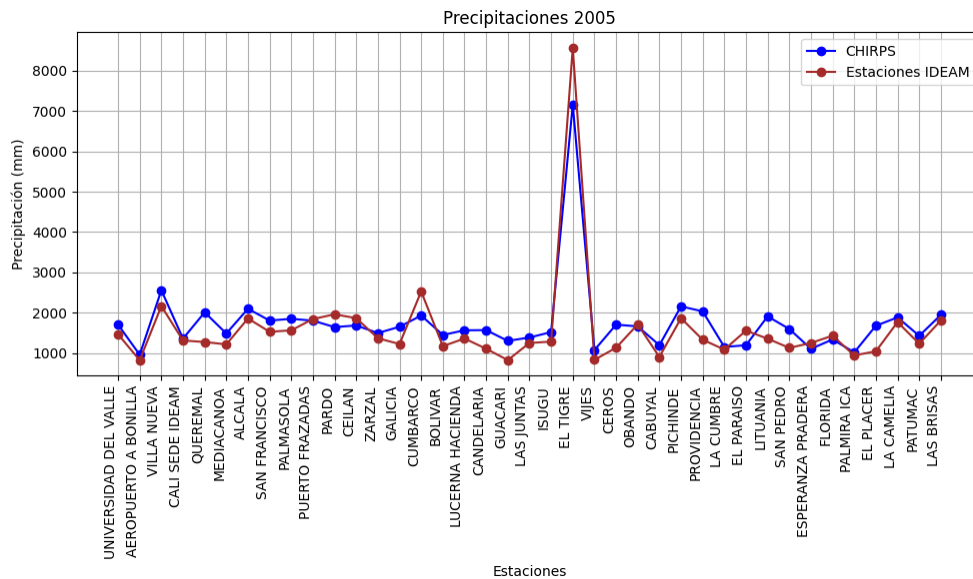


Figura 5. Comparación de precipitaciones anuales estimadas por CHIRPS y observadas en estaciones IDEAM para el año 2005.

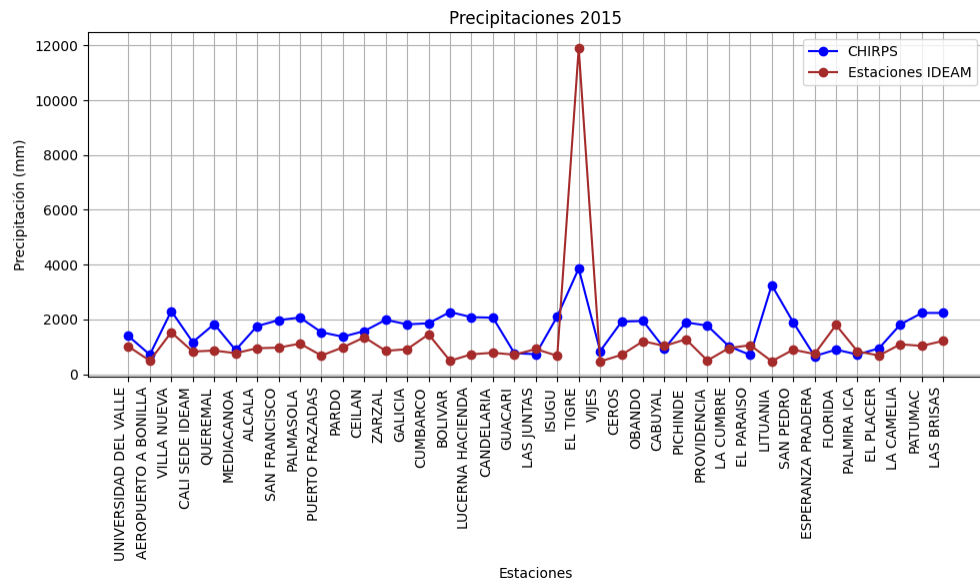
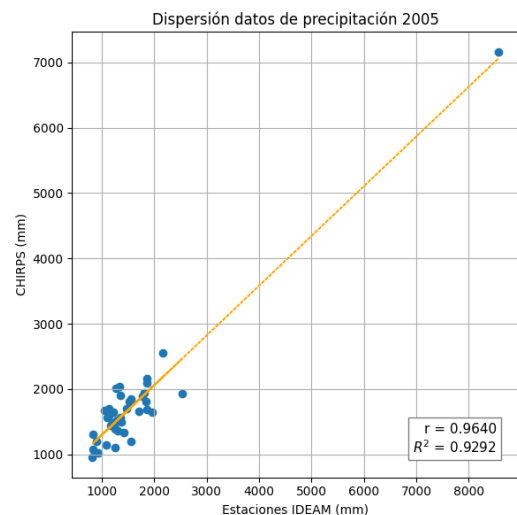
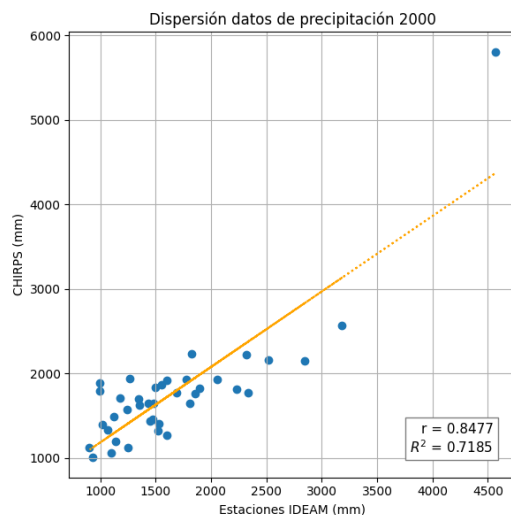


Figura 6. Comparación de precipitaciones anuales estimadas por CHIRPS y observadas en estaciones IDEAM para el año 2015.

Los resultados de los indicadores estadísticos de correlación de Pearson (r) y coeficiente de determinación (R^2) usados para determinar la relación y variabilidad de los datos se presentan en la figura 7; se observa que los años en los que los resultados fueron mayores corresponden a 2005, 2010, y 2013 con valores de r 0.96, 0.92 y 0.94 respectivamente, mientras que el R^2 mostró valores de 0.92, 0.86 y 0.88 respectivamente.



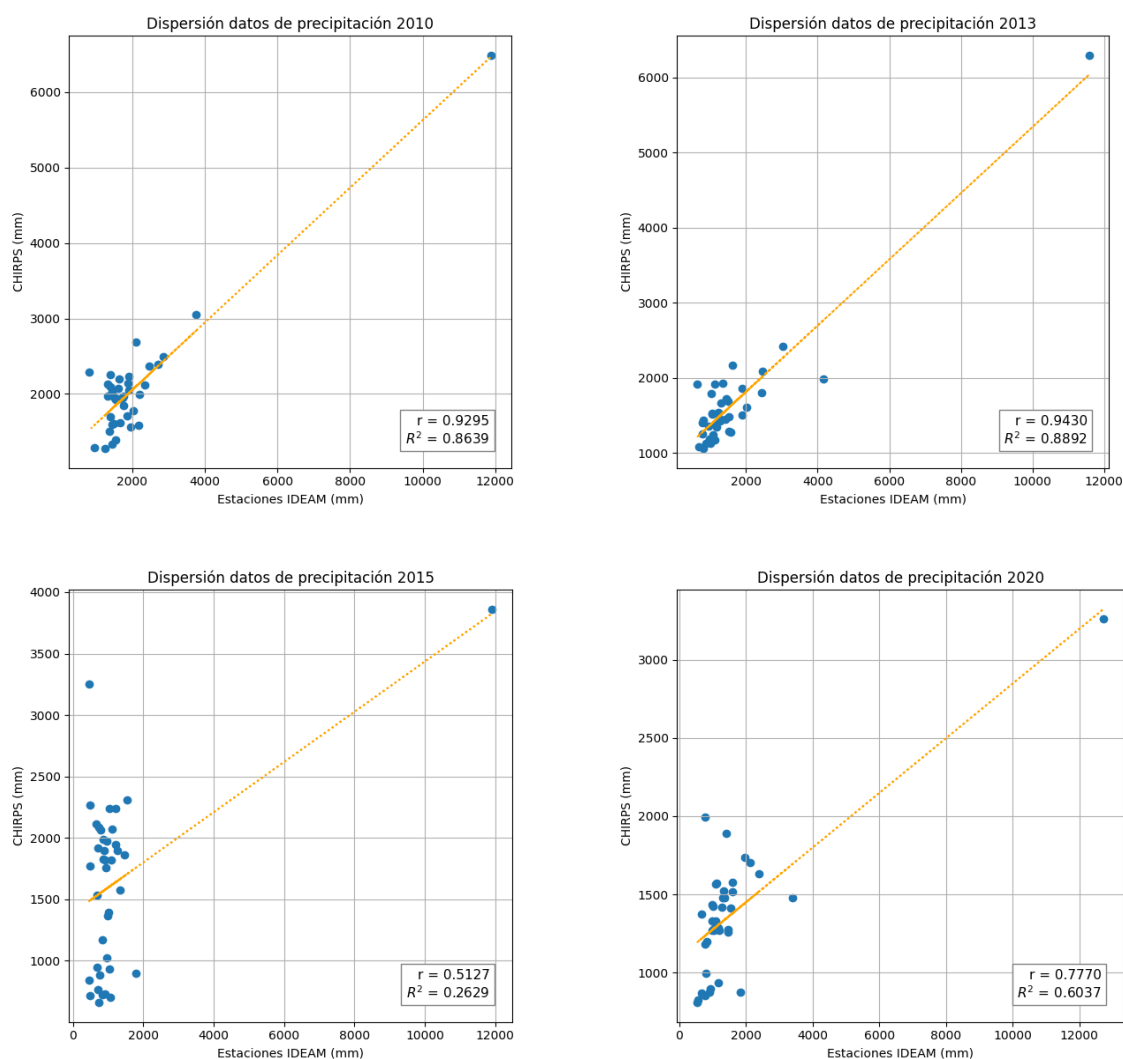


Figura 7. Relación entre datos CHIRPS y estaciones IDEAM.

La muestra constó de los años 2000, 2002, 2005, 2008, 2010, 2013, 2015, 2018 y 2020, arrojando como promedio los valores mostrados en la tabla 6; indicando una correlación congruente entre ambas fuentes de datos, una determinación alta indicando que 72% de la variabilidad de los datos CHIRPS se pueden explicar con las estaciones IDEAM y una sobreestimación de CHIRPS sobre IDEAM.

Tabla 6. Promedios estadísticos entre CHIRPS e IDEAM.

Promedios estadísticos	
r	0.8439
R^2	0.7289
bias	97.18 mm

En las figuras 8 y 9; se muestra el comportamiento de los datos MODIS contra los de las estaciones climatológicas de la CVC correspondientes a los años 2005 y 2015, se observa que los registros MODIS tienden a ser mayores a los de las CVC. Para el año 2005 las temperaturas máximas registradas fueron de 26,7 °C en la estación “Pacífico” y de 25,4 °C en “Garzonero”; por su parte la temperatura máxima registradas por MODIS fue de 30,2 °C para “La independencia” y de 29,5 °C en la estación “Garzonero”. En 2015 los registros más altos se presentaron nuevamente en “La independencia” y “Garzonero” para MODIS llegando a los 32 °C y a 25,8 y 24,8 °C en la CVC respectivamente.

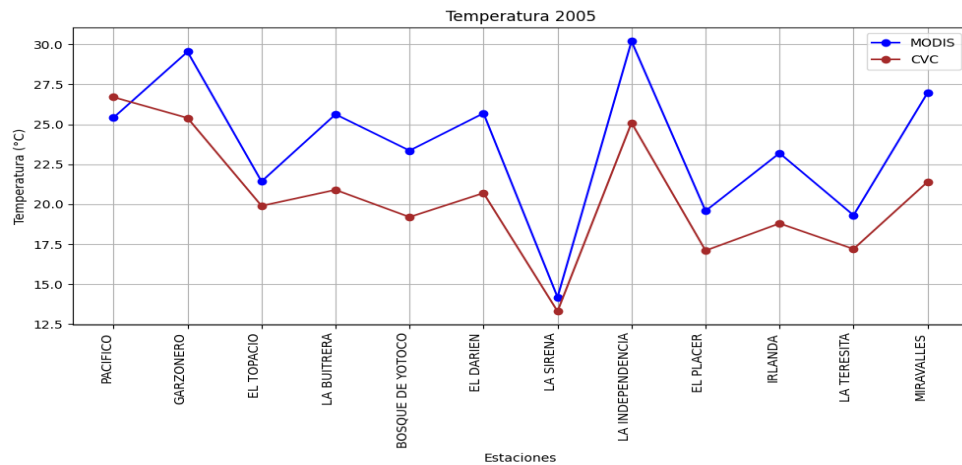


Figura 8. Comparación de temperaturas anuales registradas por MODIS y observadas en estaciones CVC para el año 2005.

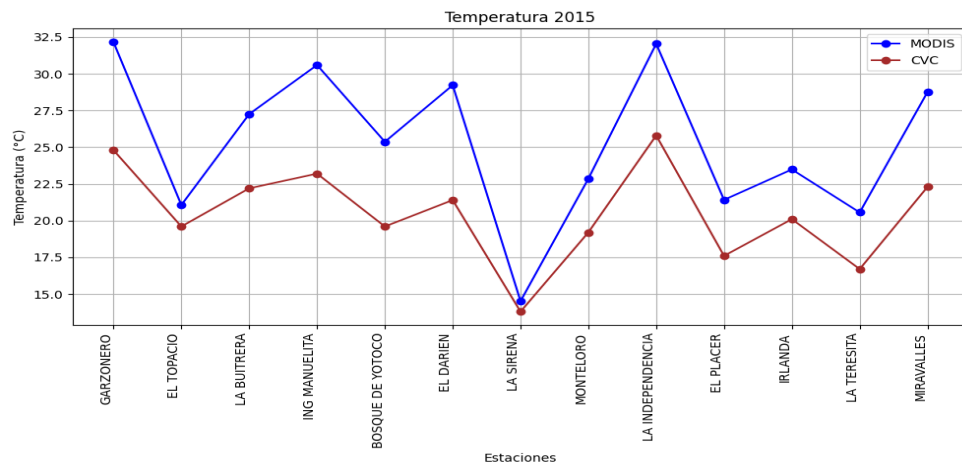


Figura 9. Comparación de temperaturas anuales registradas por MODIS y observadas en estaciones CVC para el año 2015.

Para el caso de la temperatura en la figura 10, se observa que los valores de r y R^2 rondaron entre 0,85 - 0,96 y 0,72 - 0,92 respectivamente; presentando los resultados más altos en los años 2015 y 2013 mientras los más bajos se dieron en los años 2010 y 2000.

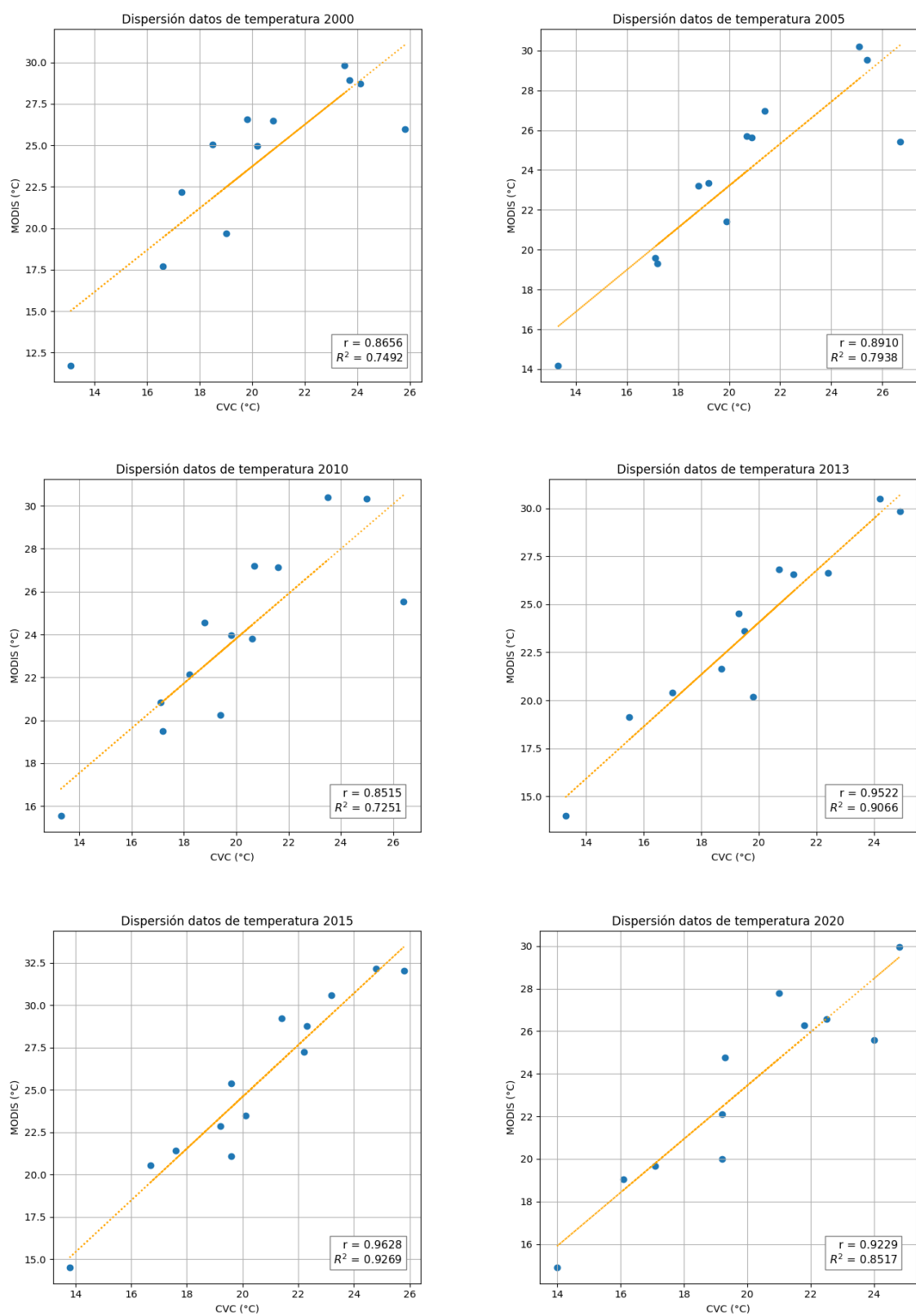


Figura 10. Relación entre datos MODIS y estaciones CVC.

En la tabla 7 se detallan datos promedios de r , R^2 y el sesgo. Los resultados muestran una correlación lineal fuerte entre los datos MODIS y CVC, una determinación alta indicando que el 81% de los datos CVC pueden explicarse con MODIS y una sobre estimación promedio de 3,71 °C de los datos satelitales frente a las estaciones.

Tabla 7. Promedios estadísticos entre MODIS y CVC.

Promedios estadísticos de MODIS vs CVC (temperatura)	
r	0.9045
R^2	0.8194
bias	3.71 °C

7.2 Variables Bioclimáticas

7.2.1 Precipitaciones

Del proceso de caracterización del BST, las variables climatológicas utilizadas arrojaron diversos subproductos que muestran el comportamiento de estas en el periodo de estudio, en la figura 11 se observa la tendencia promedio de precipitación en todo el Valle del Cauca a partir de los datos CHIRPS a lo largo de los años; los años 2006 y 2011 mostraron un mayor valor con aproximadamente 3700 mm/año, mientras que los años con menor registro fueron el 2015 con un promedio aproximado de 2300 mm/año y el 2020 con registro cerca de los 2100 mm/año.

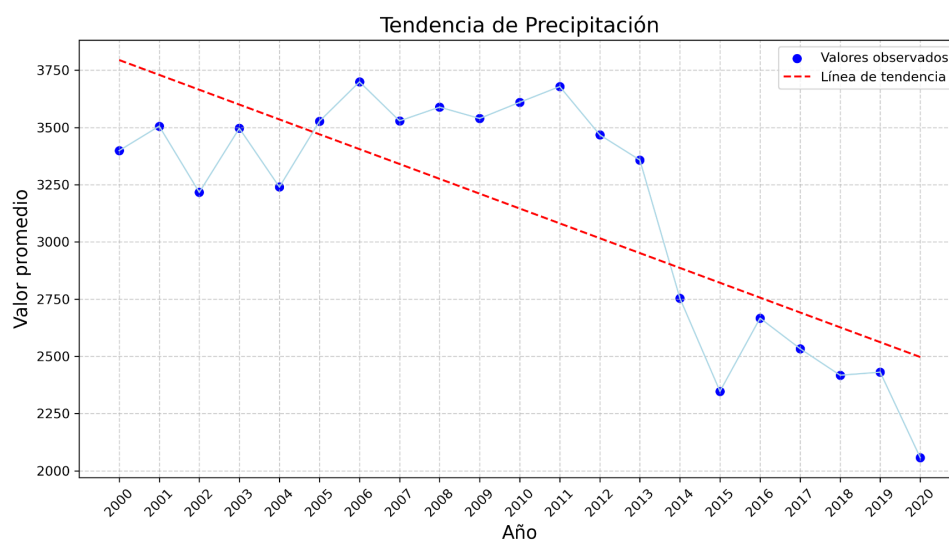


Figura 11. Tendencia de precipitación CHIRPS promedio anual.

La pendiente negativa de la línea de tendencia en la figura 12 muestra una disminución progresiva en las durante la evolución temporal de las precipitaciones según datos CHIRPS, aunque se observó una estabilidad en las precipitaciones con valores promedios en el Valle del Cauca entre los 3200 y 3700 mm/año durante los años 2000 al 2013; a partir del año 2014 se presentó una disminución de las precipitaciones promedio con registros cercanos a los 2000 mm/año.

Las mayores precipitaciones se registraron hacia el occidente del Valle del Cauca en la zona de la costa pacífica superando los 5000 mm, mientras que en la región geográfica del Valle del Cauca las precipitaciones se encontraron entre los 700 a 2000 mm, como se observa en la figura 12.

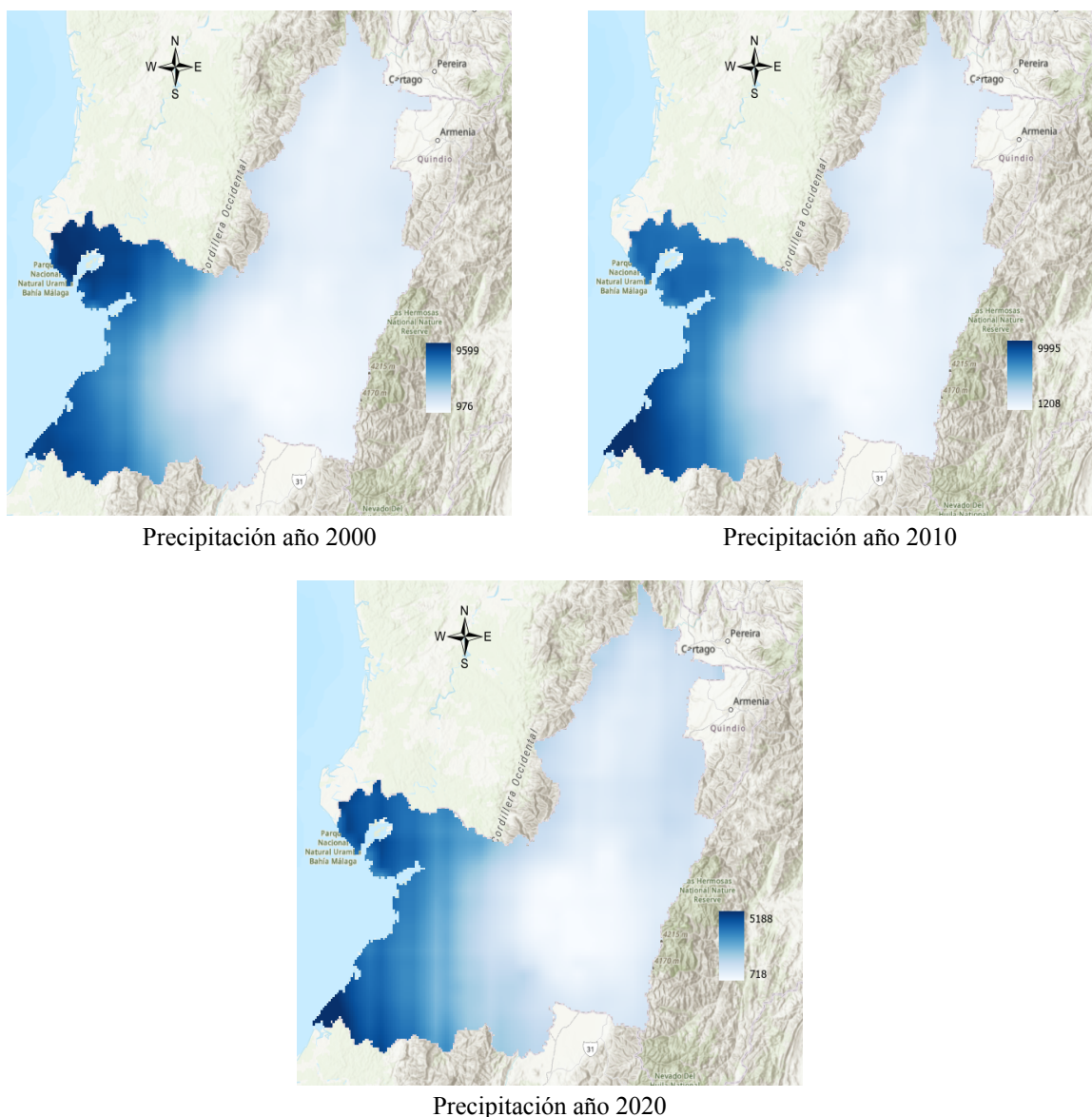


Figura 12. Distribución de precipitaciones 2000 - 2010 – 2020.

7.2.2 Temperatura

La temperatura, temperatura basal y biotemperatura presentadas en las figuras 13 a 15, muestran la tendencia de anuales promedio de térmicas en el Valle del Cauca, permitiendo reconocer el comportamiento general durante el periodo comprendido entre el 2000 y 2020.

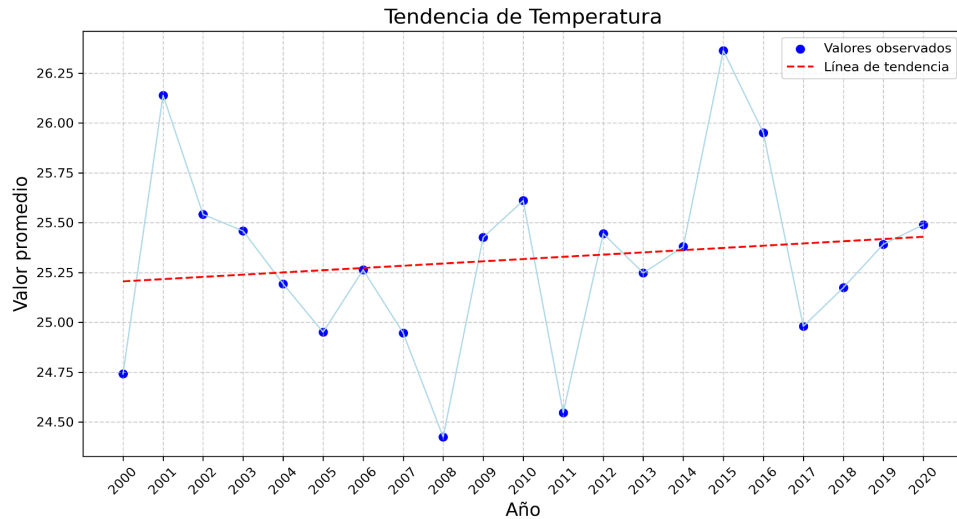


Figura 13. Tendencia de temperatura MODIS promedio anual.

La figura 13 corresponde a los datos originales obtenidos de MODIS, se observa la evolución de los valores medio de temperatura en el Valle del Cauca, la variación en los valores registrados va desde un mínimo de 24.4 °C en el año 2008 y un máximo de 26.3 °C para el año 2015; además se observó una leve tendencia al aumento de la temperatura en el departamento.

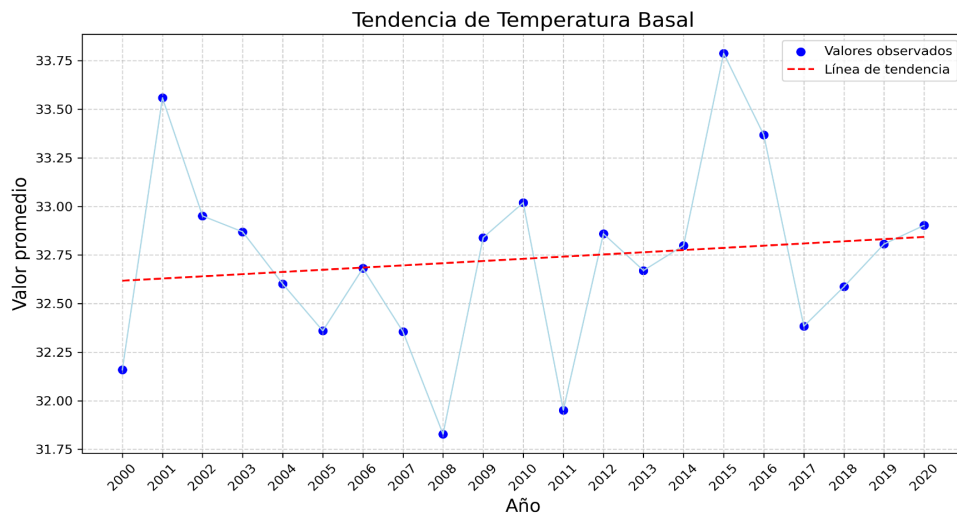


Figura 14. Tendencia de temperatura basal promedio anual.

El comportamiento de la biotemperatura basal media anual mostrada en la figura 14, es muy similar al de la temperatura media original, esto debido a que es el resultado de la ecuación (4) que relaciona la temperatura con el componente altitudinal del Valle del Cauca relacionando la elevación con la temperatura. En este caso los valores medios de temperatura oscilaron entre un mínimo de 31.8 °C para el año 2008 y un máximo de 33.8 °C para el 2015, la tendencia general observada en estos datos también mostró un incremento moderado.

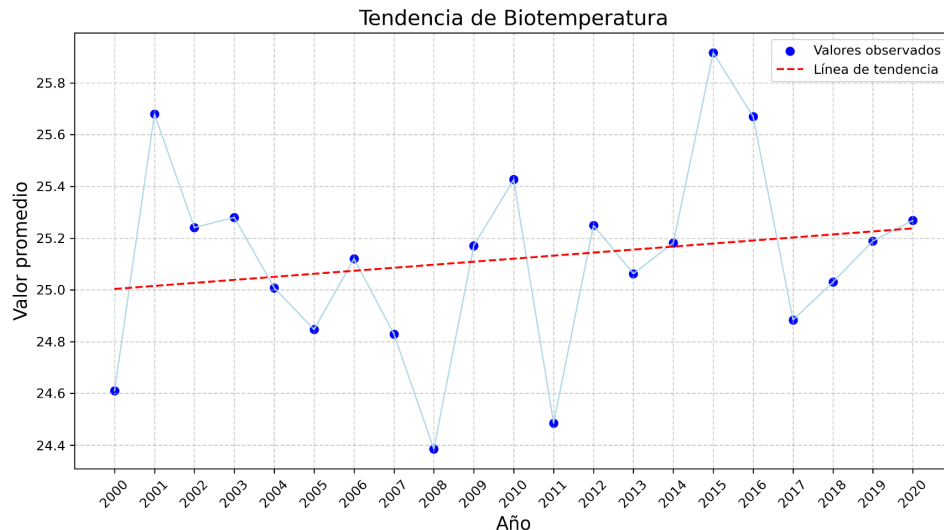
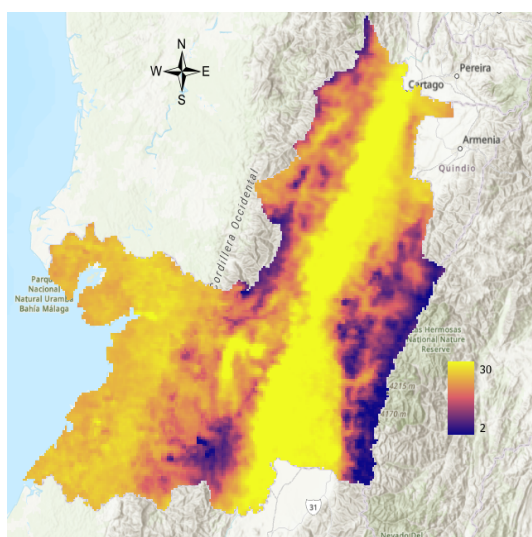


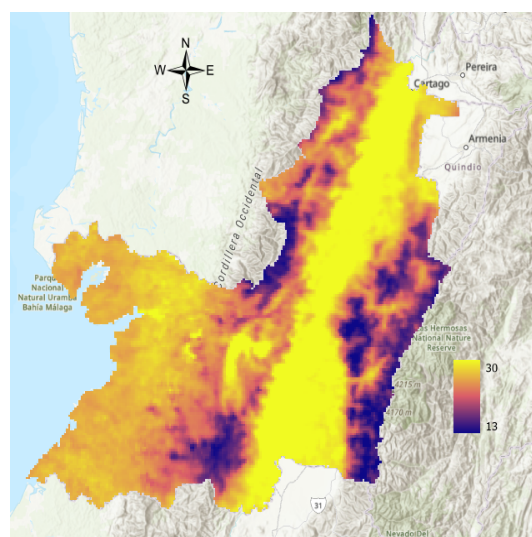
Figura 15. Tendencia de biotemperatura promedio anual.

Mediante la figura 15 se muestra la evolución de la biotemperatura media anual del Valle del Cauca, esta deriva de la temperatura original después de utilizar la ecuación (1) llevando los valores a un rango de 0 a 30 °C. Los valores medios obtenidos en esta condición rondaron entre un mínimo de 24.4 °C para el 2008 y un máximo de 25.9 °C para el 2015; aunque la tendencia mostró un leve incremento, las condiciones fueron relativamente estables.

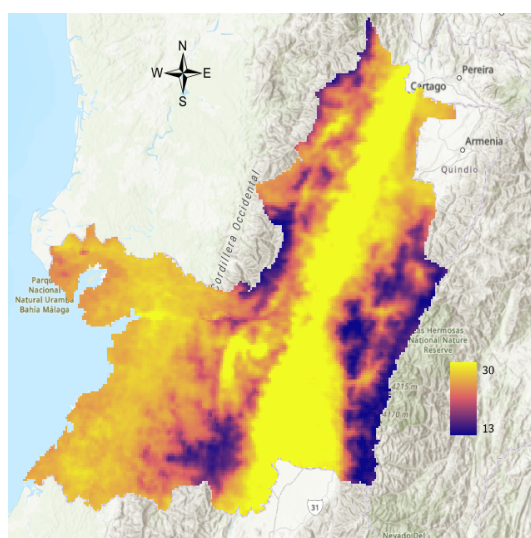
Luego de utilizar la ecuación (2) con la temperatura se obtuvo la biotemperatura que se encuentra en el rango ecológico de 0 a 30 °C que se muestra en la figura 16, esta variable se utilizó para determinar la EVP. En esta variable los valores medios mínimos obtenidos fueron de 24,4 °C para el año 2008 y el máximo fue de 25,9 °C para el 2015. La tendencia, aunque levemente creciente; mostró una predominancia térmica alta que favorece las zonas tropicales según el diagrama de holdridge presentado en la figura 1.



Biotemperatura año 2000



Biotemperatura año 2010



Biotemperatura basal año 2020

Figura 16. Distribución de Biotemperatura 2000 - 2010 - 2020.

En la figura 16, se muestra el comportamiento de la biotemperatura basal en determinados momentos del periodo de estudio correspondiente a los valores reclasificados de la tabla 1 que asigna los rango según la metodología de Holdridge, donde 16 corresponde al rango entre los 24 y 30 °C. Se observó que generalmente la BTB en el Valle del Cauca presentó un dominio térmico alto, puesto que, aunque en el año 2000 se reconocieron zonas con menor temperatura, la predominante fue la del rango 16; para el año 2010 el rango de BTB fue igual para todo el departamento, y aunque en el año 2020 se presentó otro rango de temperaturas el predominante fue el 16.

7.2.3 Evapotranspiración

De la ecuación (3) se generaron los ráster de EVP del Valle del Cauca y sus valores medio se muestran en la figura 17, se observó que durante el periodo de estudio se presentaron 2 lapsos durante los que esta variable se mantuvo relativamente estables con valores aproximados entre 0.69 y 0.78 durante los años 2002 - 2005 y 2016 - 2019.

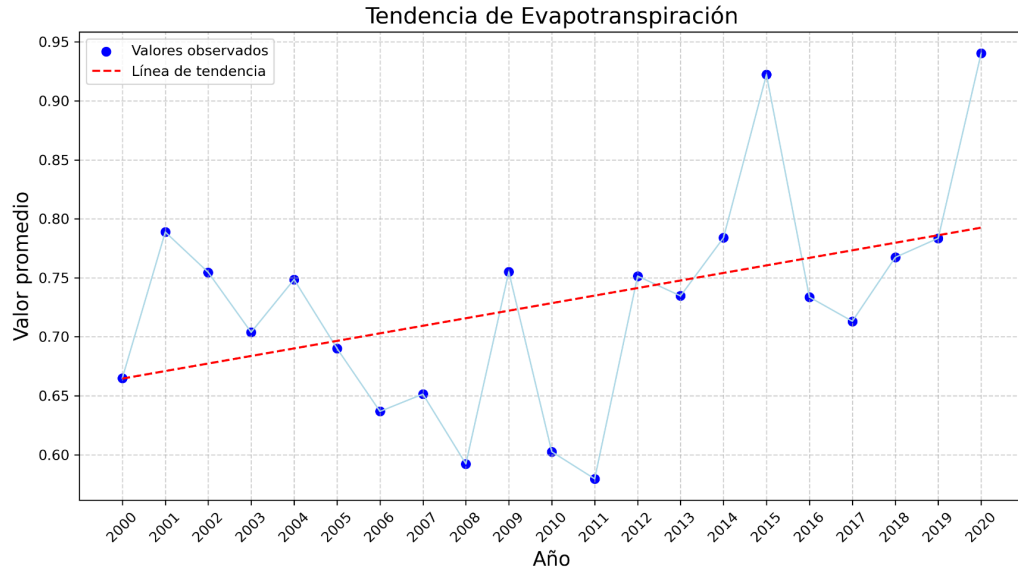
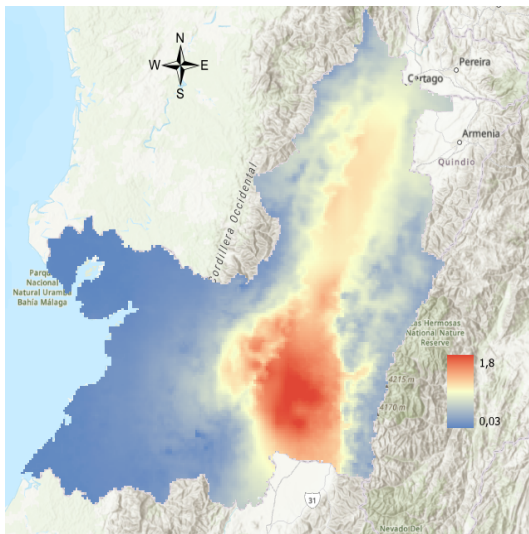
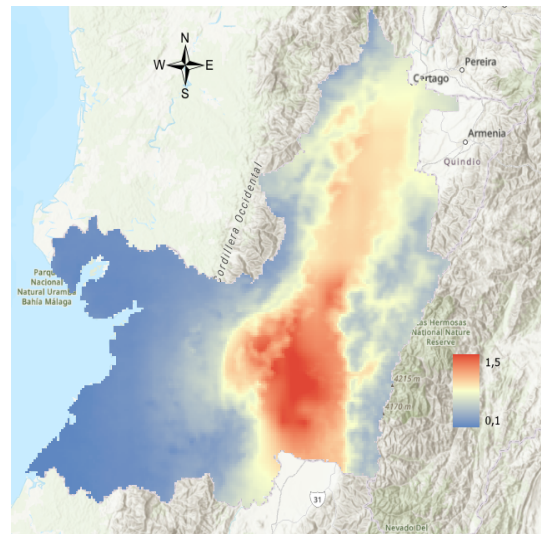


Figura 17. Tendencia de evapotranspiración promedio anual.

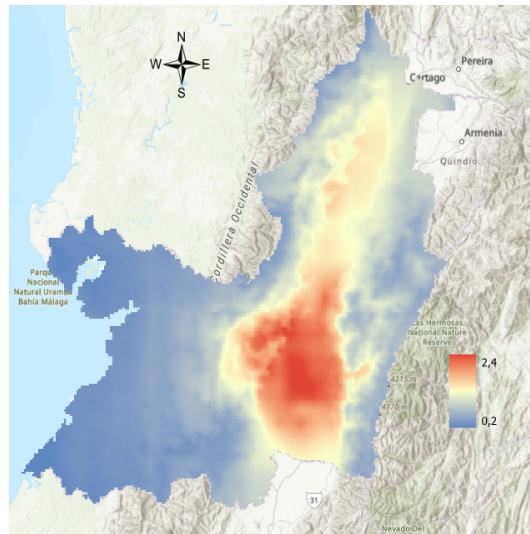
Así mismo, se muestra que durante los años 2008, 2010 y 2011 se identificaron los valores medios mínimos cercanos a 0.60; por el contrario, los valores medios máximos se registraron en los años 2015 y 2020 con medidas aproximadas de 0.92 y 0.94 respectivamente. También se observa que la tendencia de la EVP refleja un aumento durante los años de estudio.



Evapotranspiración año 2000



Evapotranspiración año 2010



Biotemperatura basal año 2020

Figura 18. Distribución de Evapotranspiración 2000 - 2010 - 2020.

En la figura 18 se representa el comportamiento de la variable EVP en el departamento para los años 2000, 2010 y 2020 como muestras representativas. Los valores observados según la clasificación de Holdridge, para los años 2000 y 2010 se observó que el rango de EVP mínimo comprendido entre 0.125 y 0.25 se ubicó principalmente en la zona pacífico del departamento; mientras que la relación de EVP con el rango más alto comprendido entre 1 y 2, se concentró en la región central o valle geográfico del departamento mostrando una diferencia climática significativa entre la zona húmeda del litoral pacífico y el interior cálido y seco del valle geográfico.

Asimismo, durante estos dos primeros momentos se destacó la reducción para el año 2010 de los valores más altos de EVP; sin embargo, para el año 2020 esta reducción se revirtió apareciendo zonas con mayor relación de EVP mostrando zonas aún más secas.

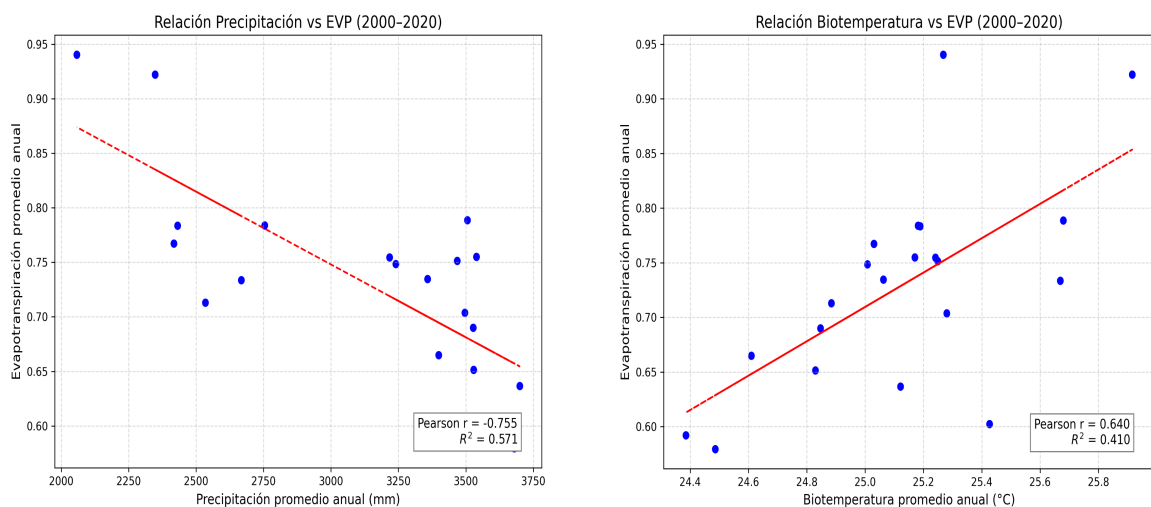


Figura 19. Relación entre variables de precipitación y biotemperatura con la evapotranspiración.

Adicionalmente la figura 19 muestra la relación entre la PREC y EVP, así como la BT y EVP respectivamente. Al ver estas relaciones se observó que la relación entre PREC - EVP obtuvo un coeficiente de correlación $r = -0.75$, indicando que la relación fuerte entre ambas variables, aunque negativa fue fuerte; ya que a mayor precipitaciones la evaporación del agua fue menor. El coeficiente de determinación $R^2 = 0.57$ sugiere que el 57% de las variaciones en la EVP se pueden explicar mediante la precipitación.

Por otra parte, la relación entre BT - EVP presentó un coeficiente de correlación $r = 0.63$, mostrando una relación positiva de moderada a fuerte, esto relaciono que, a mayor biotemperatura, la EVP tendió a aumentar. El coeficiente de determinación $R^2 = 0.40$ señaló que el 40% de la variabilidad de la EVP se puede explicada por la biotemperatura, lo cual es significativo, aunque evidencia la influencia de otros factores climáticos como la radiación solar, humedad o precipitación.

7.3 Biomas

Durante el proceso de caracterización del bioma objeto de estudio, se reconocieron 6 biomas y 5 zonas de transición en el departamento durante el periodo de estudio y que se presentan en la tabla 8; en esta se observó que los biomas que persistieron durante los 21 años de estudio fueron el BHT, BMHT y el BST, además de las zonas de transición ZT BMH SBT-BHT-BMHT y ZT BST-BHT-BH SBT; mientras que solo una vez se presentaron las condiciones para el bioma BPTC y ZT BMHTC-BPTC-BPTF.

Tabla 8. Zonas de Vida de Holdridge identificados en el Valle del Cauca.

Bioma	Abreviación Bioma	Apariciones
Bosque Húmedo Tropical	BHT	21
Bosque Muy Húmedo Subtropical	BMH SBT	3
Bosque Muy Húmedo Tropical	BMHT	21
Bosque Muy Seco Tropical	BMST	5
Bosque Pluvial Subtropical	BP SBT	3
Bosque Pluvial Templado Caliente	BPTC	1
Bosque Pluvial Tropical	BPT	14
Bosque Seco Tropical	BST	21
Zona de Transición Bosque Muy Húmedo Subtropical - Bosque Húmedo Tropical - Bosque Muy Húmedo Tropical	ZT BMH SBT-BHT-BMHT	21
Zona de Transición Bosque Muy Húmedo Templado Caliente - Bosque Pluvial Templado Caliente - Bosque Pluvial Templado Frío	ZT BMHTC-BPTC-BPT F	1
Zona de Transición Bosque Muy Húmedo Tropical - Bosque Muy Húmedo Subtropical - Bosque Pluvial Subtropical	ZT BMHT-BMH SBT-BP SBT	2
Zona de Transición Bosque Muy Húmedo Tropical - Bosque Pluvial Tropical - Bosque Pluvial Subtropical	ZT BMHT-BPT-BPSBT	16
Zona de Transición Bosque Pluvial Subtropical - Bosque Pluvial Tropical	ZT BP SBT-BPT	7
Zona de Transición Bosque Seco Tropical - Bosque Húmedo Tropical - Bosque Húmedo Subtropical	ZT BST-BHT-BH SBT	21
Zona de Transición Bosque Seco Tropical - Bosque Muy Seco Tropical - Bosque Seco Subtropical	ZT BST-BMST-BS SBT	16

En la figura 20, se observa que la presencia del BST se da en el centro del departamento y durante sus transformaciones tiende a fragmentarse en el norte del departamento, mientras su presencia es constante en el sur.

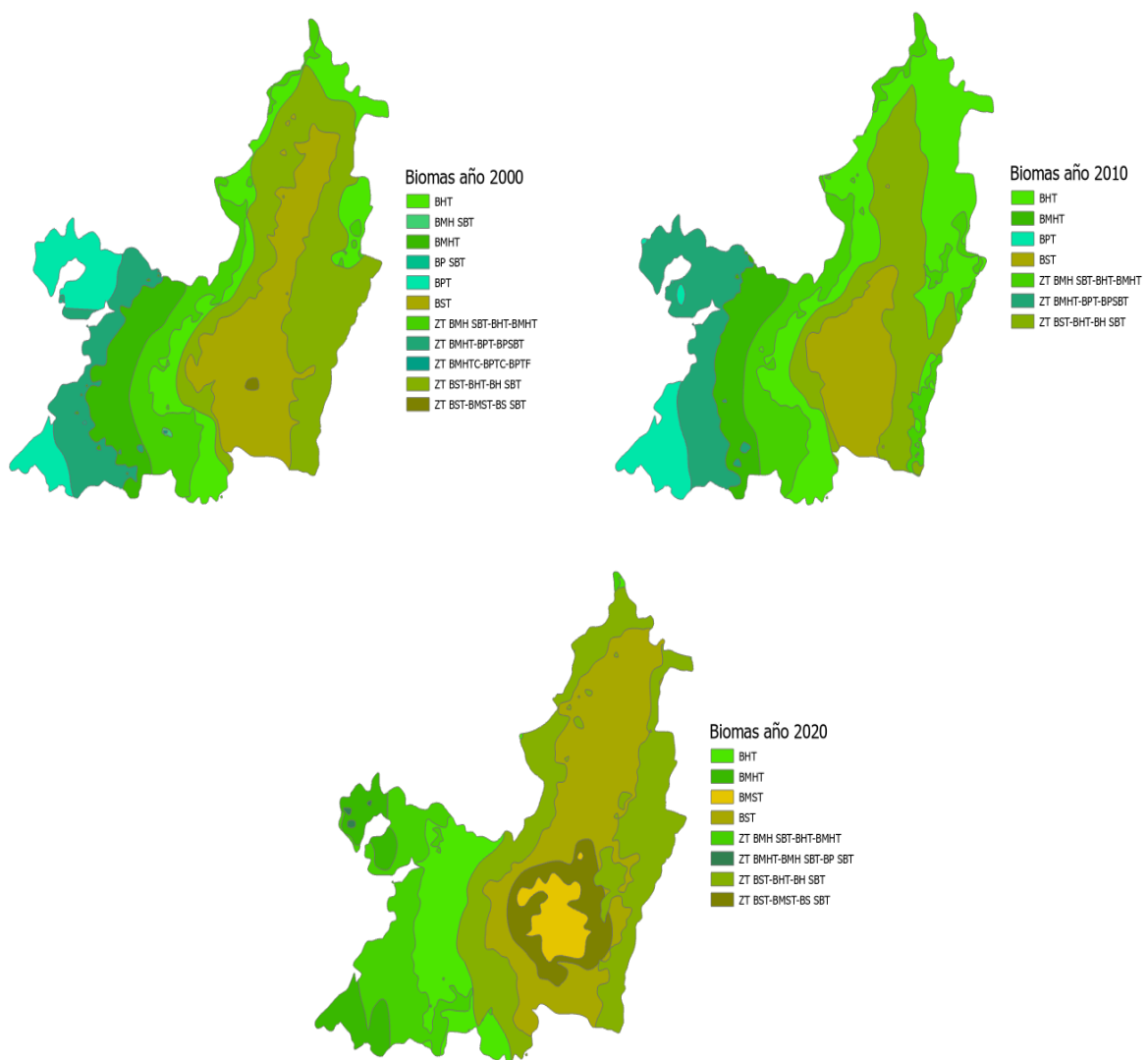


Figura 20. Zonas de vida de Holdridge para el Valle del Cauca 2000 - 2010 - 2020.

En la tabla 9 se observan las áreas promedio de los biomas y zonas de transición durante los años de estudio, siendo el BST el bioma con mayor área promedio presente durante el estudio con un aproximado de 474.580 Ha, mientras que la zona de transición con mayor área fue ZT BST-BHT-BH SBT con un valor promedio de área aproximado de 538.148 Ha. Por otro lado, el bioma que presentó menor promedio de área fue BPTC con aproximadamente 107 Ha y la zona de transición con menor registro fue ZT BMHTC-BPTC-BPTF con aproximadamente 250 Ha.

Tabla 9. Detalle de biomas.

Bioma	Área promedio (Ha)	Año con menor área	Área mínima (Ha)	Año con mayor área	Área máxima (Ha)
BHT	269383,72	2001	134013,65	2010	528631,01
BMH SBT	534,46	2019	107,84	2000	1224,3
BMHT	202215,25	2020	126356,17	2016	369727,43
BMST	58186,87	2004	1970,33	2015	189524,1
BP SBT	246,95	2013	107,84	2000	525,15
BPTC	107,84	2004	107,84	2004	107,84
BPT	197704,11	2010	102865,02	2009	299583,17
BST	474850,57	2015	236158,69	2001	665133,22
ZT BMH SBT-BHT-BMHT	247939,74	2013	148612,81	2011	385995,54
ZT BMHTC-BPTC-BPTF	250	2000	250	2000	250
ZT BMHT-BMH SBT-BP SBT	1267,28	2011	0,42	2020	2534,14
ZT BMHT-BPT-BPSBT	195108,35	2016	30503,54	2010	289874,43
ZT BP SBT-BPT	1195,16	2002	107,84	2003	4260,77
ZT BST-BHT-BH SBT	538148,45	2011	410715,14	2018	663711,97
ZT BST-BMST-BS SBT	53064,47	2016	107,84	2015	235876,28

7.3.1 Bosque Seco Tropical

De los biomas del Valle del Cauca el BST se presentó como el objetivo de estudio, este mostró una dinámica espacial variable que mostró su relación directa con las condiciones bioclimáticas del departamento. En la figura 21 se muestra la evolución anual de las áreas ocupadas por el bioma entre los años 2000 y 2020, se observan las fluctuaciones y la tendencia general a la que se inclina el BST; observando que para el año 2000 se registró una área aproximada de 435.000 Ha y se finalizó cerca de las 572.000 Ha para el año 2020.

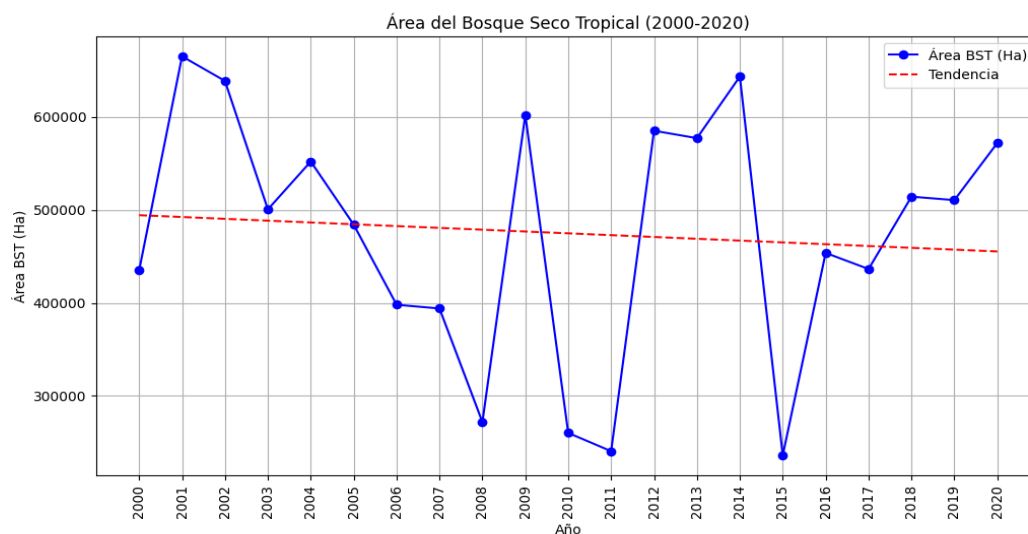


Figura 21. Variación anual del área del BST en el Valle del Cauca.

Durante los años 2001 al 2005 se observó un crecimiento con respecto al año 2000 y registrando la máxima extensión en el periodo de estudio con un área superior a las 660.000 Ha alcanzada en el año 2001; sin embargo, desde el 2004 se registró una disminución paulatina hasta el año 2008. Durante los años 2009 al 2015 las fluctuaciones se vieron más marcadas con crecimientos y decrecimientos irregulares con áreas entre las 643.000 Ha y las 236.000 Ha, esta última registrada en el año 2015 y representando la menor extensión registrada en el periodo de estudio. Finalmente, a partir del año 2015 se presenta una recuperación del BST hasta el año 2020; pese a las fluctuaciones de crecimiento la tendencia general del BST presentó un leve descenso de la superficie total del bioma.

Tabla 10. Área y porcentaje del BST en el Valle del Cauca (2000-2020).

Área (Ha)	Año	Porcentaje	Área (Ha)	Año	Porcentaje
435087,606	2000	21,04%	585156,856	2012	28,30%
665133,217	2001	32,17%	577200,061	2013	27,91%
638693,033	2002	30,89%	643400,118	2014	31,12%
500609,708	2003	24,19%	236158,691	2015	11,42%
552069,894	2004	26,69%	453813,453	2016	21,94%
484188,763	2005	23,42%	436463,976	2017	21,11%
398059,941	2006	19,25%	514265,309	2018	24,87%
394080,585	2007	19,06%	510587,526	2019	24,69%
271941,821	2008	13,14%	571938,157	2020	27,66%
602123,816	2009	29,11%			
260218,790	2010	12,59%			
240670,317	2011	11,64%			

Del total del área del Valle del Cauca, el BST ocupó un porcentaje cada año mostrado en la tabla 10. Durante el periodo analizado los años donde el bioma abarcó más del 30% de la superficie del departamento fueron los años 2001, 2014 y 2002 con 32,17%; 31,12% y 30,89% respectivamente. Por el contrario, los años 2010, 2011 y 2015 fueron los años con menor porcentaje correspondiente a 12,59%; 11,64% y 11,42% respectivamente.

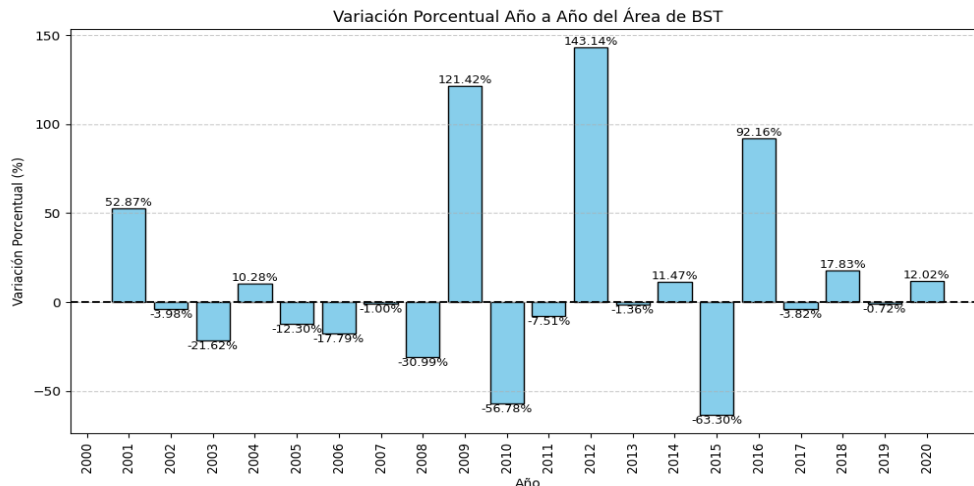


Figura 22. Variación porcentual interanual del BST.

Lo que se presenta en la figura 22 es la variación que tuvo el BST año tras año, donde se visualiza con claridad los años donde se presentó un mayor cambio en el área del bioma. Los incrementos más notables se dieron en el 2012 y 2009 con una expansión del 143% y 121% con respecto a los años 2011 y 2008; seguido por los años 2016 y 2001 con 92% y 52% respectivamente. Contrario a los años ya mencionados, los descensos más notorios se presentaron en los años 2008, 2010 y 2015 con reducciones en el área de 30%, 56% y 63% respectivamente.

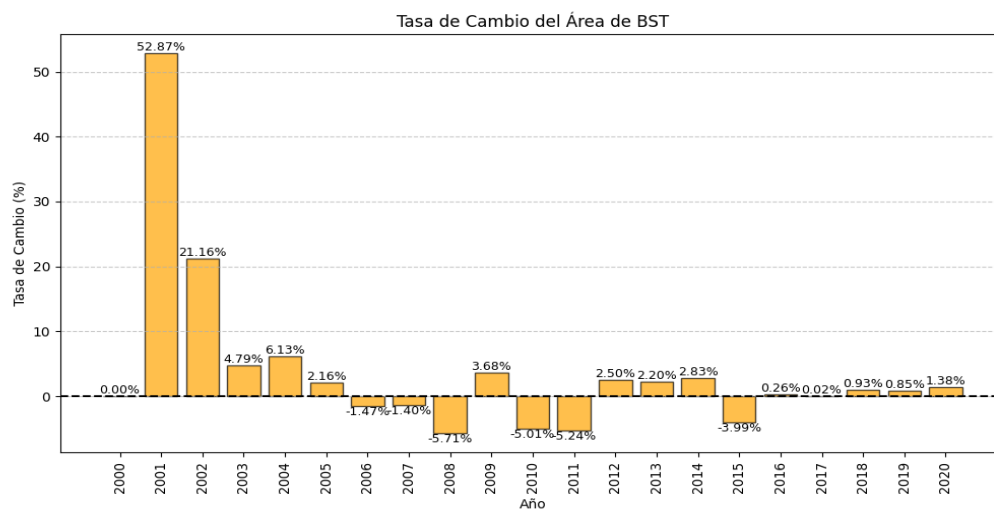


Figura 23. Tasa de cambio del BST.

Adicionalmente, la figura 23 presenta los porcentajes de cambio del bioma obtenidos de la ecuación (7) con respecto al área inicial del año 2000 y el área final correspondiente a cada año siguiente; permitiendo observar de forma más marcada el ritmo de cambio en la superficie del bioma. Los mayores incrementos se presentan los primeros años del análisis, destacando los años 2001 con más del 52% seguido del año 2002 con un valor del 21%. Entre los años 2005 y 2015 se presentaron tasas de cambio positivas y negativas con valores entre -5% y 3%.

A partir del 2016 la tasa de cambio mantuvo una variación moderada con un cambios positivos cercanos al 1%.

La evolución del BST junto con sus zonas de transición adyacentes, ZT BST-BHT-BH SBT asociada a ambientes más húmedos y ZT BST-BMST-BS SBT correspondiente a ecosistemas más secos, se presentan en la figura 24. Durante este periodo de estudio se observó que las zonas húmedas permanecieron generalmente por encima del BST y de las zonas secas, presentando los picos máximos en los años 2007 y 2018 con más de 600.000 Ha. Por otro lado, la ZT BST-BMST-BS SBT se mantuvo presente durante los años 2000 al 2005, entre los años 2006 al 2011 desapareció con excepción del 2009 y finalmente entre el 2012 al 2020 se mantuvo presente nuevamente registrando su cobertura máxima para el año 2015 con cerca de 250.000 Ha.

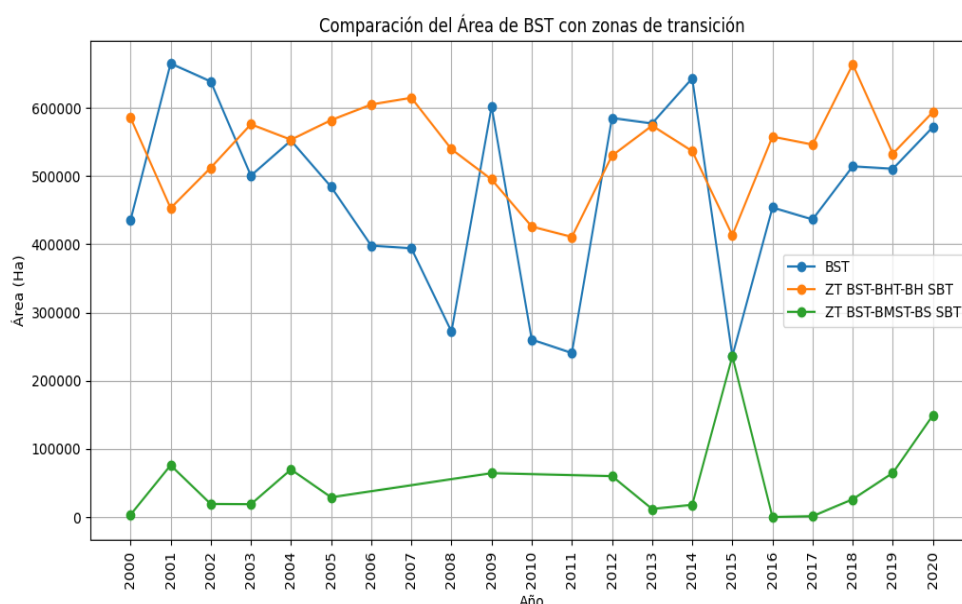
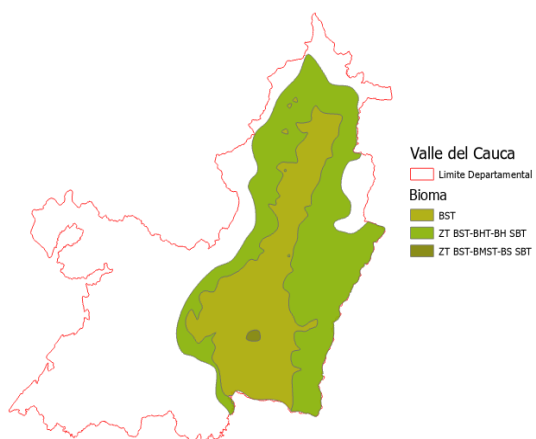


Figura 24. Evolución del BST y sus zonas de transición asociadas en el Valle del Cauca (2000–2020).

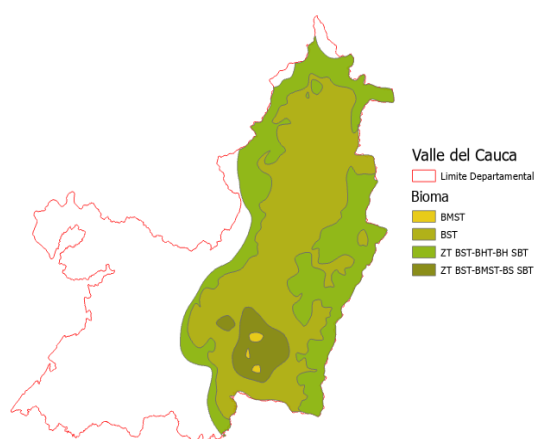
El comportamiento visto muestra que las zonas de transición actúan como áreas de influencia directa sobre el BST absorbiendo las fluctuaciones que este presentó pues cuando el BST aumentó la ZT BST-BHT-BH SBT disminuyó (2001, 2009, 2014) mostrando una relación inversa puesto que cuando ZT BST-BHT-BH SBT aumentó el BST disminuye (2005, 2006, 2007). Aunque generalmente los valores registrados en las áreas de ZT BST-BMST-BS SBT permanecieron inferiores y distantes del BST, en el año 2015 se apreció una subida abrupta de esta zona de transición mientras que el área de BST disminuyó abruptamente.

Finalmente, en las figuras 25 y 26, se muestra la distribución espacial desde el año 2000 hasta el 2020 del BST; permitiendo reconocer visualmente las zonas de permanencia, expansión o retracción del bioma en el departamento.

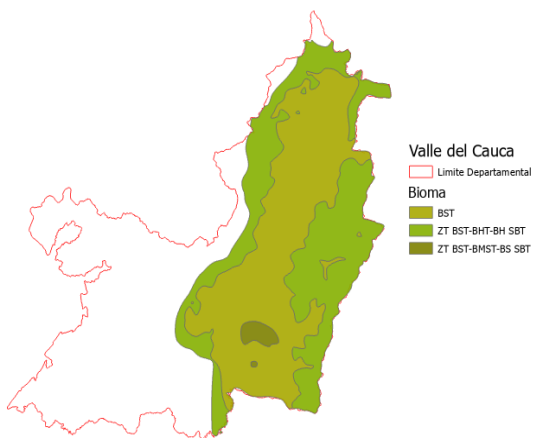
a) 2000



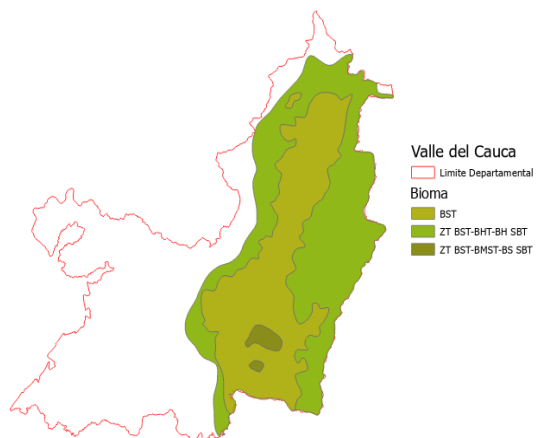
b) 2001



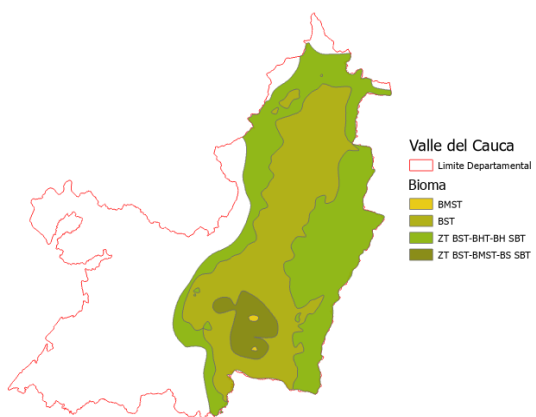
c) 2002



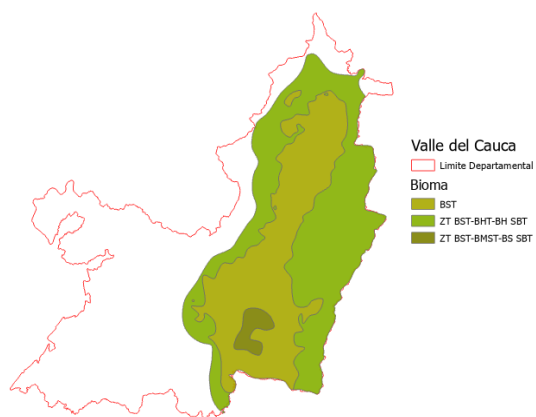
d) 2003



e) 2004



f) 2005



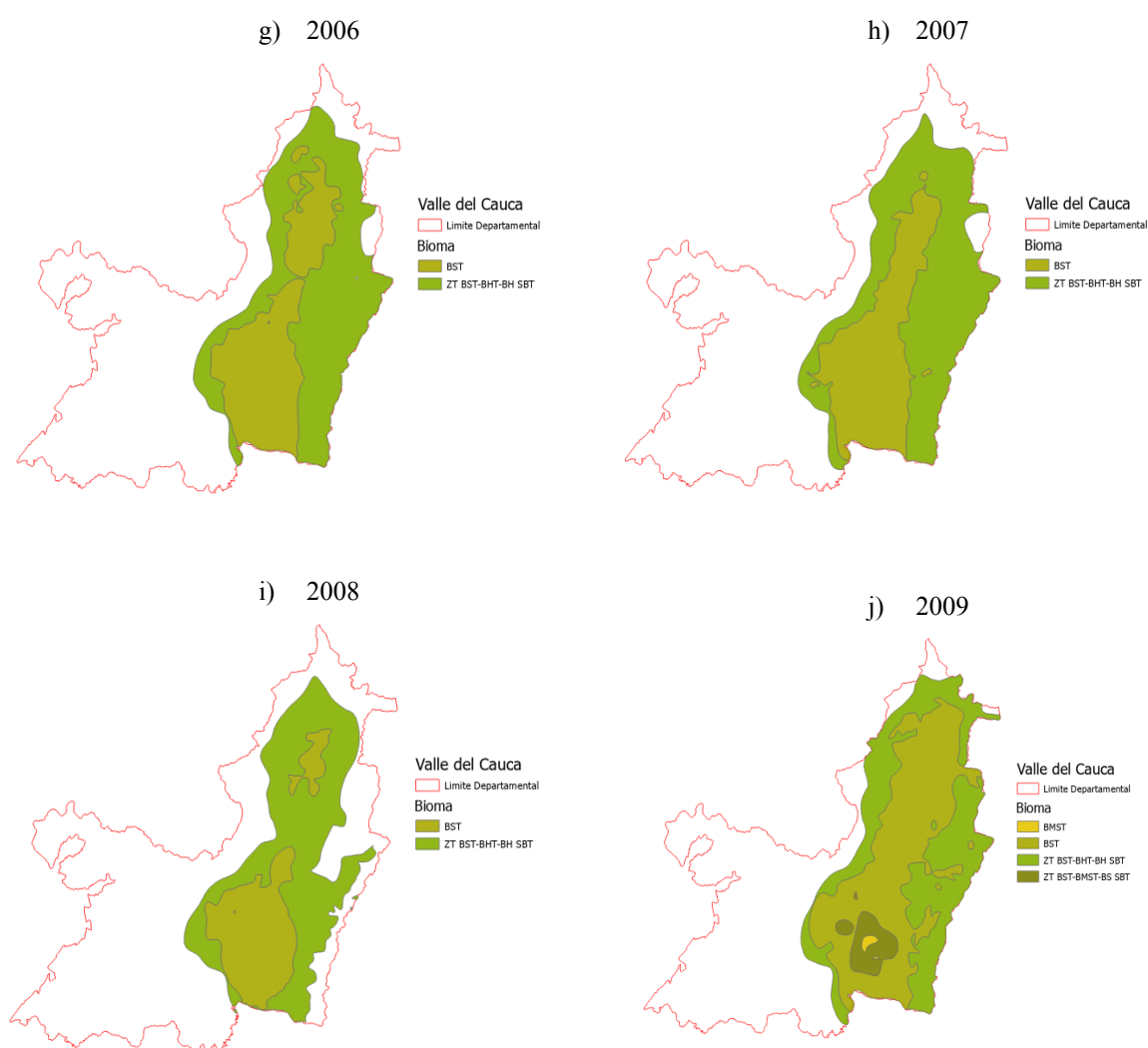
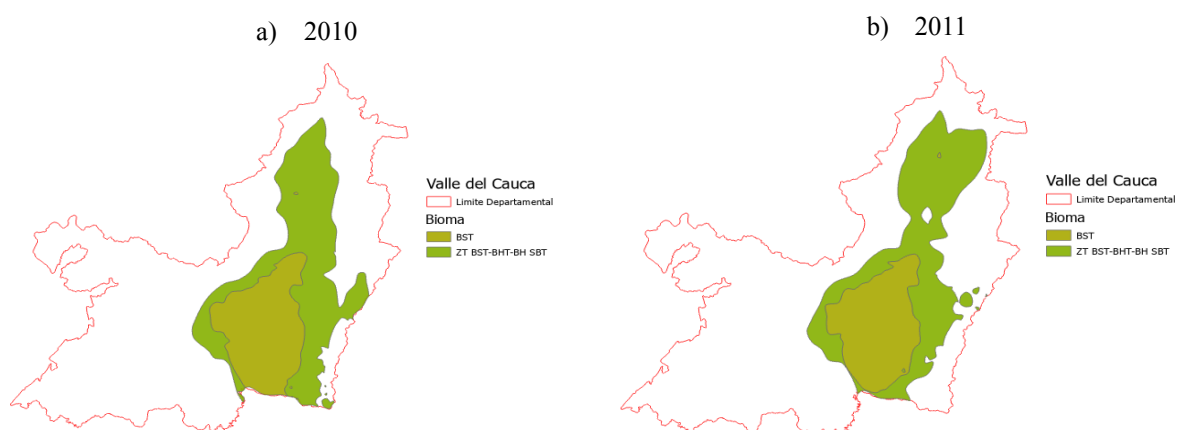
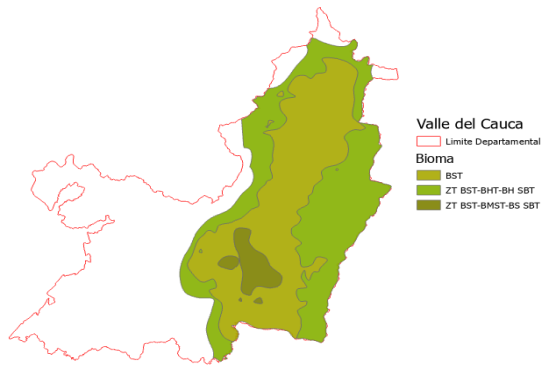


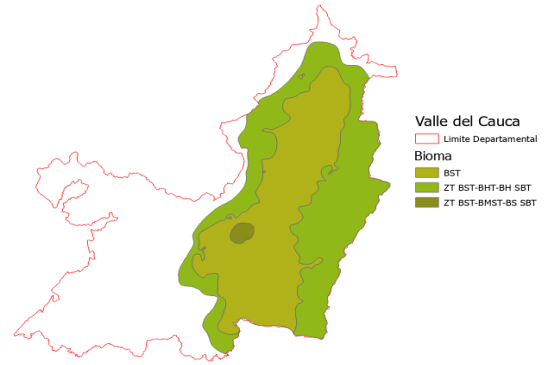
Figura 25. Distribución del BST en el Valle del Cauca 2000 - 2009.



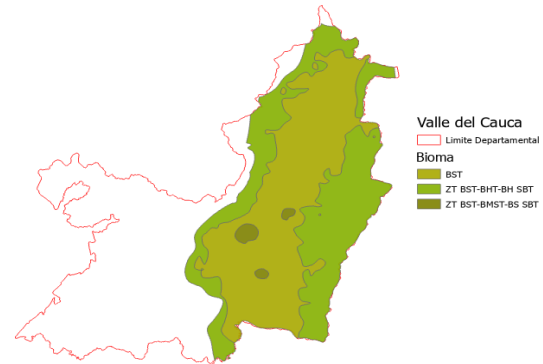
c) 2012



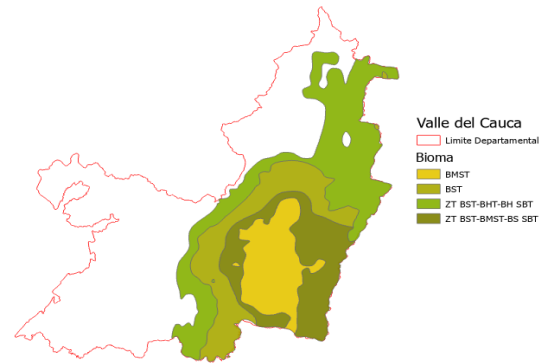
d) 2013



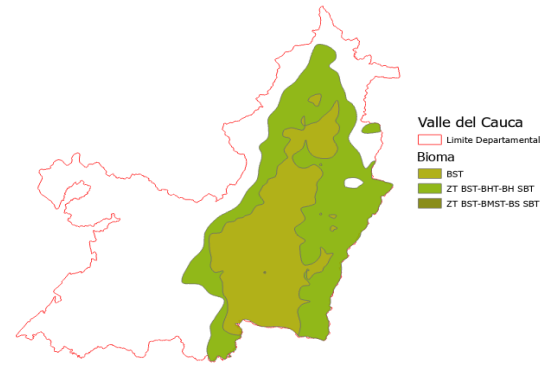
e) 2014



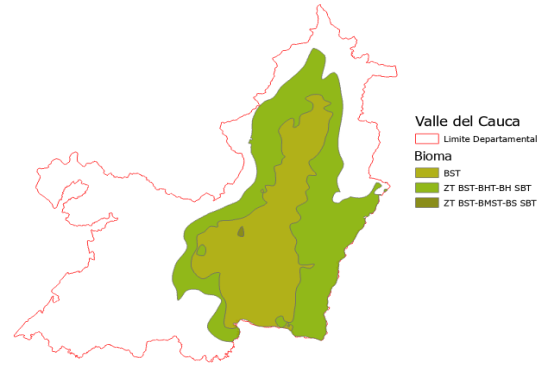
f) 2015



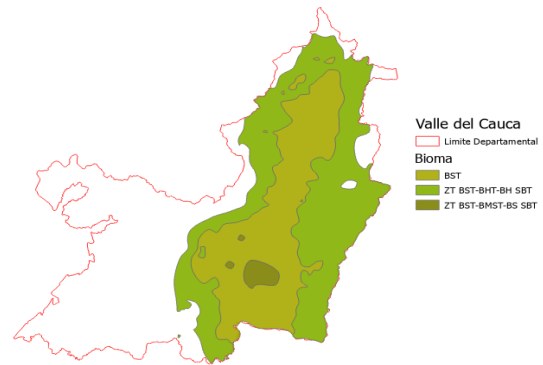
g) 2016



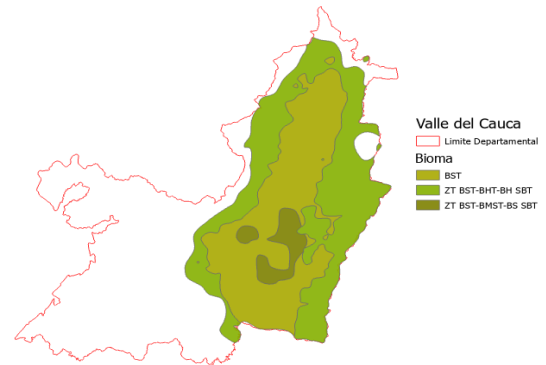
h) 2017



i) 2018



j) 2019



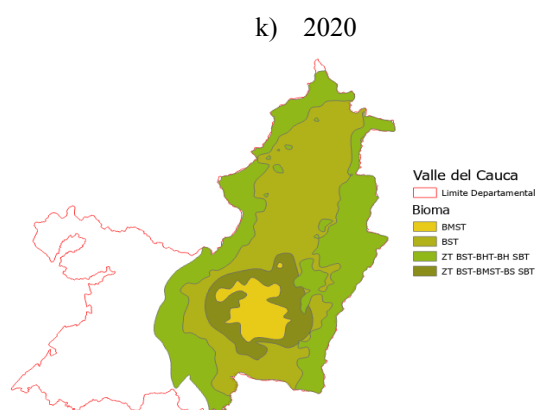


Figura 26. Distribución del BST en el Valle del Cauca 2010 - 2020.

7.3.2 Transformaciones del BST

Detallando de forma más precisa las transformaciones que presentó el BST durante el periodo 2000 - 2020, se resaltan los procesos de permanencia, pérdida o expansión entre el BST y otros biomas o zonas de transición analizando las transformaciones año a año e incluyendo promedios generales de transformación que resumen el comportamiento de este bioma. La figura 27 muestra el periodo que menor transformaciones presentó durante el tiempo de estudio, reflejando una relativa estabilidad en el bioma con 233.470 ha que no presentaron cambios, mientras la pérdida de BST fue de 26.658 Ha, de las que más del 99% se transformó a ZT BST-BHT-BH SBT concentrando en la zona sur-oriental del bioma; por otro lado la expansión del BST alcanzó las 7.200 Ha en la zona noroccidental transformándose desde la zona de transición húmeda ZT BST-BHT-BH SBT hasta el 100% del crecimiento.

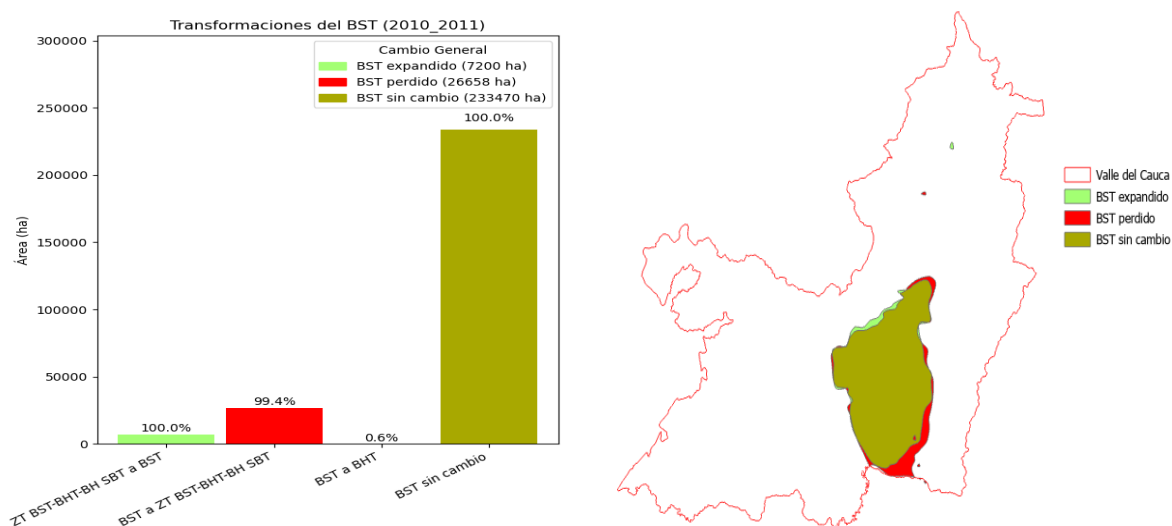


Figura 27. Transformaciones espaciales del BST entre el año 2010 y 2011.

Por el contrario, al periodo 2010 - 2011, la fase de transformaciones entre el año 2014 y 2015 fue la que más cambios presentó en el intervalo del 2000 al 2020, viéndose marcada por grandes pérdidas de bioma BST como se muestra en la figura 28. Para este periodo las pérdidas del bioma superaron las 500.000 Ha, presentando transformaciones tanto a biomas como zonas de transición secas y húmedas; transformándose directamente de BST a BMST representando el 34.7% de las hectáreas perdidas por el bioma y un 20.6% que pasó a ser BHT, presentándose estas transformaciones negativas hacia el sur y nororiente del valle geográfico del Río Cauca. Por otro lado, la expansión del BST provino en su mayoría de la zona de transición húmeda ZT BST-BHT-BH SBT con el 90% y un 9.5% que paso directamente desde BHT a BST, mientras que la permanencia del bioma fue de 139.767 Ha en la zona céntrica del departamento.

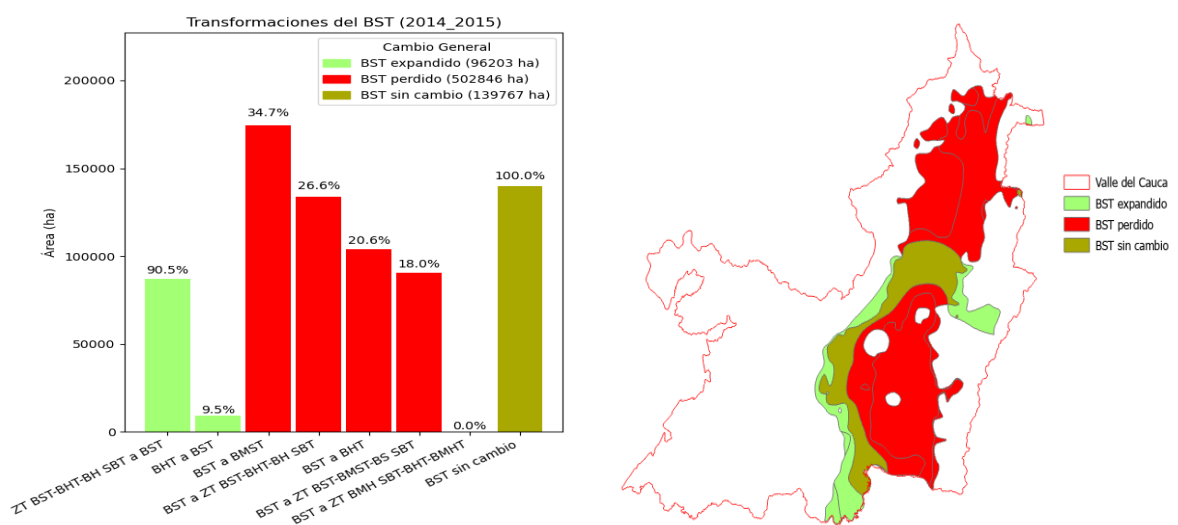


Figura 28. Transformaciones espaciales del BST entre el año 2014 y 2015.

Posteriormente, el periodo entre el 2015 - 2016 mostró una recuperación importante del bioma BST con 347.980 Ha; de las cuales el 54.3% se transformaron en BST desde BMST y un 28.2% desde la zona de transición seca ZT BST-BMST-BH SBT a BST, estas principales transformaciones se dieron en la zona sur del valle geográfico del río Cauca. Por el contrario, la pérdida del bioma fue de 130.501 Ha, de las cuales la principal transformación provino de la zona de transición ZT BST-BHT-BH SBT con un 93.2% y la permanencia del área en el BST fue de 105528 Ha, como lo muestra la figura 29.

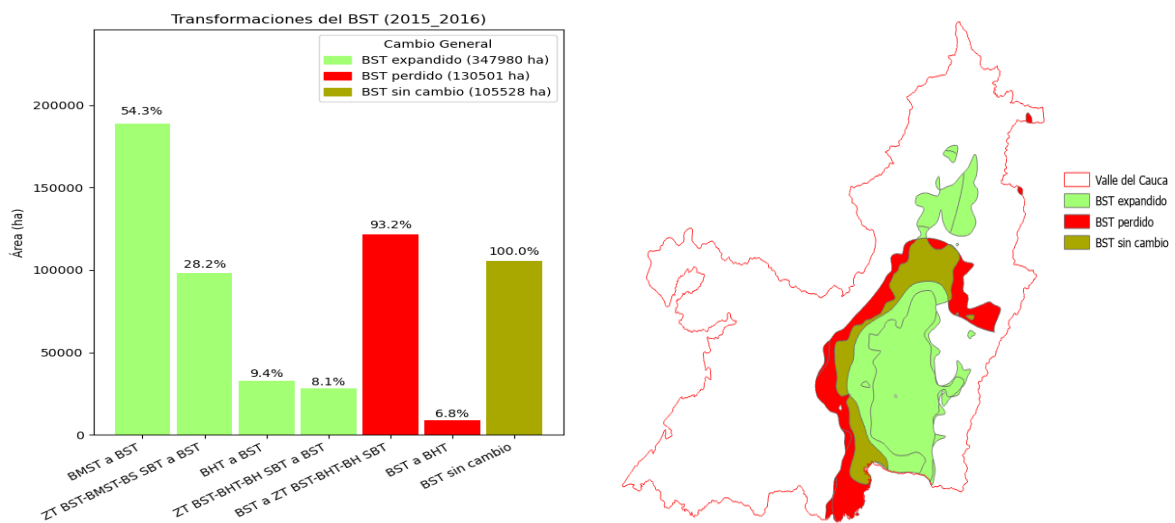


Figura 29. Transformaciones espaciales del BST entre el año 2015 y 2016.

Seguido a esto se muestra el comportamiento promedio de los cambios del BST y sus principales procesos de transformación durante los años 2000 al 2020. En la figura 30, se observa que, en promedio el área del bioma presentó una expansión de 130.085 Ha por año, una pérdida de 123.242 Ha por año y una permanencia de 346.553 Ha por año; mostrando un balance entre la pérdida y la expansión del mismo con una pequeña predominancia en las áreas expandidas sobre las pérdidas.

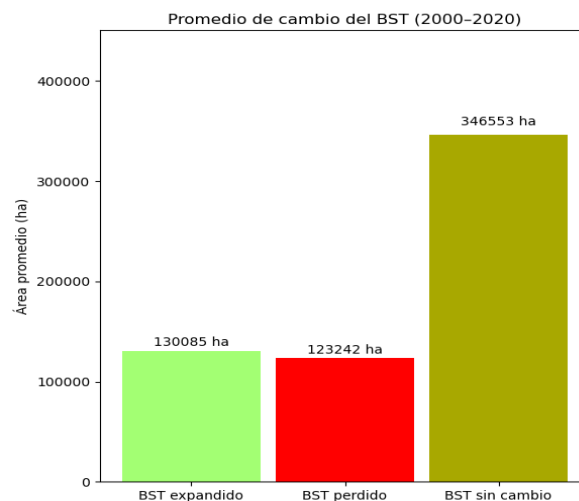


Figura 30. Promedio de expansión, pérdida y permanencia del BST en el Valle del Cauca entre 2000 y 2020.

Por otro lado, la figura 31, detalla los procesos de cambio mostrando las transformaciones puntuales; donde el principal proceso de expansión corresponde a la transformación de zona de transición húmeda correspondiente al 78%, específicamente desde ZT BST-BHT-BH SBT hacia BST con un promedio de 88.985 ha por año, mostrando un avance del BST sobre ecosistemas húmedos. En contraste a esto las pérdidas presentaron un comportamiento dual pasando a zonas de transición tanto húmedas como secas con 68% y 32% respectivamente, el

BST paso hacia ZT BST-BHT-BH SBT con 70.318 ha por año, mientras la transiciones hacia zonas más secas principalmente fue hacia ZT BST-BMST-BS SBT con 27.238 ha por año.

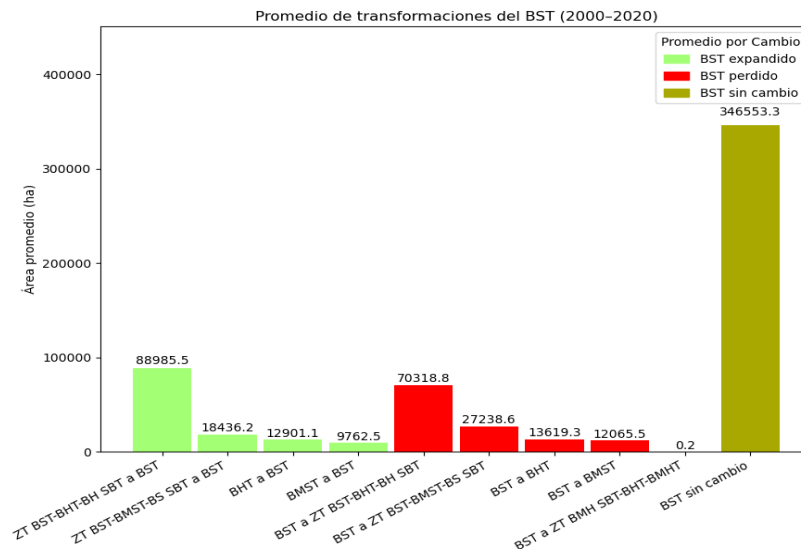


Figura 31. Promedio de transformaciones específicas del BST entre 2000 y 2020.

7.4 Cobertura y uso del suelo en el departamento

Los resultados del análisis multitemporal de la cobertura y uso del suelo en el departamento del Valle del Cauca, empleando la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia, evidencia dinámicas significativas y reveladoras entre los periodos estudiados. La figura 32 muestra la ocupación de cada una de las clasificaciones nivel 1 del sistema CLC, para los años 2000 a 2002 se observa la predominancia de la cobertura boscosa ocupando más del 47% del territorio y la cobertura agrícola con poco más del 46%, lo que reflejó un comportamiento relativamente equilibrado entre conservación y actividad agropecuaria.

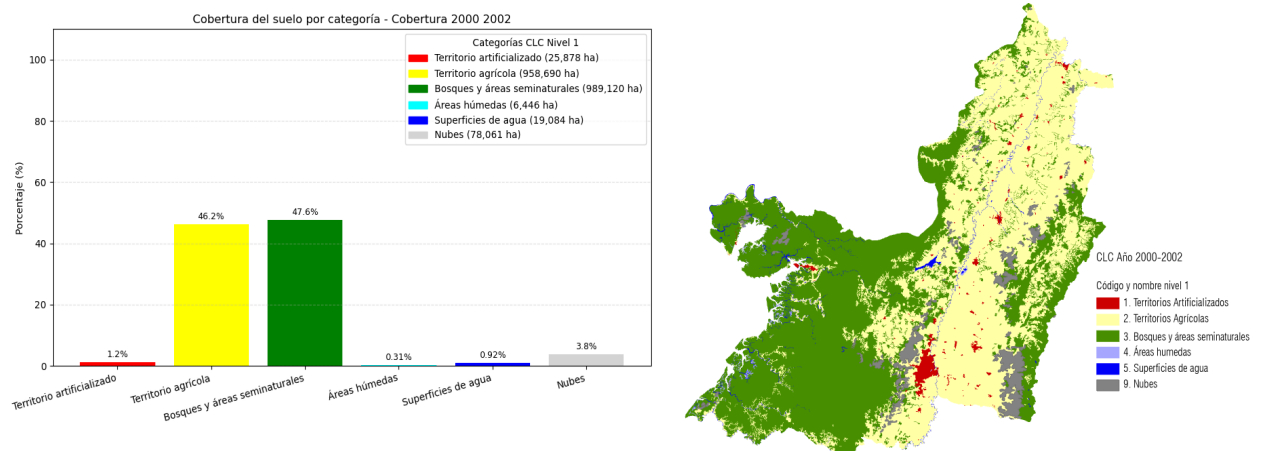


Figura 32. Representación de áreas ocupadas por cada categoría de la clasificación CLC entre 2000 y 2002.

Para los años 2005 a 2009, las proporciones se mantuvieron aproximadamente estables como se muestra en la figura 33, con aumentos en el territorio agrícola ocupando entonces el 47% del territorio.

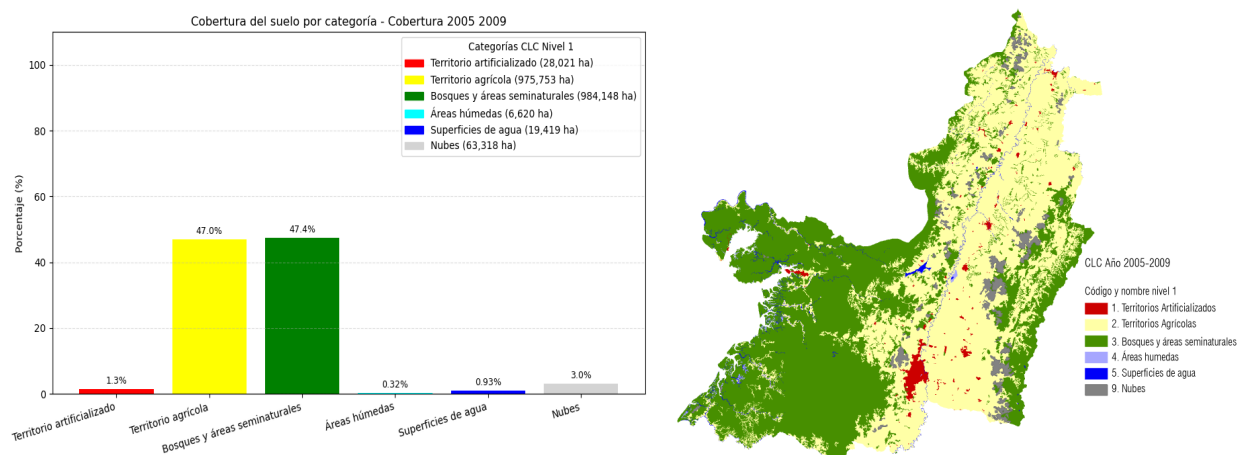


Figura 33. Representación de áreas ocupadas por cada categoría de la clasificación CLC entre 2005 y 2009.

Entre los años 2010 a 2012 como se observa en la figura 34 se presentó un cambio significativo debido a que la cobertura boscosa presentó un aumento al 60% de áreas ocupadas en el departamento mientras que el territorio agrícola descendió notablemente a poco más del 32%. Se destaca también el aumento de áreas ocupadas por superficies de agua que pasaron de un 0.93% a un 6.1%.

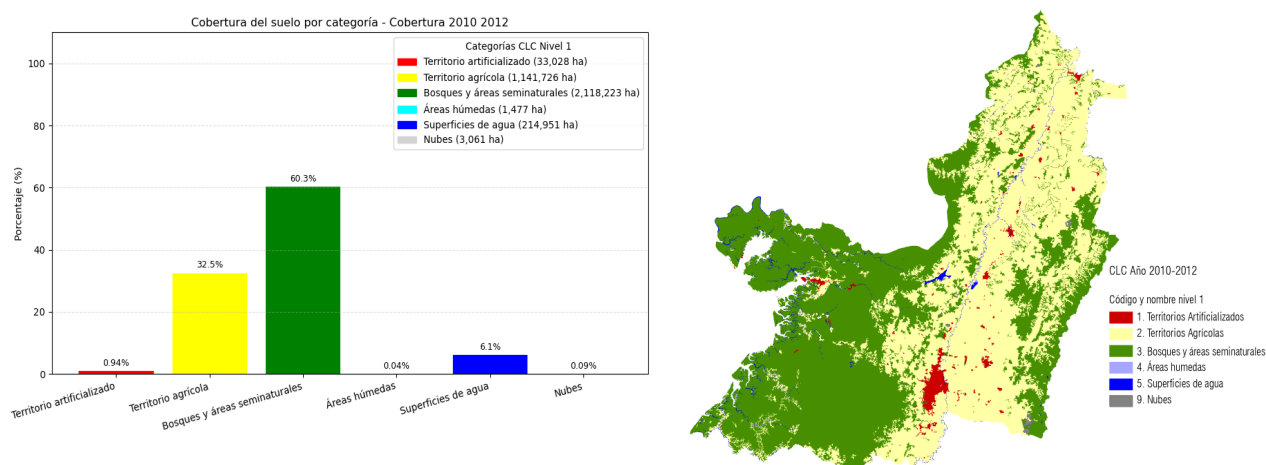


Figura 34. Representación de áreas ocupadas por cada categoría de la clasificación CLC entre 2010 y 2012.

Para el año 2020 se reforzó la tendencia de crecimiento en áreas clasificadas como bosques y áreas seminaturales con un 63.9% en ocupación y una consolidación del territorio agrícola en más del 32% tal como se aprecia en la Figura 35. Por otro lado, el territorio artificializado aunque en menor medida mostró un incremento gradual del 1.2% en 2000 a 1.6% en 2020. Las áreas húmedas se mantuvieron al margen ocupando menos del 0.5% del departamento durante

todo el periodo, mientras que las superficies de agua aumentaron levemente hacia los años 2010 a 2012 y posteriormente una reducción en 2020 (1.8%)

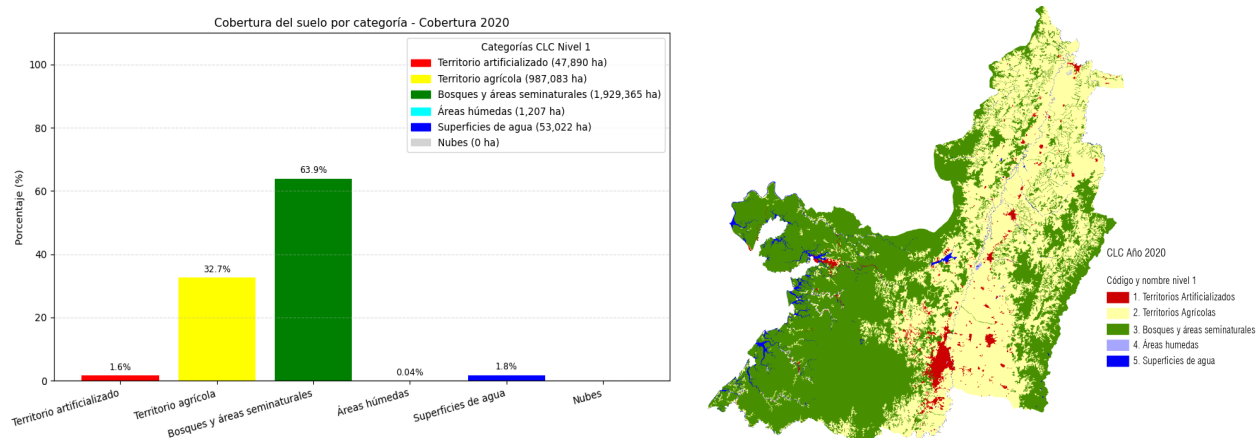


Figura 35. Representación de áreas ocupadas por cada categoría de la clasificación CLC año 2020.

7.4.1 Dinámicas de transición de Cobertura y uso del suelo delimitados por el BST

La tabla 11 muestra las transiciones de cobertura y usos del suelo identificadas a partir de la caracterización del BST y sus zonas de transición para los periodos intersectados espacialmente 2000-2005, 2005-2010 y 2010-2020. Estas transiciones fueron cuantificadas en hectáreas; cada fila de la tabla representa una transición CLC específica, el primer número indica la categoría de cobertura original y el segundo número la categoría destino. Cabe resaltar que las casillas marcadas como N/A indican que durante ese periodo de análisis no se presentó la transición en la zona delimitada para el estudio.

Tabla 11. Transiciones CLC en los diferentes periodos de tiempo a partir de la caracterización del BST.

Transición	Área (Ha) 2000 a 2005	Área (Ha) 2005 a 2010	Área (Ha) 2010 a 2020
1_1	21996,778	24839,550	21154,791
1_2	265,611	512,630	1645,174
1_3	105,737	111,007	104,772
1_4	N/A	N/A	11,631
1_5	N/A	N/A	112,898
1_9	8,119	N/A	N/A
2_1	1870,687	3936,764	10296,894
2_2	755929,719	806984,274	515980,934
2_3	21747,489	28743,589	53604,770
2_4	335,037	14,328	132,111
2_5	73,465	379,042	1490,701
2_9	13942,071	N/A	N/A
3_1	46,601	113,849	385,139
3_2	25442,496	22164,650	23265,982
3_3	622938,257	668264,670	189552,320
3_5	37,697	29,904	93,755
3_9	10222,754	N/A	N/A
4_1	N/A	N/A	10,264
4_2	22,576	201,861	300,350
4_3	17,501	N/A	62,135
4_4	713,298	610,252	187,334
4_5	N/A	350,901	65,432
5_1	N/A	N/A	129,239
5_2	230,388	23,945	1767,814
5_3	36,929	50,195	221,297
5_4	114,680	0,934	403,983
5_5	10900,238	14212,725	3788,915
9_1	N/A	147,456	N/A
9_2	18037,500	24088,775	478,069
9_3	9553,376	28332,935	1688,815
9_9	30818,966	3057,265	N/A

Durante los años estudiados se identificaron dinámicas tanto de cambio como de permanencia. Un ejemplo claro de permanencia es la 2_2 (territorio agrícola), que mostró las extensiones más altas en todos los periodos: 755.929 ha entre 2000 y 2005; 806.984,3 ha de 2005 a 2010; y 515.980 ha de 2010 a 2020, a pesar del hecho que para 2020 hubo una reducción notable del 36% en su extensión. Además, la permanencia 3_3 (bosques y áreas seminaturales) experimentó una disminución severa pasando de ocupar más de 600.000 ha entre 2000 y 2005 a solo 189.552 ha entre 2010 y 2020.

En el cambio del uso de la tierra, la conversión de áreas agrícolas a bosques y áreas seminaturales (transición 2_3) aumentó, superando las 53.600 ha en el periodo 2010-2020. Por el contrario, los cambios de coberturas agrícola y boscosa a territorio artificializado (transiciones 2_1 y 3_1) aumentó a lo largo del periodo estudiado.

Detallando más las dinámicas de cambio ocurridas en los diferentes intervalos de tiempo sobre el BST y sus zonas de transición, se identificó que para los años 2000 a 2005 la transición de coberturas más representativa corresponde al paso de bosques y áreas seminaturales a territorio agrícola ocupando este más de 25.000 ha de la zona ecológica. Así mismo se observó una transición significativa del territorio agrícola hacia cobertura boscosa con 21.747 ha, a pesar de su magnitud, esta transición no compensa completamente la pérdida de zonas boscosas descrita anteriormente como se puede apreciar en la figura 36.

Una parte significativa de los cambios se vio afectada por la nubes, estas transiciones no representan necesariamente un cambio real sino limitaciones en la detección y clasificación de tipo de cobertura debido a condiciones atmosféricas.

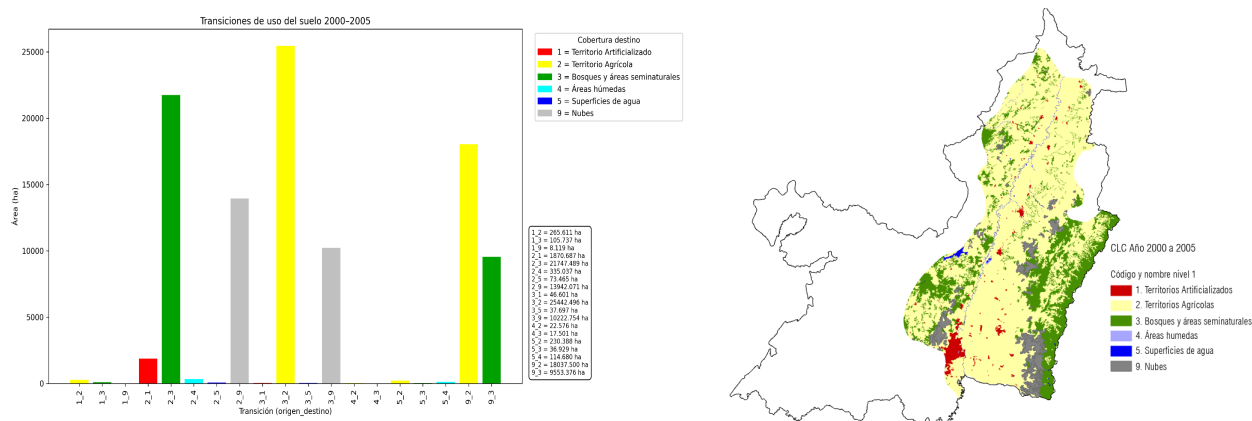


Figura 36. Dinámica de transiciones CLC sobre el BST 2000 a 2005.

Se evidencia en la figura 37 la variación entre el año 2005 y el 2010 para la cobertura agrícola que antes era cobertura boscosa de la zona ecológica llegó a alcanzar más de 28.000 ha, seguida por el cambio de cobertura boscosa convertida en territorio agrícola (3_2) con cerca de 22.815 ha. Por otro lado, se registró un considerable aumento en la transición 2_3 (territorio agrícola hacia el territorio artificializado) con más de 3.000 ha.

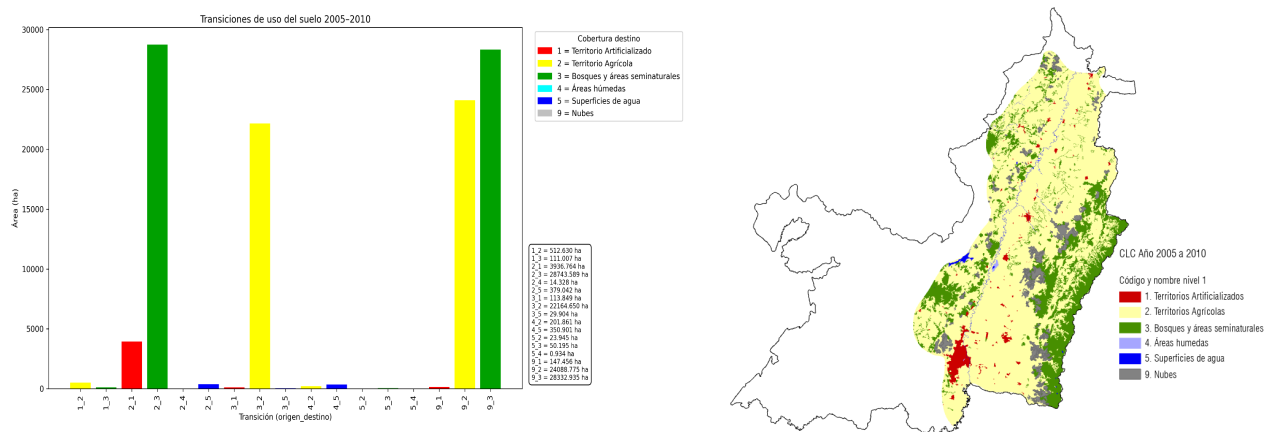


Figura 37. Dinámica de transiciones CLC sobre el BST 2005 a 2010.

Finalmente para los años 2010 a 2020, se observa a través de la figura 38 un cambio marcado con dirección hacia la recuperación de la cobertura boscosa, ocupando más de 53.600 ha de la zona ecológica. Sin embargo, también se aprecia otra transición importante (3_2) con casi 23.000 ha, aunque es menor al incremento de los bosques y áreas seminaturales mencionado inicialmente, sigue persistiendo la presión de la actividad agropecuaria. Cabe destacar la expansión del territorio artificializado que antes era territorio agrícola, este alcanzó 10.472 ha, más del triple en el periodo 2005-2010.

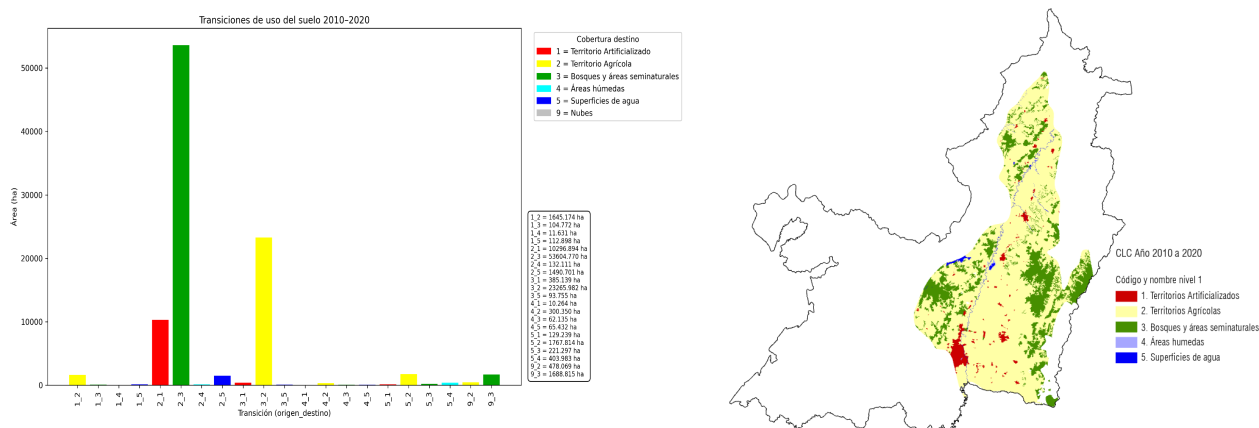


Figura 38. Dinámicas de transiciones CLC sobre el BST 2010 a 2020.

7.5 Dinámicas de transformación del BST y cobertura boscosa

Se observa en la figura 39, las dinámicas de transformación tanto de la cobertura boscosa como del BST y sus zonas de transición a partir de la caracterización de la zona ecológica para los años 2000 a 2005. La tercera categoría del CLC se mantuvo mayormente estable con más del 90% sin cambios. No obstante, se registraron al menos 35.750 ha de cobertura perdida y 31.461 ha de ganancia.

Estos patrones concuerdan con las transformaciones registradas por el BST y sus zonas de transición. En el mismo intervalo de tiempo, el BST consolidado perdió 37.701 ha, cifra que coincide aproximadamente con lo reportado como la pérdida neta en la categoría 3 de CLC.

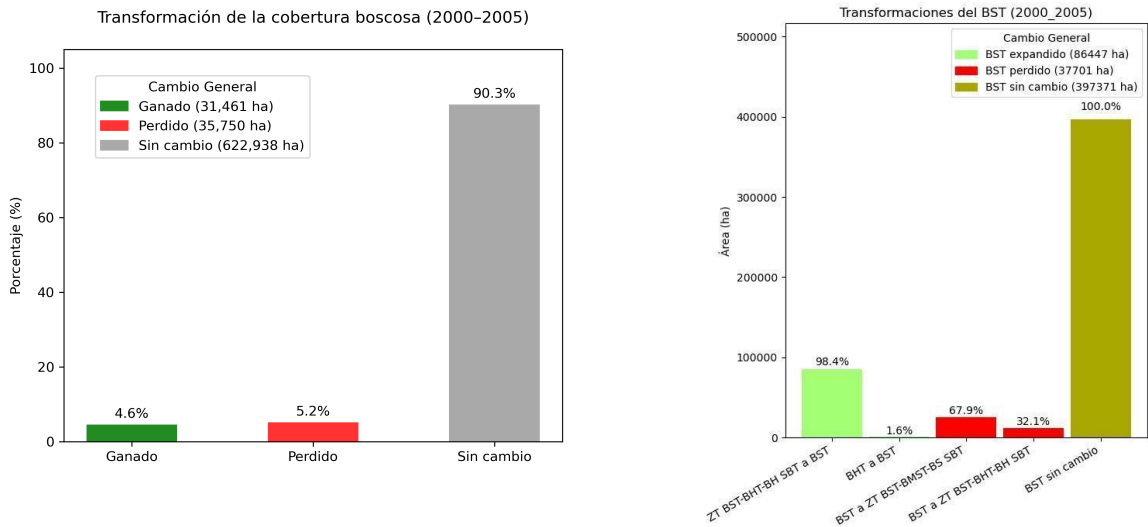


Figura 39. Dinámicas de transformación de cobertura boscosa y BST 2000 a 2005.

Si bien la cobertura del área se mantuvo casi en 89,4% entre 2005 y 2010, se observa en la figura 40 que el comportamiento del BST consolidado no fue el mismo. En este periodo, el BST consolidado perdió 253.945 ha, a diferencia de 22.308 ha que categóricamente se perdió de la cobertura boscosa. Esto sugiere que el BST sí tuvo una considerable reducción, mientras la categoría 3 aparentemente presenta en ganancia neta, lo que indica el crecimiento de otras formaciones boscosas a expensas del BST como lo indican las zonas de transición.

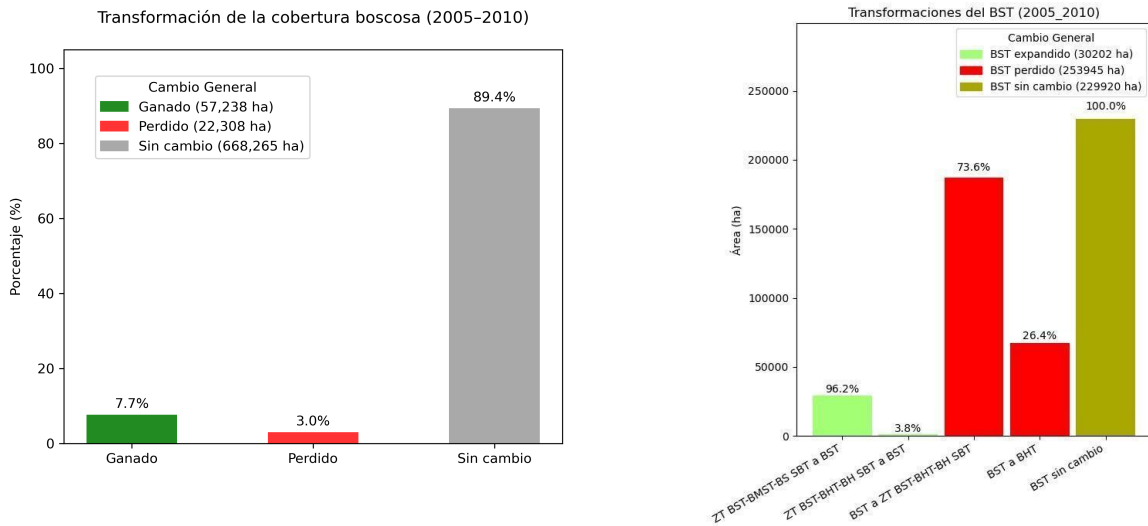


Figura 40. Dinámicas de transformación de cobertura boscosa y BST 2005 a 2010.

Por último desde el año 2010 hasta 2020, el bosque y áreas seminaturales mostraron un aumento significativo hacia la recuperación con una ganancia del 20.7% la mayor a lo largo de

los años registrados. A pesar de que la tasa de pérdida (23,745 ha, 8.8%) es menor, hay una ganancia positiva de ecosistemas forestales. Solo el 70.5% del área permaneció sin cambios.

Estos comportamientos se ven reflejados directamente en las dinámicas de transformación del BST y se puede observar en la figura 41. A diferencia de los períodos anteriores, el BST tuvo un importante incremento de 305.444 ha ganadas, lo que significa un 58.9% del total transformado, que es un aumento mayormente evidente sobre la zonas de transición ZT-BST-BHT-BH, constituyendo una conversión favorable de coberturas hacia BST.

Simultáneamente, el BST perdió 194,067 ha, lo que corresponde al 41.1% de la transformación total del bioma. Aunque este número sigue siendo alto, es notable que la expansión del BST superó su pérdida

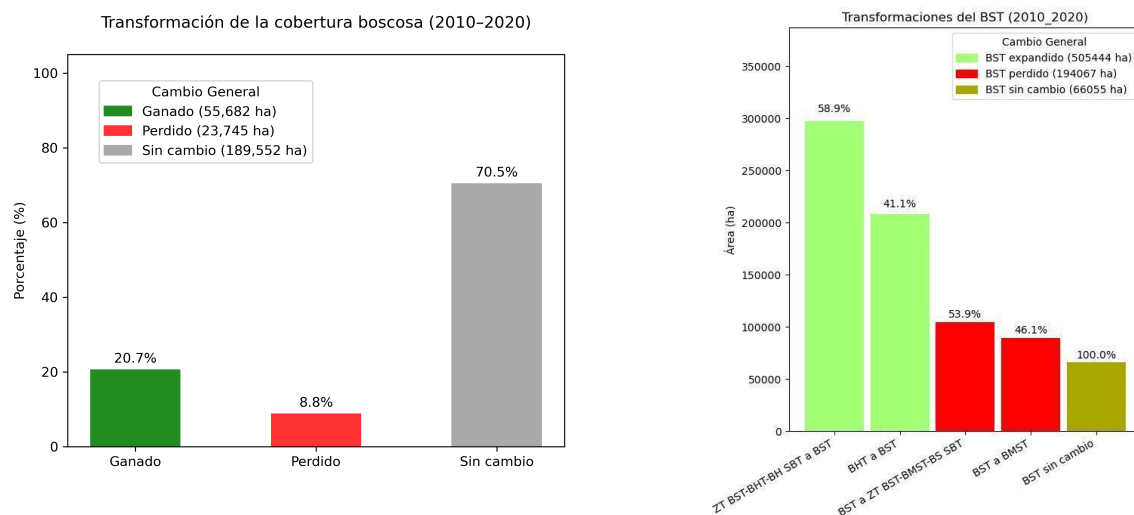


Figura 41. Dinámicas de transformación de cobertura boscosa y BST 2010 a 2020.

8. DISCUSIONES

A partir de los resultados obtenidos y presentados en el capítulo anterior, y considerando el uso del sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge para reconocer el comportamiento del Bosque Seco Tropical (BST) entre los años 2000 y 2020, se realizó un contraste frente a los hallazgos encontrados en investigaciones previas desarrolladas por otros autores, con el fin de identificar su versatilidad en diferentes escalas, similitudes, diferencias y posibles explicaciones a las condiciones particulares del BST en el Valle del Cauca durante dicho periodo.

8.1 Biomas

De los 8 biomas reconocidos para el Valle del Cauca, 5 se encontraron en zona tropical, 2 en subtropical y 1 en templado caliente; destacaron el BST, BHT y BMHT y de las 7 zonas de transición resaltaron ZT BST-BHT-BH SBT y ZT BMH SBT-BHT-BMHT. En contraste con esto, en Argentina [37] aplicó el modelo de Holdridge reconociendo 83 zonas de vida o biomas donde 30 de estos fueron en regiones tropicales y 28 en subtropicales. El total de biomas reconocidos por [37] representa el 63% del total posible del sistema de Holdridge y partiendo del periodo 1981 a 2010 proyectó escenarios futuros donde se evaluó la vulnerabilidad de los biomas reconocidos. Por su parte, [44] reconoció 16 biomas a través de la metodología de Holdridge, distribuidas en las tres vertientes del país, donde el bioma más representativo de la vertiente del Atlántico fue el bosque muy húmedo (40 %), el desierto en la vertiente del Pacífico (48%) y el páramo húmedo en la vertiente del Lago Titicaca (76%); y los biomas con menor presencia fueron las Tundras (2,1 %) ubicadas por encima de los 3500 msnm en el sur del país y el Bosque muy seco (0,57%) ubicado en la costa norte.

Mientras tanto, [3] en su estudio abarcó los Estados Unidos y reconoció 38 zonas de vida distintas utilizando el modelo de Holdridge, donde los biomas abarcaron cinco fajas latitudinales desde la tropical hasta la boreal resaltando las fajas templado cálido que cubre el 64% del país y la templado frío cubriendo el 35%. El bioma con mayor área reconocido fue el BHTC con 178 millones de Ha mientras la cobertura de área más pequeña fue la tundra húmeda templada cálida, que cubrió sólo 320 Ha. Por otro lado, [46] en su análisis de la región XUAR detectó cambios en la diversidad de las zonas de vida con 11 biomas entre 1961-1970, 10 entre 1971-1980, 11 nuevamente entre 1981-1990 y 12 entre los años 1991-2000. Por otra parte, en este estudio la varianza de biomas se dio entre 3 biomas en los años 2014, 2016 y 2018 y 6 biomas en los años 2000 y 2004.

8.1.1 Bosque Seco Tropical

En el Valle del Cauca se identificaron en promedio 475.000 Ha de BST durante los años 2000 a 2020, que se ubican principalmente en el valle geográfico del río Cauca y zonas de piedemonte.

Estudiando la dinámica espacial del BST año por año, las áreas se distribuyeron de manera fragmentada con mayor predominancia en el centro-sur del departamento con valores máximos de 665.000 ha en el año 2001 y 236.000 ha en el 2015. En contraste, el estudio de [9] identificó una extensión del BST de 350.959 ha dentro del Valle del Cauca para los años 1984, 1988 y 2014; donde abarcaron biomas regionales como el Zonobioma Alternohígrico Tropical (ZAHTVC) y Helobioma del Valle del Cauca (HVC).

En el Caribe, [24] realizó un estudio del BST en la cuenca hidrográfica del río Cesar, comprendiendo departamentos como el Cesar, Magdalena y la Guajira; para 1986 reportaron una presencia de BST de 801.500 ha, de las que el 12,3% se encontraron en el municipio de Valledupar, Cesar, por el contrario, el municipio de San Sebastián, Magdalena, poseía un 0,3%. Entre 1986 y 2015 la cobertura de BST se redujo a 237.268 ha quedando solo el 29,6% del ecosistema original. Analizando el valor inicial reportado en este estudio para el año 2000 de 435.000 ha y el valor final de 572.000 ha en el 2020, el BST presentó una tasa de cambio de 1,37%, sin tener en cuenta los valores máximos y mínimos encontrados durante el estudio.

Mientras que este estudio se centró en reconocer el bioma BST en el Valle del Cauca, [10] buscaron reconocer el estado de fragmentación de la cobertura vegetal BST, donde en la cuenca alta del río Cauca para el año 2012 reconocieron 1638 fragmentos del BST esparcidos por todo el Valle del Cauca con una área de 9.889 ha, los fragmentos con un área mayor a 100 ha se encuentran en el norte del área de estudio hacia el piedemonte de ambas cordilleras y en el centro y sur de la cuenca en el piedemonte de la cordillera Occidental y en general la mayoría de todos los fragmentos se ubicaron en zonas agrícolas.

8.1.2 Transformaciones del BST

La tasa de transformación del BST en el Valle del Cauca entre los años 2000 - 2010 fue cercana a -5% y entre el 2010 - 2020 fue de 8% resaltando que las pérdidas de este bioma se presentaron principalmente en los 10 primeros años de estudio. La tasa de transformación de [9] entre los años 1984 - 1998 fue de -1% , mientras que para el periodo 1998 - 2014 fue de -3,33%, para este caso las mayores pérdidas se presentaron en los últimos 16 años. El ZAHTVC presentó transformaciones de hasta el 73% en sus ecosistemas y el HVC un 63%. En el estudio presente se evidenció una permanencia promedio del BST de 346.553 ha en general, mientras que de las 350.959 ha reconocidas por [9] 154.777 ha fueron áreas naturales (ZAHTVC+HVC) y corresponde al 26 % de las que persistieron hasta 2014.

Los resultados de las transformaciones mostraron que el BST experimentó una dinámica espacial considerable entre los años 2000 a 2020; periodo en el que se identificaron procesos de expansión, pérdida y permanencia con fluctuaciones marcadas entre los años 2014-2015 y 2015-2016 clasificándolas hacia otros biomas con una pérdida promedio de 68% y una expansión de 59,5% respectivamente. Mientras, [24] reportó que entre 1986 y 2015 el BST en la Cuenca hidrográfica del río Cesar disminuyó en un 70,4%, representando una pérdida de 564.232 ha durante los 29 años de estudio, sin embargo, también identificó una regeneración estimada del 2% equivalente a 16.113 ha. Las transformaciones reconocidas en este estudio fueron hacia otros biomas mientras que [24] identificó transiciones hacia otras coberturas

como pastos (54,68%), Cultivos (39,67%), Cuerpos de agua y áreas húmedas (4,71%), Suelos desnudos, playas y afloramientos rocosos (0,47%), Minería a cielo abierto (0,44%) y, por último, zonas urbanas e infraestructura humana (0,03%).

En el Valle del Cauca, la expansión del BST se presentó de zonas de transición húmedas representando una disminución promedio del 57% de estas áreas, mostrando un proceso en el que las regiones húmedas pasan a condiciones más secas o semiáridas. Algo parecido reportó [29] que evaluaron la transformación del BST en la desertificación del municipio Aguas de Dios en Cundinamarca, evidenciaron que para el año 1991 las áreas con grado de desertificación alto, moderado y bajo corresponden a un 21,7%; 61,07% y 17,26% del municipio y para el 2018 estas aumentaron hasta 52,9%; 38,9% y 8,2%, mostrando un incremento en las condiciones áridas.

8.2 Cobertura y uso del suelo en el departamento

8.2.1 Dinámicas de transición de Cobertura y uso del suelo delimitados por el BST

El análisis multitemporal a lo largo del periodo 2000 a 2020, reveló dinámicas tanto de pérdidas como de ganancia o permanencia. Los resultados obtenidos en el estudio son consistentes con la tendencia de reducción, donde la transición de coberturas naturales hacia usos agrícolas es uno de los principales procesos de cambio.

Para los periodos 2000-2005 y 2005-2010, se registró que la cobertura con mayor ocupación sobre la zona ecológica fue el territorio agrícola con al menos 48,9% (755.929 ha) hasta 2005 y aumentó a 49,6% (806.984 ha) al 2010. También se identificaron transiciones predominantes como el paso de bosques y áreas seminaturales a territorio agrícola (3_2) ocupando 24,9% (25.400 ha), lo que se relaciona con el aumento de áreas cultivadas encontrado por [9] en el Valle del Cauca, quienes reportaron un incremento de 40,1% en estas superficies agrícolas, que pasando de 137.573 ha en 1984 a 192.788 ha en 2014.

Durante la década 2010 a 2020, el cambio principal fue el de territorio agrícola a cobertura boscosa ocupando al menos 55,3% (53.600 ha), a pesar de esto se evidenció una reducción de la cobertura boscosa de 69,6% pasando de ocupar 622.938 ha en 2005 a tan solo 189.552 ha al 2020 mientras que [9] registraron que la cobertura natural se redujo en aproximadamente un 50 % entre 1984 y 2014. Específicamente, en ese período, las áreas naturales pasaron de 154.777 ha en 1984 a 78.951 ha en 2014, lo que representa esa reducción.

Por su parte, [14] en el estudio realizado en la cuenca del río Nenjiang en China, registró la disminución de superficie forestal del 17,9% para el período de 1954 a 2010. Además, encontró que la expansión de tierras agrícolas fue la transición más significativa, con un aumento de 17,3% (1.145.268 ha) desde 1954 hasta 2010, principalmente a partir de la conversión de bosques y pastizales.

En cuanto a la dinámica de otras coberturas, aunque en menor medida se registró el aumento progresivo del paso de territorio agrícola a territorio artificializado que para el primer periodo

(2000-2005) ocupaba 1,8% (1.870 ha), para el segundo (2005-2010) ocupaba 3,6% (3.936 ha) y finalizó en 2020 con 10,7% (10.297 ha). Por su parte [9] identificaron para el Valle del Cauca que otras coberturas (incluyendo áreas cultivadas no clasificadas como tales) aumentaron en un 365 % entre 1984 y 1998, y en un 113 % entre 1998 y 2014.

8.2.2 Dinámicas de transformación del BST y cobertura boscosa

Respecto a las dinámicas de transformación del BST como de la cobertura boscosa clasificada con el nivel 1 de la metodología CLC adaptada para Colombia, se registró que para el periodo 2000-2005 la cobertura boscosa experimentó una pérdida del 5,2% (35.750 ha), aproximado a este valor se evidenció que la pérdida de BST para el mismo periodo fue de 16,6 % (37.701 ha). [19] identificó patrones de agrupación de diferentes estructuras vegetales en asociaciones de tipo climática, atmosférica e hídrica. Estas áreas se vinculan mediante zonas de transición, en relación con esto se evidenció que la mayor expansión del BST se presentó en la conversión de "ZT BST-BHT-BH SBT a BST" 98,4% de la expansión, mientras que la mayor pérdida se atribuye a "BST a ZT BST-BMST-BS SBT" que representó 67,9% de la pérdida.

Para los años 2005 a 2010 la cobertura boscosa evidenció una tendencia hacia la recuperación con más de 57.200 ha que representaron el 7,7%. Sin embargo, el comportamiento del BST fue opuesto, durante este periodo, la pérdida de BST fue de 49,4% (253.945 ha) superando drásticamente la expansión que ocupó 5,9% (30.202 ha), lo que sugiere una transformación de áreas de BST hacia otras zonas de vida o tipos de bosque. Mientras que [9] para su estudio para el Valle del Cauca, registraron que la cobertura natural se redujo en aproximadamente un 50% entre 1984 y 2014, evidenciando que pasaron de ocupar 154.777 ha en 1984 a solo 78.951 ha en 2014.

Finalmente para el último periodo 2010-2020, la cobertura boscosa experimentó una ganancia de 20,7% (55.682 ha), esta fue la cifra más alta del total de periodos analizados, frente a un 8,8% (23.745 ha) de pérdida. En concordancia con lo anterior, [14] en su estudio sobre la cuenca del río Nenjiang en China, evidenció que entre 2000 y 2010 hubo un proceso de reforestación, evidenciado por la conversión de tierras no utilizadas a bosques ocupando 2.11% (77.916 ha) de la superficie, impulsada por políticas gubernamentales como la del "retorno de cultivos a bosques y pasturas". En cuanto a la dinámica del BST se observó una expansión considerable de 66% (505.444 ha) superado su pérdida de 25,3% (194.067 ha). La expansión principal se dio en "ZT BST-BHT-BH SBT a BST" (58,9%), lo que indicó la conversión de otras zonas de vida hacia el BST.

En su estudio sobre las áreas naturales de BST en el Valle del Cauca, [9], señalaron que, a pesar de la pérdida, un 26 % de las áreas naturales, estas persistieron durante el periodo 1984-2014. Esto pone de manifiesto el potencial que tienen para su conservación.

8.3 Datos estadísticos

En el presente trabajo la evaluación de los datos CHIRPS frente a los datos IDEAM mostraron una correlación fuerte en años como 2005, 2010 y 2013 con resultados de $r= 0,96$, $0,92$ y $0,94$ respectivamente; con un promedio general durante el periodo de estudio de $r= 0,8439$, $R^2= 0,7289$ y un sesgo (bias) promedio de $97,18$ mm indicando una sobreestimación moderada de CHIRPS frente a las estaciones in situ del IDEAM. Este comportamiento es consistente en la mayoría de los años de estudio, con una excepción notable para el año 2015 donde el r fue de $0,56$.

Por su parte [47] desarrollaron su estudio en el departamento de Antioquia durante el periodo 1981 - 2018, donde realizó la validación de los datos CHIRPS en diferentes escalas (diaria, mensual y anual) frente a 75 estaciones meteorológicas. Los resultados en la escala diaria mostraron correlaciones bajas con valores de r entre $0,07$ y $0,35$ con sesgos entre $-46,07$ hasta los $309,26$ mm; mientras que cuando analizaron la escala mensual mejoraron los valores de r con resultados entre $0,72$ y $0,92$ y un sesgo entre $-16,97$ y $19,55$ mm en el 72% de las estaciones. En cambio, en la validación anual los resultados de r se dieron entre $0,77$ y $0,92$ con sesgos que oscilaron entre los $-25,46$ y $38,60$ mm.

Los resultados obtenidos en términos de correlación en este estudio se encontraron dentro de los rangos superiores reportados por [47] en la escala anual. Sin embargo, el sesgo obtenido de $97,18$ mm resultó considerablemente más alto frente a los $38,60$ mm reportados en el estudio de Antioquia, teniendo en cuenta que este sesgo fue evaluado por estaciones y las diferencias regionales, densidad de estaciones o condiciones climáticas locales. Si bien los resultados mostraron un buen comportamiento de los datos CHIRPS en escalas anuales, la precisión puede verse afectada por zonas con alta variabilidad climática.

Por otro lado el estudio realizado por [44], para la estimación de zonas de vida de Holdridge en el Perú para el periodo 1981 - 2010, destacó una alta correspondencia entre los datos Satelitales MODIS y las observaciones realizadas por las estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) obteniendo valores de correlación de hasta $0,97$. Este resultado coincide con la correlación obtenida en este estudio de $r= 0,90$ frente a las temperaturas registradas por las estaciones de la CVC en el Valle del Cauca; evidenciando una alta capacidad del satélite MODIS para representar la temperatura superficial en zonas tropicales.

Adicionalmente, un resultado similar al obtenido en este estudio fue reportado por [37] en la aplicación del modelo de zonas de vida de Holdridge para Argentina. En ese trabajo los autores utilizaron imágenes ráster de precipitación y temperatura provenientes del Atlas Climático Digital del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y se validaron frente a 80 estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina para el periodo 1981-2010 arrojando el valor de correlación $r= 0,94$ para temperatura y $r= 0,98$ para la precipitación. Los resultados de este estudio para el Valle del Cauca fueron coherentes con los de [37] alcanzando valores promedios de $r=0,90$ para la temperatura y $r= 0,84$ para las precipitaciones. Aunque las fuentes de datos, los contextos

climáticos y geográficos difieren, la coincidencia en los altos niveles de determinación sugiere una buena representación del comportamiento climático por parte de los productos satelitales.

8.4 Variables Bioclimáticas

8.4.1 Precipitación

En el análisis de los datos CHIRPS entre el 2000 y 2020 para el Valle del Cauca, se identificaron promedios máximos en los años 2006 y 2011 con valores cercanos a los 3700 mm por año, mientras los mínimos registrados en 2015 y 2020 fueron de 2300 y 2100 mm por año respectivamente. Desde el año 2013 se evidenció que los valores empezaron a descender, aunque las zonas de mayor humedad y precipitación permanecieron especialmente en el occidente del departamento. En el estudio de [48] en las cuencas del río Dagua y río Cali reportó un incremento en la precipitación total anual promedio de 15,2 mm y 9,1 mm respectivamente; señalando que las precipitaciones máximas anuales tienden a incrementarse en las estaciones ubicadas en la zona Oeste de la cuenca del río Dagua cerca del Pacífico, presentando precipitaciones bastante altas hasta 8000 mm/año.

Para el año 2015 [49], reportó que las precipitaciones en el Valle del Cauca fueron las menores registradas hasta el 2018 con un promedio de 931 mm/año. Mientras los datos de las estaciones IDEAM reportaron un valor promedio de 1204 mm/año y en las misma zonas de las estaciones el promedio presentado por CHIRPS fue 1637 mm/año.

8.4.2 Temperatura

Los datos obtenidos de MODIS para la temperatura media anual entre los años 2000 al 2020, mostró valores promedios para el Valle del Cauca entre los 24,4 °C en 2008 y 26,3 °C en 2015, de estos datos derivó la BT y BTB con rangos entre los 24,4 - 25,9 °C y 29,1 - 29,5 °C respectivamente. De este mismo modo [49] reportó que para el Valle del Cauca uno de los años más calurosos fue el 2015 con una temperatura promedio de 24,1 °C para la región. Por otro lado, los datos de las estaciones CVC registraron promedios de 19,2 °C en 2008 y 20,4 °C en 2015.

8.4.3 Evapotranspiración

En el periodo de estudio para el Valle del Cauca, la EVP mostró una tendencia creciente con valores medios anuales cercanos a los 0.6 en 2011 y máximos de 0.9 en 2015, ubicándose en las zonas centrales del departamento aquellas con mayor registro de EVP, mientras que la zona accidental presentó los valores más bajos de EVP.

9. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se estudió la dinámica espacial y temporal de las transformaciones del BST, sus variables bioclimáticas y su posible relación con los usos del suelo en el Valle del Cauca entre los años 2000 y 2020. La metodología propuesta, basada en uso de imágenes satelitales (MODIS, CHIRPS), la clasificación de zonas de vida de Holdridge y herramientas SIG en Python y GEE, demostró ser robusta para el monitoreo del BST en el Valle del Cauca, validada con datos in situ (correlaciones superiores a 0,85). Esto confirma su potencial como herramienta replicable para estudios ecológicos y de gestión territorial.

El BST presentó dinámicas contrastantes, entre el 2000 y 2010 mostró pérdidas del -5%; mientras que entre 2010 y 2020 mostró una recuperación cercana al 8%. Se identificaron que las transiciones más relevantes se dieron desde zonas húmedas hacia el BST con un 17% de expansión mientras que las pérdidas se asociaron en un 6% hacia los biomas o zonas áridas, evidenciando una sensibilidad a condiciones de mayor aridez.

Los principales motores de transformación del Bosque Seco Tropical (BST) y de las coberturas boscosas se asociaron con actividades humanas, principalmente agricultura y ganadería, que mantuvieron predominancia en el departamento y en las zonas delimitadas del bioma y sus áreas de transición. De manera paralela, se registró un aumento progresivo del territorio artificializado, el cual, con el paso de los años, desplazó en mayor medida a las superficies agrícolas, intensificando los procesos de transformación del paisaje.

Los datos satelitales empleados, CHIRPS para precipitación y MODIS para temperatura, mostraron una alta correlación con los registros in situ de las estaciones IDEAM y CVC ($r = 0,85$ y $r = 0,90$, respectivamente). A pesar de una sobreestimación promedio de 97,18 mm en la precipitación y 3,71 °C en la temperatura, estos resultados se encontraron dentro de los rangos reportados en estudios similares, lo que respalda su pertinencia como insumos para las investigaciones ecológicas y climáticas.

Durante el periodo analizado, se evidenció una disminución sostenida de la precipitación desde el año 2013, junto con un incremento gradual de la temperatura y la evapotranspiración, favoreciendo condiciones más secas y cálidas. La correlación negativa entre precipitación y evapotranspiración ($r = -0,75$) y la positiva con la biotemperatura ($r = 0,64$) reflejan la influencia determinante que tienen estas variables bioclimáticas en la transformación del Bosque Seco Tropical (BST), incrementando su vulnerabilidad frente a escenarios de cambio climático.

La tendencia observada en el Valle del Cauca coincide con estudios realizados tanto en el propio departamento como en regiones tropicales de Asia y otras áreas, donde se ha evidenciado la transformación de los bosques secos hacia biomas más áridos bajo la presión combinada de factores antrópicos y variabilidad climática. Aunque la diversidad de biomas identificados en el Valle del Cauca es menor, el patrón de pérdida y sensibilidad frente a cambios bioclimáticos resulta consistente con lo reportado en dichos contextos.

10. TRABAJOS FUTUROS

Dentro del marco del proyecto se destacó la importancia de generar datos base que permitan consolidar sistemas de monitoreo para la detección y estudio de los remanentes del BST, es por esto que en próximas iniciativas para la restauración y preservación del mismo en el departamento, es importante considerar el rango de diversidad ecológica que albergan las dinámicas de transformación del BST y la presencia de la cobertura boscosa.

Se abre la posibilidad para el desarrollo de estudios que aborden la planificación del uso del suelo como estrategia para fomentar y fortalecer acciones de protección, manejo y conservación de los servicios ecológicos que proporciona el BST. Adicionalmente, se pueden llevar a cabo investigaciones que detallen las coberturas presentes dentro del bioma y como el comportamiento y cambios que sufren estas coberturas pueden alterar el bioma de forma general.

Se propone para trabajos futuros lograr un monitoreo más preciso y detallado del BST, emplear tecnologías avanzadas de teledetección como imágenes satelitales de alta resolución. Adicionalmente, la obtención e integración de datos aplicando técnicas fotogramétricas y LiDAR, podría ofrecer una mejor perspectiva debido a la combinación de herramientas para lograr monitoreos con exactitud de la pérdida de coberturas o recuperación de áreas degradadas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. A. González, H. García, G. Corzo, and S. Madriñan, *BIODIVERSIDAD, CONSERVACION Y DESARROLLO*. E-CONTENT GENERIC VENDOR, 2012.
- [2] D. M. Olson *et al.*, "Terrestrial Ecoregions of the world: A New Map of Life on Earth," 2001.
- [3] A. E. Lugo, S. B. Brown, R. Dodson, T. S. Smith, and H. H. Shugart, "The Holdridge life zones of the conterminous United States in relation to ecosystem mapping," *J Biogeogr*, vol. 26, no. 5, pp. 1025–1038, Sep. 1999, doi: 10.1046/j.1365-2699.1999.00329.x.
- [4] M. R. Derguy, A. A. Drozd, M. F. Arturi, S. Martinuzzi, L. Toledo, and J. L. Frangi, "APLICACIÓN DEL MODELO DE CLASIFICACIÓN ECOLÓGICA DE HOLDRIDGE PARA LA REPUBLICA ARGENTINA A PARTIR DEL ANÁLISIS ESPACIAL DE DATOS," 2016.
- [5] A. Etter, "DIVERSIDAD ECOSISTEMICA EN COLOMBIA HOY," 1993.
- [6] G. Márquez Calle, "VEGETACIÓN, POBLACIÓN Y HUELLA ECOLÓGICA COMO INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD EN COLOMBIA," 2000.
- [7] C. Pizano and H. García, "EL BOSQUE SECO TROPICAL EN COLOMBIA," 2014.
- [8] J. M. Barraza, J. F. Montes, N. H. Martínez, and C. Deloya, "Ensamblaje de escarabajos coprófagos (Scarabaeidae: Scarabaeinae) del Bosque Tropical Seco, Bahía Concha, Santa Marta (Colombia)," 2010.
- [9] D. P. Alvarado Solano and J. T. Otero Ospina, "Áreas naturales de bosque seco tropical en el Valle del Cauca, Colombia: una oportunidad para la restauración," 2017.
- [10] A. M. Arcila Cardona, C. Valderrama Ardila, and P. Chacón de Ulloa, "Estado de fragmentación del bosque seco de la cuenca alta del río Cauca, Colombia," 2012.
- [11] J. C. Morales-Hernández, F. M. Carrillo-González, L. M. Farfán-Molina, and V. M. Cornejo-López, "Cambio de cobertura vegetal en la región de Bahía de Banderas, México," *Rev Colomb Biotecnol*, vol. 18, no. 1, May 2016, doi: 10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.57709.
- [12] E. F. Lambin *et al.*, "The causes of land-use and land-cover change: Moving beyond the myths," 2001. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/40143592>
- [13] A. Abad-Auquilla, "El cambio de uso de suelo y la utilidad del paisaje periurbano de la cuenca del río Guayllabamba en Ecuador," *Revista de Ciencias Ambientales*, vol. 54, no. 2, pp. 68–91, Jul. 2020, doi: 10.15359/rca.54-2.4.
- [14] J. Tang, K. Bu, J. Yang, S. Zhang, and L. Chang, "Multitemporal analysis of forest fragmentation in the upstream region of the Nenjiang River Basin, Northeast China," *Ecol Indic*, vol. 23, pp. 597–607, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.ecolind.2012.05.012.
- [15] R. Scolozzi and D. Geneletti, "A multi-scale qualitative approach to assess the impact of urbanization on natural habitats and their connectivity," *Environ Impact Assess Rev*, vol. 36, pp. 9–22, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.eiar.2012.03.001.
- [16] I. Armbréch and P. Ulloa Chacón, "Rareza y Diversidad de Hormigas en Fragmentos de Bosque Seco Colombianos y sus Matrices," 1999.
- [17] Y. Herreras Diego and J. Benítez-Malvido, *Consecuencias de la fragmentación de los ecosistemas*, 1st ed. 2005. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/319174095>
- [18] W. F. Laurance *et al.*, "Relationship between soils and Amazon forest biomass: A landscape-scale study," *For Ecol Manage*, vol. 118, no. 1–3, pp. 127–138, Jun. 1999, doi: 10.1016/S0378-1127(98)00494-0.
- [19] L. Holdridge, "Ecología basada en zonas de vida," 1978.
- [20] S. Su, R. Xiao, Z. Jiang, and Y. Zhang, "Characterizing landscape pattern and ecosystem service value changes for urbanization impacts at an eco-regional scale," *Applied Geography*, vol. 34, pp. 295–305, 2012, doi: 10.1016/j.apgeog.2011.12.001.

- [21] G. Rudas *et al.*, "BIODIVERSIDAD Y ACTIVIDAD HUMANA: RELACIONES EN ECOSISTEMAS DE BOSQUE SUBANDINO EN COLOMBIA," 2007. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/236173725>
- [22] N. Rodríguez, P. Armenteras Dolors, M. Morales Rivas, and M. Romero Ruiz, *Ecosistemas de los andes colombianos*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, 2006.
- [23] W. Vargas, "Los bosques secos del Valle del Cauca: una aproximación a su flora actual," 2012.
- [24] F. A. Camargo Moyano, "LA TRANSFORMACIÓN DEL BOSQUE SECO DESDE LA MIRADA GEOGRÁFICO-AMBIENTAL, EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO CESAR," 2017.
- [25] J.-P. Puyravaud, "Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation," 2003. [Online]. Available: <http://www.fao.org/>
- [26] H. Alphan, H. Doygun, and Y. I. Unlukaplan, "Post-classification comparison of land cover using multitemporal Landsat and ASTER imagery: The case of Kahramanmaraş, Turkey," *Environ Monit Assess*, vol. 151, no. 1–4, pp. 327–336, 2009, doi: 10.1007/s10661-008-0274-x.
- [27] F. E. Clements, "Plant Succession An Analysis Of The Development Of Vegetation," 1916. [Online]. Available: <http://www.archive.org/cleails/cu31924000531818>
- [28] L. Mucina, "Biome: evolution of a crucial ecological and biogeographical concept," *New Phytologist*, vol. 222, no. 1, pp. 97–114, Apr. 2019, doi: 10.1111/nph.15609.
- [29] A. D. Alarcón Montaña and M. Á. Roza Arango, "Análisis multitemporal de la transformación del bosque seco tropical que influye en la desertificación del municipio de Agua de Dios," 2020. [Online]. Available: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitariahttps://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1868
- [30] F. Domingo, L. Villagarcía, and A. Were, "¿Cómo se puede medir y estimar la evapotranspiración?: estado actual y evolución," 2002. [Online]. Available: www.aeet.org/ecosistemas/031/informe1.htm
- [31] H. L. Penman, "Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass," 1948.
- [32] O. C. González Gómez, R. L. Correa Amaya, and L. M. Carrillo Forero, "Formato común de hoja metodológica de indicadores ambientales: Precipitación total anual y mensual," *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.*, 2014.
- [33] F. J. Sahagún Sánchez and H. Reyes Hernández, "Impactos por cambio de uso de suelo en las áreas naturales protegidas de la región central de la Sierra Madre Oriental, México," 2018.
- [34] O. Mutanga and L. Kumar, "Google earth engine applications," Mar. 01, 2019, *MDPI AG*. doi: 10.3390/rs11050591.
- [35] Esri, "Introducción a ArcGIS Pro." Accessed: Apr. 28, 2025. [Online]. Available: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/get-started/get-started.htm>
- [36] European Environmen Agency, "Cobertura terrestre de Corine." Accessed: Apr. 06, 2025. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/en/datahub/datahubitem-view/a5144888-ee2a-4e5d-a7b0-2bbf21656348>
- [37] M. R. Derguy, "CLASIFICACIÓN ECOLÓGICA PARA LA REPÚBLICA ARGENTINA A PARTIR DEL MODELO DE ZONAS DE VIDA DE HOLDRIDGE (1947, 1967): MAPEO, CARACTERIZACION Y TENDENCIAS DE CAMBIO," 2019.
- [38] V. Ruiz, R. Savé, and A. Herrera, "Multitemporal analysis of land use change in the Terrestrial Protected Landscape Miraflores Moropotenté Nicaragua, 1993-2011," *Ecosistemas*, vol. 22, no. 3, pp. 117–123, Sep. 2013, doi: 10.7818/ECOS.2013.22-3.16.
- [39] A. Velázquez *et al.*, "Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México," 2002.
- [40] C. H. Merriam, "LIFE ZONES AND CROP ZONES OF THE UNITED STATES," 1898.

- [41] J. S. Beard, "Climax Vegetation in Tropical America," 1944.
- [42] E. García, "Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de KöPPEN," 2004.
- [43] Gobernacion del Valle, "Mapas y Territorios." Accessed: May 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.valledelcauca.gov.co/publicaciones/60137/mapas-y-territorios/>
- [44] E. Sabino Rojas, "Estimación de las Zonas de Vida de Holdridge en el Perú," 2019.
- [45] R. T. Yupanqui Velez, "VALIDACIÓN DE LOS DATOS CHIRPS DE PRECIPITACIÓN PARA MONITOREO DE PERIODOS SECOS Y HÚMEDOS DEL PERÚ DIRECCIÓN GENERAL DE HIDROLOGÍA Y RECURSOS HÍDRICOS 1 PERSONAL DIRECTIVO," 2015.
- [46] Y. Zheng, Z. Xie, L. Jiang, H. Shimizu, and S. Drake, "Changes in Holdridge Life Zone diversity in the Xinjiang Uygur Autonomous Region (XUAR) of China over the past 40 years," *J Arid Environ*, vol. 66, no. 1, pp. 113–126, Jul. 2006, doi: 10.1016/j.jaridenv.2005.09.005.
- [47] C. López-Bermeo, R. D. Montoya, F. J. Caro-Lopera, and J. A. Díaz-García, "Validation of the accuracy of the CHIRPS precipitation dataset at representing climate variability in a tropical mountainous region of South America," *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 127, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.pce.2022.103184.
- [48] F. Cardona-Guerrero, Á. J. Ávila-Díaz, Y. Carvajal-Escobar, and H. Jiménez-Escobar, "Trends into rainfall time series of two andes basins of Valle del Cauca (Colombia)," 2014.
- [49] E. Cortés Betancourt, "25 datos de 25 años de registro del clima regional," Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia - Cenicaña . Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.cenicana.org/25-datos-de-25-anos-de-registro-del-clima-regional/>