



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**

**Universidad del Perú. Decana de América**

**Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica**

**Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica**

**Estimación de la deforestación en el Santuario Histórico  
Bosque de Pómac y su zona de amortiguamiento  
mediante modelos estocásticos y teledetección**

**TESIS**

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo

**AUTOR**

Nilton Orlando PÉREZ AVENDAÑO

**ASESORES**

Mg. Walter Aparicio ARÉVALO GÓMEZ

M.Sc. Tulio Wilfredo CHÁVEZ ESPÍRITU (Coasesor)

Lima, Perú

2021



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

## Referencia bibliográfica

---

Pérez, N. (2021). *Estimación de la deforestación en el Santuario Histórico Bosque de Pómac y su zona de amortiguamiento mediante modelos estocásticos y teledetección*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

---

## Metadatos complementarios

| Datos de autor                                         |                                                                                                                                                                                                                                                               |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nombres y apellidos                                    | Nilton Orlando Pérez Avendaño                                                                                                                                                                                                                                 |
| DNI                                                    | 76221734                                                                                                                                                                                                                                                      |
| URL de ORCID                                           | <a href="https://orcid.org/0000-0001-5163-2647">https://orcid.org/0000-0001-5163-2647</a>                                                                                                                                                                     |
| Datos de asesor                                        |                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Nombres y apellidos                                    | Walter Aparicio Arévalo Gómez                                                                                                                                                                                                                                 |
| DNI                                                    | 09050786                                                                                                                                                                                                                                                      |
| URL de ORCID                                           | <a href="https://orcid.org/0000-0002-5738-7942">https://orcid.org/0000-0002-5738-7942</a>                                                                                                                                                                     |
| Datos de coasesor                                      |                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Nombres y apellidos                                    | Tulio Wilfredo Chávez Espíritu                                                                                                                                                                                                                                |
| DNI                                                    | 41312461                                                                                                                                                                                                                                                      |
| URL de ORCID                                           | <a href="https://orcid.org/0000-0003-2233-1372">https://orcid.org/0000-0003-2233-1372</a>                                                                                                                                                                     |
| Datos de investigación                                 |                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Línea de investigación                                 | A.2.3.1. Procesamiento de Imágenes Satelitales y Modelado                                                                                                                                                                                                     |
| Grupo de investigación                                 | No Aplica                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Agencia de financiamiento                              | Sin Financiamiento                                                                                                                                                                                                                                            |
| Ubicación geográfica de la investigación               | País: Perú<br>Departamento: Lima<br>Provincia: Lima<br>Distrito: San Juan de Lurigancho<br>Asociación: Las Terrazas de las Flores<br>Manzana y lote: Mz. B Lt. 2<br>Latitud: -12.0238241<br>Longitud: -77.0145578                                             |
| Año o rango de años en que se realizó la investigación | 2019 - 2021                                                                                                                                                                                                                                                   |
| URL de disciplinas OCDE                                | Sensores remotos<br><a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.04">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.04</a><br>Ciencias del medio ambiente<br><a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.08">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.08</a> |



# UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA

## **ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓGRAFO**

Usando la plataforma virtual de Google Meet de la Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el día viernes 28 de mayo del año 2021, siendo las 16:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Ing. LUIS ALBERTO HUAMÁN AMASIFUEN

Ing. JOSÉ ANTONIO SANDOVAL CASAS

Ing. MÁXIMO AYALA GUTIÉRREZ

Presidente

Miembro

Miembro

Reunidos en Acto Académico virtual Público de Sustentación de la Tesis titulada: “**ESTIMACIÓN DE LA DEFORESTACIÓN EN EL SANTUARIO HISTÓRICO BOSQUE DE PÓMAC Y SU ZONA DE AMORTIGUAMIENTO MEDIANTE MODELOS ESTOCÁSTICOS Y TELEDETECCIÓN**” Presentada por el Bachiller **NILTON ORLANDO PÉREZ AVENDAÑO**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo.

Expuesta la Tesis; los miembros del Jurado plantearon al Bachiller las preguntas pertinentes, que fueron absueltas a:

**SATISFACCIÓN**

Concluida la sustentación de Tesis, el Jurado procedió a evaluar y calificar la calidad y sustentación en secreto, cuyo calificativo fue:

**QUINCE (15), APROBADO**

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓGRAFO, a Don NILTON ORLANDO PÉREZ AVENDAÑO.

Siendo las.....**17:15**..... horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (05) Actas Originales de la Sustentación de Tesis, firmadas por el Jurado Calificador.

Lima, 28 de mayo del 2021

**Ing. LUIS ALBERTO HUAMÁN AMASIFUEN**  
PRESIDENTE

  
JOSE ANTONIO SANDOVAL CASAS  
INGENIERO GEOGRAFO  
Reg. CIP. N° 59153

**Ing. JOSÉ ANTONIO SANDOVAL CASAS**  
MIEMBRO

**Ing. MÁXIMO AYALA GUTIÉRREZ**  
MIEMBRO

**Mg. WALTER APARICIO ARÉVALO GÓMEZ**  
ASESOR DE TESIS

*A mi familia, por ser la eterna  
inspiración para luchar por  
alcanzar mis metas.*

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradecer a mi asesor, Mg. Walter Aparicio Arévalo Gómez, por su confianza desde el inicio de esta investigación y por sus consejos que me ayudaron a poder realizar una investigación de manera eficaz; a mi asesor externo, Ing. M.Sc. Tulio Wilfredo Chávez Espíritu, por compartir sus conocimientos en teledetección y bosques, siendo un guía constante en este trabajo; al Ing. Wilder Hans Caballero Haro y al Lic. M. Sc. José Jesús Pasapera Gonzales, por ayudarme a definir el presente trabajo y brindarme consejos que me ayudaron a encaminarme en esta investigación; a todos los miembros de la Dirección Geomática de la Agencia Espacial CONIDA con los que compartí espacio de trabajo en determinado momento, que me apoyaron brindándome su apoyo cada vez que lo necesité; a la Agencia Espacial CONIDA por brindarme imágenes PERUSAT-1 que me apoyaron a la validación de los mapas realizados; a la Especialista en Áreas Naturales Protegidas por el SERNANP, Ing. M.Sc. Julia Inés Laso Clemente, quien, a través del Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas, contribuyeron a la investigación brindando información detallada del Santuario Histórico Bosque de Pómac de manera muy eficiente y completa; al Ing. M.Sc. Boris S. Hinojosa Guzmán, por apoyarme a realizar un trabajo optimo en cuanto a la creación de escenarios a futuro; al Mg. Luis Robles, quien a, través del Centro de Investigación y Especialización en Ciencias e Ingeniería (CIECI), me permitieron aprender diferentes herramientas para realizar la metodología; a mi tía Lade Marisol Quispe Marca, por su apoyo en cuanto a la corrección de errores de redacción; a la Geog. Isabel Mercedes Pino Capcha, por sus muy útiles consejos para superar problemas metodológicos, para realizar un trabajo ordenado, también por ayudar a levantarme en cada tropiezo que tuve y ser una motivación constante para seguir adelante.

Además, un agradecimiento especial a los amigos y familiares siempre que creyeron en mí y me brindaron sus palabras de aliento para poder continuar hasta el final.

# ÍNDICE GENERAL

|                                                                   |       |
|-------------------------------------------------------------------|-------|
| RESUMEN .....                                                     | xvi   |
| ABSTRACT.....                                                     | xviii |
| CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....                                     | 1     |
| 1.1 Formulación del Problema .....                                | 3     |
| 1.1.1 Problema General.....                                       | 3     |
| 1.1.2 Problemas Específicos .....                                 | 3     |
| 1.2 Justificación de la Investigación .....                       | 4     |
| 1.3 Objetivos.....                                                | 6     |
| 1.3.1 Objetivo General .....                                      | 6     |
| 1.3.2 Objetivos Específicos .....                                 | 6     |
| CAPITULO II. MARCO TEÓRICO .....                                  | 7     |
| 2.1 Antecedentes del Problema .....                               | 7     |
| 2.1.1 A Nivel Mundial. ....                                       | 7     |
| 2.1.2 A Nivel Nacional.....                                       | 10    |
| 2.1.3 A Nivel Local. ....                                         | 12    |
| 2.2 Bases Teóricas .....                                          | 14    |
| 2.2.1 La dinámica de los territorios Agrícolas y Urbanizados..... | 14    |
| 2.2.3 La deforestación de Bosques Secos.....                      | 54    |
| CAPITULO III. HIPÓTESIS Y VARIABLES .....                         | 64    |
| 3.1 Hipótesis General .....                                       | 64    |
| 3.2 Hipótesis Específicos .....                                   | 64    |
| 3.1 Identificación de Variables .....                             | 65    |
| 3.1.1 Variables Independientes.....                               | 65    |
| 3.1.2 Variable Dependiente.....                                   | 65    |
| CAPITULO IV. METODOLOGÍA .....                                    | 66    |
| 4.1 Área de Estudio .....                                         | 66    |
| 4.1.1 Ubicación y Extensión.....                                  | 66    |
| 4.1.2 Características físicas del área de estudio.....            | 67    |
| 4.2 Datos.....                                                    | 71    |
| 4.2.1 Temporalidad del Estudio.....                               | 71    |
| 4.2.2 Imágenes Satelitales.....                                   | 73    |

|       |                                                                                                                                |     |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.3 | Factores que influye en la Deforestación.....                                                                                  | 75  |
| 4.3   | Generación de Mapas de Cobertura de Suelo .....                                                                                | 80  |
| 4.3.1 | Selección de Clases de Cobertura de Suelo.....                                                                                 | 80  |
| 4.3.2 | Clasificación de Imágenes.....                                                                                                 | 87  |
| 4.3.3 | Refinación de los Mapas Clasificados.....                                                                                      | 90  |
| 4.3.4 | Validación de los Mapas Clasificados mediante el Índice Kappa .....                                                            | 97  |
| 4.3.5 | Creación de Proyecciones.....                                                                                                  | 106 |
|       | CAPITULO V. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....                                                                      | 134 |
| 5.1   | Influencia de la dinámica de los Territorios Agrícolas y Urbanizados, y la Gestión del SHBP, sobre los Bosques Secos. ....     | 134 |
| 5.1.1 | Influencia de la dinámica de los Territorios Agrícolas y Urbanizados sobre los Bosques Secos.....                              | 139 |
| 5.1.2 | Influencia de la gestión del SHBP sobre los Bosques Secos .....                                                                | 141 |
| 5.1.3 | Comportamiento del avance de los Territorios Agrícolas y Urbanizados en la zona de amortiguamiento del SHB y en dicha ANP..... | 142 |
| 5.2   | CONTRASTACION DE HIPOTESIS.....                                                                                                | 143 |
|       | CAPITULO VI. CONCLUSIONES.....                                                                                                 | 145 |
|       | CAPITULO VII. RECOMENDACIONES .....                                                                                            | 146 |
|       | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                                                                               | 148 |
|       | ANEXOS .....                                                                                                                   | 153 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Espectro Electromagnético.....                                                         | 23 |
| Figura 2. Interpretación geométrica de la Radiancia.....                                         | 24 |
| Figura 3. Satélite Landsat-8.....                                                                | 30 |
| Figura 4. Nave espacial Terra, portador del instrumento ASTER.....                               | 31 |
| Figura 5. Satélite PeruSat-1.....                                                                | 32 |
| Figura 6. Fundamento espectral de los Índices de Vegetación.....                                 | 37 |
| Figura 7. Fundamentos del análisis No Supervisado.....                                           | 40 |
| Figura 8. Algoritmo de Mínima Distancia.....                                                     | 41 |
| Figura 9. Algoritmo de Paralelepípedos.....                                                      | 42 |
| Figura 10. Extensión del algoritmo de Máxima Probabilidad a dos bandas.....                      | 44 |
| Figura 11. Tipos de muestreo.....                                                                | 46 |
| Figura 12. Clasificación de N elementos en cuadro de doble entrada.....                          | 57 |
| Figura 13. Clasificación de términos relativos (dividido entre N) en cuadro<br>de doble entrada. | 58 |
| Figura 14. Figura 14. Vector $\hat{c}(u)$ y matiz P .....                                        | 59 |
| Figura 15. Mapa de área de estudio.....                                                          | 68 |
| Figura 16. Mapa geológico del área de estudio.....                                               | 69 |
| Figura 17. Mapa de pendientes del área de estudio.....                                           | 69 |
| Figura 18. Mapa de tipos de suelo del área de estudio.....                                       | 70 |
| Figura 19. Mapa fisiográfico del área de estudio.....                                            | 70 |
| Figura 20. Imágenes satelitales con combinación de bandas SWIR-NIR-GREEN .....                   | 74 |
| a)2001, b)2007, c)2010, d)2016, e)2019.                                                          |    |
| Figura 21. Imágenes satelitales con combinación de bandas NIR-RED-GREEN.....                     | 75 |

a)2001, b)2007, c)2010, d)2016, e)2019.

Figura 22. Modelo de elevación digital.....77

Figura 23. Mapa de proximidad a vías..... 78

Figura 24. Mapa de proximidad a centros poblados.....78

Figura 25. Mapa del Santuario Histórico Bosque de Pómac.....79

a) deforestación año 2009, b) perturbación al año 2016.

Figura 26. Mapa de temperatura media.....79

Figura 27. Mapa de precipitación media.....80

Figura 28. a) Muestra ejemplo de Bosque Seco Denso.....83

b) Firma espectral promedio de los ROI seleccionados para realizar la  
clasificación del Bosque Seco Denso.

Figura 29. a) Muestra ejemplo de Área Cultivada en combinación .....84

SWIR-NIR-GREEN, b) firma espectral promedio de los ROI seleccionados  
para realizar la clasificación del Área Cultivada.

Figura 30. a) Muestra ejemplo de Suelo en Descanso en combinación.....84

SWIR-NIR-GREEN, b) firma espectral promedio de los ROI seleccionados.  
para realizar la clasificación del Suelo en Descanso.

Figura 31. a) Muestra ejemplo de Área Cultivada Muy Húmeda en.....85

combinación SWIR-NIR-GREEN, b) firma espectral promedio de los ROI  
seleccionados para realizar la clasificación del Área Cultivada Muy Húmeda.

Figura 32. a) Muestra ejemplo de Vegetación Herbácea y Arbustiva en.....85

combinación NIR-RED-GREEN, b) firma espectral promedio de los ROI  
seleccionados para realizar la clasificación de la Vegetación Herbácea y Arbustiva.

Figura 33. a) Muestra ejemplo de Bosque Seco Ralo en combinación.....86

NIR-RED-GREEN, b) firma espectral promedio de los ROI seleccionados

para realizar la clasificación del Bosque Seco Ralo.

Figura 34. Comparación de firmas espectrales promedio de los.....86

ROI seleccionados para realizar la clasificación de las imágenes.

Figura 35. a) Clasificación del año 2001, b) Clasificación del año.....89

2007, c) Clasificación del año 2010, d) Clasificación del año 2016,

e) Clasificación del año 2019.

Figura 36. Índices de Vegetación de Diferencia Normalizada.....91

del: a) año 2001, b) año 2007, c) año 2010, d) año 2016, e) año 2019.

Figura 37. Índices de Agua de Diferencia Normalizada.....93

del: a) año 2001, b) año 2007, c) año 2010, d) año 2016, e) año 2019.

Figura 38. a) Mapa preliminar del año 2001 .....95

clasificación; b) Mapa definitivo del año 2001.

Figura 39. a) Mapa preliminar del año 2007 .....95

clasificación; b) Mapa definitivo del año 2007.

Figura 40. a) Mapa preliminar del año 2010 .....96

clasificación; b) Mapa definitivo del año 2010.

Figura 41. a) Mapa preliminar del año 2016 .....96

clasificación; b) Mapa definitivo del año 2016.

Figura 42. a) Mapa preliminar del año 2019 .....97

clasificación; b) Mapa definitivo del año 2019.

Figura 43. Validación de la clasificación preliminar del año 2001: a) valores de.....103

los puntos de validación en el mapa clasificado, b) valores de los puntos de validación en la realidad.

Figura 44. Validación de la clasificación definitiva del año 2001: a) valores de .....103

los puntos de validación en el mapa clasificado; b) valores de los puntos de

validación en la realidad.

Figura 45. Validación de la clasificación definitiva del año 2007: a) valores de.....104

los puntos de validación en el mapa clasificado, b) valores de los puntos de

validación en la realidad.

Figura 46. Distribución de puntos de validación del año 2010.....104

Figura 47. Distribución de puntos de validación del año 2016.....105

Figura 48. Validación de la clasificación definitiva del año 2019: a) valores de.....105

los puntos de validación en el mapa clasificado; b) valores de los puntos de

validación en la realidad.

Figura 49. Estadísticas de la Ejecución del Entrenamiento del Sub-Modelo.....114

: a) Proyección al año 2019, Escenario 1, b) Proyección al año 2037, Escenario 1,

c) Proyección al año 2037, Escenario 2.

Figura 50. Mapa de potencial de transiciones basado en los.....114

años 2001 y 2010: a) Proyección al año 2019, Escenario 1, b) Proyección

al año 2037, Escenario 1, c) Proyección al año 2037, Escenario 2.

Figura 51. Mapa Proyectado a 2019, Escenario 1.....115

Figura 52. Mapas Proyectados a 2037: a) Escenario 1, b) Escenario 2.....115

Figura 53. Estadísticas de la ejecución del entrenamiento para la Proyección.....124

al año 2010: a) por el modelo MLP Neural Network, b) por el modelo SimWeight,

c) por el modelo Logistic Regression.

Figura 54. Mapa de potencial de transiciones basado en los años.....125

2001 y 2007 mediante los diferentes métodos: a) MLP Neural Network,

b) SimWeight, c) Logistic Regression.

Figura 55. Mapas de Cobertura de Suelo Proyectados al Año 2010: .....126

a) por el modelo MLP Neural Network, b) por el modelo SimWeight,

c) por el modelo de Logistic Regression

Figura 56. Estadísticas de la ejecución del entrenamiento: a) para.....126

la Proyección al año 2019, Escenario 2, b) para la Proyección al año 2019, Escenario 3.

Figura 57. Mapa de potencial de transiciones: a) basado en los años 2010 .....127

y 2016, b) basado en los años 2001 y 2016

Figura 58. Mapas Proyectados a 2019: a) Escenario 2, b) Escenario 3. ....127

Figura 59. Mapas de cobertura de suelo en la Zona de Amortiguamiento.....128

del SHBP: a)2001, b) 2007, c) 2010, d) 2016, e) 2019.

Figura 60. Mapas de cobertura de suelo en el Santuario Histórico Bosque de Pómac: .....129

a)2001, b) 2007, c) 2010, d) 2016, e) 2019.

Figura 61. Proyección de la cobertura de suelos para el Escenario 1 al .....130  
año 2019 : a) Zona de Amortiguamiento, b) SHBP.

Figura 62. Mapa de cobertura de suelo en la Zona de Amortiguamiento.....130

del Santuario Histórico Bosque de Pómac: a) Escenario 1 al año 2037, b) Escenario 2 al año  
2037.

Figura 63. Mapa de cobertura de suelo en el Santuario Histórico Bosque de.....131

Pómac en el Año 2037: a) Escenario 1 al año 2037, b) Escenario 2 al año 2037.

Figura 64. Comparación del comportamiento de la deforestación.....142

neta promedio anual en la Zona de Amortiguamiento y el SHBP.

## LISTA DE CUADROS

|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Cuadro 1. Comparación de características entre satélites del programa Landsat.....     | 29  |
| Cuadro 2. Características del sensor ASTER.....                                        | 31  |
| Cuadro 3. Cualidades del satélite PeruSat-1.....                                       | 32  |
| Cuadro 4. Validación del coeficiente Kappa.....                                        | 49  |
| Cuadro 5. Precipitaciones medias en la estación de verano de los años.....             | 73  |
| seleccionados y de los no seleccionados.                                               |     |
| Cuadro 6. Imágenes satelitales de insumo.....                                          | 73  |
| Cuadro 7. Cobertura de suelo, en hectáreas, para los diferentes años clasificados..... | 94  |
| Cuadro 8. Matriz de confusión para los puntos de la muestra en el mapa.....            | 99  |
| preliminar del año 2001.                                                               |     |
| Cuadro 9. Matriz de confusión para los puntos de la muestra del año 2001 .....         | 99  |
| resumida del Cuadro 8.                                                                 |     |
| Cuadro 10. Matriz de confusión para los puntos de la muestra del mapa definitivo.....  | 100 |
| del año 2001.                                                                          |     |
| Cuadro 11. Matriz de confusión para los puntos de la muestra del año 2007.....         | 100 |
| Cuadro 12. Matriz de confusión para los puntos de la muestra del año 2010.....         | 101 |
| Cuadro 13. Matriz de confusión para los puntos de la muestra del año 2016.....         | 101 |
| Cuadro 14. Matriz de confusión para los puntos de la muestra del año 2019.....         | 102 |
| Cuadro 15. Cuadro resumen de índices Kappa para la clasificación de cada año.....      | 102 |
| Cuadro 16. Cambios de las clases, en hectáreas, entre los años 2001 y 2010.....        | 107 |

|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Cuadro 17. Confiabilidad de los factores de cambio al Escenario 1 proyectado.....      | 108 |
| al año 2019                                                                            |     |
| Cuadro 18. Matriz de probabilidad de cambio entre los años 2001 y 2010.....            | 109 |
| Cuadro 19. Cambios de las clases, en hectáreas, entre los años 2010 y 2019.....        | 110 |
| Cuadro 20. Confiabilidad de los factores de cambio al Escenario 1 proyectado.....      | 111 |
| al año 2037.                                                                           |     |
| Cuadro 21. Matriz de probabilidad de cambio entre los años 2010 y 2019.....            | 111 |
| Cuadro 22. Cambios de las clases, en hectáreas, entre los años 2001 y 2019.....        | 112 |
| Cuadro 23. Matriz de probabilidad de cambio al Escenario 2 proyectado al año 2037..... | 113 |
| Cuadro 24. Cambios de las clases, en hectáreas, entre los años 2001 y 2007.....        | 116 |
| Cuadro 25. Confiabilidad de los factores de cambio para proyección a 2010.....         | 117 |
| Cuadro 26. Matriz de probabilidad de cambio entre los años 2001 y 2007.....            | 118 |
| Cuadro 27. Valor ROC de la clase ANTRÓPICO para cada.....                              | 119 |
| método de entrenamiento de sub-modelo de la Proyección a 2010.                         |     |
| Cuadro 28. Valor ROC de cada clase de la Proyección a 2010.....                        | 119 |
| Cuadro 29. Cambios de las clases, en hectáreas, entre los años 2010 y 2016.....        | 120 |
| Cuadro 30. Confiabilidad de los factores de cambio al Escenario 2 proyectado.....      | 120 |
| al año 2019                                                                            |     |
| Cuadro 31. Matriz de probabilidad de cambio entre los años 2010 y 2016.....            | 121 |
| Cuadro 32. Valores ROC para las clases del Escenario 2 proyectado al año 2019.....     | 122 |
| Cuadro 33. Cambios de las clases, en hectáreas, entre los años 2001 y 2016.....        | 119 |
| Cuadro 34. Matriz de probabilidad de cambio entre los años 2001 y 2016.....            | 123 |
| Cuadro 35. Valores ROC para las clases del Escenario 3 proyectado al año 2019.....     | 124 |
| Cuadro 36. Cobertura de suelo por año, en hectáreas, de la zona de.....                | 134 |
| amortiguamiento del SHBP.                                                              |     |
| Cuadro 37. Cobertura de suelos, en hectáreas, del SHBP para los diferentes.....        | 135 |

años analizados, en el SHBP.

Cuadro 38. Coberturas de suelo, en hectáreas, de los Escenarios creados para.....135  
el 2019 y 2037, en la Zona de Amortiguamiento del SHBP.

Cuadro 39. Coberturas de suelo, en hectáreas, de los Escenarios creados para.....136  
el 2019 y 2037, del SHBP.

Cuadro 40. Matriz de cambios, en hectáreas, entre las clases Bosques y Áreas Semi.....136  
Naturales y Territorios Agrícolas y Urbanizados, en la Zona de Amortiguamiento del SHBP.

Cuadro 41. Matriz de cambio, en hectáreas, entre la clase Bosque y Áreas.....137  
Semi Naturales a Territorios Agrícolas y Urbanizados, en el SHBP.

Cuadro 42. Matriz de cambios, en hectáreas, entre la clase Territorios.....137  
Agrícolas y Urbanizados y la clase Bosques y Áreas Semi Naturales, en  
la Zona de Amortiguamiento del SHBP.

Cuadro 43. Matriz de cambio, en hectáreas, de la clase Territorios Agrícolas.....138  
y Urbanizados a Bosques y Áreas Semi Naturales, en el SHBP.

Cuadro 44. Matriz de deforestación neta, en hectáreas, entre los diferentes.....138  
años analizados, en la Zona de Amortiguamiento del SHBP.

Cuadro 45. Matriz de deforestación neta, en hectáreas, entre los diferentes años.....139  
analizados, en el SHBP.

Cuadro 46. Tasa de deforestación neta media anual, por periodos, en la zona de.....140  
amortiguamiento del SHBP.

Cuadro 47. Tasa de deforestación neta media anual, por periodos, en el SHBP.....140

## LISTA DE ACRÓNIMOS Y SIGLAS

**SHBP:** Santuario Histórico Bosque de Pómac

**ANP:** Área Natural Protegida

**CORINE:** Coordination of Information on the Environment

**LCM:** Land Change Modeler

**MLP:** Multi Layer Perceptron

**FAO:** Food and Agriculture of the United Nations

**MINAM:** Ministerio del Ambiente

**SERNANP:** Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas

**SINANPE:** Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado

**UNEP-WCMC:** Centro de Monitoreo de la Conservación Mundial del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

**REDD:** Reducción de Emisiones derivadas de la Deforestación y la Degradación de los bosques

**MLP:** Multi Layer Perceptron

**GLM:** Generalized Linear Models

**MTUS:** Matriz de Transición de Uso de Suelo

**TM:** Thematic Mapper

**SIG:** Sistema de Información Geográfica

**ERTS:** Earth Resources Technology Satellite

**MSS:** Multispectral Scanning System

**ETM:** Enhanced Thematic Mapper

**OLI:** Operation Land Imager

**TIRS:** Thermal Infrared Sensor

**NASA:** National Aeronautics and Space Administration

**USGS:** United States Geological Survey

**EOS:** Earth Observation Solutions

**ND:** Nivel Digital

**TOA:** Top of Atmosphere

**NDVI:** Normalized Difference Vegetation Index

**ROI:** Region of Interest

**ROC:** Relative Operation Characteristic

**CPU:** Central Processing Unit

**DTDV:** Discret Times/Discret Values

**DTCV:** Discret Time/Continuous Values

**CDTV:** Continuous Time/Discret Values

**CTCV:** Continuous Time/Continuous Values

**DS:** Decreto Supremo

**UT M:** Universal Transversal de Mercator

**INGEMMET:** Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico

**CONIDA:** Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial

**DEM:** Digital Elevation Model

**USAID:** United States Agency for International Development

**MINSA:** Ministerio de Salud

**OPS:** Organización Panamericana de la Salud

**NDWI:** Normalized Difference Water Index

## RESUMEN

Los bosques secos, en la actualidad, son ecosistemas que se encuentran en peligro de desaparecer debido a diversos factores, uno de esos factores es el avance de la agricultura, que presiona sus fronteras cada vez más. Un claro ejemplo del peligro en que se encuentran dichos ecosistemas es el Santuario Histórico Bosque de Pómac (SHBP), que, a pesar de contar con una categoría de Área Natural Protegida (ANP) de carácter intangible, se encuentra siendo gravemente afectado. (aclarar objetivo)

La zona específica que se analizó es el SHBP y su Zona de Amortiguamiento, porque así se podrá visualizar mejor el problema. Esto debido a que, dicha área, cuenta con un tratamiento especial y aun así se encuentra ocupada en gran porcentaje por áreas agrícolas. Se utilizó la metodología CORINE Land Cover para clasificar el área y se procesaron imágenes satelitales de la constelación LANDSAT. La clasificación se realizó mediante clasificación supervisada (método de Máxima Probabilidad) y, posteriormente, se afinó los resultados mediante diferentes técnicas de teledetección aplicados a la misma imagen analizadas inicialmente.

A partir de los mapas del año 2001, 2010 y 2019 se crearon dos proyecciones al año 2037, utilizando el módulo Land Change Modeler (LCM) del software IDRISI Selva, para pronosticar la deforestación, tanto en la Zona de Amortiguamiento del Santuario Histórico Bosque de Pómac como dentro de dicha Área Natural Protegida. A su vez se creó una proyección para visualizar la situación actual en la que se encontraría el Santuario Histórico Bosque de Pómac, en caso de que no se hubiera detenido y solucionado el tema de la invasión que sucedió dentro del ANP.

La proyección al año 2019 nos mostró una realidad alterna a la actual, en la que se hubiera perdido un 33.7% del total de la clase Bosque y Áreas Semi Naturales con que se contaba en el año 2001, a comparación de la recuperación total con la que se cuenta hoy en día. Para el año 2037 se presenta apenas una pequeña pérdida de Bosque y

Áreas Semi Naturales dentro del ANP, caso contrario resulta para la Zona de Amortiguamiento del SHBP, donde la pérdida de Bosques y Áreas Semi Naturales ha avanzado sin detenerse en los últimos años, estimando que para el año 2037 se tendría una pérdida estimada del 66% de dicha clase, con respecto al año 2001, en el caso más radical, o un 57.7% en el caso más conservador.

***Palabras clave:*** Deforestación, Bosques Secos, Santuario Histórico Bosque de Pómac, Áreas Naturales Protegidas, Zona de Amortiguamiento

## ABSTRACT

Dry forests, at present, are ecosystems that are in danger due to various factors, one of these factors is the advance of agriculture, which pushes their borders more and more. A clear example of the danger in which these ecosystems are found is the Pómac Forest Historic Sanctuary (SHBP), which, despite having an intangible category of Protected Natural Area (ANP), is being seriously affected.

The specific area that was analyzed is the SHBP and its buffer zone, because that way the problem can be better visualized. This is due to the fact that said buffer zone has a special treatment and even so it is occupied in a large percentage by agricultural areas. The CORINE Land Cover methodology was used to classify the area and the satellite images of the LANDSAT constellation were processed. The classification was carried out by supervised classification (maximum probability method) and, later, the results were refined using different remote sensing techniques applied to the same image analyzed before.

From the maps of the year 2001, 2010 and 2019, two projections were created for the year 2037, using the Land Change Modeler (LCM) module of the IDRISI Selva software, to forecast deforestation, both in the buffer zone of the Historic Forest Sanctuary of Pomac and within said Protected Natural Area. In turn, a projection was created to visualize the current situation in which the Pomac Forest Historic Sanctuary would find itself, in case the issue of the invasion that took place within the ANP had not been stopped and resolved.

The projection to the year 2019 showed us an alternate reality to the current one, in which 33.7% of the total of the Forest and Semi-Natural Areas class had been lost in 2001, compared to the total recovery with which is counted today. For the year 2037

there is only a small loss of Forest and Semi-Natural Areas within the ANP, otherwise it is for the buffer zone of the SHBP, where the loss of Forests and Semi-Natural Areas has advanced without stopping in recent years, estimating that for the year 2037 there should be an estimated loss of 66% of this class, with respect to the year 2001, in the most radical case, or 57.7% in the most conservative case.

***Keywords:*** Deforestation, Dry Forests, Biodiversity, Pómac Forest Historic Sanctuary, Natural Protected Areas, Buffer Zone.

## CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

Según la Organización de las Naciones para la Agricultura y la Alimentación (FAO), en el periodo 1990-2020, se han perdido 178 millones de hectáreas de bosques a nivel mundial y se posee 4060 millones de ha. aun; la tasa de deforestación fue de 7.8 millones de ha. por año en el periodo entre los años 1990 a 2000, de 5,2 millones de ha. en el periodo 2000-2010 y de 4,7 millones de ha. en el periodo 2010-2020; si bien se muestra una disminución en la tasa de deforestación, continúan siendo cifras alarmantes (FAO, 2020). Así, de FAO (2020), se conoce también que solo el 10% de los bosques a nivel mundial se encuentran protegidos para la conservación de la biodiversidad.

En el Perú, de acuerdo con el Ministerio del Ambiente (MINAM), el avance de la deforestación fue de 1 518 714 ha. entre los años 2001 y 2014, con una tasa de 118 081 ha./año, en las cuales se tuvo un pico de 177 571 ha./año en el año 2014 y un mínimo de 83 995 ha./año entre el año 2000 y 2001 (MINAM, 2016b). De la cantidad total de deforestación sucedida en el Perú, entre los años 2001 y 2014, se tiene que 49 814 ha sucedieron dentro de Áreas Naturales Protegidas (MINAM, 2016b).

De los bosques deforestados, un tipo que cuenta con pérdidas más considerables, en cuanto a porcentajes, son los bosques secos. Dichos bosques han sido deforestados un 48.5% de su totalidad a nivel mundial y ,en nuestro país, en un 95% a nivel de su potencial (Portillo-Quintero & Sánchez-Azofeifa, 2010); la falta de estudios de este tipo de bosques se debe a que no cuenta con la densidad que cuentan los bosques tropicales (Janzen, 1988). Debido a esto se disimula la constante disminución de dichos bosques, se torna fácil la eliminación de las especies que lo componen y a la vez se hace más dificultoso el análisis de la pérdida de los ejemplares.

Para el año 2015 se conservan 3 674 364 ha. de bosques secos costeros, cantidad que representa un 5.1% del total de los bosques nacionales, de todo tipo (MINAM, 2016a). El bosque seco se redujo en un 17% del total con que se contaba en el año 1949 hasta el año 1999, perdiéndose 1.7% entre los años 1949 y 1962 y de 15.3%, se tuvo entre 1962 y 1999 (MINAM, 2016a).

En el Perú, los boques secos se encuentran, principalmente, en las regiones de Tumbes, Piura, Lambayeque (MINAM, 2016a). La pérdida de dichos bosques afecta de a las comunidades de las regiones antes mencionadas de forma negativa, ya que dichas comunidades tienen una economía dependiente en gran parte de los recursos forestales de bosques secos, lo que significa que la deforestación de estos bosques secos conlleva a pérdidas ecológicas y socioeconómicas de dichas comunidades (Cuentas Romero, 2015).

Dado que una parte de la deforestación bosques secos ocurrida en el país, sucedió dentro de las ANP, una medida para intentar conservar la cantidad de bosques secos en el Perú fue la creación del Santuario Histórico Bosque de Pómac (SHBP), el cual contiene el bosque seco más grande del país; pero, aun así, el bosque dentro del ANP continúa siendo amenazado por diferentes factores. Un hecho, manifestado por el Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas (SERNANP), que demuestra el peligro en esta área es que, en el año 2001, un grupo de invasores se introdujeron a la mencionada ANP y talaron alrededor del 29% de la vegetación que ahí se encontraba, con ánimos de establecerse, a pesar que los Santuarios Históricos son ANP de carácter intangible; dichas personas fueron expulsadas en el año 2009 (SERNANP, 2017). El Santuario Histórico Bosque de Pómac contaba con un grado de perturbación de 56.3% para el año 2017 y es el ANP más afectado del SINANPE, esto se relaciona a diversos factores como la tala ilegal, la quema de bosques para agricultura, los cuales suelen salirse de control y quemar más de lo esperado por quienes lo originan (Rosales Benites de Franco & Valer Villegas, 2018).

En este contexto, los modelos estocásticos se han presentado como una opción para la predicción de escenarios de deforestación. Esta técnica ha demostrado efectividad para escenarios similares, teniendo como ejemplo estudios a nivel mundial en temas idénticos o similares al analizado en la presente investigación; así mismo se tiene el estudio de Kamusoko et al. (2011), donde se predijo el cambio de la cobertura forestal en la provincia de Luangprabang - Laos; también se tiene el análisis a futuro del cambio de uso de suelo, en la provincia de Santiago de Morona - Ecuador, que fue realizado por Cabrera (2012); o la predicción de escenarios en la cuenca del río Vilcabamba - Perú, realizado por Ibáñez & Damman (2013)

## **1.1 Formulación del Problema**

### **1.1.1 Problema General**

i) ¿Cuál es la dinámica de la deforestación en el Santuario Histórico Bosque de Pómac y su Zona de Amortiguamiento, según el método de modelos estocásticos y teledetección?

### **1.1.2 Problemas Específicos**

i) ¿Cuál es la influencia de la dinámica de los Territorios Agrícolas y Urbanizados sobre la cobertura de Bosques Secos según la metodología de modelos estocásticos y técnicas de teledetección?

ii) ¿Cómo influye la gestión del SHBP sobre la cobertura de Bosques Secos, según la metodología de modelos estocásticos y técnica de teledetección?

iii) ¿Cuál es la diferencia entre el comportamiento del avance de los Territorios Agrícolas y Urbanizados en la zona de amortiguamiento del Santuario Histórico Bosque de Pómac y dentro de los límites de dicha ANP?

## **1.2 Justificación de la Investigación**

La constante deforestación que vienen presentando los bosques secos en la costa del Perú ha hecho necesaria una pronta intervención para controlar los daños que presentan. Los ataques que presentan los bosques secos, debido a los diversos factores mencionados,, han hecho que sea necesario el análisis de estos ecosistemas, con el objetivo de evitar la creciente deforestación.

El Plan Maestro del Santuario Histórico Bosque de Pómac del año 2017 a 2021, presenta una visión al año 2037 de conservación del buen estado del ecosistema Bosque Seco Ecuatorial. Esta visión necesita de una metodología que le permita conocer si los planes que se vienen realizando son los necesarios para alcanzar las metas propuestas de conservación de estos bosques, a la vez que le permita conocer los lugares en donde se presenten problemas que los amenacen y, posiblemente, empeoren su situación de peligro a futuro, para que así se les pueda dar atención inmediata. Una metodología, que cumple con las necesidades antes mencionadas, son

las proyecciones a futuro, las cuales, al requerir el análisis del cambio de la cobertura de suelo, permite conocer el pasado, presente y futuro, lo cual brinda información muy importante para el manejo del ANP.

Existen diversos procedimientos para generar escenarios futuros, sin embargo, algunos de ellos requieren de un manejo informático más extenso. El Centro de Monitoreo de la Conservación Mundial del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP-WCMC) presenta diversas alternativas recomendables para la creación de escenarios futuros sobre el tema de la deforestación, en el contexto de la planificación del programa REDD+; entre las recomendaciones se encuentra el software IDRISI Selva, más precisamente, el módulo Land Change Modeler (LCM) (Epple et al., 2012), el cual permite obtener los resultados sin necesidad de procesos altamente complejos, esto proporciona una mayor celeridad y, por lo tanto, una mayor capacidad de respuesta.

En resumidas cuentas, la presente investigación brinda una metodología sin grandes requerimientos informáticos para lograr predecir los avances de la deforestación de bosques secos, mostrando así los lugares que evidencian mayor necesidad de atención y así se puedan tomar medidas previsorias. Ante este control de la deforestación de bosques secos se evitarían pérdidas que perjudiquen a las poblaciones cuya economía depende del aprovechamiento sustentable de las poblaciones de algarrobo (especie de árbol que, en su mayoría, compone el bosque seco del SHBP).

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

- Estimar la dinámica de la deforestación en el Santuario Histórico Bosque de Pómac y su Zona de Amortiguamiento mediante modelos estocásticos y técnicas de teledetección.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Determinar la influencia de la dinámica de los Territorios Agrícolas y Urbanizados sobre la cobertura de Bosques Secos mediante modelos estocásticos y técnicas de teledetección.
- Evaluar la influencia de la gestión del SHBP sobre la cobertura de Bosques Secos mediante modelos estocásticos y técnicas de teledetección.
- Establecer la diferencia entre el comportamiento del avance de los Territorios Agrícolas y Urbanizados en la zona de amortiguamiento del Santuario Histórico Bosque de Pómac y la parte interior de dicha ANP.

## CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes del Problema

#### 2.1.1 *A Nivel Mundial.*

Según Portillo-Quintero y Sánchez-Azofeifa (2010) se detectó el estado de conservación de los bosques secos, en la distribución potencial de bosque secos neotropicales para las Américas, mediante la clasificación supervisada de imágenes MODIS, debido a su resolución de 500 m, que garantiza una gran cobertura, y apoyándose con el uso del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Se obtuvo un mapa que muestra la extensión actual y la distribución de bosques secos en las Américas con un acuerdo espacial, medido a partir del coeficiente de Tau, de un 76% entre el mapa obtenido y la información de validación usada para todas las clases de cobertura de suelo (bosque/no bosque). A partir de los mapas realizados se llegó a la conclusión de que en América del Norte se tenían 519 597 km<sup>2</sup> de bosque seco tropical, en América del Centro 203 884 km<sup>2</sup> y en América del Sur 268 885 km<sup>2</sup> (Portillo-Quintero & Sánchez-Azofeifa, 2010).

En Kamusoko et al. (2011) se predijo el cambio de la cubierta forestal en la provincia de Luangprabang, Laos, utilizando cadenas de Markov y Células Automatas. Kamusoko et al. (2011) necesitaron de información de la cubierta forestal del año 1993, 2000, 2007 y factores de cambio como distancia a carreteras principales, distancia a ríos, distancia al centro de la ciudad y distancia a zonas deforestadas debido a que estos factores determinaron ser independientes entre sí, siendo este un requisito

fundamental. Kamusoko et al. (2011) crearon escenarios optimistas y pesimistas, acerca del cambio en la cobertura de suelo de la zona, obteniendo así que las áreas no forestadas aumentan en ambos escenarios, en menor medida para el caso optimista. La validación se realizó creando un escenario para el año 2007, a partir de la información de cobertura forestal del año 1993 y 2000, para así comparar dicho escenario con la realidad mediante índice kappa, obteniendo que el modelo utilizado realiza una simulación relativamente buena, siendo mejor esta simulación para las categorías que ocupan mayor espacio en la escena analizada (Kamusoko et al., 2011).

De Rodríguez Eraso (2011), donde se analizó el cambio de la cobertura de suelos en dos regiones de Colombia: Andes y Guyana. Rodríguez Eraso (2011) predijo escenarios futuros, para esto usó factores de cambio demográficos, fisiográficos, uso de suelo, socioeconómicos. Se utilizaron dos metodologías de modelamiento: Perceptrón Multi-Capa (MLP), del módulo Land Change Modeler, y Modelos Lineales Generalizados (GLM), determinándose luego que el modelo MLP tuvo mejores resultados que el GLM. Con esto, Rodríguez Eraso (2011), logró determinar que hay diferencias entre los patrones de cambio de las diferentes regiones, un ejemplo es la deforestación, donde la tasa de deforestación anual es más alta en las tierras altas (Andes) que en las bajas (Guyana). Como resultado del modelamiento se logra obtener que, para los dos escenarios proyectados (2020 y 2050), se observa una marcada deforestación de bosques y un fuerte incremento en la vegetación secundaria, lo que se relaciona con la agricultura y la alimentación del ganado vacuno de la zona, esto se nota de manera más clara en las tierras altas (Andes) (Rodríguez Eraso, 2011).

En Cabrera Barona (2012) se analizó el cambio de uso de suelo en la provincia de Morona-Santiago, ubicada en Ecuador, para el año 2026, mediante el uso de cadenas de Markov y Células Automatas, con el objetivo de crear escenarios tendenciales y escenarios alternativos que, posteriormente, podrían ser usados para el establecimiento de planes de ordenamiento territorial. Se logró determinar que el bosque decreció en la zona de interés (Morona-Santiago), de 535 300 ha. en 1990 a 509 000 ha. en 2008. A partir de las cadenas de Markov y las Células Automatas se estimó que, para el 2028, se tendría 501 600 ha de bosque, mientras que las áreas deforestadas pasaban a ser

usadas para áreas agropecuarias, lo que se representa en las cifras, ya que, en el año 1990, se tenía 10 520 ha de áreas agropecuarias, luego 35 020 ha en el 2008 y , luego se estimaron 44 220 ha al año 2026 (Cabrera Barona, 2012).

De Vaca Genuit (2012) se logró visualizar la realidad de los bosques secos en los estados de Chiapas, Tabasco, Campeche, Quintana Roo, Yucatán y parte de Oaxaca y Veracruz, pertenecientes a México, en el periodo entre los años 1990 hasta el año 2006. En dicho documento se determina que la deforestación disminuyó su tasa anual, para 342 municipalidades estudiadas, de 0.85% a 0.67%, en los periodos de 1990 a 2000 y de 2000 a 2006, respectivamente; sin embargo, se observó también que la tasa de deforestación, en otras áreas, era de magnitudes mayores. Otro aspecto importante que Vaca Genuit (2012) determinó es la relación entre la deforestación y los factores físicos, como la pendiente, donde se analizó cómo las pendientes suaves presentaban mayores posibilidades de ser deforestada y las pendientes mayores podrían permanecer en su estadio natural por más tiempo. Así, lograron asociar la deforestación a eventos climáticos, como la temperatura, precipitación e insolación; debido a la relación de estos elementos con la altitud, por lo que dicho factor también se asoció a la deforestación (Vaca Genuit, 2012).

En Mishra et al. (2014) se realizó, mediante el software IDRISI, específicamente el módulo Land Change Modeler (LCM), el análisis de cambio en la cobertura de suelo en la ciudad Muzaffarpur, en Bihar (India), y sus alrededores, entre los años 1988 y 2010, para realizar la proyección de la cobertura a los años 2025 y 2035. Las clases en el mapa son Suelo de agricultura, Exfoliantes de vegetación, Tierra de barbecho, Residuos de tierra, Área con construcción, Cuerpos de agua y Lecho de río (Mishra et al., 2014). Se observó que, para los años 2025 y 2035, hubo un crecimiento de las clases Área con construcción y Suelos de agricultura mientras que el resto de las clases presenta una fluctuación en sus tendencias (Mishra et al., 2014).

### **2.1.2 A Nivel Nacional.**

Ibáñez y Damman (2013) generaron escenarios predictivos para la cuenca del río Vilcabamba, ubicado en Apurímac, utilizando Cadenas de Markov y Células Automatas y teniendo como insumo los mapas de la cuenca mencionada en los años 1986, 1994, 2002 y 2009. A partir de dichos mapas, Ibáñez y Damman (2013) determinaron que, en la cuenca alta, las áreas de nevado, tienden a convertirse a áreas de suelos desnudos, mientras que, en las zonas agrícolas, se dieron paso a praderas y bosques; en la cuenca baja se obtuvo que las zonas agrícolas pasaban a ser praderas y las praderas posteriormente eran sucedidas por bosques y matorrales. Basándose en fechas, Ibáñez y Damman (2013), lograron identificar que, entre 1986 y 2002, había una reducción de praderas y bosques, mientras que, de 2002 a 2009, sucedía todo lo contrario. Basándose en la Matriz de Transición de Uso de Suelo (MTUS), se logró determinar 3 escenarios prospectivos para la cuenca objetivo, siendo más probables a suceder, según la población, los escenarios en el cual haya un desequilibrio entre las mineras y la población (Ibáñez & Damman, 2013).

En Rojas Baez (2017) se crearon 3 simulaciones para el año 2030 de la Amazonía peruana. Esto se logró basándose en la clasificación de las imágenes satelitales que cubrían el área de estudio, entre los años 2000 y 2015, con el objetivo de determinar la deforestación estimada de bosques húmedos, para el año 2030; dichas proyecciones se realizaron utilizando el software IDRISI Selva, específicamente, utilizando el módulo Land Change Modeler (LCM). Rojas Baez (2017) utilizó, como factores que inducen o retienen al cambio, la distancia a no bosque, la distancia a centros poblados, la distancia a carreteras, la distancia a ríos, el modelo de elevación digital, la pendiente de la Amazonía, la capacidad de uso mayor, las ANP, el mapa de cobertura vegetal, el mapa ecológico, el mapa de comunidades nativas y el mapa de suelos.

Del procedimiento explicado en el párrafo anterior, lograron determinar que la tendencia es la pérdida de bosque húmedo de colina baja lomada; sin embargo, en

líneas generales, se determinó una disminución de 0.23% de la tasa de deforestación anual entre los años 2000 y 2015, para el primer escenario, ya que se tuvo 16 334.6 km<sup>2</sup> de deforestación, comparada con los 18 096.1 km<sup>2</sup>, que se tuvo entre 2000 y 2015; un aumento de 0.01% de la tasa de deforestación anual entre los años 2000 y 2015 para el segundo escenario, ya que se tuvo 18 180.9 km<sup>2</sup> de deforestación, comparada con los 18 096.1 km<sup>2</sup> que se tuvo entre 2000 y 2015 y un aumento de 0.34% de la tasa de deforestación anual, entre los años 2000 y 2015, en el tercer escenario, ya que se tuvo 20 819.6 km<sup>2</sup> de deforestación, comparada con los 18 096.1 km<sup>2</sup> que se tuvo entre 2000 y 2015 (Rojas Baez, 2017).

Rodríguez Calampa (2018) determinó, por medio de la clasificación supervisada de imágenes Landsat-5 y Sentinel-2, específicamente usando el algoritmo de Máxima Probabilidad, el avance de la deforestación analizando el cambio de cobertura y uso de suelo, en la zona ubicada en el distrito El Sauce, ubicado en la región San Martín, utilizando técnicas SIG y teledetección. Analizó esta área compuesta por 3 formaciones vegetales: bosque seco-Tropical (bs-T), bosque húmedo Pre montano Tropical (transicional a bh-T) (bh-PT/bh-T) y bosque muy húmedo Pre montano Tropical (bmh-PT). Rodríguez Calampa determinó que, en la zona de estudio, hubo una tasa de deforestación de 25.66%, utilizando la ecuación utilizada por la FAO (1996). Los mapas obtenidos en esta tesis arrojaron una confiabilidad temática, representada con índice kappa, de 0.9 lo cual refleja una concordancia casi perfecta. (Rodríguez Calampa, 2018)

Se realizó la proyección al año 2029, mediante el análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, desde el año 1999 al 2018, de la ciudad de Iquitos y alrededores, que fueron obtenidos de la plataforma Google Earth Engine (Palacios Vega et al., 2019). Mediante este procedimiento se logró determinar el avance de la clase “Construido”, de 318 ha., sumado a las 1 673.46 ha., que ya había aumentado desde el año 1999 al 2018; mientras que se tuvo una disminución de 375 ha. en la clase “Vegetación No Intervenida”, esto sumado a las 1 797.57 ha., que ya se habían perdido desde el año 1999 al 2018 (Palacios Vega et al., 2019). Palacios Vega et al. (2019) también determinaron que las imágenes ya procesadas de la plataforma Google Earth

Engine son insumos que permite determinar la proyección a futuro con índices de validación aceptables.

### **2.1.3 A Nivel Local.**

De acuerdo con Diaz Salinas (2013) se determinó la deforestación en el Santuario Histórico Bosque de Pómac a partir del uso de técnicas de teledetección. Mediante clasificación supervisada de imágenes TM/Landsat, Diaz Salinas (2013) identificó 3 clases: Bosque, No Bosque e Hidrografía (ríos) y, una vez obtenidas las clases para los años 2000, 2003 y 2008, se obtuvo las áreas de cada una de ellas para los diferentes años, donde la clase Bosque disminuía de 4 339.14 ha. en el 2000 a 3 417.36 ha. en el año 2006, para luego finalizar en 3380.5 ha. Se determinó que el área de la clase No bosque pasó de 1493.03 ha. en el 2000 a 2 412.66 ha. en el 2006 y, finalmente, 2 450.13 ha. en 2008; la extensión de la clase de Hidrografía (ríos) no varió de 57.84 ha. para todos los años (Diaz Salinas, 2013). La investigación fue validada con puntos de control en campo, donde se determinó que había una exactitud de un 85%, habiendo confusión entre la clase Bosque y No bosque, específicamente en las partes donde había Bosque ralo, debido a que había mucho suelo desnudo y poca vegetación, lo que causaba errores al momento de determinar la clase para las clases Bosque Ralo (Diaz Salinas, 2013).

Se logró determinar la deforestación que viene sucediendo en el Santuario Histórico Bosque de Pómac, el Área de Conservación Regional Huacrupe-La Calera y el Área de Conservación Privada Chaparri, ubicados en Lambayeque, de forma cualitativa y cuantitativa (Cuentas Romero, 2015). Es decir, Cuentas Romero (2015) explica el fenómeno de la deforestación, no solo desde el aspecto numérico -expresado en hectáreas- sino también las causas que la vienen provocando, por lo que se presenta a su vez alternativas para poder disminuir o detener la deforestación. Cuentas Romero (2015) realizó el aspecto cuantitativo a partir de técnicas de teledetección, a la par del

uso de sistemas de información geográfica, y el aspecto socioeconómico se determinó a partir de encuestas, de información captada por medios de comunicación e información del último censo realizado. Cuentas Romero (2015) también detectó los bosques mediante el uso del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) aplicados a imágenes Landsat 5 y Landsat 8 desde el año 1985 al año 2015.

Se propuso una metodología, por medio de herramientas SIG, para lograr el correcto uso de los bosques secos, teniendo como área de estudio el caserío El Choloque, ubicado en Motupe, Lambayeque (O'Brien Mazzini, 2015). También se determinó, en O'Brien Mazzini (2015) que los potenciales del bosque seco en este caserío son la obtención de miel, debido a la presencia de panales de abejas; así como también la adquisición de leña, mediante la tala de ramas de los árboles, por lo cual, para optimizar el aprovechamiento de este bosque seco, se procedió a ubicar los lugares en que esas actividades puedan realizarse. Mediante dicho SIG, O'Brien Mazzini (2015) logró crear escenarios, lo cual demostró que esta herramienta es óptima para tomar decisiones con respecto al manejo forestal en bosques secos.

En Tafur Rojas (2017) se estudió el cambio de cobertura del suelo, dentro del Santuario Histórico Bosque de Pómac, en el periodo de abril del año 2008 a abril del año 2015. Para realizar el propósito del documento se recurrió al uso del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, el cual determinó la ubicación de las especies vegetales en la imagen satelital y la discriminación de otros elementos sobre la superficie terrestre del área de interés, para así determinar una clasificación de cobertura de suelos. Ya realizado el mapa de cobertura de suelos se determinó un aumento en el Bosque Seco Semi Denso, de 1 432.44 ha. a 2 519.82 ha., y un aumento del Bosque Seco Ralo, de 1 805.49 ha. a 2 127.78 ha.; mientras que se tuvo una pérdida en el Bosque Seco Denso de 1 497.24 ha. a 1 127.61 ha. y una pérdida de 1 135.44 ha. a 91.89 ha. de Bosque de Cobertura Mínima (Tafur Rojas, 2017). Tafur Rojas (2017) también realizó una jerarquía de las especies vegetativas que componen el Santuario Histórico Bosque de Pómac mediante su Índice de Valor de Importancia.

## 2.2 Bases Teóricas

### 2.2.1 *La dinámica de los territorios Agrícolas y Urbanizados.*

Al hablar sobre la dinámica de los Territorios Agrícolas y Urbanizados nos referimos al cambio que sucede en dichos tipos de cobertura de suelo en distintos periodos de tiempo; ante esto tendremos que definir primeramente lo que es la Cobertura de Suelo y como se puede realizar su clasificación.

**2.2.1.1 Cobertura de Suelo y Clasificación.** El termino cobertura de suelo se usa para describir el material físico que se encuentra sobre la superficie terrestre (OpenStreetMap Wiki, 2016). Para clasificar la cobertura del suelo puede darse mediante dos sistemas: A Priori y A Posteriori (OpenStreetMap Wiki, 2016).

Se obtuvo de OpenStreetMap Wiki (2016), que el sistema de clasificación A Priori se refiere a aquella forma de clasificar el terreno de manera previa a la toma de datos en campo, ajustando los datos obtenidos a la clasificación dada previamente. Para realizar utilizar este sistema se debe acordar todas las combinaciones posibles de criterios, al iniciar dicha clasificación (OpenStreetMap Wiki, 2016).

Por otro lado, OpenStreetMap Wiki (2016) afirma que el sistema de clasificación A Posteriori se da de manera de manera posterior a la toma de datos en campo, necesitando un orden por similitud de muestras de campo. No se requiere de nociones preestablecidas para realizar este procedimiento, lo que le da un carácter más flexible; sin embargo, debido a la necesidad de realizar primero un trabajo de campo en el área de interés, dificulta una replicación de la metodología en otras zonas, lo cual limita su aplicación a lugares o regiones ecológicas similares (OpenStreetMap Wiki, 2016).

La presente investigación utilizó el sistema A Priori; pero, aun así, es necesario reconocer cada tipo de cobertura de suelo para lograr diferenciar a los Territorios Agrícolas y Urbanizados del resto. Para cuenta con diferentes metodologías para realizar la clasificación, de las cuales se usó *CORINE Land Cover*, debido a que este método de clasificación se encuentra utilizado ya por la Comunidad Andina (MINAM, 2014), además también se encuentra adaptada por Colombia (Martínez & Murcia, 2010).

**2.2.1.2 Metodología CORINE Land Cover.** Según CEC (1994, citado en Bossard et al., 2000), el nombre CORINE proviene de Coordination of Information on the Environment, que en español significa Coordinación de Información sobre el Medio Ambiente. CEC (1994, citado en Bossard et al., 2000), menciona que esta metodología se determinó con el objetivo de que el conocimiento existente presente una visión general y para que los datos acerca del cambio en determinadas características de la biosfera sea lo más completa y actualizada posible, lo que permitiría realizar una gestión adecuada a los responsables de la toma de decisiones. CORINE Land Cover pertenece al programa CORINE, el cual fue pensado para proveer de detalle de la cobertura terrestre, que posea consistencia en cuanto a la localización geográfica, en diferentes estados miembros de la Comunidad Europea (CEC, 1994, citado en Bossard et al., 2000).

La metodología CORINE Land Cover se realizó en una escala de 1:100 000 e, inicialmente, sus diferentes clases se encontraba separadas en 3 niveles (Bossard et al., 2000), siendo aumentada la precisión hasta al sexto nivel en la adaptación realizada para Colombia (Martínez & Murcia, 2010).

i) **Territorios Artificializados.** Esta clase abarca las áreas de las ciudades y las poblaciones, junto a las zonas aledañas que van siendo asimiladas gradualmente por procesos de urbanización y cambios de uso de suelo a fines industriales, comerciales, de servicios y recreativos. Cuenta con 4 clases de segundo nivel (Martínez & Murcia, 2010).

- *Zonas Urbanizadas.* Estas zonas incluyen los terrenos ocupados por infraestructura urbana, a su vez también incluye las áreas verdes y redes de comunicación asociado a dichas infraestructuras. Esta clase se encuentra compuesta por 2 de tercer nivel y ninguna de cuarto nivel (Martínez & Murcia, 2010).
- *Tejido Urbano Continuo.* De acuerdo con Martínez y Murcia (2010), los espacios que conforman esta clase están ocupados, en un 80% o más, por infraestructuras urbanas.
- *Tejido Urbano Discontinuo.* En esta clase las edificaciones se encuentran dispersas y las infraestructuras cubren menos del 80% de toda la superficie , mientras que el espacio restante presenta otras clases en tamaños menores que el área mínima cartografiable (Martínez & Murcia, 2010).
- *Zonas Industriales o Comerciales y Redes de Comunicación.* Estas zonas incluyen solo terrenos ocupados por infraestructura de uso comercial, industrial, de servicios y comunicaciones; así, se incluyen en esta clase las instalaciones y redes de comunicación que permiten el desarrollo de los procesos que se realizan en cada actividad (Martínez & Murcia, 2010). Cuenta con 5 clases de tercer nivel que son:
  - ✓ *Zonas Industriales o Comerciales.*
  - ✓ *Red Vial, ferroviaria y terrenos asociados.*
  - ✓ *Zonas Portuarias.*
  - ✓ *Obras Hidráulicas* (Martínez & Murcia, 2010).
- *Zonas de Extracción Mineras y Escombreras.* Estas zonas incluyen terrenos donde se extraen o acumulan materiales referentes a actividades mineras,

construcción, producción industrial y vertimientos de residuos de otros orígenes. Presenta 2 clases de tercer nivel, que son (Martínez & Murcia, 2010):

- ✓ *Zonas de Extracción Minera.*
- ✓ *Zonas de Disposición de Residuos* (Martínez & Murcia, 2010).

- *Zonas Verdes Artificializadas, No Agrícola.* Estas zonas incluyen las zonas verdes que se encuentran dentro de las áreas urbanas en las que se realizan actividades comerciales, recreacionales, de conservación, entre otras; donde los usos de suelo no requieren de una estructura física apreciable. Posee 2 clases de tercer nivel, que son (Martínez & Murcia, 2010):

- ✓ *Zonas Verdes Urbanas.*
- ✓ *Instalaciones Recreativas* (Martínez & Murcia, 2010).

**ii) Territorios Agrícolas.** Esta clase agrupa los terrones dedicados a la producción de alimentos, fibras y otras materias primas usadas en industrias, ya sea que se encuentren ocupados por cultivos, con pastos, en rotación o barbecho. Presenta 3 clases de segundo nivel (Martínez & Murcia, 2010):

- *Cultivos Transitorios.* Esta clase comprende a las áreas ocupadas por cultivos que tienen un ciclo vegetativo menor a un año. Su característica principal es que, luego de la cosecha, se requiere que se vuelva a sembrar para que la producción continúe. Posee 5 clases de tercer nivel (Martínez & Murcia, 2010):

- ✓ *Otros Cultivos Transitorios.*
- ✓ *Cereales.*
- ✓ *Oleaginosas y Leguminosas.*

✓ *Hortalizas.*

✓ *Tubérculos* (Martínez & Murcia, 2010).

- *Cultivos Permanentes.* De acuerdo con Martínez & Murcia (2010) esta clase agrupa los terrenos cubiertos con cultivos, poseen un ciclo vegetativo mayor a un año y produce varias cosechas sin necesidad de replantar. Está compuesta por 5 clases de tercer nivel:

✓ *Cultivos Permanentes Herbáceos.*

✓ *Cultivos Permanentes Arbustivos.*

✓ *Cultivos Permanentes Arbóreos.*

✓ *Cultivos Agroforestales.*

✓ *Cultivos Confinados* (Martínez y Murcia, 2010).

- *Pastos.* Según Martínez y Murcia (2010) esta clase agrupa los territorios ocupados por vegetación herbácea densa de composición florística; estas áreas son dedicadas al pastoreo por un tiempo de dos a más años. La componen las siguientes clases de tercer nivel:

✓ *Pastos Limpios*

✓ *Pastos Arbolados*

✓ *Pastos enmalezados* (Martínez y Murcia ,2010)

- *Áreas Agrícolas Heterogéneas.* Esta clase contiene a los territorios que poseen cobertura agrícolas y naturales, determinadas en un patrón complicado que dificulta

en demasía la separación en coberturas individuales (Martínez & Murcia, 2010). La componen 4 clases de tercer nivel, las cuales son:

- ✓ *Mosaico de Cultivos*
- ✓ *Mosaico de Pastos y Cultivos*
- ✓ *Mosaico de Cultivos, Pastos y Especies Naturales*
- ✓ *Mosaico de Cultivos con Especies Naturales* (Martínez y Murcia, 2010)

**iii) Bosques y Áreas Semi Naturales.** De (Martínez & Murcia, 2010) se conoce que esta clase agrupa a diferentes coberturas vegetales de tipo boscoso, arbustivo y herbáceo. Martínez & Murcia (2010) dicen que esta clase también agrupan otras coberturas que resultan de un fuerte manejo antrópico, como son: las plantaciones forestales y la vegetación secundaria o en transición. Presenta 3 clases de segundo nivel:

- *Bosques.* En Martínez & Murcia (2010) se dice que clase está constituida por áreas naturales o semi naturales, en su mayoría por especies arbóreas nativas o exóticas. También mencionan que, al referirse a especies arbóreas, se habla de plantas leñosas permanentes con un solo tronco principal con una copa más o menos definida (Martínez & Murcia, 2010). Presenta 3 clases de tercer nivel:

- ✓ *Bosque Denso.* Martínez & Murcia (2010) menciona que, para que un territorio pertenezca a esta clase entonces los árboles, deben presentar un estrato de copas (también llamado dosel) que cubra la superficie, por lo menos, en un 70%. En Martínez & Murcia (2010) dicen también que a esta clase la componen el Bosque Denso Alto y el Bosque Denso Bajo.

✓ *Bosque Abierto*. De acuerdo con Martínez & Murcia (2010), para que una clase sea considerada como bosque abierto debe contar con un dosel que cubra menos del 70% de la superficie en la que se encuentra. Esta clase está compuesta por las clases Bosque Abierto Alto y Bosque Abierto Bajo.

- *Áreas con Vegetación Herbácea y/o Arbustiva*. En Martínez & Murcia (2010) se menciona que en esta clase se consideran las superficies cubiertas por vegetación natural y producto de la sucesión natural, de crecimiento arbustivo o herbáceo, que se desarrollan en diferentes sustratos y pisos altitudinales, con poca o sin intervención del hombre. La componen 3 clases de tercer nivel, que son:

✓ *Herbazal*.

✓ *Arbustal*.

✓ *Vegetación Secundaria o en Transición* (Martínez & Murcia 2010)

- *Áreas Abiertas, sin o con poca vegetación*. Comprende superficies cubiertas por poca o nula vegetación, está conformada en su mayoría por suelos desnudos y quemados, por coberturas arenosas y rocosas, las cuales, a veces, presentan cobertura de hielo y nieve (Martínez & Murcia, 2010). Esta clase presenta 5 de tercer nivel:

✓ *Zonas Arenosas Naturales*.

✓ *Afloramientos Rocosos*.

✓ *Tierras Desnudas y Degradadas*.

✓ *Zonas Quemadas* (Martínez y Murcia, 2010).

✓ *Zonas Glaciares y Nivales* (Martínez & Murcia (2010).

*iv) Áreas Húmedas.* De acuerdo con Martínez & Murcia (2010), esta clase hace referencia a las áreas inundables, pantanos y terrenos anegadizos, en donde el agua subterránea emerge al nivel del suelo de forma permanente o temporal.

- *Áreas Húmedas Continentales.* Martínez & Murcia (2010) mencionan que esta clase hace referencia a las áreas inundables, pantanos y terrenos anegadizos y suelen estar cubiertos por vegetación acuática. Posee las siguientes clases de tercer nivel:

✓ *Zonas Pantanosas*

✓ *Turberas*

✓ *Vegetación Acuática Sobre Cuerpos de Agua*(Martínez & Murcia, 2010)

- *Áreas Húmedas Costeras.* Esta clase engloba, según (Martínez & Murcia, 2010), a los pantanos litorales y a áreas inundables que dependen de la marea. Esta clase posee tres clases de tercer nivel y ninguna de cuarto nivel.

✓ *Pantanos Costeros*

✓ *Salitral*

✓ *Sedimentos Expuestos en Bajamar* (Martínez & Murcia, 2010).

*v) Superficies de Agua.* De acuerdo con (Martínez & Murcia, 2010) esta clase agrupa a los cuerpos de agua permanentes, estacionales o intermitentes que se ubican dentro del continente o adyacente a la costa continental, se incluyen también los fondos asociados a los mares con profundidad inferior a los 12m.

- *Aguas Continentales*. También en (Martínez & Murcia, 2010) se dice que esta clase agrupa a los cuerpos de agua permanentes, estacionales o intermitentes que se ubican dentro del continente. Esta clase posee las siguientes clases de tercer nivel:

- ✓ *Ríos.*
- ✓ *Lagunas, Lagos y Ciénagas Naturales.*
- ✓ *Canales.*
- ✓ *Cuerpos de Agua Artificiales* (Martínez y Murcia, 2010).

Una vez que se conoce los conceptos para poder discriminar cualquier tipo de cobertura de suelo que pueda encontrarse en el área de estudio es necesario contar con herramientas que permitan identificar el territorio de manera rápida y precisa. Ante esta necesidad se cuenta con las técnicas de teledetección.

**2.2.1.3 Teledetección aplicada al reconocimiento de cobertura de suelos.** Para entender el cómo ayuda la teledetección al reconocimiento de cobertura de suelos es necesario conocer su definición y cuál es la forma de identificar la superficie terrestre. Puede contar con muchas definiciones, sin embargo, una de las que más acogida presenta es la siguiente (Sobrino et al., 2000, p. 19):

“El vocablo teledetección deriva del francés ‘teledetección’, traducida en 1967 al termino anglosajón ‘remote sensing’ o percepción remota. Definir el concepto de teledetección no es sencillo ya que no existe una definición única, universalmente aceptada. En su más amplio sentido se entiende por teledetección o percepción remota ‘la adquisición de información sobre un objeto a distancia, esto es, sin que exista contacto material entre el objeto o sistema observado y el observador’. Esta definición incluye el caso más simple de teledetección que sería cuando nos acercamos a la ventana o cuando leemos un libro- el ojo humano puede considerarse

un sensor que obtiene información del entorno- pero también abarca otras técnicas de exploración” (p. 19).

**2.2.1.4 Espectro Electromagnético.** Todo lo que observamos es producto de la interacción de la energía con el medio que la rodea; por esto para clasificar el medio se requiere conocer el Espectro Electromagnético. De acuerdo con Sobrino et al. (2000) el espectro electromagnético es la agrupación de diferentes rangos de energía electromagnética, denominados bandas, dichas bandas se encuentran agrupadas según sus características similares.

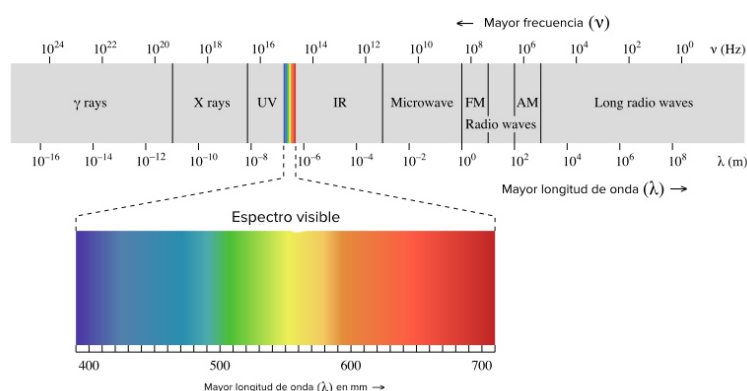


Figura 1. Espectro Electromagnético. Khan Academy (2020).

Para conocer como el espectro electromagnético es el objetivo de las técnicas de teledetección se debe tener en claro ciertos conceptos, uno de estos conceptos es el de *radiancia* (L). La radiancia se define como el *flujo radiante* ( $\Phi$ ), que es la cantidad total de energía radiada durante un periodo de tiempo, que procede de una *superficie elemental* (dS) por unidad de *ángulo sólido* ( $\Omega$ ) y por unidad de superficie colocada normalmente a la dirección de la propagación de la energía ( $\theta$ ) (Sobrino et al., 2000)

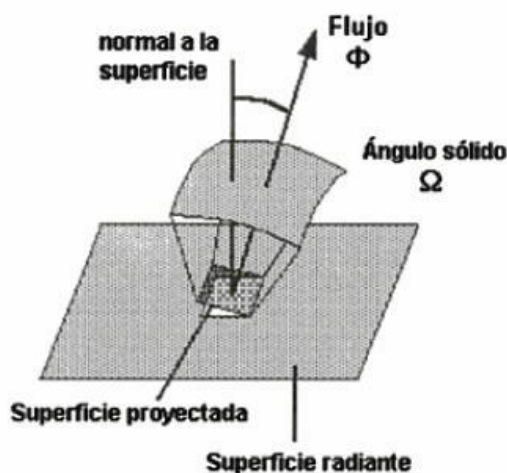


Figura 2. Interpretación geométrica de la Radiancia. Sobrino et al. (2000).

**2.2.1.5 Fundamentos Físicos.** Es necesario reconocer la interacción de la energía con los diferentes elementos de la naturaleza para poder clasificarlos posteriormente. La energía electromagnética, de acuerdo con Sobrino et al. (2000), al impactar sobre una superficie, se verá afectada de diferente manera, pudiendo ser reflejada, absorbida o transmitida, por lo que, para calcular la cantidad del flujo radiante que llega a la superficie tendremos que sumar la energía que fue transmitida, la que fue absorbida y la que fue reflejada de la siguiente manera:

$$\Phi_i = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t$$

Donde:  $\Phi_i$  = Flujo incidente

$\Phi_r$  = Energía Reflejada

$\Phi_a$  = Energía Absorbida

$\Phi_t$  = Energía Transmitida

Sin embargo, esta ecuación suele representarse en unidades relativas, por lo que se divide las unidades entre la energía incidente, de la siguiente manera (Sobrino et al., 2000):

$$1 = \frac{\Phi_r}{\Phi_i} + \frac{\Phi_a}{\Phi_i} + \frac{\Phi_t}{\Phi_i} = \rho + \alpha + \tau$$

Donde:  $\rho$  = Reflectancia

$\Phi_a$  = Absortancia

$\Phi_t$  = Transmitancia

Según Sobrino et al. (2000), de las unidades antes expresadas, la más utilizada es la *Reflectividad*. La reflexión se puede dar de distintas maneras, estas se dan debido a las características de la superficie en la que incide. Estas distintas maneras de reflectancia son:

- *Especular*. La energía se refleja con el mismo ángulo de incidencia y hacia una sola dirección.
- *Pseudo-especular*. La energía se refleja con el mismo ángulo de incidencia; pero, a diferencia de la manera especular, la energía se dirige a varias direcciones.
- *Difusa*. La energía se refleja con diferente ángulo de incidencia y hacia muchas direcciones.
- *Perfectamente difusa*. La energía se refleja hacia varias direcciones con el mismo ángulo (Sobrino et al., 2000).

Otros aspectos importantes que menciona Sobrino et al. (2000), para entender la teledetección, son los procesos de interacción de la radiación electromagnética con la materia, dichos procesos son: la *Absorción* y la *Dispersión*. Con la atmosfera,

particularmente, sucede que la radiación electromagnética interactúa con las moléculas que la componen (Sobrino et al., 2000).

**2.2.1.6 Sensores.** De acuerdo con Sobrino et al. (2000), para lograr detectar la información de manera remota, se desarrollaron dispositivos denominados sensores, los cuales son susceptibles a captar las señales electromagnéticas.

*i) Cualidades de los sensores.* En Sobrino et al. (2000) se menciona que, al igual que el caso de las fotografías aéreas, se debe tener el concepto de escala, en el caso de radares y radiómetros hablaremos del concepto de **Resolución**, las cuales son:

- *Resolución Espacial.* Si bien se suele identificar al área en el terreno, en Sobrino et al. (2000) se aclara que esta resolución se refiere al área que abarca la mínima unidad de la imagen, también denominada **píxel**; sin embargo, en realidad, se refiere al área que se determina por el campo de visión instantáneo del sensor (IFOV), y esta se define como la sección angular, medida en radianes, observada en un momento dado. Depende de la apertura del dispositivo óptico del sensor (Sobrino et al., 2000)
- *Resolución Espectral.* En Sobrino et al. (2000) se refieren a esta resolución como la aptitud de un sensor para separar la información de diferentes longitudes de onda, esta capacidad depende del dispositivo de filtro óptico, que segrega la radiación incidente en bandas espectrales, más o menos amplias. La resolución espectral indica el número de bandas en las que registra determinado sensor (Sobrino et al., 2000).
- *Resolución Radiométrica.* Esta característica se refiere a la sensibilidad de cada sensor para diferenciar señales electromagnéticas de energía dentro de una banda espectral, cuando mayor sea el número de niveles mejor será la resolución radiométrica y mayor precisión tendrá la información (Sobrino et al., 2000).

- *Resolución Temporal* . La resolución temporal se refiere al tiempo que se toma el sensor en pasar 2 veces por el mismo lugar, esta se encuentra relacionada con la altura a la que se encuentra ubicado el sensor (Sobrino et al., 2000).

**2.2.1.6.1 Satélites de Observación.** Sobrino et al. (2000) define a los satélites como objetos artificiales colocados en el espacio para dar vueltas a la tierra con una órbita en específico. Estos pueden dividirse por diferentes criterios como su aplicación y según su órbita.

*i) El programa Landsat.* Sobrino et al. (2000) mencionan que este programa se inició en los años 70, con un programa denominado ERTS (Earth Resources Technology Satellite). De acuerdo con Sobrino et al. (2000), el primer satélite de la serie, el ERTS-1, fue lanzado el 23 de julio de 1972; dicho satélite fue renombrado posteriormente como Landsat-1. En Sobrino et al. (2000) se menciona también que los satélites Landsat 1 y 2 tenían incorporado un sensor MSS (Multispectral Scanning System), que permite un barrido multiespectral con detectores sensibles a 4 bandas espectrales: dos en la región visible y dos en el infrarrojo cercano.

En el satélite Landsat-3 se realizó unas mejoras al sensor MSS, la cual consistía en una banda térmica, que solo funcionó por 4 meses, y un sistema de video de 40 m de resolución espacial, que funcionaba con longitudes de onda entre 0.51 a 0.75  $\mu\text{m}$ , con 64 niveles de intensidad para la banda 7 y 127 para las bandas 4,5 y 6 (Sobrino et al., 2000).

En el año 1982 fue lanzado el satélite Landsat-4, iniciando la segunda generación del programa Landsat, según menciona Sobrino et al. (2000); Sobrino et al. (2000) también menciona que este satélite tuvo una vida útil desde diciembre de 1982 a febrero de 1983, siendo reemplazado en 1984 por el satélite Landsat-5.

En 1993 se lanzó el satélite Landsat-6, después de que el proyecto haya tenido un fracaso en el sector privado y retorne al sector público por la presión de la comunidad científica; sin embargo, se perdió, debido a un fallo de la comunicación entre el satélite

y la plataforma, lo que conllevó a que no alcanzara la órbita deseada (Sobrino et al., 2000). Sobrino et al. (2000) menciona que este fracaso puso en peligro el programa Landsat.

De acuerdo con Sobrino et al. (2000), el 15 de abril de 1999, se lanzó con éxito el satélite Landsat-7, que posee una versión mejorada del sensor TM, el ETM (Enhanced Thematic Mapper), el cual incorpora una banda pancromática (0.5 a 0.9  $\mu\text{m}$ ), que cuenta con una resolución espacial de 15 m. El satélite Landsat-7 es el satélite de mejor calibración, por lo que sus mediciones son extremadamente precisas, además, el satélite Landsat-7 ha sido denominado como “el instrumento de observación más estable y mejor caracterizado jamás colocado en órbita”. (Sobrino et al., 2000)

El 11 de febrero del 2013 fue lanzado el satélite Landsat-8, el último satélite del programa puesto en órbita. Este satélite cuenta con 2 sensores: el Operation Land Imager (OLI) y el sensor de infrarrojos térmicos (TIRS). El sensor OLI presenta una resolución espacial de 30 m (bandas en el espectro visible, infrarrojo cercano, infrarrojo medio), mientras que el sensor TIRS presenta una resolución espacial de 100 m (bandas en el infrarrojo térmico) y presenta 15 m de resolución en la banda pancromática (Sobrino et al., 2000).

El satélite Landsat-8 cuenta también con 2 bandas extras, una que va desde los 0.43 a los 0.45  $\mu\text{m}$ , que es la banda aerosol/cósmica y cirrus, que va desde los 1.36 a 1.38  $\mu\text{m}$ . El satélite Landsat-8 fue realizado como una colaboración entre la NASA y la USGS, la NASA se encargó del desarrollo del satélite mientras que la USGS se encarga del mantenimiento, calibración, procesamiento de datos y el archivo de información en EROS a partir del 30 de mayo del 2013 (Sobrino et al., 2000).

Actualmente se encuentra en desarrollo el satélite Landsat-9, con la colaboración, ya habitual, entre la NASA y la USGS. Su lanzamiento está planificado para diciembre del 2020 y, para apresurar su lanzamiento, su diseño continuará con el de su predecesor, el Landsat-8. (NASA, 2020b)

Cuadro 1. Comparación de características entre satélites del programa Landsat.

| SATÉLITE  | LANZAMIENTO<br>(FIN SERVICIO) | ALTITUD(KM) | PERIODICIDAD<br>(días) | SENSOR                                                     | BANDA:<br>INTERVALO<br>ESPECTRAL<br>(micrometros) | RESOLUCIÓN<br>ESPACIAL<br>(metros) |
|-----------|-------------------------------|-------------|------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------|
| LANDSAT-1 | 23-7-72(6-1-78)               | 917         | 18                     | RBV                                                        | (1)0.48-0.57                                      | 80                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (2)0.58-0.68                                      | 80                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (3)0.70-0.83                                      | 80                                 |
|           |                               |             |                        | MSS                                                        | (4)0.5-0.6                                        | 79                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (5)0.6-0.7                                        | 79                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (6)0.7-0.8                                        | 79                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (7)0.8-1.1                                        | 79                                 |
| LANDSAT-2 | 22-1-75(25-2-82)              | 917         | 18                     | Idéntica a configuración LANDSAT-1                         |                                                   |                                    |
| LANDSAT-3 | 5-3-78(31-3-83)               | 917         | 18                     | RBV                                                        | (1)0.505-0.75                                     | 40                                 |
|           |                               |             |                        | MSS                                                        | (4)0.5-0.6                                        | 79                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (5)0.6-0.7                                        | 79                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (6)0.7-0.8                                        | 79                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (7)0.8-1.1                                        | 79                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (8)10.4-12.6                                      | 240                                |
| LANDSAT-4 | 16-7-82(2-83)                 | 705         | 16                     | MSS                                                        | (4)0.5-0.6                                        | 82                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (5)0.6-0.7                                        | 82                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (6)0.7-0.8                                        | 82                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (7)0.8-1.1                                        | 82                                 |
|           |                               |             |                        | TM                                                         | (1)0.45-0.72                                      | 30                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (2)0.52-0.60                                      | 30                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (3)0.63-0.69                                      | 30                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (4)0.76-0.9                                       | 30                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (5)1.55-1.75                                      | 30                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (6)10.4-12.5                                      | 120                                |
|           |                               |             |                        |                                                            | (7)2.08-2.35                                      | 30                                 |
| LANDSAT-5 | 1-3-84(2012)                  | 705         | 16                     | Idéntica a configuración LANDSAT-4                         |                                                   |                                    |
| LANDSAT-6 | 5-10-93(5-10-93)              | 705         | 16                     | Fallos en el sistema de comunicación. No llegó a funcionar |                                                   |                                    |
| LANDSAT-7 | 15-4-99                       | 705         | 16                     | TM                                                         | (1)0.45-0.52                                      | 30                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (2)0.52-0.6                                       | 30                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (3)0.63-0.69                                      | 30                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (4)0.76-0.9                                       | 30                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (5)1.55-1.7                                       | 30                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (6)10.4-12.5                                      | 120                                |
|           |                               |             |                        |                                                            | (7)2.08-2.35                                      | 30                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | PAN 0.5-0.9                                       | 15                                 |
| LANDSAT-8 | 11-2-2013                     | 705         | 16                     | OLI                                                        | (1)0.435-0.451                                    | 30                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (2)0.452-0.512                                    | 30                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (3)0.533-0.59                                     | 30                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (4)0.636-0.673                                    | 30                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (5)0.851-0.879                                    | 30                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (6)1.566-1.651                                    | 30                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | (7)2.107-2.294                                    | 30                                 |
|           |                               |             |                        |                                                            | PAN 0.503-0.676                                   | 15                                 |
|           |                               |             |                        | (9)1.363-1.384                                             | 30                                                |                                    |
|           |                               |             |                        | TIRS                                                       | (1)10.6-11.19                                     | 100                                |
|           |                               |             |                        |                                                            | (2)11.5-12.51                                     | 100                                |

Fuente. Datos tomados de Sobrino et al. (2000).



*Figura 3.* Satélite Landsat-8. (Wikipedia, 2020).

*ii) Misión ASTER.* De acuerdo con la NASA (2020a), el Radiómetro Avanzado de Emisión y Reflexión Térmica (ASTER), es un instrumento de imagen a bordo de TERRA, satélite insignia del EOS. Esta misión se desarrolló por la NASA, en colaboración con la METI, y fue lanzado en diciembre de 1999. ASTER captura datos de alta resolución espacial en 14 bandas, estas van desde las longitudes de onda el espectro visible hasta las infrarrojas térmicas, también presentan capacidad de visualización estéreo para la creación de modelos de elevación digital (NASA, 2020a).

NASA (2020a) también menciona que el satélite ASTER se basa en 3 subsistemas de instrumentos separados, cada uno de estos subsistemas opera en una región espectral diferente, cada uno cuenta con un telescopio diferente y fue construido por una compañía japonesa diferente. Estos subsistemas son: la región visible y el infrarrojo cercano (VNIR), la región infrarroja de onda corta (SWIR) y la región del infrarrojo térmico (TIR) (NASA, 2020a).

Cuadro 2. Características del sensor ASTER.

| Característica      | VNIR                                                        | SWIR                                 | TIR                                   |
|---------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Rango espectral     | Banda 1: 0.52 - 0.60 $\mu\text{m}$<br>Apuntando al Nadir    | Banda 4: 1.600 - 1.700 $\mu\text{m}$ | Banda 10: 8.125 - 8.475 $\mu\text{m}$ |
|                     | Banda 2: 0.63 - 0.69 $\mu\text{m}$<br>Apuntando al Nadir    | Banda 5: 2.145 - 2.185 $\mu\text{m}$ | Banda 11: 8.475 - 8.825 $\mu\text{m}$ |
|                     | Banda 3: 0.76 - 0.86 $\mu\text{m}$<br>Apuntando al Nadir    | Banda 6: 2.185 - 2.225 $\mu\text{m}$ | Banda 12: 8.925 - 9.275 $\mu\text{m}$ |
|                     | Banda 3: 0,76 - 0,86 $\mu\text{m}$<br>Apuntando hacia atrás | Banda 7: 2.235 - 2.285 $\mu\text{m}$ | Banda 13: 10.25 - 10.95 $\mu\text{m}$ |
|                     |                                                             | Banda 8: 2.295 - 2.365 $\mu\text{m}$ | Banda 14: 10.95 - 11.65 $\mu\text{m}$ |
|                     |                                                             | Banda 9: 2.360 - 2.430 $\mu\text{m}$ |                                       |
| Resolución espacial | 15 m                                                        | 30 m                                 | 90 m                                  |

Fuente. Datos tomados de Sobrino et al. (2000) con base en datos de NASA (1990).

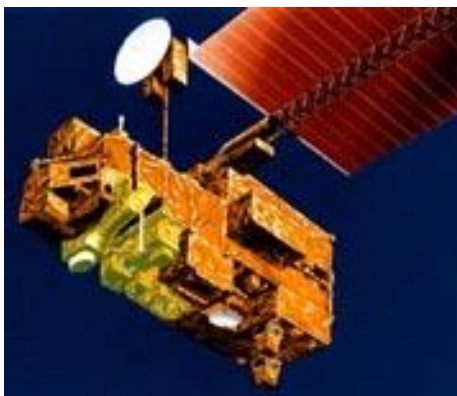


Figura 4. Nave espacial Terra, portador del instrumento ASTER. NASA (2020).

*iii) Satélite PeruSat-1.* La Agencia Espacial del Perú-CONIDA, en colaboración con el gobierno de la República Francesa, lanzaron, el 15 de setiembre del 2016, el satélite PeruSat-1. Este satélite cuenta con 4 bandas espectrales, 3 en el espectro visible y 1 en el infrarrojo cercano, además cuenta con una banda pancromática; posee una resolución espacial de 70 cm en la banda pancromática, debido a esto posee la denominación de submétrico, y posee resolución espacial de 2.8 m para las demás bandas. El PeruSat-1 se encuentra ubicado a 694 km de altura en una órbita heliosincrónica (CONIDA, 2018).

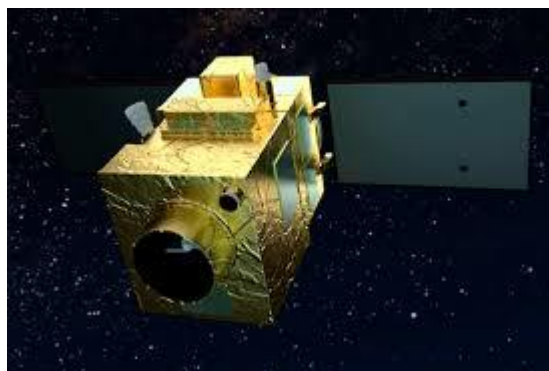


Figura 5. Satélite PeruSat-1. CONIDA (2018).

Cuadro 3. Cualidades del Satélite PeruSat-1.

| BANDA              | LONGITUD DE ONDA( $\mu\text{m}$ ) | RESOLUCIÓN ESPACIAL(m) | RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA (bits) |
|--------------------|-----------------------------------|------------------------|--------------------------------|
| PANCROMÁTICA       | 0.45-0.75                         | 0.7                    | 12                             |
| AZUL               | 0.45-0.52                         | 2.8                    | 12                             |
| VERDE              | 0.53-0.6                          | 2.8                    | 12                             |
| ROJA               | 0.62-0.69                         | 2.8                    | 12                             |
| INFRARROJO CERCANO | 0.76-0.89                         | 2.8                    | 12                             |

Fuente. Elaboración propia con datos tomados de CONIDA (2018).

**2.2.1.7 Corrección Atmosférica en el espectro solar.** Como se menciona en Aguilar Arias (2015), ya que los sensores capturan la información en Niveles Digitales (ND), y la escala de estos depende del sensor, e incluso hay diferencia en el mismo sensor cuando la información se toma en diferente momento, no se puede comparar firmas espectrales con la información en ND. Para solucionar este problema es que se convierte los datos del ND a una escala espectral normalizada, a esta conversión se le llama Corrección Atmosférica (Aguilar Arias et al., 2015)

De acuerdo con Chuvieco (1995), para realizar la corrección atmosférica, primero debe convertirse la información de ND a radiancia (ecuación 1), luego se convierte estos valores a niveles de reflectancia a Tope de Atmosfera-TOA (ecuación 2) (Kruse, 2004, citado en Aguilar et al., 2014). Para hacer estas correcciones se debe recurrir a las siguientes ecuaciones:

$$L_{senk} = a_{0,k} + a_{1,k}ND_k \dots \text{(ecuación 1)}$$

Donde:  $L_{senk}$  = Radiancia espectral de la banda k.

$a_{0,k}$  ,  $a_{1,k}$  = Coeficientes de calibración de la banda k.

$ND_k$  = Valor de Nivel Digital en la banda k.

$$\rho_k = \frac{K * \pi * L_{senk}}{E_{0,k} * \cos \theta} \dots \text{(ecuación 2)}$$

Donde:  $\rho_k$  = Reflectividad en la banda k

$K = 1 + 0.0167(\sin(2\pi(\text{día} - 93.5) / 365))^2$  = Factor de corrección de la distancia Tierra-Sol

$\theta$  = Ángulo cenital

**2.2.1.8 Correcciones Geométricas.** Chuvieco (1995) también afirma que estos procesos se limitan a modificar la información espacial de los píxeles que componen la imagen satelital. Chuvieco (1995) sostiene que, debido a la característica digital de las imágenes, estas correcciones se dan por funciones numéricas, las cuales serían:

$$F_x = F_1(c, l) \dots (\text{ecuación 3})$$

$$F_y = F_2(c, l) \dots (\text{ecuación 4})$$

Donde: “x” e “y” son las coordenadas de la imagen corregida que se encuentran en función a las coordenadas de “c” y “l” (c, l) de la imagen sin corregir.

**i) Localización de puntos de control.** Chuvieco (1995) menciona que para el establecimiento de los puntos de control se deben tener 3 criterios a tener en cuenta: la cantidad, la localización y la distribución de estos. Según Chuvieco (1995) estos criterios responden también al tamaño y complejidad de la imagen, matemáticamente solo se requieren 3 puntos de control para la georreferenciación, la cual también dependerá de las deformaciones que se presenten; aunque, siempre conviene realizar mucho más de 3 puntos de control para garantizar un mayor ajuste.

Se recomienda entre 14 y 20 puntos de control para corregir una imagen MSS , mientras que para corregir una imagen TM se necesitan de 100 a 120 puntos y para una zona pequeña solo se necesitan entre 10 a 12 puntos (Davison, 1984, citado en Chuvieco, 1995). Estos puntos deben encontrarse en lugares claramente identificables en la imagen y en el mapa, de preferencia en lugares realizados por el hombre para que no se encuentren sujetos a cambios por el dinamismo temporal (Chuvieco, 1995)

**ii) Cálculo de las funciones de transformación.** Las correcciones se realizan estableciendo una función matemática. Para realizar dicha función se recurre a las siguientes ecuaciones:

$$X_i = a_0 + a_1 c_i + a_2 l_i \dots (\text{ecuación 5})$$

$$Y_i = b_0 + b_1 c_i + b_2 l_i \dots (\text{ecuación 6})$$

Estas ecuaciones representan una regresión lineal simple, donde  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_0$ ,  $b_1$  y  $b_2$  son los coeficientes de regresión,  $c$  y  $l$  son las variables independientes y  $X_i$  e  $Y_i$  son las variables dependientes. Las variables independientes son las coordenadas de la imagen, mientras que las dependientes son las variables corregidas; los coeficientes se calculan a partir de los puntos de control determinados, lo más usual es usando el método de mínimos cuadrados (Snedecor & Cochran, 1980; Jensen 1986; citado en Chuvieco, 1995).

**iii) *Transferencia de los ND originales a la posición corregida.*** Debido a que la información ya no se sitúa en el mismo píxel ahora podría situarse entre otros píxeles; por otra parte, el píxel ahora podría haberse agrandado. Por esto es que la transferencia de la información se puede realizar por 3 métodos: vecino más próximo, interpolación bilineal o convolución cubica (Chuvieco, 1995).

- *Vecino más próximo (nearest neighbour).* Este método se denomina así debido a que coloca la información de cada celdilla en el píxel más cercano de la imagen original. Es el método que requiere de menor transformación en los ND originales y su mayor problema yace en la distorsión en las figuras de forma lineal (carreteras, caminos, etc.), ya que las torna quebradas al ser corregidas (Chuvieco, 1995)
- *Interpolación bilineal (bilinear interpolation).* Promedia el ND de los píxeles más cercanos al original; el promedio luego es ponderado, de acuerdo con la distancia del píxel original corregido, lo que quiere decir que los píxeles más cercanos en la imagen inicial cuentan con mayor influencia. El principal problema de este método es que suele difuminar los contrastes de la imagen original (Chuvieco, 1995)

- *Convolución cúbica (cubic convolution)*. Este método considera los 16 píxeles más cercanos al píxel original, es el que posee un efecto visual más correcto; pero, su grado de complejidad demanda un mayor volumen de cálculo (Chuvieco, 1995).

**2.2.1.9 Índices de vegetación.** Una manera de poder discriminar el suelo de la vegetación en las imágenes satelitales es mediante los índices de vegetación, debido a que, mediante operaciones matemáticas simples, las cuales se explicarán más adelante, permiten relacionar el comportamiento de los distintos tipos de cobertura de suelo en la superficie terrestre y brindarles un valor, con el cuál se puede identificar de manera más precisa; estos índices ayudan a reducir el efecto del relieve, lo que se debe al peculiar comportamiento radiométrico de las cubiertas mencionadas (Chuvieco, 1995). La firma espectral de la vegetación sana muestra una diferencia entre las bandas visibles, especialmente en la banda roja (0,6 a 0,7  $\mu\text{m}$ ), y las que pertenecen al infrarrojo cercano (0,7 a 1,1  $\mu\text{m}$ ) (Chuvieco, 1995).

Las hojas absorben la luz visible debido a la clorofila, cuya actividad en las bandas de dicha región será menor; sin embargo, en el infrarrojo cercano estas sustancias son transparentes, es así que se explica que la vegetación sana presenta baja reflectancia en la banda roja y alta en el infrarrojo cercano (Chuvieco, 1995). Por otro lado, Chuvieco (1995) sostiene que el suelo presenta una firma espectral más plana, debido a la poca variación en la reflectancia entre las diferentes bandas. Basándose en lo mencionado se deduce que mientras mayor sea la diferencia entre la banda roja e infrarroja más sana será la vegetación, va disminuyendo a medida que la vegetación sea vigorosa hasta llegar a un valor cercano a cero, donde no hay vegetación (Chuvieco, 1995).

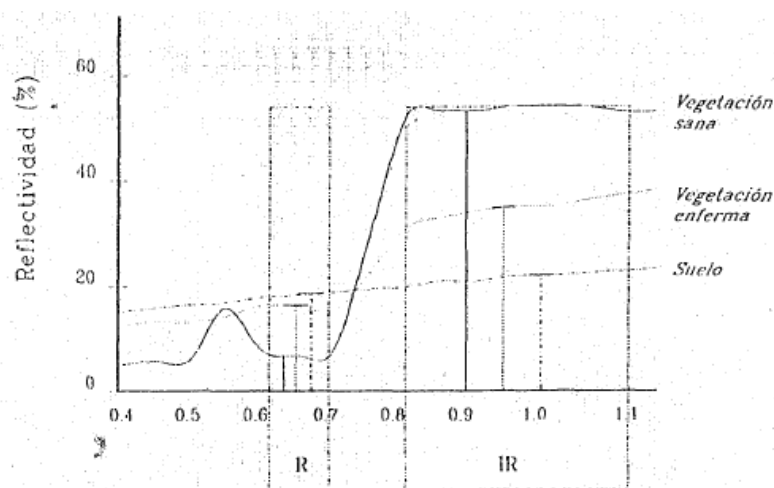


Figura 6. Fundamento espectral de los Índices de Vegetación. Chuvieco (1995).

De acuerdo con Chuvieco (1995), uno de los índices de vegetación más conocido es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Este índice, al igual que la mayoría de los índices de vegetación, se basa en el principio de diferencias entre a banda infrarroja y la banda roja, luego normaliza los resultados para que el rango de valores vaya de -1 a 1, donde los datos cercanos a 1 indican vegetación en mejor condición y se presenta con la siguiente ecuación (Chuvieco, 1995):

$$NDVI = \frac{\text{Banda Roja} - \text{Banda Infrarroja}}{\text{Banda Roja} + \text{Banda Infrarroja}} \dots (\text{ecuación 7})$$

**2.2.1.10 Clasificación de Imágenes Satelitales.** La información obtenida por los satélites no son nada mientras no sean interpretadas, debido a que el resultado es la imagen ya clasificada, está marca la calidad final del proyecto desarrollado, así lo expone Chuvieco (1995).

Para realizar una clasificación se cuentan con 3 fases: definición digital de las categorías o fase de entrenamiento, distribución de los píxeles de la imagen en una de las categorías y, por último, comprobación y verificación de resultados (Chuvieco, 1995).

*i) Fase de entrenamiento.* Chuvieco (1995) aclara que, para interpretar una imagen, se tiene que contar con una experiencia previa, que permitirá clasificarla, basándose en ciertos criterios como tono, textura, situación o tamaño. De la misma forma, la clasificación digital se inicia definiendo las categorías a discriminar; sin embargo, esta también debe conocer el ND que identifica a las clases o, mejor aún, el rango de ND hacia todas las bandas (Chuvieco, 1995). Esta etapa es la columna vertebral de la clasificación, ya que la influye en mayor medida y, de realizarse incorrectamente, empobrecerá los resultados (Hixson et al., 1980; Story y Campbell, 1986; citado en Chuvieco, 1995).

*ii) Tipos de Clasificación.* Las clasificaciones tradicionalmente se han dividido en 2 tipos, clasificación supervisada y no supervisada; pero, también se encuentra la forma mixta. Estas se explicarán a continuación (Chuvieco, 1995).

- *Clasificación Supervisada.* Chuvieco (1995) menciona que esta clasificación parte de un conocimiento previo sobre lo que se contiene en el área de la imagen satelital, debido a que realizar este tipo de procedimiento requiere de dibujar polígonos denominados *Regiones de Interés (ROI)*. Estos ROI sirven para entrenar al clasificador para reconocer las clases, esto sucede porque el entrenador calcula los ND dentro de dichos ROI para más tarde calcule la clase a la que pertenece cada píxel (Chuvieco, 1995).

Terminada la selección de los ROI, el ordenador procede a calcular las estadísticas de los ND de los píxeles contenidos en dichos ROI, sean media, rango, desviación estándar, varianza, covarianza, entre otras, de los ND, para así determinar que ND deben ser categorizados de una u otra clase (Chuvieco, 1995).

- *Clasificación No Supervisada.* En esta forma de clasificación el usuario no requiere de conocimiento previo sobre el área que comprende la imagen satelital y solo necesita interpretar la información generada (Chuvieco, 1995).

De acuerdo con Chuvieco (1995), para realizar esta clasificación se asume que los ND forman grupos, denominadas *clusters*, más o menos nítidos, dependiendo de los casos. Chuvieco (1995) también menciona que estos clusters equivalen a agrupación de píxeles con firmas espectrales semejantes y por lo cual definen a ROI, lastimosamente estas agrupaciones no siempre logran estimar las clases que el usuario necesita y debido a esto le queda a este tener que dar sentido a las obtenidas.

La delimitación de los clusters se inicia basándose en dos criterios: medición de la similitud entre píxeles y otro que marque las condiciones del proceso de agrupamiento. El más usado para obtener la distancia entre píxeles, es el método de distancia euclidiana, dado por la ecuación (Chuvieco, 1995):

$$D_{a-b} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (ND_{a,k} - ND_{b,k})^2} \dots (\text{ecuación 8})$$

Donde:  $D_{a-b}$  es la distancia entre el pixel a y b

$ND_{a,k}$  y  $ND_{b,k}$  son los niveles digitales de esos píxeles en la banda k  
 “m” es el número de bandas

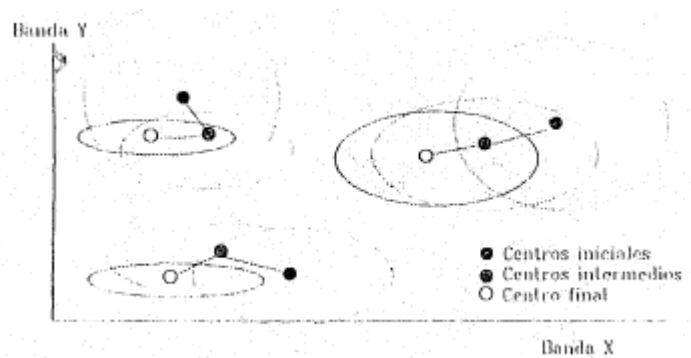


Figura 7. Fundamentos del análisis no supervisado. Chuvieco (1995).

- **Análisis de las estadísticas de entrenamiento.** En Chuvieco (1995) se aclara que, sin importar el método se use para realizar la clasificación, se requiere de validar las clases utilizadas y verificar si son representativas y analizables. Chuvieco (1995) afirma que existen diversas formas de análisis, tanto gráficas como estadísticas, una de las formas más utilizadas es la forma gráfica, que consiste en comparar las firmas espectrales de las distintas clases para verificar que estas se diferencien entre sí y garantizar una correcta clasificación sin peligro a mezcla entre clases.

- **Fase de Asignación.** De acuerdo con Chuvieco (1995), en esta fase comenzará la asignación de clases para cada píxel de la imagen, basándose en un conjunto de funciones determinantes, a estas se ecuaciones se le puede llamar fronteras, que determinan cada categoría. El píxel será asignado como determinada clase en caso su valor de ND este dentro del rango de valores asignados a esta (Chuvieco, 1995).

Los criterios más conocidos para establecer los límites de los ND, para cada clase, son: Mínima distancia, Paralelepípedos y Máxima Probabilidad (Chuvieco, 1995)

- *Clasificación de mínima distancia.* Consiste en ubicar el pixel lo más cercano a la clase posible, es decir, lo más cercano al centroide de la clase. Esta distancia no se trata de algo espacial sino de una espectral. Para medir esta distancia se requiere de la siguiente ecuación (Chuvieco, 1995):

$$d_{x,A} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (ND_{x,k} - ND_{A,K})^2} \dots (\text{ecuación 9})$$

Donde:  $d_{x,A}$  es la medida de la distancia entre el pixel x y la clase A,  $ND_{x,k}$  es el nivel digital del pixel en la banda k,  $ND_{A,K}$  es el promedio de ND para determinada clase y m es el número de bandas.

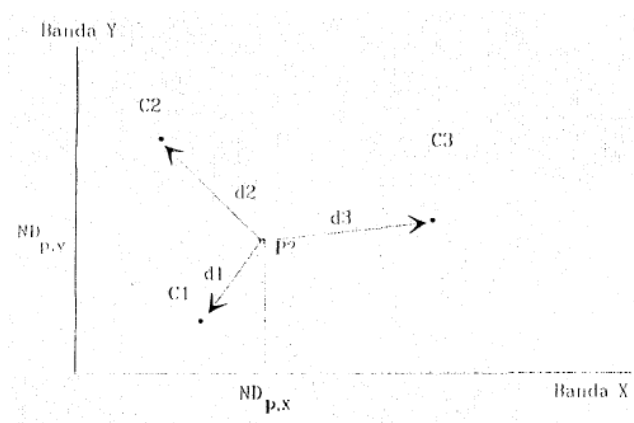


Figura 8. Algoritmo de Mínima Distancia. Chuvieco (1995).

- *Clasificación de paralelepípedos.* Para esta clasificación se debe establecer un dominio para las clases, considerando su centridad y su dispersión (Chuvieco, 1995). Chuvieco (1995) también señala que un píxel es categorizado, de una manera u otra, dependiendo de si se encuentra dentro del dominio de dicha categoría; esta elección se esquematiza de la siguiente manera:

$$ND_{A,k} - R_{A,k} < ND_{x,k} < ND_{A,k} + R_{A,k} \dots (\text{ecuación 10})$$

Donde:  $ND_{A,k}$  es el promedio de niveles a ND de determinada clase,  $R_{A,k}$  es el rango del dominio de la categoría y  $ND_{x,k}$  es el ND del pixel x para la banda k.

Chuvieco (1995) indica que la distancia se establece por el usuario, generalmente guiándose por la desviación estándar o con un múltiplo de esta, considerando que, mientras mayor sea el umbral, más los píxeles dentro y así habrá una mayor posibilidad de error.

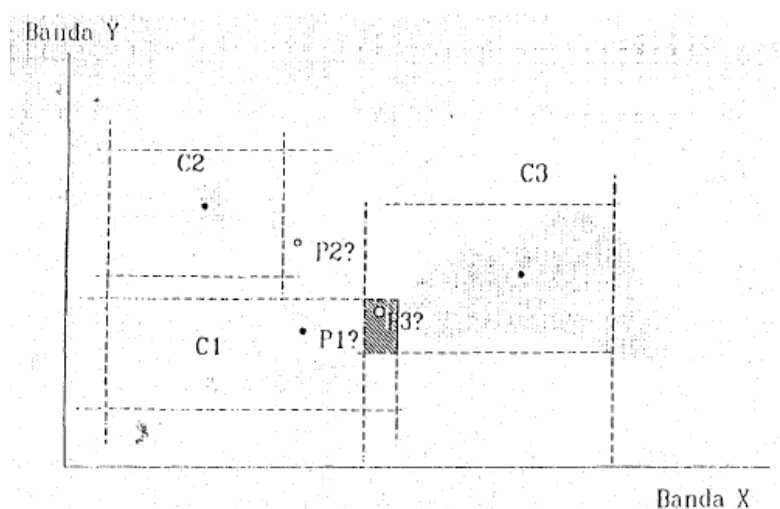


Figura 9. Algoritmo de Paralelepípedos. Chuvieco (1995).

- *Clasificación por máxima probabilidad.* Esta clasificación considera una distribución normal para los ND de los píxeles de la imagen y determina la probabilidad de que uno pertenezca a determinada clase, a la que un píxel tenga mayor posibilidad de pertenencia será a la que se le asigne. Para el caso de una

banda se puede calcular la probabilidad de pertenencia del pixel de la siguiente manera (Chuvieco, 1995):

$$p\left(\frac{x}{A}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_A^2}} \exp\left(-\frac{(ND_x - ND_A)^2}{2\sigma_A^2}\right) \dots (\text{ecuación 11})$$

Donde:  $p\left(\frac{x}{A}\right)$  es la probabilidad de que un pixel  $x$ , con nivel digital  $ND_x$  pertenezca a la clase  $A$ , que tiene una media de  $ND_A$  y una varianza de  $\sigma_A^2$ .

Una vez determinada la probabilidad de pertenencia a las clases se le asignará el píxel a la clase  $A$ , solo si (Chuvieco, 1995):

$$p\left(\frac{x}{A}\right) \geq p\left(\frac{x}{B}\right) \dots (\text{ecuación 12})$$

Donde:  $A$  es diferente de  $B$ , desde 1 hasta  $n$ , donde  $n$  es el número de clases.

De acuerdo con Chuvieco (1995), algunas clases de grandes extensiones y por eso se presenta mayor cantidad de píxeles mal clasificados, por esto se debe considerar una probabilidad extra, que es la considerada a priori, y de esta manera se consiguen resultados más notables. De esta forma, un pixel pertenece a la clase  $A$  si cumple con el siguiente criterio:

$$p\left(\frac{x}{A}\right)p(A) \geq p\left(\frac{x}{B}\right)p(B) \dots (\text{ecuación 13})$$

Hasta este momento lo que se ha mencionado es para el caso de una banda, sin embargo, Chuvieco (1995), menciona que se debe considerar que en una clasificación no se considera solo una, sino varias; entonces, si lo vemos en 2 dimensiones, la gráfica de los límites de la categoría representa un elipsoide, y todos ellos simbolizan la probabilidad de asociada a cada categoría. A más de dos dimensiones ya no se puede graficar las probabilidades. Se extiende la ecuación para su cálculo de la siguiente manera (Chuvieco, 1995):

$$p\left(\frac{x}{A}\right) = 2\pi^{m/2}|V_A|^{0.5}\exp(-0.5(X - M_A)^T V_A^{-1}(X - M_A)) \dots (\text{ecuación 14})$$

Donde:  $m$  es el número de bandas,  $|V_A|$  es la determinante de la matriz de la varianza -covarianza,  $X$  es el vector de ND asociado al pixel  $x$ ,  $M_A$  es el vector de ND medios de la clase  $A$  y los superíndices  $T$  y  $-1$  son las matrices transpuesta e inversa, respectivamente.

El algoritmo le permite al usuario establecer una probabilidad mínima para que un pixel pertenezca, si es que se observa que muchos pixeles quedan sin pertenecer a una clase se recomienda volver a correr el modelo variando las tolerancias mínimas de probabilidades o modificando las regiones de interés (Chuvieco, 1995).

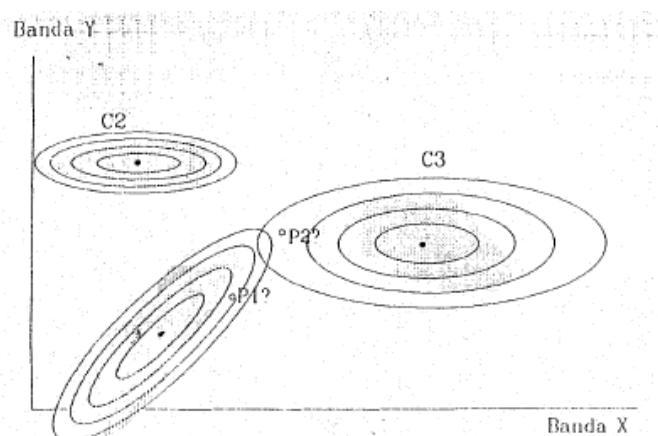


Figura 10. Extensión del algoritmo de Máxima Probabilidad a dos bandas. Chuvieco (1995).

- **Clasificación multitemporal.** La clasificación multitemporal se puede dividir en dos grupos: los estudios multianuales y los multi-estacionales. En los primeros se analiza la variación entre dos fechas de referencia, mientras que en el segundo caso

se tienen los cambios como centro del análisis, los cuales serán de diferentes fechas de un mismo año, para identificar la permutación que ocurre en diferentes estaciones (Chuvieco, 1995).

Los estudios multitemporales se pueden realizar de diferentes formas, tales como:

- i) Extraer la información de los ND de los píxeles de la imagen de diversos momentos e identificar umbrales de cambio
- ii) Realizar un cociente entre los resultados obtenidos de los diferentes momentos, seleccionar las componentes menos importantes e identificar, extraer pixel a pixel las dos imágenes clasificadas (Girard, 1981; Mergerson, 1981; citado en Chuvieco, 1995).

**2.2.1.11 Medida de la fiabilidad.** Para contar con la seguridad de que la identificación de la cobertura de suelos ha sido realizada de manera precisa se requiere la validación de los resultados. Para esto se necesita primero determinar la muestra y depende de esta que se realice un correcto procedimiento; debido a esto se deben considerar los siguientes criterios, con el objetivo de ejecutar este procedimiento de manera correcta: método de selección de la muestra, tamaño y distribución de la muestra y nivel de confianza otorgado a mi estimación (Chuvieco, 1995).

**i) Tipos de Muestreo**

- *Aleatorio Simple.* Los elementos que se deben verificar tienen, todos, las mismas posibilidades de ser elegidos.
- *Aleatorio Estratificado.* Los elementos a verificar se eligen de modo tal que se le agrega un criterio más para ser seleccionados (altura, clase, entre otros).

- *Sistemático*. Las muestras se distribuyen siguiendo un sistema a partir de un punto de origen seleccionado inicialmente.
- *Sistemático no alineado*. Similar al sistemático solo que variando una de las dos coordenadas y otorgando aleatoriedad al proceso.
- *Por conglomerados*. En vez de elegir una sola unidad de muestra se escoge un conglomerado (cluster), en otras palabras, en cada punto de muestreo se toman varias muestras (Chuvieco, 1995)

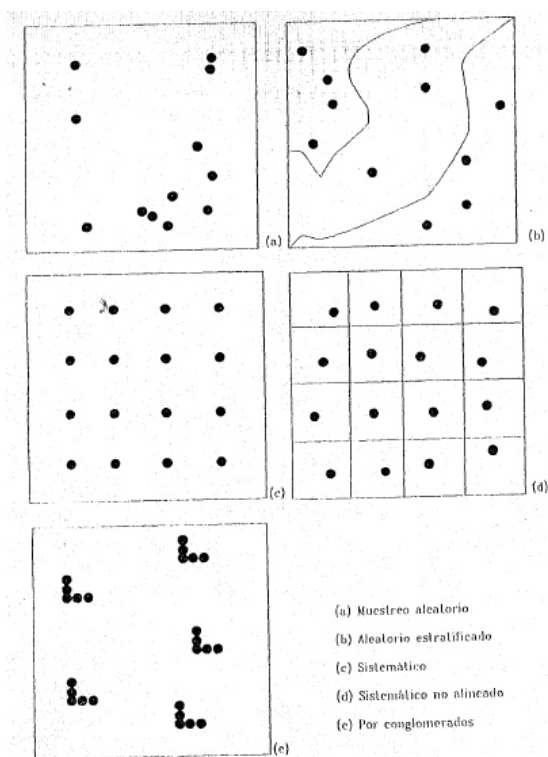


Figura 11. Tipos de muestreo. Chuvieco (1995).

ii) **Tamaño de muestra.** El tamaño de la muestra se determina por la siguiente ecuación (Congalton, 1988b, citado en Chuvieco, 1995):

$$N = \frac{z^2 * p * q}{E^2} \dots (\text{ecuación 15})$$

Donde:  $z$  = Abscisa de la curva normal para un determinado nivel de confianza

$p$  = Probabilidad de acierto

$q$  = Probabilidad de error (1-p)

$E$  = Error estimado

iii) **Matriz de Confusión.** Cuadro bidimensional donde las filas son clases de referencia y las columnas son clases determinadas por el usuario, la diagonal de esta matriz determina los puntos que se encuentran bien clasificados y los valores de las marginales representan los errores de asignación (Chuvieco, 1995).

- *Análisis estadísticos de la matriz de confusión*

✓ *Precisión global.* Se establece una relación entre los valores de la diagonal con los valores totales, siguiendo la siguiente ecuación (Chuvieco, 1995).

$$F_m = \frac{\sum x_i}{\sum \sum x_{ij}} * 100 \dots (\text{ecuación 16})$$

✓ *Precisión del usuario.* Conviene considerar también los valores de las celdas marginales. En el caso de los valores de las filas, cuando los valores reales no fueron considerados en la clasificación se les llama Errores por Omisión y se calcula para cada clase de la siguiente forma (Chuvieco, 1995):

$$E_{oi} = \frac{x_{ij} - x_{ii}}{x_{ij}} \dots (\text{ecuación 17})$$

Donde:  $x_{ij}$  = Indica el valor en la marginal en la fila i

$x_{ii}$ = Valor en la diagonal

De la misma manera que los errores de omisión, los valores de las marginales de las columnas determinan los Errores por Comisión. Para determinarlos se necesita la siguiente ecuación (Chuvieco, 1995):

$$E_{ci} = \frac{x_{ij}-x_{ii}}{x_{ij}} \dots (\text{ecuación 18})$$

Donde:  $x_{ij}$ = Indica el valor en la marginal en la columna i

$x_{ii}$ = Valor en la diagonal

Desde otro punto de vista, Chuvieco (1995) señala que se puede establecer la precisión el usuario ( $F_{ui}$ ) y la precisión del productor ( $F_{pi}$ ), las cuales son una relación inversa al error por comisión y omisión respectivamente. Se calculan de la siguiente manera:

$$F_{ui} = \frac{x_{ii}}{x_{ij}} * 100 \dots (\text{ecuación 19})$$

$$F_{pi} = \frac{x_{ii}}{x_{ij}} * 100 \dots (\text{ecuación 20})$$

*iv) Índice Kappa.* Este índice analiza la relación entre diversas precisiones mencionadas anteriormente; mide la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad observado y el que se determinaría solo por azar; se calcula utilizando la siguiente ecuación (Hudson & Ramn, 1987, citado en Chuvieco, 1995):

$$k = \frac{N \sum X_{ii} - \sum X_{ij} X_{ji}}{N^2 - \sum X_{ij} X_{ji}} \dots (\text{ecuación 21})$$

Donde:  $X_{ii}$ = Acuerdo observado

$X_{ij}, X_{ji}$  = Acuerdo esperado

El índice Kappa varía de 0 a 1, mientras más se acerque a 1 significará que más confiable es la clasificación. Se han establecido rangos que determinan la fiabilidad de los resultados, dependiendo del valor del índice (Landis & Koch, 1977).

Cuadro 4. *Validación del Coeficiente Kappa.*

| Índice Kappa | Fuerza de Concordancia |
|--------------|------------------------|
| 0            | Pobre                  |
| 0.01-0.2     | Leve                   |
| 0.21-0.4     | Aceptable              |
| 0.41-0.6     | Moderada               |
| 0.61-0.8     | Considerable           |
| 0.81-1       | Casi Perfecta          |

Fuente. Elaboración propia con datos tomados de Landis & Koch (1977).

v) **Característica de Operación Relativa (ROC).** En Del Valle (2017) se sostiene que esta herramienta es usada con el objetivo evaluar la capacidad de discriminar que posee una prueba con dos posibilidades de clasificación (dicotómica), desde los años 50, donde fue utilizada en el campo de la detección con radar. Este método requiere de un umbral, con este se determina la cantidad de muestras que se encuentran dentro del umbral y fuera de su rango, para que posteriormente estos valores son graficados en una curva que representa la sensibilidad y la especificidad del testeo (Del Valle, 2017).

Del Valle (2017) define la variable aleatoria 'D', que será denominada *Estado*, que tendrá el valor de '0' al no poseer el evento, y '1' cuando sí se presente. Además,

se requerirán de un grupo de control, de una variable ‘x’ (que mide cierta característica de cada individuo y puede ser continua o discreta) y de una variable ‘y’ (variable prueba), que valdrá ‘1’ en caso de ser positiva o ‘0’ al ser negativa (Del Valle, 2017).

Del Valle (2017) afirma que, cuando el valor de la variable ‘D’ coincida, en el valor ‘1’, con la variable ‘y’ para un individuo, este caso será denominado como un ‘verdadero positivo’ ( $V_+$ ); cuando la variable ‘D’ tenga el valor de ‘0’ y la variable ‘y’ sea ‘1’, para el mismo individuo, entonces se le considerará como un ‘falso positivo’ ( $F_+$ ); cuando las variables ya mencionadas coincidan, en el valor ‘0’, para un individuo, será denominado como un ‘verdadero negativo’ ( $V_-$ ); por último, cuando la variable ‘D’ tenga el valor de ‘1’ y la variable ‘y’ tenga un valor de ‘0’, para el mismo individuo, se le considerará como ‘falso negativo’ ( $F_-$ ).

- *Sensibilidad*: Esta es la probabilidad de que un elemento posea uno de los dos valores posibles, tanto en la prueba como en la clasificación. Se le conoce también como predictivo positivo (Del Valle, 2017). Se determina con la siguiente expresión (Del Valle, 2017):

$$S = \frac{V_+}{V_+ + F_-} \dots (\text{ecuación 22})$$

- *Especificidad*: Esta es la probabilidad de que un elemento posea el otro de los dos valores posibles, tanto en la prueba como en la clasificación. Se le conoce también como predictivo negativo (Del Valle, 2017). Se determina con la siguiente expresión (Del Valle, 2017)

$$E = \frac{V_-}{V_- + F_+} \dots (\text{ecuación 23})$$

Con los valores ya definidos se grafica la curva ROC, la cual representa 1-especificidad (E), frente a la sensibilidad (S) para cada posible valor umbral (Del Valle, 2017).

$$ROC = \begin{cases} y = S \\ x = 1 - E \end{cases} \dots (\text{ecuación 24})$$

Si bien la teledetección es una herramienta muy útil y precisa, que puede generar información muy exacta, puede ser reforzada con diferentes herramientas. En la presente investigación se decidió pulir los resultados, para aumentar la precisión de los resultados, con el uso del Sistema de Información Geográfica (SIG).

**2.2.1.3 Sistema de Información Geográfica (SIG).** Según O'Brien (2015), se le puede llamar SIG al método para tratar la información geográfica para combinarla y generar nueva información a partir de la que se poseía en un inicio. La realización de tal proceso requiere de apoyo informático, tanto de hardware como de software, todo bajo el proyecto definido por un grupo de personas y controlado por técnicos encargados de su desarrollo (O'Brien, 2015).

**2.2.1.4 Software.** Los softwares se agrupan para que sea posible el funcionamiento de los distintos subsistemas, que, en conjunto, permiten el tratamiento de los datos geográficos. Estos subsistemas son (Buzai, 2013):

- i)* Almacenamiento y organización de datos espaciales gráficos: Mediante digitalización, procesos automáticos o archivos directamente obtenidos de satélite.
- ii)* Almacenamiento y organización de datos atributos: La localización espacial definida, esta permite una organización más eficiente.
- iii)* Tratamiento de datos: A través de diversas herramientas.
- iv)* Presentación de resultados (Buzai, 2013).

Un SIG puede ser considerado como tal desde que cuenta con el tratamiento de datos (a pesar que solo cuenta con este); pero, si cuenta con todos los subsistemas es considerado como un SIG total (Buzai, 2013).

### **2.2.1.5 Hardware.** El hardware está compuesto por:

- i)* Unidad Central de Procesamiento (CPU): Es el componente fundamental de una computadora, encargado de realizar todos los procesamientos que se necesitan.
- ii)* Periféricos de Entrada: Este permite que el usuario se comunice con el CPU. Como ejemplo se tiene el teclado, el mouse, scanner, entre otros.
- iii)* Periféricos de Salida: Permite que el CPU se comunice con el usuario, que muestre los resultados. Como ejemplo se tiene el monitor, el plotter, entre otros (Buzai, 2013).

## **2.2.2 La gestión del Área Natural Protegida.**

Para conocer la gestión que acontece en el Áreas Natural Protegida Santuario Histórico Bosque de Pómac, primero es necesario conocer que es un Área Natural Protegida (ANP), como se clasifican y que es el Santuario Histórico Bosque de Pómac.

**2.2.2.1 Área Natural Protegida.** De acuerdo con la Ley N° 26834, Ley de Áreas Naturales Protegidas (Congreso de la República del Perú, 1997):

“Las Areas Naturales Protegidas son los espacios continentales y/o marinos del territorio nacional, expresamente reconocidos y declarados como tales, incluyendo sus categorías y zonificaciones, para conservar la diversidad biológica y demás valores asociados de interés cultural, paisajístico y científico, así como por su contribución al desarrollo sostenible del país” (p.150721).

De la Ley N° 26834 (1997) se conoce que las ANP se dividen en dos categorías, de acuerdo con el aprovechamiento de sus recursos: Aquellas ANP que son de uso directo, en la cual sus recursos son tangibles, es decir, donde se pueden utilizar los recursos ubicados dentro de los límites del ANP en actividades extractivas (de

manera controlada y organizada); y las ANP que son de uso indirecto, donde sus recursos son intangibles, es decir, donde se pueden utilizar los recursos ubicados dentro de los límites del ANP en actividades no son usados de manera directa sino mediante actividades que no modifiquen en gran medida el paisaje protegido por el ANP como investigación científica o turismo.

**2.2.2.1.1 Áreas Naturales Protegidas de Uso Indirecto.** En esta categoría se encuentran Áreas Naturales Protegidas como:

- Parques Nacionales
- Santuarios Nacionales
- Santuarios Históricos (Ley N° 26834, 1997).

**2.2.2.1.2 Áreas Naturales Protegidas de Uso Directo.** En esta categoría se encuentran Áreas Naturales Protegidas como:

- Reservas Nacionales
- Reservas Paisajísticas
- Refugios de Vida Silvestre
- Reservas Comunales
- Bosques de Protección
- Cotos de Caza (Ley N° 26834, 1997).

Al mencionar las Áreas Naturales Protegidas es necesario mencionar las Zonas de Amortiguamiento, ya que están estrictamente vinculadas, como se explica a continuación.

**2.2.2.2 Zona de Amortiguamiento.** En el artículo 61 del DS N°038-2001(2001), Reglamento de la Ley de Áreas Naturales Protegidas, se define a una Zona de Amortiguamiento como la zona adyacente a las áreas pertenecientes al SINANPE, a las cuales se le tendrá que dar un trato especial con el fin de garantizar la conservación del ANP.

De acuerdo con el DS N° 038-2001 (2001), las actividades que se realicen dentro de las zonas de amortiguamiento no deben poner en riesgo las acciones realizadas con el fin de proteger el ANP. Así, el DS N° 038-2001 (2001) manifiesta que dicha zona tendrá que ser establecida en el plan maestro de su respectiva ANP mediante coordenadas UTM.

**2.2.2.3 Santuario Histórico Bosque de Pómac.** El Decreto Supremo N°034-2001-AG (2001, citado en SERNANP, 2017) describe que el ANP se ubica en la cuenca baja del río La Leche, entre los distritos de Pítipo, Túcume, Íllimo y Pacora, en la provincia de Ferreñafe, región Lambayeque. Así, de acuerdo con el Decreto Supremo N°034-2001-AG (2001, citado en SERNANP, 2017), dicha ANP es categorizada como de uso indirecto y su objetivo es conservar la unidad paisajística-cultural conformada por el Bosque Seco Ecuatorial y el Complejo Arqueológico Sicán. Antes de ser nombrada Santuario Histórico Bosque de Pómac, esta era una Zona Reservada denominada Batán Grande.

Los elementos que componen este santuario histórico son de orden natural y cultural: el orden natural lo compone el ecosistema de Bosque Seco, que se encuentra compuesto en su gran mayoría por bosques de algarrobo (*Prosopis limensis Benth*) de hasta 106 años (Lazo Clemente, 2018), así como también vegetación cactal y sapotal (SERNANP, 2017); el orden cultural lo forman 3 Complejos Arqueológicos (Complejo Huaca Lucía-Cholope, Complejo Huaca Soledad y Complejo Sicán) y por 2 complejos Histórico-Productivos (Complejo Ganadero de la Hacienda Batangrande y el Complejo Apícola Casa Karl Weiss) (SERNANP, 2017).

### **2.2.3 La deforestación de Bosques Secos.**

La deforestación de bosques secos, en el presente estudio, ha sido analizada desde el pasado al presente para así poder estimar cifras a futuro. Para poder explicar este análisis es necesario definir que es la deforestación y que son los bosques secos, para

así establecer una relación entre las variables antes mencionadas y la presente variable.

**2.2.3.1 Bosques Secos.** De acuerdo al Mapa Ecológico del Perú, elaborado por la Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (ONERN) son una zona de vida ubicadas principalmente en la región latitudinal tropical; la altitud en la que suelen encontrarse los ejemplares de esta zona de varía entre los 300 y 800 m.s.n.m (ONERN, 1976). Los bosques secos presentan una vegetación natural conformada por especies perennifolios (con hojas durante todo el año) y caducifolios (pierden sus hojas en ciertos momentos del año), distribuidos en 3 estratos: árboles dispersos con alturas de hasta 30 m. y diámetro de hasta 1.5 m., árboles delgados de hasta 0.6 m. de diámetro y plantas arbustivas y herbáceas muy dispersas (ONERN, 1976).

Podemos referirnos a bosques secos también como aquellos que se encuentran en regiones caracterizadas por sus temporadas de sequía largas (Portillo-Quintero & Sánchez-Azofeifa, 2010); u otra definición sugiere que deben tener vegetación que tenga una temporada de sequía de mínimo entre 5 a 6 meses y que posea procesos ecológicos fuertemente estacionales (Portillo-Quintero & Sánchez-Azofeifa, 2010).

**2.2.3.2 Deforestación.** De acuerdo con (Martin, 2008), se denomina deforestación a la pérdida de bosques dada por causa de la actividad antrópica, es decir, para considerarse un área como deforestada debe observarse el cambio del uso del suelo de bosque a determinado uso de origen antrópico .

Otro concepto para “Deforestación” es el que brinda el Ministerio del Ambiente, en la cual se la define como “la conversión por actividad humana directa de tierras

boscosas en tierras no forestales” (Convención de las naciones Unidas contra la corrupción; citado en MINAM, 2014).

Ante esto, debido a que se analizó anteriormente el análisis de la dinámica de los Territorios Agrícolas y Urbanizados, se requirió de una herramienta que permita establecer un patrón en su comportamiento y, una vez detectado dicho patrón, se pueda estimar un avance a un futuro determinado. La solución a esta necesidad fue brindada por los *Modelos Estocásticos*.

**2.2.3.3 Modelos Estocásticos.** También llamados “Métodos Probabilísticos”, es decir, modelos que no poseen carácter determinístico y sus resultados están sujetos a probabilidades. Se les puede definir como “una colección de variables aleatorias  $\{X_t, t \in T\}$  definidas sobre un espacio de probabilidad  $(\Omega, A, P)$ ” (Montes Suay, 2007). De acuerdo con Montes Suay (2007), pueden clasificarse por el tipo de variables que intervienen y la dimensión del índice, la que los divide en 4 tipos, los cuales son:

**2.2.3.3.1 DTDV.** Es el acrónimo de las palabras en inglés Discret Times/Discret Values, que se refiere a que los procesos poseen índice numerable y variables discretas (Montes Suay, 2007).

**2.2.3.3.2 DTCV.** Es el acrónimo de las palabras en inglés de Discret Time/Continuous Values, referido a los procesos que poseen índice numerable y variables continuas (Montes Suay, 2007).

**2.2.3.3.3 CTDV.** Este es el acrónimo de las palabras en inglés de Continuous Time/Discret Values, lo cual se refiere a que los procesos poseen índice no numerable y variables discretas (Montes Suay, 2007).

**2.2.3.3.4 CTCV.** Este es el acrónimo de las palabras en inglés de Continuous Time/Continuous Values, lo cual se refiere a que los procesos poseen índice no numerable y variables continuas (Montes Suay, 2007).

De diversos antecedentes analizados se identificó que uno de los métodos mas utilizados para la estimación de deforestación son las Cadenas de Markov, debido a su precisión, pero facilidad de manejo.

**2.2.3.4 Cadenas de Markov** También denominado Proceso de Markov, se considera que un proceso estocástico es uno de Markov si dicho proceso evoluciona solo dependiendo del pasado inmediato. Pueden ser DTDV o CTDV, debido a su índice, que puede ser discreto o continuo, y su variable siempre será discreta; al ser DTDV se le da el nombre de Cadena de Markov Discreta y cuando sea CTDV será llamado Cadena de Markov Continua en el Tiempo (Montes Suay, 2007).

Para definirlo matemáticamente primero se debe considerar un conjunto “N”, de elementos finitos, clasificadas “n” cantidad de categorías, que son excluyentes y exhaustivas, en diferentes momentos del tiempo “t” y “t+h”. De esto se tiene  $N_i(u)$  el elemento perteneciente al estado “i” en el momento “u” y  $N_{ij}$  se refiere a la transición del estado “i” en el tiempo “t” al estado “j” en el tiempo “t+h” (Partida Bush, 1989).

| Estado de destino<br>(t + h) | Estado de origen (tiempo t) |          |          |     |          | Total        |
|------------------------------|-----------------------------|----------|----------|-----|----------|--------------|
|                              | 1                           | 2        | 3        | ... | n        |              |
| 1                            | $N_{11}$                    | $N_{21}$ | $N_{31}$ | ... | $N_{n1}$ | $N_1(t + h)$ |
| 2                            | $N_{12}$                    | $N_{22}$ | $N_{32}$ | ... | $N_{n2}$ | $N_2(t + h)$ |
| 3                            | $N_{13}$                    | $N_{23}$ | $N_{33}$ | ... | $N_{n3}$ | $N_3(t + h)$ |
| ⋮                            | ⋮                           | ⋮        | ⋮        | ⋮   | ⋮        | ⋮            |
| n                            | $N_{1n}$                    | $N_{2n}$ | $N_{3n}$ | ... | $N_{nn}$ | $N_n(t + h)$ |
| Total                        | $N_1(t)$                    | $N_2(t)$ | $N_3(t)$ | ... | $N_n(t)$ | N            |

Figura 12. Clasificación de N elementos en cuadro de doble entrada. Partida Bush (1989).

| Estado de destino<br>(t + h) | Estado de origen (tiempo t) |          |          |     |          |            |
|------------------------------|-----------------------------|----------|----------|-----|----------|------------|
|                              | 1                           | 2        | 3        | ... | n        | Total      |
| 1                            | $c_{11}$                    | $c_{21}$ | $c_{31}$ | ... | $c_{n1}$ | $c_1(t+h)$ |
| 2                            | $c_{12}$                    | $c_{22}$ | $c_{32}$ | ... | $c_{n2}$ | $c_2(t+h)$ |
| 3                            | $c_{13}$                    | $c_{23}$ | $c_{33}$ | ... | $c_{n3}$ | $c_3(t+h)$ |
| ⋮                            | ⋮                           | ⋮        | ⋮        | ⋮   | ⋮        | ⋮          |
| n                            | $c_{1n}$                    | $c_{2n}$ | $c_{3n}$ | ... | $c_{nn}$ | $c_n(t+h)$ |
| Total                        | $c_1(t)$                    | $c_2(t)$ | $c_3(t)$ | ... | $c_n(t)$ | 1          |

Figura 13. Clasificación de términos relativos (dividido entre N) en cuadro de doble entrada. Partida Bush (1989).

De acuerdo con Partida Bush (1989) puede calcular la cantidad de elementos que cambian del estado “i” al estado “j” dentro de un periodo “h” de la siguiente manera:

$$p_{ij} = N_{ij}/N_i(t) = c_{ij}/c_i(t) \dots (\text{ecuación 25})$$

Luego Partida Bush (1989) dice que sustituyendo la ecuación 25 en el cuadro de doble entrada se tiene:

$$c_{ij}(t+h) = \sum_{i=1}^n c_{ij} = \sum_{i=1}^n p_{ij} c_i(t) \text{ para toda "j"} \dots (\text{ecuación 26})$$

Partida Bush (1989) continúa diciendo que, de acuerdo con la ecuación 25, se puede establecer:

$$\sum_{i=1}^n p_{ij} = 1 \text{ para toda "i"} \dots (\text{ecuación 27})$$

También, Partida Bush (1989) define el vector columna  $\hat{c}(u)$  y la matriz P como:

$$\hat{C}(u) = \begin{bmatrix} c_1(u) \\ c_2(u) \\ c_3(u) \\ \vdots \\ c_n(t) \end{bmatrix} \text{ y } P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{21} & p_{31} & \dots & p_{n1} \\ p_{12} & p_{22} & p_{32} & \dots & p_{n2} \\ p_{13} & p_{23} & p_{33} & \dots & p_{n3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{1n} & p_{2n} & p_{3n} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix}$$

Figura 14. Vector  $\hat{C}(u)$  y matriz  $P$ . Partida Bush (1989).

Conociendo este dato, se puede expresar la ecuación 26 como (Partida Bush, 1989):

$$\hat{C}(t+h) = P \cdot \hat{C}(t) \dots (\text{ecuación 28})$$

Debido a que el principio fundamental de las Cadenas de Markov se basa en que las posibilidades de transición solo dependen del estado inicial de un periodo “h” y no del tiempo previo. Partida Bush (1989) afirma entonces que teniendo como  $P(k)$  a la matriz de probabilidades para el k-ésimo intervalo de longitud “h” posterior al momento “t”, se aplica 2 veces en la ecuación 28:

$$\hat{C}(t+2h) = P(2) \cdot \hat{C}(t+h) = P(2) \cdot P(1) \cdot \hat{C}(t) \dots (\text{ecuación 29})$$

Generalizando la ecuación 29 para “m” periodos tenemos:

$$\hat{C}(t+mh) = P(m) \cdot P(m-1) \cdot P(m-2) \dots P(2) \cdot P(1) \cdot \hat{C}(t) \dots (\text{ecuación 30})$$

Y así, Partida Bush (1989) continúa diciendo que esta última ecuación resulta ser el modelo estocástico conocido como Cadena de Markov, donde el termino cadena proviene de la liga de varios periodos. Partida Bush (1989) supone incluso, que las probabilidades de cambio permanecen constantes, donde tendremos la siguiente ecuación:

$$\hat{c}(t+mh) = P^n \cdot \hat{c}(t) \dots (\text{ecuación 31})$$

De la lectura de (Partida Bush, 1989) se desprende con respecto al tema de las cadenas de Markov que:

La utilidad de las cadenas de Markov radica en su capacidad de proyectar las probabilidades de transición para cada periodo futuro, sin embargo, ya que por lo general se cuentan con distribuciones relativas ( $c_i(u)$ ) y es más complicado poseer las probabilidades de transición que se necesita, se necesitarán de algún algoritmo para obtener dichas probabilidades (p.550).

**2.2.3.5 Potencial de Transición.** El potencial de transición se refiere al establecimiento de probabilidades de cambio entre diferentes clases de cobertura de suelos determinada para cada unidad mínima que compone el área de estudio (para cada píxel en el caso de las imágenes satelitales). Para obtener dichas probabilidades se cuentan con diversos de los algoritmos, los cuales se presentarán a continuación:

*i) Redes Neuronales Artificiales.* De acuerdo con Fausett (s. f.), consiste en la agrupación de gran número de elementos de procesamiento simples llamados *neuronas*, *unidades* o *nodos*. Las neuronas se encuentran conectadas entre sí por medio de enlaces de comunicación directo, los cuales cuentan con un peso. Estos pesos representan la información que está siendo usada para resolver un problema (Fausett, s. f.).

Así Fausett (s.f.) afirma que cada neurona tiene un estado interno que se denomina “activación” o “nivel de actividad”; las neuronas se encuentran en función de los datos de entrada recibidos. Lo común es que envíen su activación, como una señal, a otra; cabe resaltar que las neuronas no pueden enviar más de una señal a la vez; aunque, una señal se puede transmitir a más de una neurona a la vez (Fausett, s. f.).

De los diversos tipos de redes neuronales que existen, el que suele utilizarse en temas de teledetección es el de Perceptrón Multicapa (MLP por sus siglas en inglés) (Atkinson y Tatnall, 1997).

- *Perceptrón Multicapa*. Este concepto fue utilizado por primera vez en el año 1952, consta de un nodo simple, que recibe ponderaciones de entrada, y otorga umbrales como resultados, de acuerdo con una regla (Atkinson & Tatnall, 1997). El MLP es capaz de separar datos, debido a que es “multicapa”, por esto generalmente de tres o más capas (Atkinson y Tatnall, 1997).

✓ La primera capa es en la que se encuentran los datos de entrada, estos poseen información caracterizada (Kaminsky et al., 1997; Chen et al., 1997; citados en Atkinson, 1997).

✓ La segunda capa es la denominada “capa oculta”, este nombre se determina ya que no cuenta con datos de salida, no presenta reglas; pero, las capas ocultas tienen la capacidad de representar cualquier función booleana (Atkinson & Tatnall, 1997). El aumento de la cantidad de capas oculta acrecienta el tiempo de procesamiento y hay una menor habilidad de generalizar (Foody, 1995b, citado en Atkinson, 1997).

✓ La tercera capa presenta los resultados, los cuales deben presentar la misma cantidad de caracteres que se presentaron en los datos de entrada (Atkinson & Tatnall, 1997).

El MLP requiere de entrenamiento, que sirve para construir un modelo del proceso de generación de datos, a partir del cual se generan salidas que no se han visto antes. Los resultados obtenidos se comparan luego con los esperados (los cuales servirán en la etapa de testeo) y así se determina el error calculado (Atkinson y Tatnall, 1997).

*ii) SimWeight*. De acuerdo con (Sangermano et al., 2010) sobre el algoritmo SimWeight:

Proviene de las palabras en inglés Similarity Weighted, que significan “Similitud Ponderada”, este es un procedimiento de aprendizaje que se deriva del

procedimiento de K-Nearest Neighbor (vecino más cercano). Este modelo debe contar con dos clases: cambio y persistencia. Para cada pixel, SimWeight extrae el valor de K-Nearest (sea de cambio o persistencia), para luego calcular la distancia en el espacio variable desde las ubicaciones desconocidas hasta las instancias de cambio en la que se encuentran el rango de k (p. 571).

Sangermano et al. (2010) define que la distancia hallada se utiliza como dato en la ecuación utilizada para determinar la pertenencia de determinado píxel a determinada clase. Dicha ecuación es la siguiente:

$$Asignación_{cambio} = \frac{\sum_{i=1}^c (1.0 - \frac{1}{1 + e^{d_i}})}{k} \quad (c \leq k) \dots (\text{ecuación 32})$$

Donde: k= Número de píxeles (cambio + persistencia)

c= Número de píxeles de cambio

d= distancia a una instancia de cambio

Realizar el entrenamiento necesita de, al menos, dos mapas en diferentes momentos y para que cada transición sea modelada se requiere de dos clases de entrenamientos, cambios y persistencias; además, se debe contar con variables independientes, las cuales deben poseer unidades comparables, y puede ser logrado mediante estandarización de datos (Sangermano et al., 2010).

**iii) Regresión Logística.** Permite identificar la influencia que tiene una variable independiente sobre la dependiente (también llamada de respuesta); esta variable de respuesta puede ser dicotómica o politómica (es capaz de tener dos o más valores) (Alderete, 2006); a la variable dependiente se le denominará “Y” y a la variable independiente se le nombrará “X”; cuando la variable dependiente Y solo tiene dos valores entonces se le denomina “proceso binomial” y es el que se sucede generalmente; si esto sucede se le da a Y el valor de 0, de ocurrir el hecho, y 1 si no ocurre (Alderete, 2006).

De acuerdo con Aldarete (2006), el modelo de regresión logística puede ser representado de la siguiente forma:

$$\text{logist}(\pi) = \log \left( \frac{\pi_i}{1-\pi_i} \right) \dots (\text{ecuación 33})$$

Donde:  $\pi_i$  = Probabilidad de observar la categoría o evento a predecir

$1 - \pi_i$  = Probabilidad de no observar la categoría o evento a predecir

$\log$  = logaritmo neperiano o logaritmo en base 2

## CAPITULO III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

### 3.1 Hipótesis General

*i)* La dinámica de la deforestación en el Santuario Histórico Bosque de Pómac y su Zona de Amortiguamiento, según el método de modelos estocásticos y teledetección, tendría una tendencia creciente.

### 3.2 Hipótesis Específicos

*i)* La dinámica de los Territorios Agrícolas y Urbanizados tendría una influencia significativa sobre la cobertura de Bosques Secos, según la metodología de modelos estocásticos y técnicas de teledetección.

*ii)* La gestión del SHBP tendría una influencia significativa sobre la cobertura de Bosques Secos, según la metodología de modelos estocásticos y técnica de teledetección.

*iii)* Podría existir una diferencia significativa entre el comportamiento del avance de los Territorios Agrícolas y Urbanizados en la zona de amortiguamiento del Santuario Histórico Bosque de Pómac y dentro de los límites de dicha ANP.

### **3.1 Identificación de Variables**

#### **3.1.1 Variables Independientes**

- i) La dinámica de los territorios Agrícolas y Urbanos.
- ii) La gestión del Área Natural Protegida.

#### **3.1.2 Variable Dependiente**

- i) La deforestación de Bosques Secos.

## **CAPITULO IV. METODOLOGÍA**

### **4.1 Área de Estudio**

#### **4.1.1 *Ubicación y Extensión***

El área de estudio comprende el ANP Santuario Histórico Bosque de Pómac (SHBP) y en su Zona de Amortiguamiento. Se encuentra limitada por las coordenadas 9292091.868883 m N en el norte, 9272459.746285 m N por el sur, 643207.305922 en el este, 626856.023219 m E por el oeste. Está ubicado en el distrito de Pítipo, provincia de Ferreñafe, departamento de Lambayeque a 31.5 km de la ciudad de Chiclayo; cuenta con una extensión total de 32101.038664 ha. y un perímetro de 71.966811 Km (Figura 15).

El área fue elegida para abarcar toda la extensión del ANP y su Zona de Amortiguamiento, de otra manera existiría el riesgo de perderse información, al realizarse los diferentes procesos que se utilizarán. Esta zona fue seleccionada, específicamente, porque el SHBP es un ANP que protege a la población de algarrobos más densa del planeta y su Zona de Amortiguamiento por tener que contar con tratamiento especial, por tanto, la deforestación en la zona analizada implicaría una mayor en otros casos, donde la protección a los ecosistemas de bosques secos sea menor o, en el peor de los escenarios, nula.

De la extensión total del área de estudio, el SHBP y su Zona de Amortiguamiento presentan una extensión total de 15184 ha., de las cuales 5 887 ha. pertenecen el ANP, de acuerdo con las cifras reportadas por el SERNANP.

#### **4.1.2 Características físicas del área de estudio**

**4.1.2.1 Geología.** El área se encuentra compuesta, en su mayoría, por depósitos aluviales y fluviales, formado por acumulación de grava, arena, limo y arcilla con clastos, acumulaciones de gravas, arenas, limos y arcillas transportadas en el cauce de río y quebradas; depósitos eólicos, compuesto por acumulación de arenas cuarzosas; grupo Goyllarisquizga, constituido por areniscas cuarzosas blanquecinas, limoarcillitas grises y niveles de carbón; formación Llama, que son brechas piroclásticas andesíticas gris violácea a moradas, tobas ácidas; formación Porculla , integrada por tobas andesíticas y riolíticas, gris blanquecinas, estas son brechas piroclásticas andesíticas así como lavas de esta misma composición; formación Tinajones, formado por Areniscas, brechas piroclásticas, conglomerados, limolitas y calizas impuras; en menor medida por formación Oyotún, creado por andesitas afaníticas a porfiríticas de color gris a gris oscura, brecha volcánicas clastos angulosos a sub angulosos andesíticos y areniscas rojas (Figura 16).

**4.1.2.2 Geomorfología.** La geomorfología del área de estudio está dada, en su mayor parte, por dunas con pendiente suave de 5%; en el mismo rango de pendiente se encuentra el lecho del río La Leche, que atraviesa la extensión de trabajo; también presenta estribaciones con pendiente fuerte, yendo desde los 25 a 60%, superando este intervalo en la parte más alta (Figura 17).

**4.1.2.3 Tipos de Suelos.** La zona está compuesta en su gran mayoría por un suelo tipo “Arenosol Háplico”, esto se refiere a que no posee un rasgo en especial en los suelos arenosos (FAO, 2007), que en términos utilizados en la actualidad se define como “Arenisol”; en una mínima cantidad se encuentra cubierto por un suelo tipo “Leptosol Lítico”, estos son poco profundos situados sobre roca continua (Figura

18) (FAO,2007), que en términos actuales se puede denominar a este tipo de suelos como “Entisol Lítico”.

**4.1.2.4 Fisiografía.** La zona está conformada por una Provincia Climática denominada Bosque Seco; dicha Provincia Climática se conforma por dos Gran Paisaje, la Llanura Fluvial del Rio La Leche y el Relieve Eólico Montañoso y Colinado; la Llanura Fluvial del Rio La Leche posee un solo Paisaje, que es el Valle Bajo del Rio La Leche, mientras que el Relieve Eólico Montañoso y Colinado posee los Paisajes Cerros Bajos y Colinas Bajas; por último, el Valle Bajo del Rio La Leche posee el Sub Paisaje de Pendiente Ligera con Drenaje Muy Pobre, los Cerros Bajos poseen el Sub Paisaje Pendiente Moderada con Drenaje Muy Pobre y las Colinas Bajas poseen los Sub Paisajes Pendiente Ligera con Drenaje Muy Pobre y Pendiente Moderada con Drenaje Muy Pobre (Figura 19).

De la fisiografía elaborada se logró determinar que el área no presenta un riesgo para habitar en ella, en cuanto a la geología, geomorfología o pendiente.

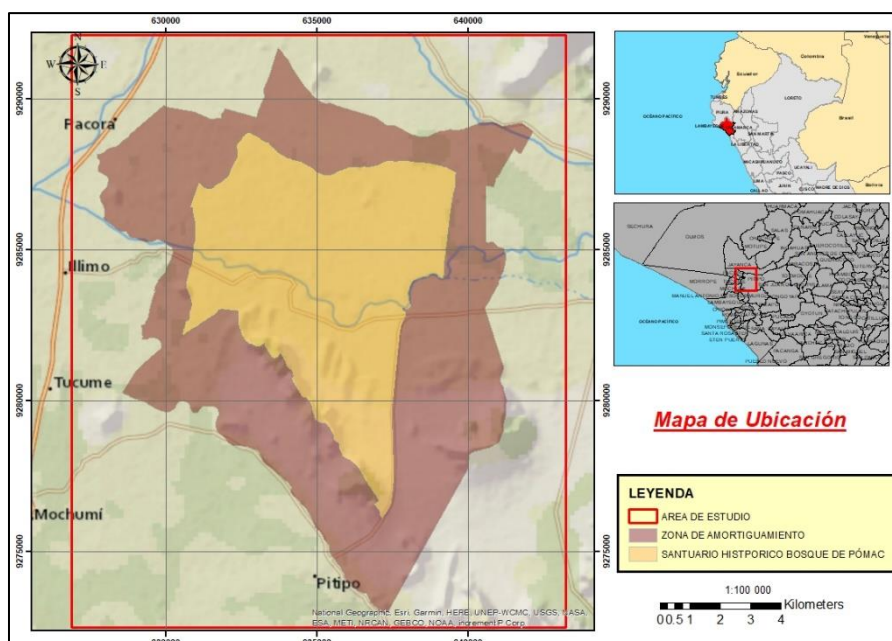


Figura 15. Mapa de Ubicación del área de estudio. Elaboración propia con datos del Servicio Nacional de áreas Naturales Protegidas por el estado (SERNANP) (2016).

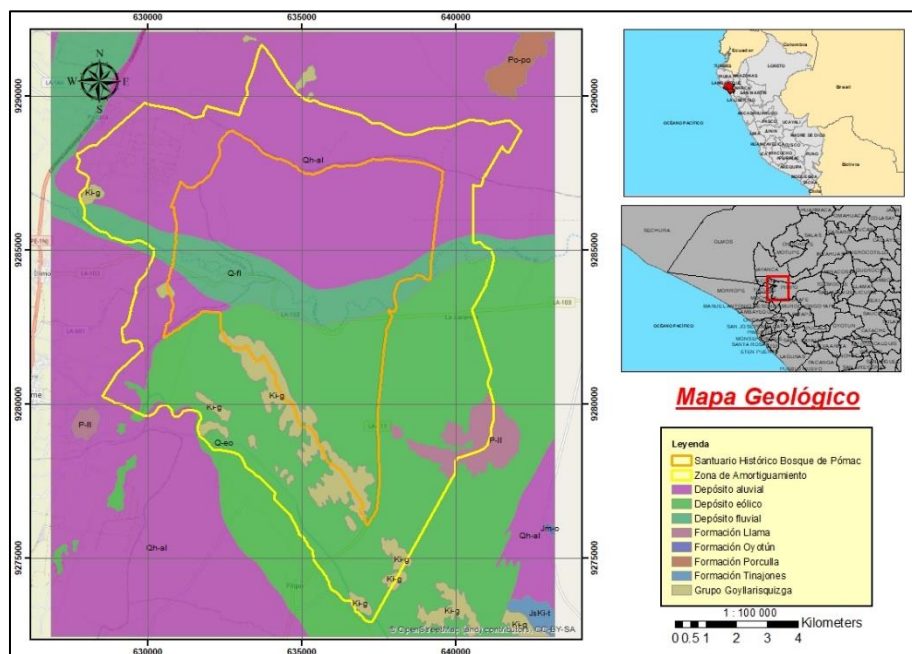


Figura 16. Mapa geológico del área de estudio. Elaboración propia con datos del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) (2014).

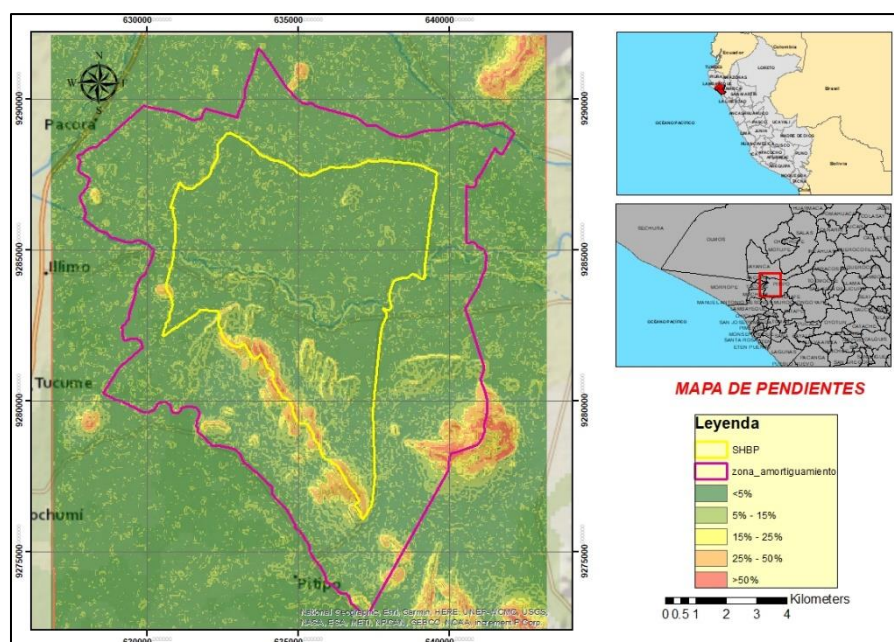


Figura 17. Mapa de pendientes del área de estudio. Elaboración propia con datos de la NASA (2005).

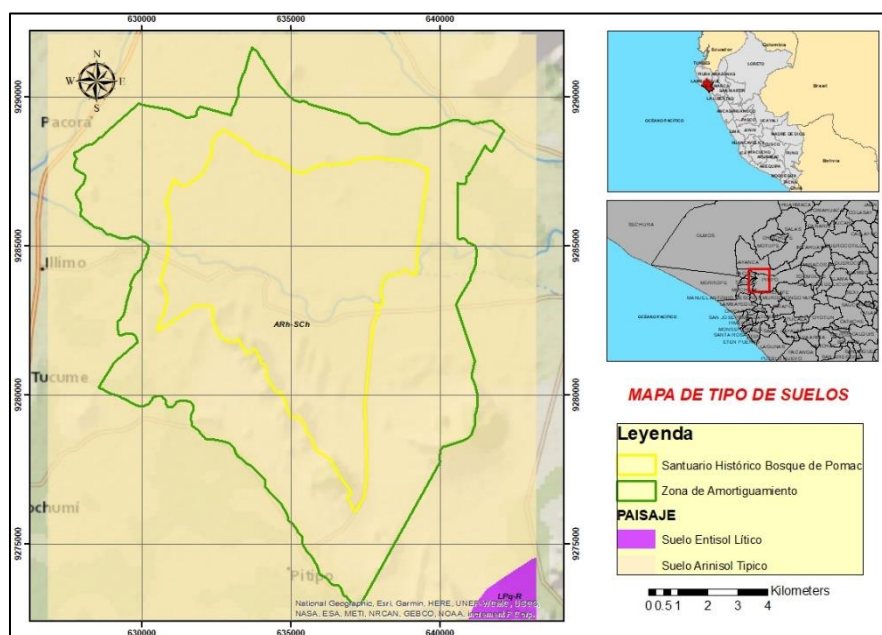


Figura 18. Mapa de tipos de suelo del área de estudio. Elaboración propia con datos de la MINAM (2012).

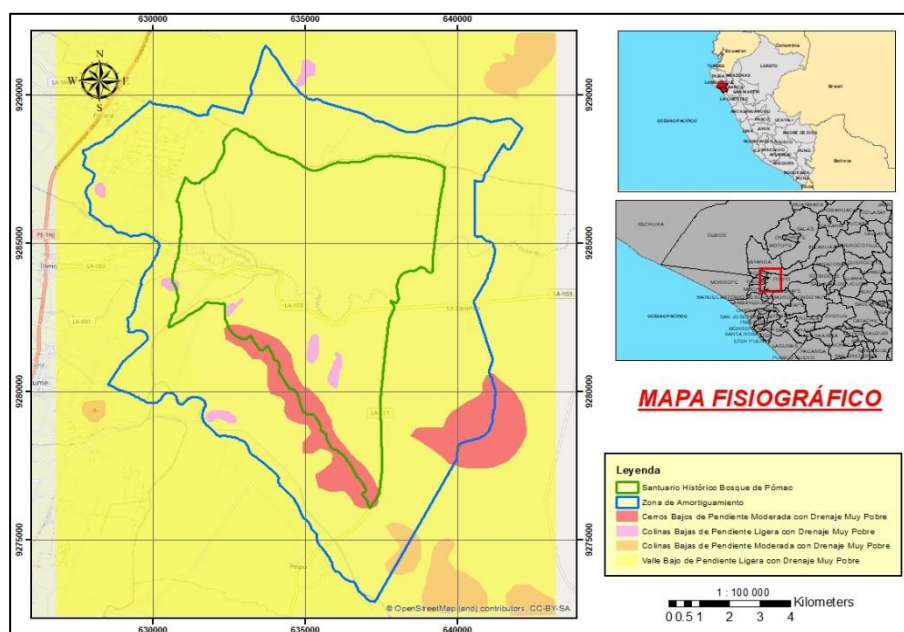


Figura 19. Mapa fisiográfico del área de estudio. Elaboración propia.

## **4.2 Datos**

### ***4.2.1 Temporalidad del Estudio***

El estudio se realizó en los meses que componen la estación de verano (diciembre a marzo), debido a que la cantidad de precipitación en el área de estudio es mayor, lo cual permite identificar produce que las hojas de las especies vegetativas destaquen en comparación con el color del suelo y así sea más fácil la ubicación tanto de los árboles como de los arbustos que componen los bosques secos.

El mosaico satelital del año que sirvió de base para la elección de los demás años involucrados en el estudio fue la del año 2019, ya que en tal año se inició con la investigación del área de interés de la presente investigación y se deseó que fuera lo más actualizada posible (para dicho entonces). Se tuvo en cuenta la precipitación media de la estación de verano, en milímetros, para el año 2019, y se seleccionaron los años que posean una precipitación media, en época de verano, similar al año 2019.

El año inicial se ajustó a la creación del SHBP, debido a que las políticas de conservación establecidas para las ANP, en teoría, tendrían que haber modificado el dinamismo de la deforestación en la zona. Sumado al criterio mencionado anteriormente, se estableció el 2001 de inicio, habiendo tenido como opciones 2000, 2001 y 2002, sin embargo, por la similitud entre las precipitaciones medias de la estación de verano de dichos años, se definió el año 2001 como inicio del estudio.

Inicialmente se tenía en mente realizar una sola proyección; pero, debido a que en el intervalo elegido hubo un grave problema de deforestación, y posterior reforestación, se tuvo que implementar otra proyección, para comparar los modelos

a futuro considerando los procesos de deforestación y reforestación. Este nuevo modelo integrado permitió crear un escenario en el que no se hubieran dado los procesos de pérdidas y regeneración de bosques dentro del SHBP.

Como fecha final de la primera predicción se eligió el año 2010, debido a que, luego de una visualización en la plataforma Google Earth, se identificó que entre 2009, 2010 y 2011 se observó la máxima deforestación dentro del SHBP; tras una comparación de las precipitaciones medias de los años mencionados, se determinó que el 2010 era el indicado para realizar la proyección al año 2019.

Ya definidos los años usados para la realizar las 2 proyecciones, se necesitaron seleccionar 2 años más que serían utilizados en la realización de la validación. Se eligieron, como alternativas, fechas que se encuentran aproximadamente en la mitad de los intervalos que se usarán al crear los escenarios a futuro y que tengan la mayor similitud en cuanto a precipitaciones medias en la estación de verano.

Por lo mencionado, se escogió de entre años 2005, 2006 y 2007 a fin de validar la primera predicción, siendo elegido el mosaico del año 2006, ya que dicho en ese año la precipitación media en la estación de verano fue más cercana a la precipitación del año 2019 que ; para el segundo modelo se tuvo como alternativas las fechas 2014, 2015 y 2016, siendo descartado el 2014 por su muy baja cantidad de precipitación en la estación de verano; sin embargo, al no contar con información de 2015 y 2016, se eligió el año 2016 debido a que la información presentó mayores similitudes al mosaico del año 2019, a nivel visual, en Google Earth.

Cuadro 5. *Precipitaciones medias en la estación de verano de los años seleccionados y de los no seleccionados.*

| AÑO           | 2000 | 2001 | 2002 | 2005 | 2006 | 2007 | 2009 | 2010 | 2011 | 2014 | 2019 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| PP media (mm) | 0.41 | 1.01 | 1.41 | 0.25 | 0.83 | 1.04 | 0.75 | 1.24 | 1.52 | 0.02 | 1.03 |

Fuente. Elaboración propia con datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

#### 4.2.2 Imágenes Satelitales

El uso de mosaicos de imágenes satelitales fue por causa de la alta nubosidad que presenta la zona en la estación de verano, este procedimiento garantizó que haya la menor cantidad de nubes posible dentro del área de estudio; sin embargo, debido a la inevitable pérdida de información por nubes, se requirió de la plataforma Google Earth, la cual ayudó a orientar la edición y en la validación sirvió como conocimiento de la realidad.

Cuadro 6. *Imágenes satelitales de insumo para elaboración de mosaicos.*

| AÑO  | MOSAICO DE IMÁGENES      | USO           |
|------|--------------------------|---------------|
| 2001 | LANDSAT-5                | CLASIFICACIÓN |
| 2001 | ASTER                    | VALIDACIÓN    |
| 2007 | LANDSAT-5                | CLASIFICACIÓN |
| 2007 | ASTER Y GOOGLE EARTH     | VALIDACIÓN    |
| 2010 | LANDSAT-7                | CLASIFICACIÓN |
| 2010 | GOOGLE EARTH             | VALIDACIÓN    |
| 2016 | LANDSAT-7                | CLASIFICACIÓN |
| 2016 | GOOGLE EARTH             | VALIDACIÓN    |
| 2019 | LANDSAT-8                | CLASIFICACIÓN |
| 2019 | PERUSAT-1 Y GOOGLE EARTH | VALIDACIÓN    |

Fuente. Elaboración propia.

Las imágenes Landsat y Aster fueron descargadas de la plataforma Google Earth Engine (<https://code.earthengine.google.com/>), a través de un script previamente realizado por la página web Gis and Beers (GIS & Beers, 2018) y modificado para cumplir con los requerimientos de la investigación; por otro lado, la imagen PeruSat-1 fue obtenida gracias a la Agencia Espacial del Perú – CONIDA (Figura 20 y Figura 21).

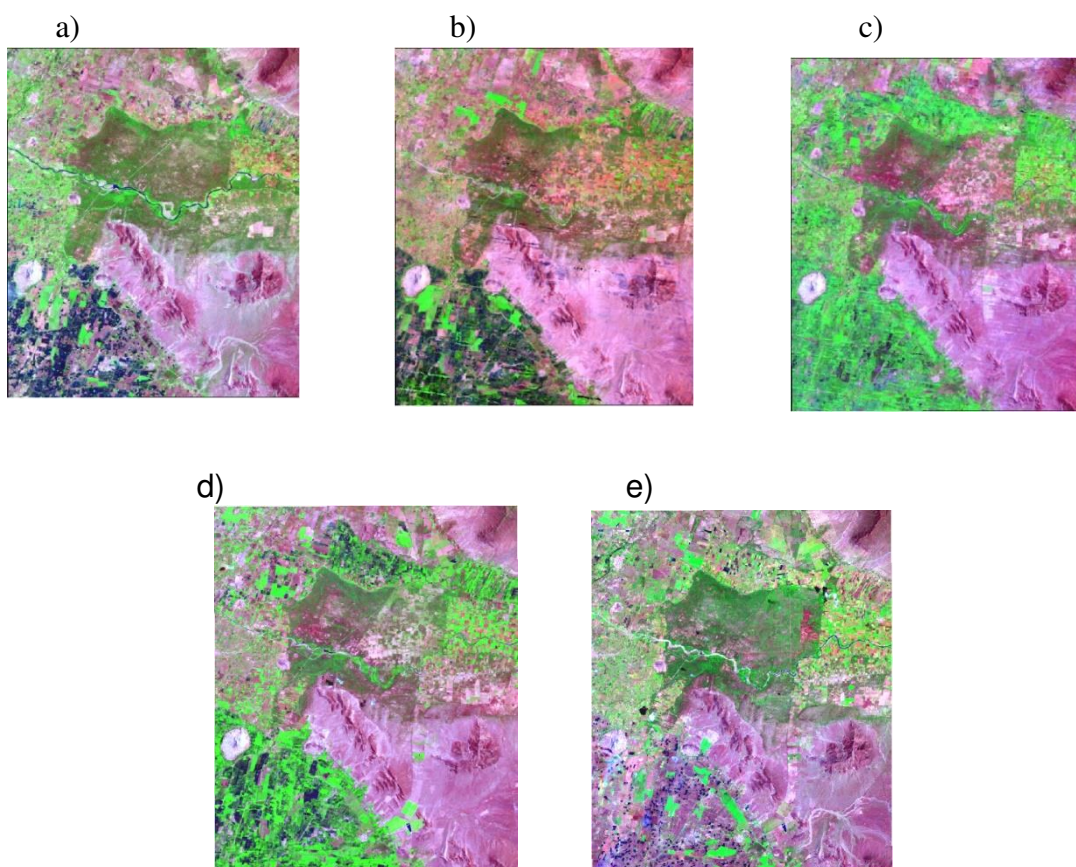


*Figura 20.* Mosaicos elaborados para solucionar el problema nubosidad con combinación de bandas SWIR-NIR-GREEN: a)2001, b)2007, c)2010, d)2016, e)2019. Google Earth Engine.

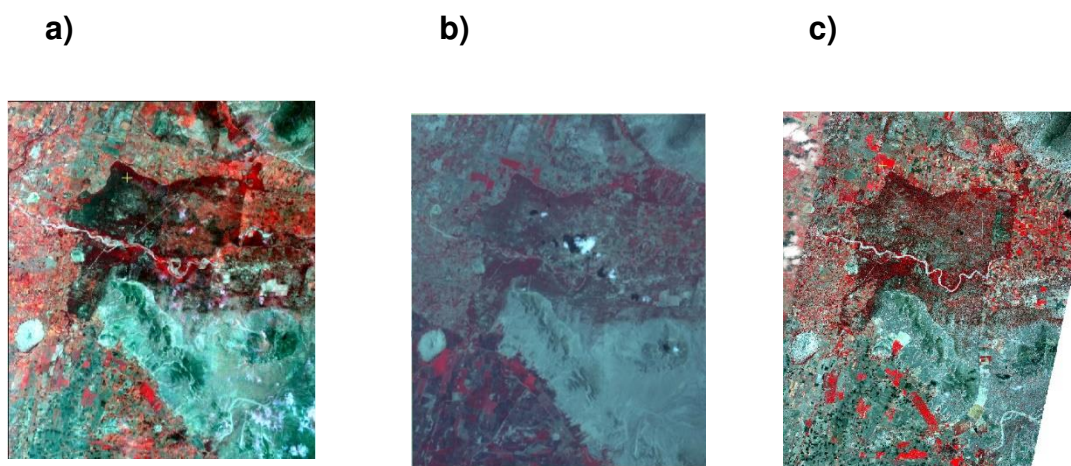


Figura 21. Mosaicos libres de nubes para con combinación de bandas NIR-RED-GREEN para validar las clasificaciones realizadas: a)2001, b)2007, c)2010, d)2016, e)2019. Google Earth Engine, CONIDA (2019).

### 4.2.3 Factores que influye en la Deforestación.

**4.2.3.1 Elevación.** Este factor se eligió debido a que la altura del terreno está vinculada a su acceso, así también se establecerá relación entre los cultivos y la elevación promedio en la que suelen darse. Esta información se obtuvo del satélite ASTER y se representó en un Modelo de Elevación Digital (DEM), el cual brinda la elevación media de cada píxel ubicado en la zona, que poseen una resolución espacial de 12.5 m; sin embargo, se realizó un cambio del tamaño del píxel a 30 m, mediante el software IDRISI Selva, para que los datos sean concordantes y se determine de manera más precisa la influencia en la deforestación (Figura 22).

**4.2.3.2 Pendientes.** Este factor se eligió debido a que los lugares llanos son más probables de ser ocupados por la actividad antrópica, así también se establecerá relación entre los cultivos y las pendientes en las que suelen darse. Para representar este factor se creó un mapa de pendientes a partir del DEM mencionado en el párrafo anterior, mediante la herramienta *Slope*, del software ArcGIS 10.4, dándoles un valor

de pendiente, por píxel, en porcentaje, además de otorgarle una resolución de 30 m. para guardar congruencia con toda la información utilizada (Figura 17).

**4.2.3.3 Proximidad a Vías.** Este factor influye de manera que la cercanía a vías brinda facilidad de acceso y posterior ocupación; por lo tanto, mientras menor sea la distancia a las vías, la probabilidad de deforestación será mayor. Para su representación fue creado un mapa de proximidad a vías, mediante la herramienta *Distance*, del software IDRISI Selva, usando como base la información brindada por el Instituto Nacional de Estadística e Informática, la cual fue validada para garantizar la existencia de las vías en la plataforma Google Earth (Figura 23). Cada píxel del mapa de proximidad se encuentra representado en metros de distancia a la vía más cercana; posee una resolución espacial de 30 m, para guardar concordancia con el resto de información utilizada.

**4.2.3.4 Mapa de Proximidad a Centros Poblados.** Este factor influye debido a que los centros poblados, tarde o temprano, necesitarán expandirse; por lo tanto, mientras menor sea la distancia a los centros poblados, la probabilidad de deforestación será mayor. Para su representación fue creado un mapa de proximidad a centros poblados, mediante la herramienta *Distance*, del software IDRISI Selva, usando como base la información brindada por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) de los censos del 2007 y del 2017 (Figura 24). Cada píxel del mapa de proximidad se encuentra representado en metros de distancia al centro poblado más cercano; posee una resolución espacial de 30 m, para guardar concordancia con el resto de información utilizada.

**4.2.3.5 Límites del SHBP.** Este factor influye debido a que el área ubicada dentro de los límites del SHBP se encuentra protegida lo cual quiere decir que será un factor limitante para la deforestación que, en teoría, tendría que ponerle un alto a la pérdida de bosques dentro del ANP (Figura 25). Para representar el factor de los límites del SHBP se procedió a crear un mapa que diferencia entre el ANP y el área que no es ANP, con una resolución espacial de 30 m. para que no haya conflictos

entre las dimensiones de los diferentes factores utilizados para determinar la deforestación.

**4.2.3.6 Temperatura Media.** Este factor influirá debido a que, tanto los cultivos como los bosques, están estrechamente vinculados a las condiciones climáticas, esta temperatura se determinó para cada píxel. Para esto se obtuvo un mapa de precipitaciones medias históricas de la página de la organización wordlclim (<https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html#>), la cual realizó la temperatura media desde el año 1975 hasta el 2020 (Figura 26).

**4.2.3.7 Precipitación Media.** Este factor influirá de igual manera que la temperatura media. Para analizar este factor se realizó un mapa de precipitaciones medias históricas con una resolución espacial de 30 m. y así pueda analizarse junto al resto de información que también posee una resolución espacial de 30 m., para lo cual se obtuvo información de la página worldclim (<https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html#>), la cual realizó la media desde el año 1975 hasta el 2020 (Figura 27).

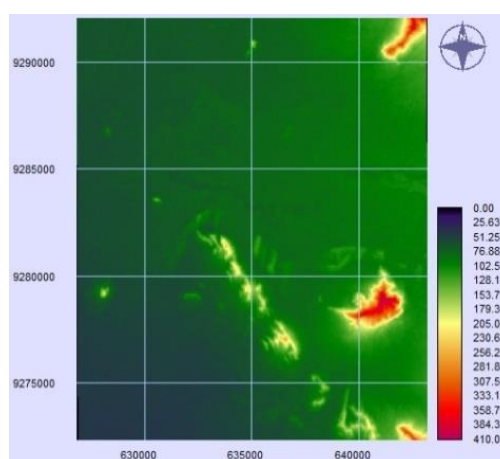


Figura 22. Modelo de elevación digital. Elaboración propia con datos de la NASA (2005).

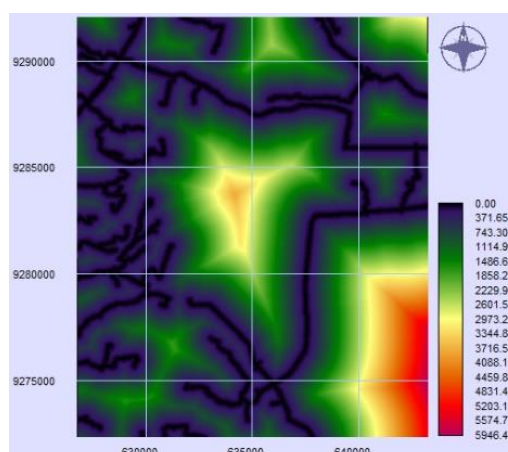


*Figura 23.* Mapa de proximidad a vías. Elaboración propia con datos obtenidos del INEI (2017)

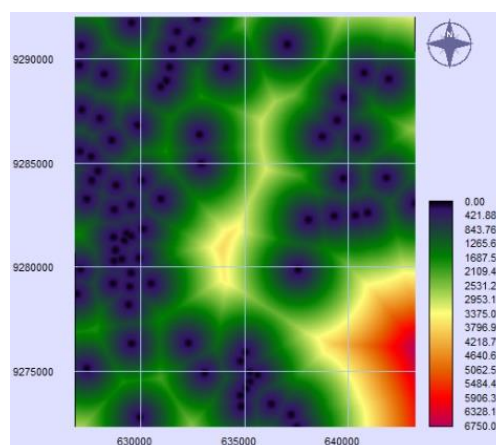


*Figura 24.* Mapa de proximidad a centros poblados. Elaboración propia con datos obtenidos del INEI (2017).

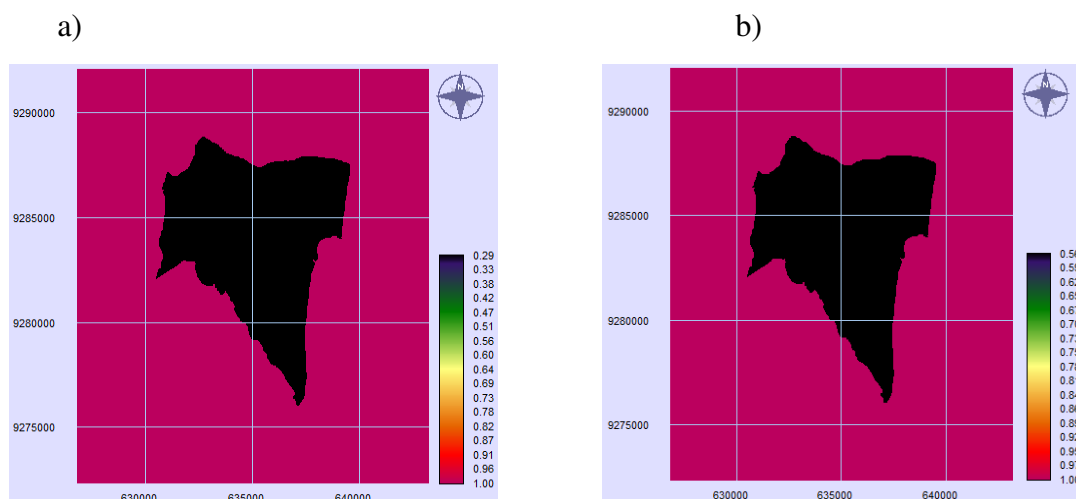


*Figura 25.* Mapa del Santuario Histórico Bosque de Pómac: a) deforestación año 2009, b) perturbación en el año 2016. Elaboración propia con datos obtenidos del SERNANP (2017).

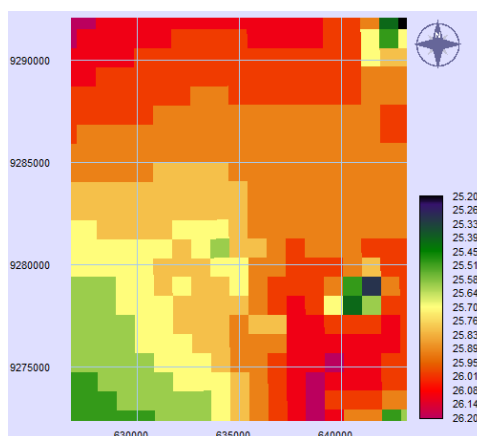


*Figura 26.* Mapa de temperatura media. Worldclim.

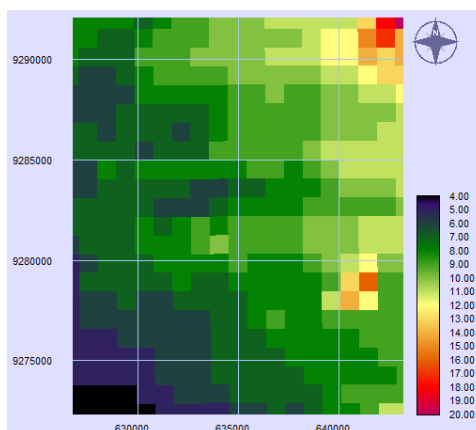


Figura 27. Mapa de precipitación media. Worldclim.

### 4.3 Generación de Mapas de Cobertura de Suelo

La clasificación de las imágenes se realizó por un sistema propio; sin embargo, una vez realizada esta, con el objetivo de minimizar errores al momento de la clasificación no supervisada, propio del proceso, ya que las firmas espectrales de las diferentes clases iniciales poseían fuertes similitudes), se procedió definir las clases resultantes como subclases de otra clasificación, basada en la metodología CORINE Land Cover, uniéndolas a la clase que les correspondiera, esto para lograr un menor error posteriormente, ya que la mayor confusión se presenta entre subclases de la misma clase.

#### 4.3.1 Selección de Clases de Cobertura de Suelo

**4.3.1.1 Clasificación Preliminar.** Debido a la similitud entre las firmas espectrales de diversas clases, se necesitó de esta clasificación inicial, esto porque se podrá mejorar en gran medida la precisión final del proyecto si se subdividen las

clases hasta un punto en donde puedan identificarse las confusiones. Las clases preliminares serán las siguientes:

*i) **Bosque Seco Denso.*** Las especies vegetativas que componen esta clase son, en su mayoría por árboles cuyo follaje cubre más del 70% de la superficie del suelo, por lo general de la especie Algarrobo, como se identificó en el mapa de distribución de especies en el SHBP del año 2015 (Tafur Rojas, 2017).

En la imagen no presentan un color uniforme, encontrándose variaciones entre ciertos píxeles, esto por causa de la filtración de la radiación a través de las hojas del follaje. La imagen presenta una textura granulosa; sus límites no son uniformes debido a su carácter natural (Figura 28).

*ii) **Área Cultivada.*** Esta clase presenta especies vegetativas propias de actividades antrópicas que cubren la superficie del área total de estudio en más del 50%. La zona contiene cultivos de maíz (Espinoza Núñez, 2002), así como también tiene cultivos de arroz, de acuerdo con distintas autoridades como el Ministerio de Salud del Perú (MINSA), la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), el Proyecto Vigía y la Organización Panamericana de la Salud (OPS) (Vélez Guevara, 2008).

En la imagen estas áreas tienen un color uniforme, que podrían perder la intensidad; pero, esta pérdida se da de igual modo gradual y no representa cambios bruscos del tono debido a que los cultivos se realizan de forma sincronizada, entonces las superficies de las plantas reflejarán la energía de condición equivalente, por encontrarse en la misma etapa de su vida; en cuanto a la textura, es de carácter liso propia de las especies vegetativas que presentan un tamaño semejante. Los límites de las áreas cultivadas suelen darse de manera análoga, ya que dichos límites son de origen antrópico (Figura 29).

**iii) Suelo en Descanso.** Esta clase posee un suelo trabajado para realizar el cultivo. En la imagen se representa con un color uniforme; aunque, suelen encontrarse rezagos de la clase Área Cultivada; tiene una textura lisa que se atribuye a que la superficie ha sido labrada con el objetivo de realizar la cosecha de las especies vegetativas o a fin de obrar el cultivo de estas; presentan límites definidos debido a su origen antrópico. Su firma espectral presenta una ligera disminución de la banda 1 a la banda 2, donde comienza un aumento exponencial con pico en la banda 6, por último, disminuye hasta la banda 8 (Figura 30).

**iv) Área Cultivada Muy Húmeda.** Esta clase se identifica de igual manera que el Área Cultivada, siendo la única diferencia que los cultivos se encuentran inundados por el método de siembra que se realizan con las especies vegetativas que se ubican en dicha área. La vegetación que conforma esta clase en la zona de estudio, por lo general, es el arroz (Vélez Guevara, 2008) (Figura 31).

**v) Río.** En esta clase está contenida el río La Leche, cuya cuenca baja atraviesa el Santuario Histórico Bosque de Pómac. Fue determinada pos-clasificación en todas las imágenes, salvo en la imagen del año 2001, debido a que en dicho momento el río se distinguió hasta un punto en donde era posible su clasificación y corrección, mientras que en los otros años la confusión de la presente con la clase de Área de Cultivo Muy Húmedo era tanta que se realizó la selección de toda la clase a través del Índice de Diferencia de Agua Normalizada (NDWI), además del apoyo visual mediante la combinación SWIR-NIR-GREEN.

**vi) Vegetación Herbácea o Arbustiva.** Esta clase posee vegetación de tipo herbácea y arbustiva, por lo que el 30% de la superficie estará compuesta por la mencionada cobertura y el otro 70% por suelo desnudo, siendo los espacios entre especies vegetativas menores al área cartografiable. La flora predominante es de tipo cactal, tal como se identificó en el mapa de distribución de especie en el SHBP del año 2015 (Tafur, 2017). En la imagen se distingue la cobertura en mejor medida, que resulta más oscuro que el que se observa en la clase Bosque Seco Ralo; no se cuentan con límites definidos debido a que esta clase es de origen natural; presenta una textura

lisa, lo que se da por que las especies vegetativas están dispersas en la zona de estudio (Figura 32).

**vii) Bosque Seco Ralo.** Esta clase está compuesta por vegetación arbórea que cubre menos del 70% de la superficie, esto sucede porque las especies vegetativas presentan menor frondosidad, que se encuentran más distanciadas; aunque, en ciertos sectores del SHBP, se debe a que es una vegetación secundaria, joven que fue reforestada tras la invasión sufrida dentro del ANP (SERNANP, 2017). En la imagen se puede visualizar la vegetación con un color inconstante, por esto los pixeles de suelo entre la clase tienen una textura granulosa, debido a la misma razón que el Bosque Seco Denso; los límites de las áreas, al ser de carácter natural, no poseen límites muy marcados, en cambio son irregulares (Figura 33).

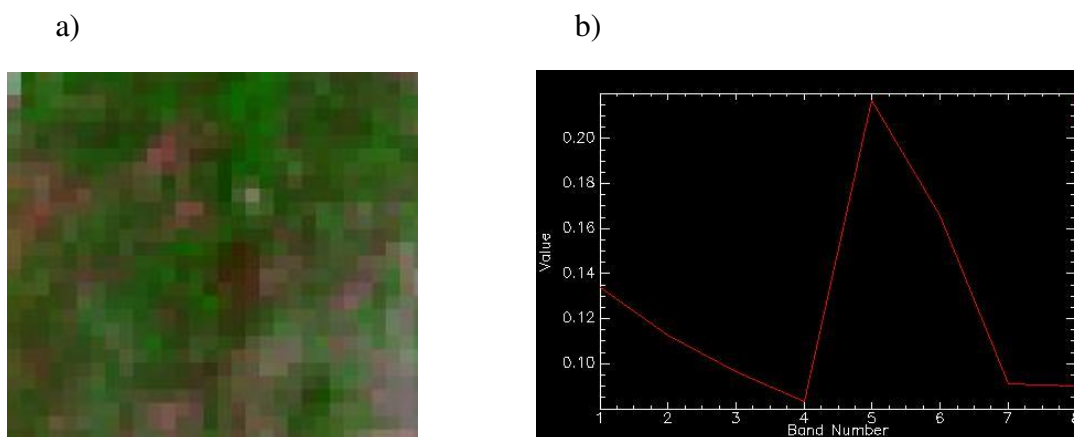


Figura 28. a) Muestra ejemplo de Bosque Seco Denso, b) firma espectral promedio de los ROI seleccionados para realizar la clasificación del Bosque Seco Denso. Software ENVI 5.3

a)



b)

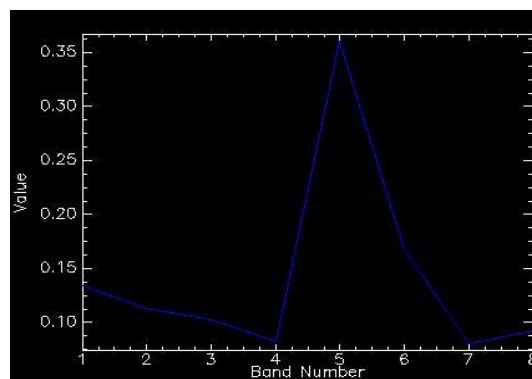


*Figura 29. a) Muestra ejemplo Área Cultivada en combinación SWIR-NIR-GREEN, b) firma espectral promedio de los ROI seleccionados para realizar la clasificación del Área Cultivada. ENVI 5.3*

a)



b)

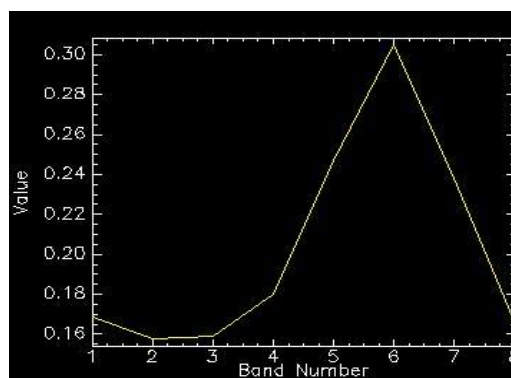


*Figura 30. a) Muestra ejemplo de Suelo en Descanso en combinación SWIR-NIR-GREEN, b) firma espectral promedio de los ROI seleccionados para realizar la clasificación del Suelo en Descanso. ENVI 5.3*

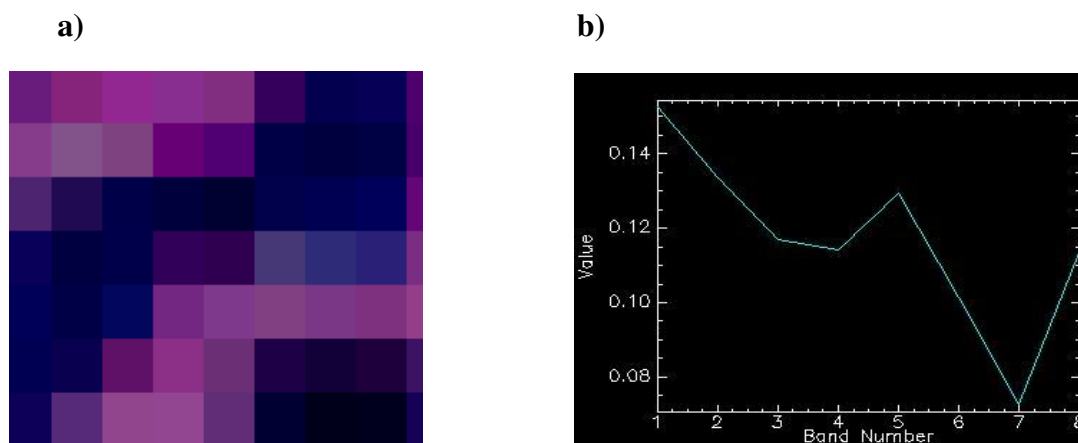


*Figura 31. a) Muestra ejemplo de Área Cultivada muy Húmeda en combinación SWIR-NIR-GREEN, b) firma espectral promedio de los ROI seleccionados para realizar la clasificación del Área Cultivada muy Húmeda. ENVI 5.3.*

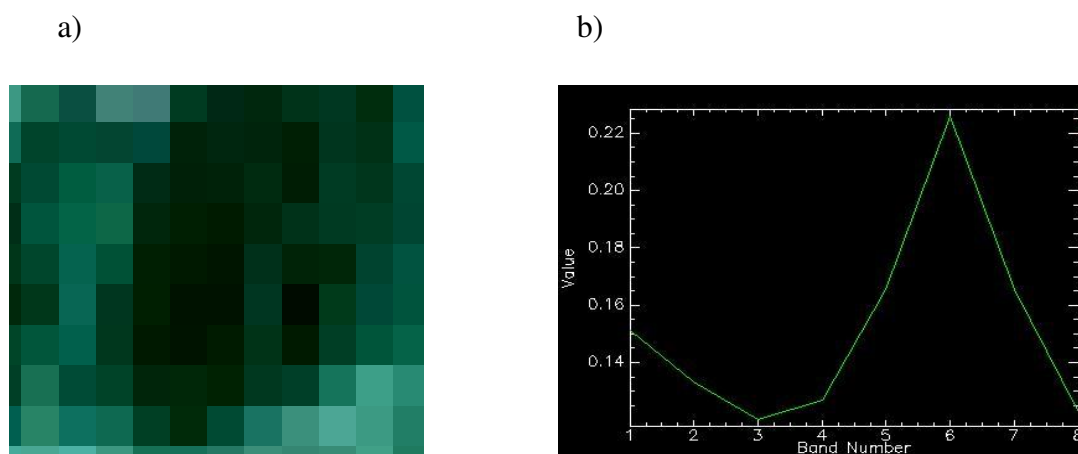


*Figura 32. a) Muestra ejemplo de Vegetación Herbácea y Arbustiva en combinación NIR-RED-GREEN, b) firma espectral promedio de los ROI seleccionados para realizar la clasificación del Vegetación Herbácea y Arbustiva. ENVI 5.3.*

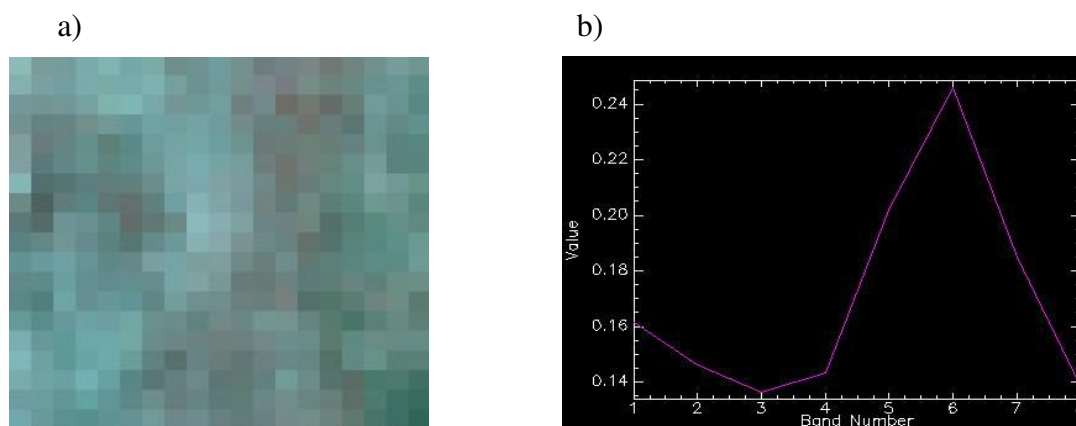


Figura 33. a) Muestra ejemplo de Bosque Seco Ralo en combinación NIR-RED-GREEN, b) firma espectral promedio de los ROI seleccionados para realizar la clasificación del Bosque Seco Ralo. ENVI 5.3.

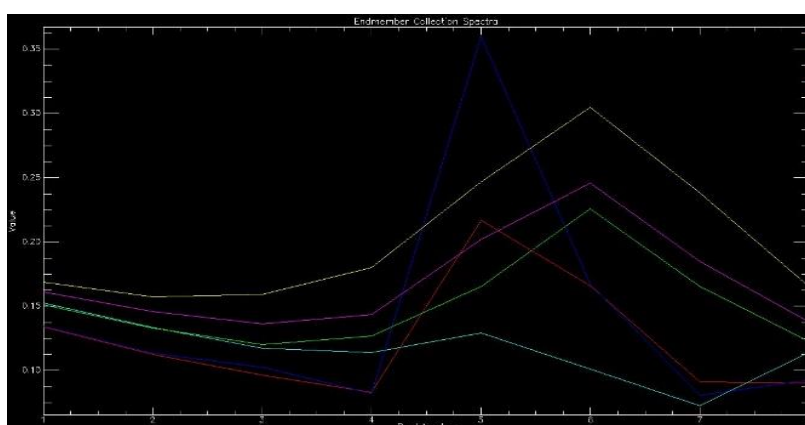


Figura 34. Comparación de firmas espectrales promedio de los ROI seleccionados para realizar la clasificación de las imágenes. ENVI 5.3.

**4.3.1.2 Clasificación Definitiva.** Esta clasificación se dio basándose en la metodología CORINE Land Cover, específicamente, se usaron clases del primer, segundo y tercer nivel de dicha metodología. Las clases usadas fueron:

i) ***Bosques Secos.*** Ya que la clasificación no admite una visualización precisa de la vegetación, lo cual dificulta la diferenciación entre las distintas especies contenidas en la zona de estudio, se unió el Bosque Seco Denso, Bosque seco Ralo y Vegetación Herbácea o Arbustiva a la clase Bosques Secos, lo que permite agrupar dichas clases en una sola que no requiera especificar la flora, sino solo disposición. Para simplificar el nombre se le denominó solo “BOSQUE” durante los distintos procesos que se realizaron mientras duró la metodología.

ii) ***Territorios Agrícolas y Urbanizados.*** Esta clase es la única que se usará combinando dos clases de primer nivel de la metodología CORINE Land Cover, esto ya que ambas son propias de la actividad antrópica y esta es la que representa la intención de la investigación. Se unieron las sub-clases Áreas de Cultivo, Suelo en Descanso y Áreas de Cultivo Muy Húmedas (que se encuentran inundadas) . Se le denominara “ANTRÓPICO”, para abreviar el nombre, en los procesos a realizar a lo largo de la metodología.

iii) ***Río.*** Solo involucra la sub-clase de su mismo nombre, esta no se agrupo a otra clase ya que presenta cambios, a pesar de ser su carácter natural, los cuales no están vinculados a la actividad antrópica, lo cual no permite que se englobe a las otras dos coberturas. Debido a que se denomina de manera breve será denominado de la misma manera, es decir, RIO.

#### **4.3.2 Clasificación de Imágenes**

La clasificación de los mosaicos se realizó mediante dos tipos de clasificaciones, tanto supervisada como no supervisada. La clasificación no supervisada se ejecutó utilizando el método de *K-Means*, del software libre SNAP, de la Agencia Europea. En este caso, se crearon un total de 30 *clases*, con 200 *iteraciones* y *random seed* de 31 415, también se usaron todas las bandas de las imágenes para así poder obtener una mayor diferenciación entre clases.

La clasificación supervisada se probó con dos métodos, por *árboles de decisión* y *Máxima Probabilidad*, ambos procedimientos fueron realizados en el software ENVI 5.3. Para realizar dichas clasificaciones se requirió de entrenar los modelos, ingresando áreas que representen ejemplos de las clases que finalmente compondrán el mapa resultado (ROI).

Para la ejecución de la clasificación por árboles de decisión se necesitó del uso del software IDL, el cual brindó los valores de los píxeles contenidos en los ROI a partir de los cuales se procedió a hallar los rangos que determinarán la pertenencia a cada clase, para esto se requirió del software R Studio. Ya realizado el anterior proceso se ingresaron los rangos al software ENVI 5.3, donde se ejecutó la clasificación. Para realizar la clasificación supervisada se utilizó el método de Máxima Probabilidad, que solo requirió de los ROI's elaborados previamente, el cual se elaboró en el software ENVI 5.3.

Una vez obtenidos los resultados se determinó que la clasificación supervisada sería más factible. Teniendo en cuenta que las clasificaciones tuvieron productos muy similares, se optó por la clasificación supervisada por Máxima Probabilidad, debido a que esta solo necesitaría de un software para su elaboración y optimizaría el tiempo de trabajo.

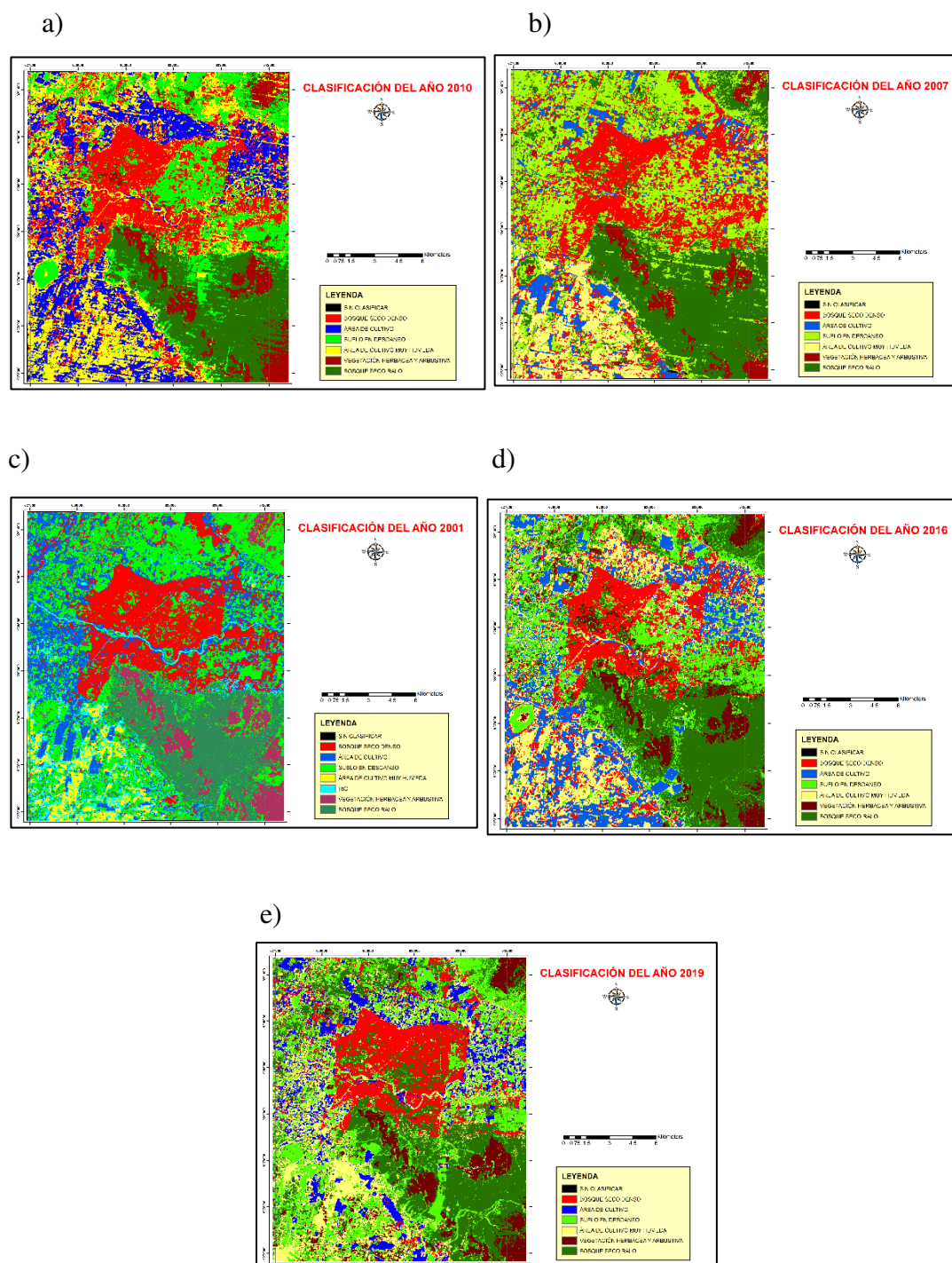


**Figura 35. a) Clasificación del año 2001, b) Clasificación del año 2007, c) Clasificación del año 2010, d) Clasificación del año 2016, e) Clasificación del año 2019. ENVI 5.3.**

### **4.3.3 Refinación de los Mapas Clasificados**

Luego de realizar la clasificación se obtuvieron los resultados esperados, teniendo algunas confusiones entre diferentes clases debido a similitudes en la firma espectral entre estas (Figura 34), por esto se procedió a convertir el ráster a formato vectorial en el software ArcGIS 10.4, en el cual se realizó todo el proceso de refinación de los mapas.

Una vez realizada la conversión se hizo una diferenciación inicial entre vegetación y no vegetación, por medio del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) del mismo mosaico analizado, el cual fue realizado mediante el software ENVI 5.3. Esto permitió diferenciar los bosques secos de la agricultura en gran medida, debido a que el NDVI de estas dos clases resulta diferente y a su vez ayuda a separar las zonas, donde el cultivo es muy ralo, de una falsa clasificación de la vegetación herbácea o arbustiva.

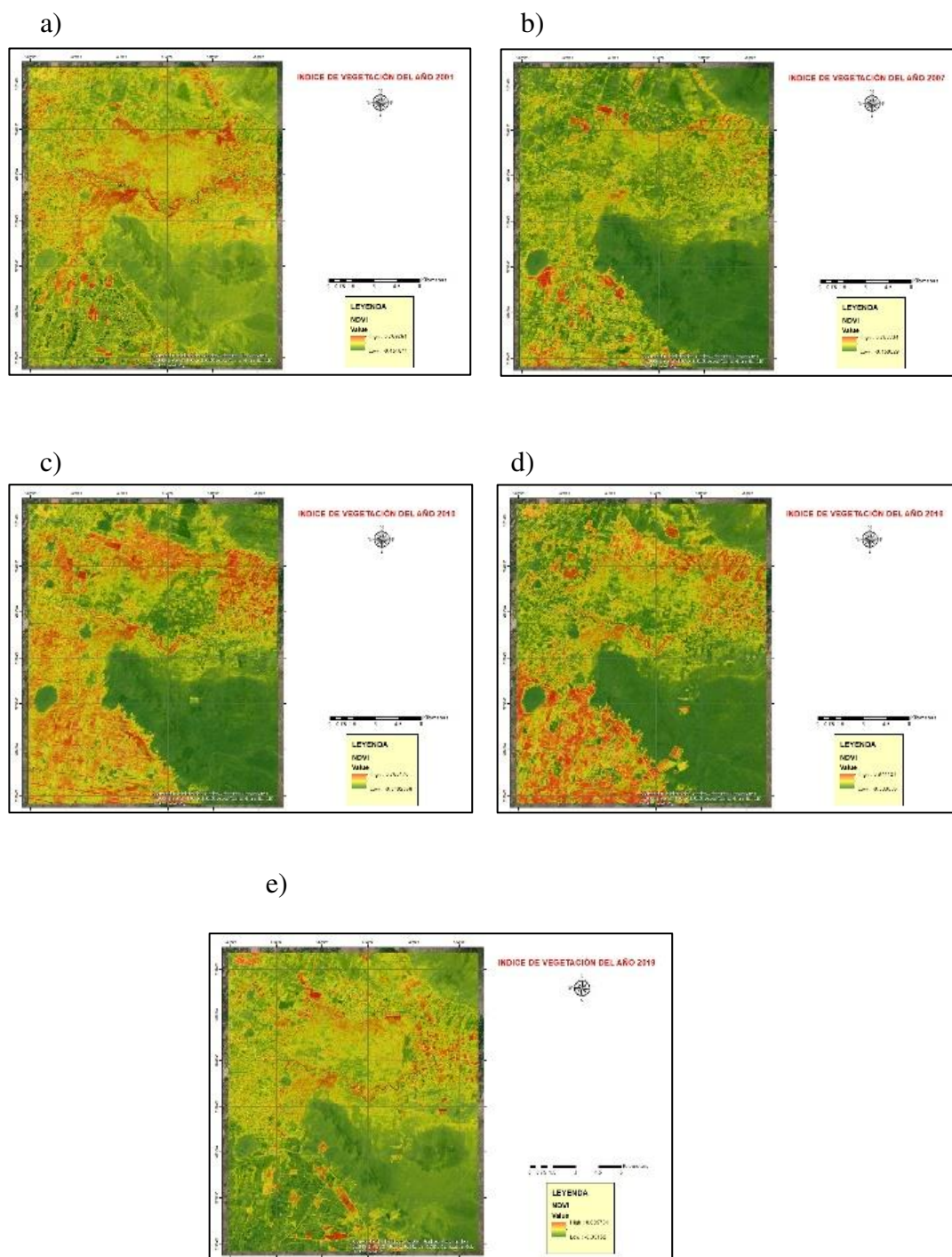


**Figura 36. Índices de Vegetación de Diferencia Normalizada del: a) año 2001, b) año 2007, c) año 2010, d) año 2016, e) año 2019. Elaboración Propia.**

Para definir completamente las clases con vegetación se requirió apoyo de la combinación B6-B4-B2 en los mosaicos Landsat-5 y B7-B5-B3 en Landsat-8, esta

combinación permitió resaltar la vegetación de bosque seco. Luego se procedió a identificar las áreas cultivadas mediante la combinación de bandas 4-3-2 en la imagen Landsat-5 y Landsat-7 y B5-B4-B3 en la imagen Landsat-8.

Ya definidas las clases de Áreas de Cultivos y de Bosque Seco, tanto Ralo como Denso, se procedió a distinguir entre los Suelos Desnudos y la Vegetación Herbácea o Arbustiva. Esta se realizó con la combinación B5-B4-B1 en Landsat-5 y Landsat-7 y B6-B5-B2 en la imagen Landsat-8, dicha combinación permitió distinguir entre tipo de suelos. Para definir las clases definitivamente se usó la combinación B6-B4-B2 en Landsat-5 y Landsat-7 y B7-B5-B3 en Landsat-8, que permitió identificar los diferentes estados de vegetación y así diferenciar lo natural de lo antrópico.

La clase Río se refinó utilizando el Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI), con el que se pudo resaltar las superficies con mayor humedad y así poder distinguir de manera más correcta el curso del agua. Cabe mencionar que, en ciertos mosaicos, el tamaño del río era muy pequeño para extraer muestras de él, por ende, los resultados no eran muy precisos en esta clase, debido a esto no se le consideró en la clasificación inicial y se agregó en la refinación de los productos, como se mencionó también anteriormente.

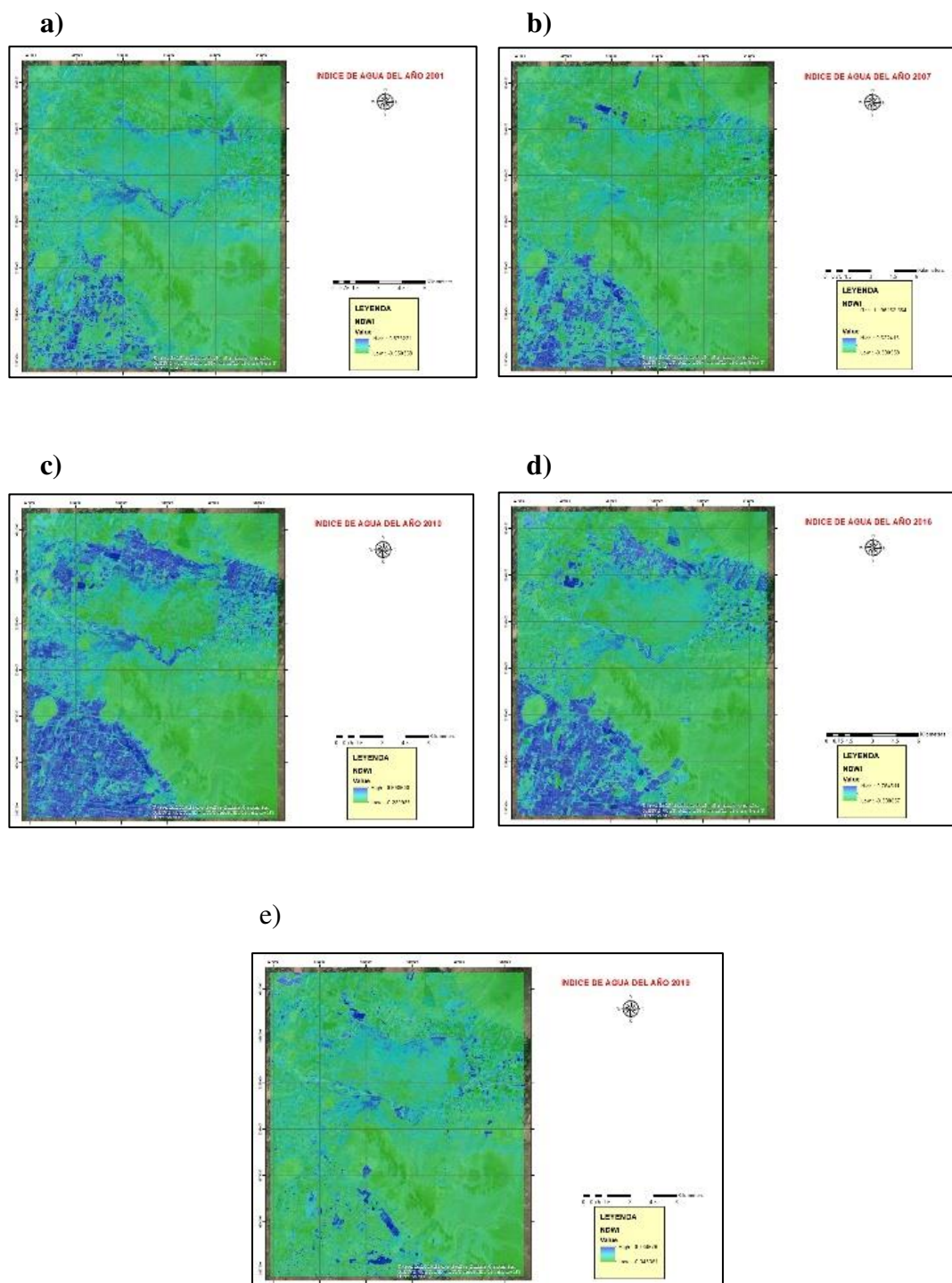


**Figura 37. Índices de Agua de Diferencia Normalizada: a) año 2001, b) año 2007, c) año 2010, d) año 2016, e) año 2019. Elaboración Propia.**

Como último paso de esta parte se realizó un suavizado de los mapas, esto para eliminar los píxeles sueltos y así mejorar la interpretación del mapa. Se utilizó el módulo *Focus* del software PCI Geomática, a fin de realizar este procedimiento, específicamente la herramienta *SIEVE*, donde se analizó la imagen en vecindarios de 3x3 píxeles, debido a que la modificación de los resultados fue mínima al elegir dicho tamaño de grupo de píxeles.

Ya obtenidos los mapas finales se procedió a reclasificarlos, mediante la herramienta *Reclass*, del software IDRISI Selva, para adecuar la clasificación preliminar a la definitiva. Una vez realizada la reclasificación se extrajeron las áreas pertenecientes a cada clase (Cuadro 7).

Cuadro 7. Cobertura de suelo, en hectáreas, para los diferentes años clasificados.

| AÑO/CLASE   | BOSQUE | ANTRÓPICO | RIO |
|-------------|--------|-----------|-----|
| <b>2001</b> | 17 641 | 14 334    | 159 |
| <b>2007</b> | 15 871 | 16 195    | 116 |
| <b>2010</b> | 14 896 | 17 044    | 174 |
| <b>2016</b> | 14 855 | 17 104    | 154 |
| <b>2019</b> | 15 035 | 16 893    | 185 |

Fuente. Elaboración propia.

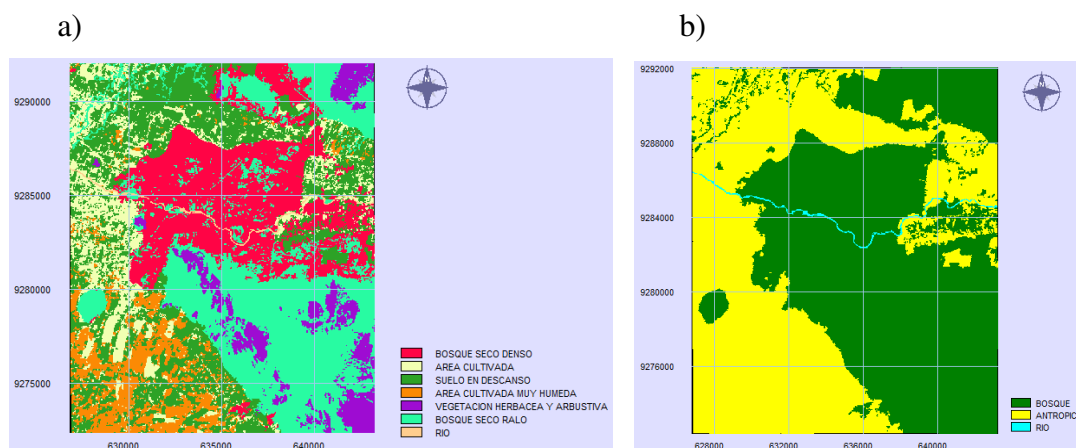


**Figura 38. a) Mapa preliminar del año 2001, b) Mapa definitivo del año 2001.** Elaboración Propia.

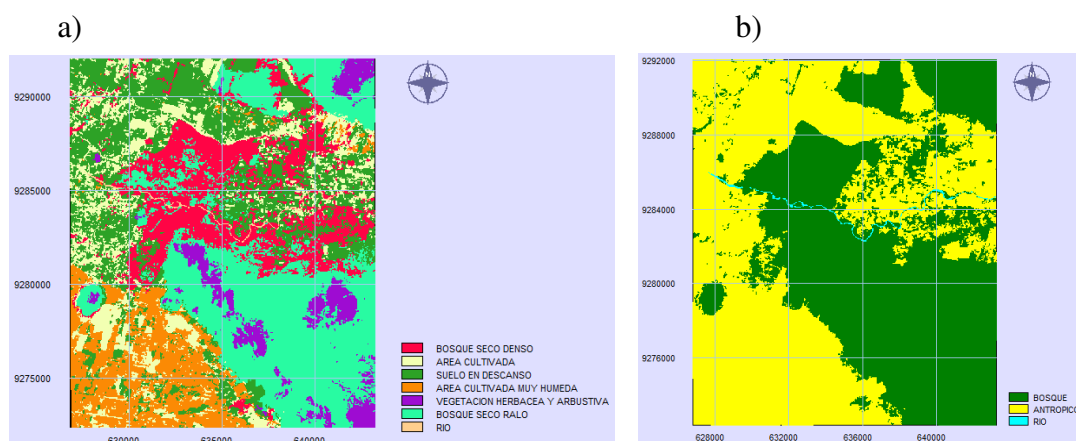
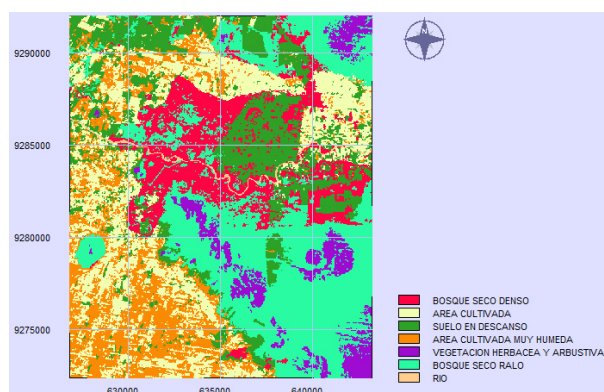


**Figura 39. a) Mapa preliminar del año 2007, b) Mapa definitivo del año 2007.** Elaboración propia.

a)



b)

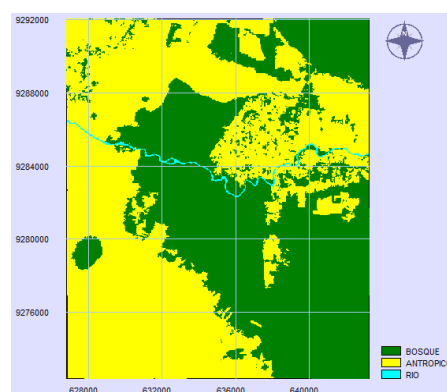
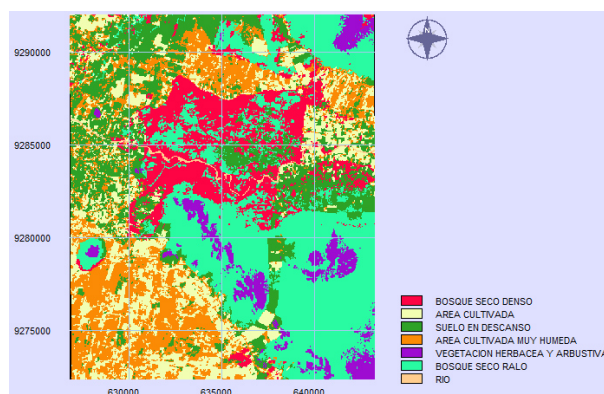


*Figura 40. a) Mapa preliminar del año 2010; b) Mapa definitivo del año 2010. Elaboración propia.*

a)



b)

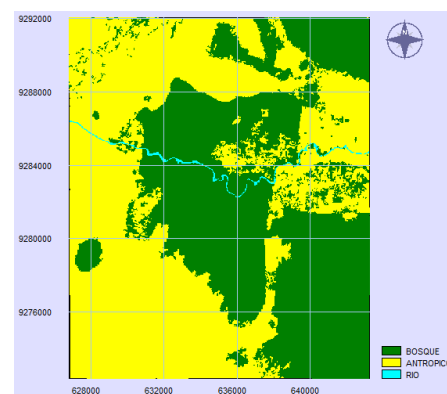


*Figura 41. a) Mapa preliminar del año 2016; b) Mapa definitivo del año 2016. Elaboración propia.*

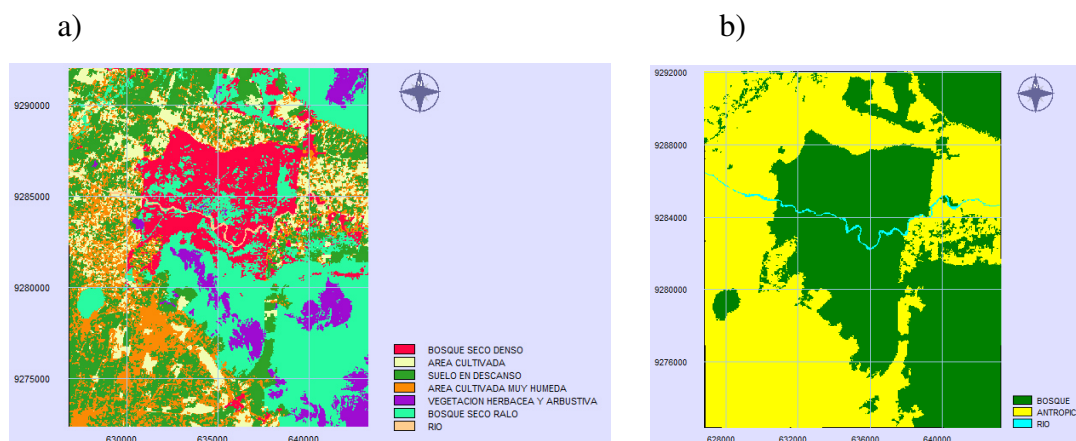


Figura 42. a) Mapa preliminar del año 2019; b) Mapa definitivo del año 2019. Elaboración propia.

#### 4.3.4 Validación de los Mapas Clasificados mediante el Índice Kappa

La validación de todos los mapas se realizó utilizando imágenes satelitales de mayor resolución espacial a las utilizadas para la realización de los mapas de cobertura de suelos (MINAM, 2014). Dicha validación fue realizada mediante el índice Kappa, determinándose un número de puntos de validación, por clase, a partir de la siguiente fórmula:

$$N = \frac{z^2 * p * q}{E^2} \dots (\text{ecuación 34})$$

Donde:  $z$  = Abscisa de la curva normal para un determinado nivel de confianza

$p$  = Probabilidad de acierto

$q$  = Probabilidad de error (1- $p$ )

$E$  = Error estimado

Se eligieron para este proyecto un nivel de confianza del 95% y un error estimado del 5%, según el protocolo de validación de la exactitud temática del mapa de

deforestación (MINAM,2014); para este nivel de confianza se tiene una abscisa de la curva normal de 1.96 (Chuvieco, 1995).

Los puntos se distribuyeron alrededor de toda el área de la clase, para esto se requirió de la herramienta *Random Points*, del software ArcGIS 10.4, este proceso se aplicó a todas las clases, por separado. Una vez creados se les fue asignados el número correspondiente a sus clases y, adicionalmente, se les creó un nuevo campo llamado VAL, en el que se procedió a llenar con la clase a la que pertenece en la imagen de validación. Una vez determinados los valores de cada punto, tanto en la clasificación como en las imágenes de validación, se obtuvo una matriz de confusión por año.

Debido a que se tienen dos clasificaciones se tuvo que decidir a cuál clasificación se validará, lo cual se decidió calculando puntos aleatorios dentro de las 7 clases preliminares del año 2001 (Figura 43) y a las 3 clases de la clasificación permanente de dicho momento (Figura 44). Una vez realizado esto se calculó la matriz de confusión perteneciente a los puntos de las 7 clases (Cuadro 8), donde se verificó que las mayores confusiones estaban entre sub-clases pertenecientes a la misma clase, por lo que se resumieron los datos de dicho cuadro a una de 3 clases (Cuadro 9) y luego se comparó las matrices de confusión resultantes (Cuadro 10). Para todo este proceso de validación se utilizó un mosaico de imágenes Aster en el periodo de 22-12-2000 hasta 30-05-2001 como referencia de la realidad.

De los procedimientos anteriormente mencionados se obtuvo como *índice kappa* el valor de 0.687 para el Cuadro 8, que posteriormente logró gran mejora al resumirlo, brindando de *índice kappa* un 0.939, obtenido del Cuadro 9, mismo valor que el resultado de la Cuadro 10. Por estos datos se decidió que resultaría más eficiente determinar puntos aleatorios solo para la clasificación de 3 clases debido a que con menos trabajo se llegaría al mismo valor.

Cuadro 8. Matriz de confusión para los puntos de la muestra en el mapa preliminar del año 2001.

| CLASE                                    | BOSQUE SECO DENSO (Bosque) | ÁREA CULTIVADA (Antropico) | SUELO EN DESCANSO (Antropico) | ÁREA CULTIVADA MUY HÚMEDA (Antropico) | VEGETACIÓN HERBÁCEA O ARBUSTIVA (Bosque) | BOSQUE SECO RALO (Bosque) | RIO (Rio) | TOTAL |
|------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------|-----------|-------|
| BOSQUE SECO DENSO (Bosque)               | 140                        | 4                          | 5                             | 0                                     | 0                                        | 15                        | 1         | 165   |
| ÁREA CULTIVADA (Antropico)               | 3                          | 102                        | 40                            | 3                                     | 0                                        | 5                         | 1         | 154   |
| SUELO EN DESCANSO (Antropico)            | 2                          | 96                         | 179                           | 6                                     | 0                                        | 3                         | 0         | 286   |
| ÁREA CULTIVADA MUY HÚMEDA (Antropico)    | 0                          | 22                         | 50                            | 44                                    | 0                                        | 0                         | 0         | 116   |
| RIO (Rio)                                | 0                          | 0                          | 0                             | 0                                     | 92                                       | 2                         | 0         | 94    |
| VEGETACIÓN HERBÁCEA O ARBUSTIVA (Bosque) | 8                          | 7                          | 2                             | 0                                     | 7                                        | 279                       | 1         | 304   |
| BOSQUE SECO RALO (Bosque)                | 0                          | 1                          | 0                             | 0                                     | 0                                        | 0                         | 7         | 8     |
| TOTAL                                    | 153                        | 232                        | 276                           | 53                                    | 99                                       | 304                       | 10        | 1127  |

Fuente. Elaboración Propia.

Cuadro 9. Matriz de confusión para los puntos de la muestra del año 2001 resumida del Cuadro 8.

| CLASE            | Bosque | Antropico | Rio | TOTAL |
|------------------|--------|-----------|-----|-------|
| <b>Bosque</b>    | 543    | 18        | 2   | 563   |
| <b>Antropico</b> | 13     | 542       | 1   | 556   |
| <b>Rio</b>       | 0      | 1         | 7   | 8     |
| <b>TOTAL</b>     | 556    | 561       | 10  | 1127  |

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 10. *Matriz de confusión para los puntos de la muestra del mapa definitivo del año 2001.*

|           | BOSQUE | ANTRÓPICO | RIO | TOTAL |
|-----------|--------|-----------|-----|-------|
| BOSQUE    | 363    | 17        | 1   | 381   |
| ANTRÓPICO | 5      | 375       | 0   | 380   |
| RIO       | 1      | 0         | 7   | 8     |
| TOTAL     | 369    | 392       | 8   | 769   |

Fuente. Elaboración propia.

Para validar el mapa del año 2007 se utilizó un mosaico Aster, realizado con imágenes de entre el 21-12-2016 hasta el 30-05-2017, además, se usó la plataforma Google Earth en la validación de 3 puntos ubicados bajo una nube que se presentaba en la información utilizada (Figura 45). Ya obtenida la validación se procedió a calcular la matriz de confusión (Cuadro 11), posteriormente se calculó el *índice Kappa*, obteniendo un resultado de 0.88, aunque menor al anterior, aún indica una clasificación casi perfecta.

Cuadro 11. *Matriz de confusión para los puntos de la muestra del año 2007.*

|           | BOSQUE | ANTRÓPICO | RIO | TOTAL |
|-----------|--------|-----------|-----|-------|
| BOSQUE    | 357    | 25        | 2   | 384   |
| ANTRÓPICO | 17     | 366       | 1   | 384   |
| RIO       | 2      | 0         | 4   | 6     |
| TOTAL     | 376    | 391       | 7   | 774   |

Fuente. Elaboración propia.

Para el año 2010 se usó la plataforma Google Earth alternando las fechas de marzo y mayo, en caso de que la zona presente nubosidad en el área de interés (Figura 46).

Una vez realizada la validación de los puntos, se procedió a crear la matriz de confusión (Cuadro 12) y luego se realizó el cálculo del *índice Kappa*, el cual dio como resultado un valor de 0.924, definiendo así una clasificación casi perfecta.

Cuadro 12. *Matriz de confusión para los puntos de la muestra del año 2010.*

|           | BOSQUE | ANTRÓPICO | RIO | TOTAL |
|-----------|--------|-----------|-----|-------|
| BOSQUE    | 371    | 11        | 0   | 382   |
| ANTRÓPICO | 17     | 366       | 0   | 383   |
| RIO       | 2      | 0         | 6   | 8     |
| TOTAL     | 390    | 377       | 6   | 773   |

Fuente. Elaboración propia.

Para el año 2016 se calcularon los valores teniendo como referencia la plataforma Google Earth, alternando entre el mes de marzo y mayo del año antes mencionado cuando se presentan nubes en la zona a validar (Figura 47). Se creó la matriz de confusión (Cuadro 13) y luego se procedió a calcular el *índice Kappa*, el cual nos dio un valor de 0.908, esto determina un nivel de casi perfecta a la clasificación de dicha fecha.

Cuadro 13. *Matriz de confusión para los puntos de la muestra del año 2016.*

|           | BOSQUE | ANTRÓPICO | RIO | TOTAL |
|-----------|--------|-----------|-----|-------|
| BOSQUE    | 369    | 13        | 0   | 382   |
| ANTRÓPICO | 21     | 361       | 0   | 382   |
| RIO       | 2      | 0         | 5   | 7     |
| TOTAL     | 392    | 374       | 5   | 771   |

Fuente. Elaboración propia.

Para el año 2019 se calcularon los valores usando como referencia, en su mayoría, dos escenas PeruSat-1 del mes de marzo; sin embargo, en el caso de ciertos puntos que se encontraban fuera del rango de la zona adquirida y en las secciones sin información por cobertura de nubes, se utilizó la plataforma Google Earth en el proceso de validación, utilizando imágenes obtenidas en el mes de marzo del 2019 (Figura 48). A partir de los datos obtenidos se creó la matriz de confusión (Cuadro 14) y luego se procedió a calcular el valor del *índice kappa*, que fue de 0.924, lo que determina un nivel de clasificación de casi perfecto en el mapa validado.

Finalmente, una vez obtenidos el índice Kappa para cada mapa se procedió a resumir los valores obtenidos en un cuadro comparativo, donde se muestra la alta precisión de cada mapa, siendo los años 2010 y 2019 los mas precisos y el 2007 el menos preciso de todos (Cuadro 15)

Cuadro 14. *Matriz de confusión para los puntos de la muestra del año 2019.*

|           | BOSQUE | ANTRÓPICO | RIO | TOTAL |
|-----------|--------|-----------|-----|-------|
| BOSQUE    | 374    | 6         | 2   | 382   |
| ANTRÓPICO | 20     | 363       | 0   | 383   |
| RIO       | 2      | 0         | 7   | 9     |
| TOTAL     | 396    | 369       | 9   | 774   |

Fuente. Elaboración propia.

Cuadro 15. *Cuadro resumen de índices Kappa para la clasificación de cada año.*

| AÑO          | 2001  | 2007 | 2010  | 2016  | 2019  |
|--------------|-------|------|-------|-------|-------|
| ÍNDICE KAPPA | 0.939 | 0.88 | 0.924 | 0.908 | 0.924 |

Fuente. Elaboración propia.

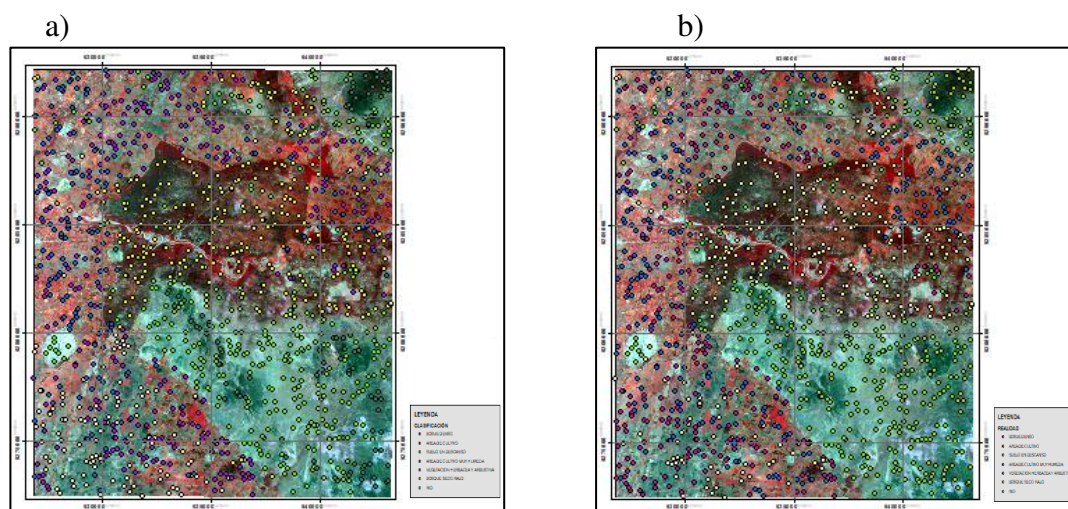


**Figura 43. Validación de la clasificación preliminar del año 2001: a) valores de los puntos de validación en el mapa clasificado, b) valores de los puntos de validación en la realidad.**

Elaboración propia con datos obtenidos de Google Earth Engine.

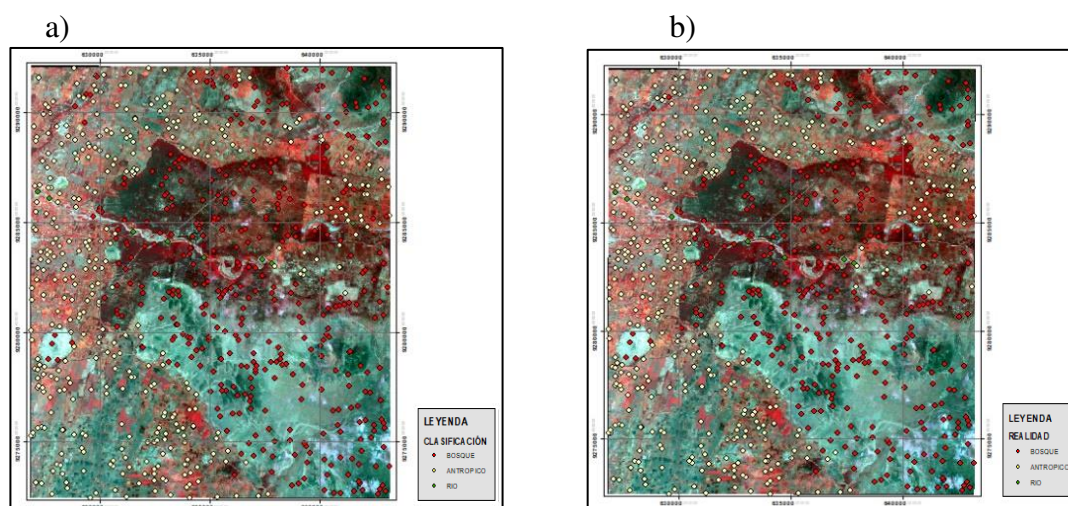


**Figura 44. Validación de la clasificación definitiva del año 2001: a) valores de los puntos de validación en el mapa clasificado, b) valores de los puntos de validación en la realidad.**

Elaboración propia con datos de Google Earth Engine.

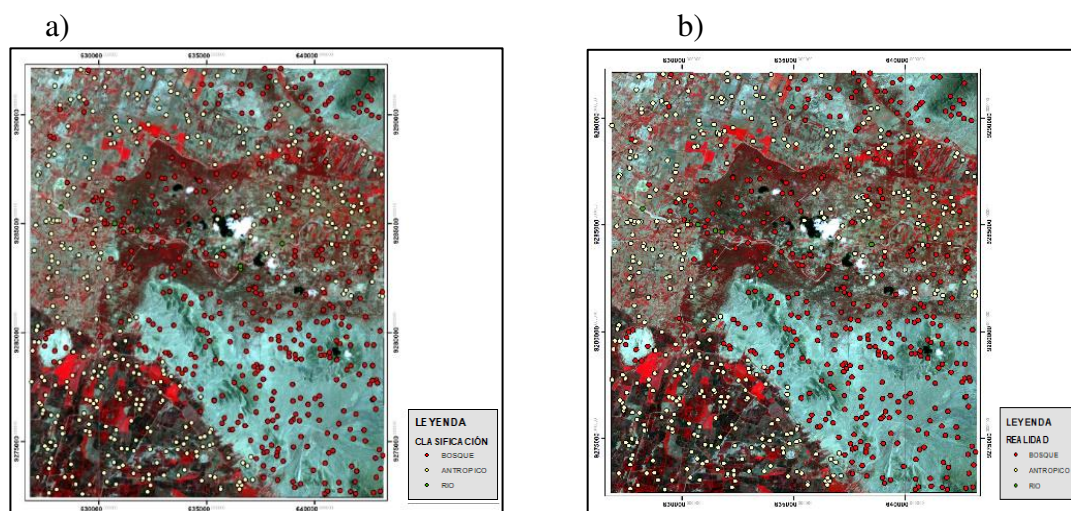


**Figura 45. Validación de la clasificación definitiva del año 2007: a) Valores de los puntos de validación en el mapa clasificado, b) Valores de los puntos de validación en la realidad.** Elaboración propia con datos de Google Earth Engine.

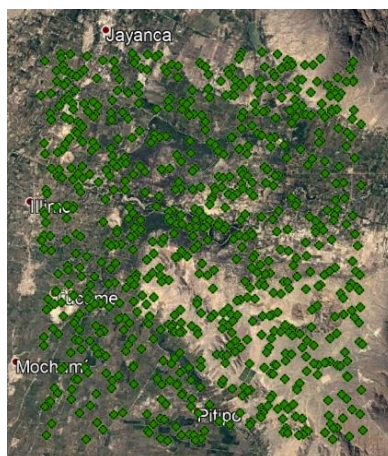


**Figura 46. Distribución de puntos de validación del año 2010.** Elaboración propia con datos de Google Earth.

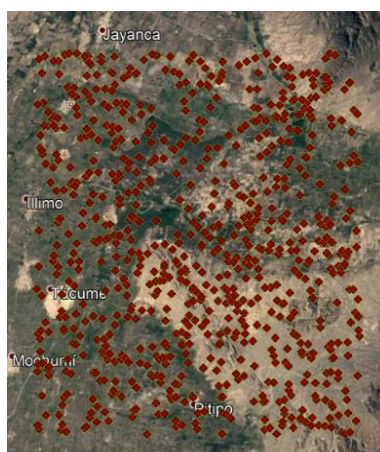


**Figura 47. Distribución de puntos de validación del año 2016.** Elaboración propia con datos de Google Earth.

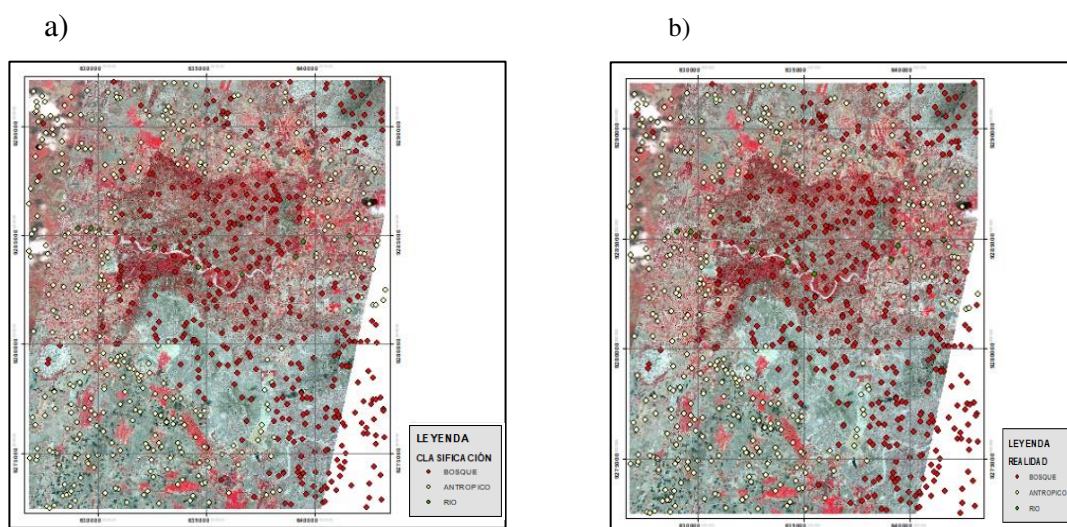


**Figura 48. Validación del mapa del año 20019: a) Valores de los puntos de validación en el mapa clasificado, b) Valores de los puntos de validación en la realidad.** Elaboración propia con datos de CONIDA.

### 4.3.5 Creación de Proyecciones

Se realizaron 3 proyecciones a futuro con la intención de obtener diversas alternativas e intentar predecir el avance de la deforestación, desde diferentes puntos de vista, además se creó 3 proyecciones a futuro adicionales, que sirvieron en el fin de realizar la validación de los primeros mencionados. Debido a que las proyecciones se repitieron para un mismo año (2019 y 2037) ambos años contaron con distintos escenarios (3 escenarios en el año 2019 y 2 escenarios en el 2037). Las proyecciones se realizaron mediante el uso del módulo Land Change Modeler: ES del software IDRISI Selva, debido a que es uno de los dos modelos recomendados por el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), para ejecutar proyecciones con respecto a temas ambientales (Epple, Williamson, Thorley, 2012); se eligió este modelo por ser el más amigable con el usuario de pocos conocimientos en programación.

Antes de realizar los distintos procesos que se realizaron en el software Idrisi Selva se requirió convertir los datos *.TIF* al formato *.RST*, nativo del software IDRISI Selva. Esto se logró tras convertir los datos *.TIF* al tipo *ASCII*, utilizando el software ArcGIS 10.4, posteriormente se utilizó la herramienta *ArcRaster*, del software IDRISI Selva, con el fin de usar la opción *ArcInfo raster ASCII format to Idrisi* y así obtener archivos de tipo *.RST*. Luego, se procedió a aplicar la normalización de los mapas, debido a que el software así lo requiere y de otro modo las imágenes no podrán ser procesadas por el módulo que será utilizado, este paso se realizó con la herramienta *Resample* del software IDRISI Selva.

**4.3.5.1 Escenario 1 proyectado para el año 2019.** Esta proyección se creó, usando el año 2001 como inicio y 2010 como fin, para estimar la cobertura del SHBP y su Zona de Amortiguamiento, en caso de no haberse frenado la invasión y realizado un proceso de reforestación dentro del ANP antes mencionada. Cabe mencionar que los procesos realizados serán replicados en las demás proyecciones.

i) Lo primero que se realizó fue ejecutar la pestaña *Modelador de Cambio* del módulo *Land Change Modeler: ES*, donde se estimaron los cambios entre el año inicial y el final, tanto ganancias como pérdidas de cada clase (Cuadro 16).

Cuadro 16. *Cambios de las clases, en hectáreas, entre los años 2001 y 2010.*

| CLASE/CAMBIO | AUMENTO | PÉRDIDA | CAMBIO NETO |
|--------------|---------|---------|-------------|
| BOSQUE       | 574     | 3325    | -2751       |
| ANTRÓPICO    | 3278    | 548     | 2730        |
| RIO          | 85      | 70      | 15          |

Fuente. Elaboración propia con datos obtenidos del software IDRISI Selva.

ii) Una vez establecidos los cambios se procedió a agregar los factores que influyen a la deforestación, que fueron creados anteriormente manteniendo las mismas dimensiones que los mapas de los años analizados, con el objetivo de establecer las reglas de cambio adecuadas. A fin de que los factores sean aceptados se debe contar con una V de Cramer superior al 0.15, de lo contrario el factor no sería significativo para la estimación de la variación en la cobertura de suelo (Cuadro 17).

Para identificar la v de Cramer se utilizó la pestaña del módulo Land Change Modeler: ES denominada *Potencial de Transición*, específicamente el panel *Prueba y Selección de Variables de Sitio y Controlador*. Una vez ejecutada la herramienta se obtuvo que todos los factores cumplían con el requisito de ser mayor a 0.15.

Cuadro 17. *Confiabilidad de los factores de cambio al Escenario 1 proyectado al año 2019.*

| FACTOR                       | V de Cramer |
|------------------------------|-------------|
| DEM                          | 0.4537      |
| Distancia a Vías             | 0.361       |
| Distancia a Centros Poblados | 0.348       |
| Pendiente                    | 0.2306      |
| Precipitación Media          | 0.3239      |
| Limites SHBP                 | 0.2059      |
| Temperatura Media            | 0.1973      |

Fuente. Elaboración propia con datos del software IDRISI Selva.

Se decidió que no se consideraría en la proyección al cambio de ANTRÓPICO a BOSQUE, esto debido a que los factores están orientados a estimar el cambio de BOSQUE a ANTRÓPICO y el cambio en viceversa no representa una cantidad significativa (salvo la reforestación; pero, esta se limita al SHBP y no habría forma de predecirla).

*iii)* Para el establecimiento de las reglas de cambio se tuvo 3 opciones: MLP Neural Network, SimWeigth y Logistic Regression. De estas 3 metodologías se eligió la que mayor valor ROC presentó en la validación (lo que se explicará detalladamente más adelante), el método MLP Neural Network. Debido a esto, se usó el mismo procedimiento en todas las proyecciones realizadas y así la variación de este no sea una variable en cuanto a la obtención de resultados.

La tasa de precisión más alta fue, luego de ejecutar la herramienta *Potencial de Transición* (específicamente la pestaña *Ejecución del Sub-Modelo de Transición*), de 82.64% (Figura 49). Se consiguió otorgando una tasa de aprendizaje inicial de 0.01 (la cual se fue modificando ya que se activó la opción de tasa de aprendizaje inicial dinámica), un momentum de 0.5, constante sigmoidea de 1.0, para el tamaño de la muestra se usaron 25 000 píxeles, se dio un número de iteraciones de 10 000, se dejó

por defecto el *RMS*, que era de 0.01 y una tasa de precisión máxima de 100%. Los parámetros fueron determinados de acuerdo a las sugerencias del creador del módulo Land Change Modeler, a esto se sumó un proceso de ensayo y error, debido a que no habían valores exactos que garantizarán la mejor precisión del entrenamiento del sub modelo.

iv) Ya realizado el entrenamiento del submodelo, se procedió a crear el potencial de transición. El procedimiento de selección del sub-modelo se ejecutó en la pestaña *Transición de Sub-Modelo: Estatus*, al igual que el potencial de transición (Figura 50).

v) Obtenido el mapa de potencial de transiciones, se ejecutó la pestaña *Predicción de Cambio*. Para generar el escenario proyectado, primeramente, se construyó la matriz de probabilidad de cambio entre los mapas de los años 2001 y 2010, para esto se utilizó el panel *Cambiar el Modelado de la Demanda* (Cuadro 18).

Cuadro 18. *Matriz de probabilidad de cambio entre los años 2001 y 2010.*

|           | BOSQUE | ANTRÓPICO | RIO    |
|-----------|--------|-----------|--------|
| BOSQUE    | 0.8118 | 0.185     | 0.0031 |
| ANTRÓPICO | 0.0362 | 0.9617    | 0.0021 |
| RIO       | 0.3507 | 0.0891    | 0.5602 |

Fuente. Elaboración propia con datos del software IDRISI Selva.

vi) Definida la matriz de probabilidad se procedió a crear el mapa proyectado al año 2019, para esto se utilizó la herramienta *Predicción de Cambio*, específicamente el panel *Asignación de Cambio*, el cual la realiza mediante el método Cadenas de Markov (Figura 51).

**4.3.5.2 Escenario 1 proyectado al año 2037.** Se ejecutó el modelo, de la misma manera que en el primer caso, teniendo el año 2010 de inicio y el 2019 como final. El objetivo de esta proyección es conocer la posible realidad del 2037 considerando el proceso de invasión y reforestación ocurridos dentro del SHBP.

*i)* Se obtuvieron los cambios entre los años 2010 y 2019 (Cuadro 19).

Cuadro 19. *Cambios de las clases, en hectáreas, entre los años 2010 y 2019.*

| CLASE/CAMBIO | AUMENTO | PÉRDIDA | CAMBIO NETO |
|--------------|---------|---------|-------------|
| BOSQUE       | 2004    | 1865    | 139         |
| ANTRÓPICO    | 1830    | 1981    | -151        |
| RIO          | 86      | 74      | 12          |

Fuente. Elaboración propia basándose en datos del software IDRISI Selva.

*ii)* Ya definidos los cambios se procedió a verificar la V de Cramer (Cuadro 20).

Cuadro 20. *Confiabilidad de los factores de cambio al Escenario 1 proyectado al año 2037.*

| <b>FACTOR</b>                | <b>V de Cramer</b> |
|------------------------------|--------------------|
| DEM                          | 0.3999             |
| Distancia a Vías             | 0.3492             |
| Distancia a Centros Poblados | 0.3099             |
| Pendiente                    | 0.1773             |
| Precipitación Media          | 0.2965             |
| Limites SHBP                 | 0.2872             |
| Temperatura Media            | 0.1774             |

Fuente. Elaboración propia con datos del Software IDRISI Selva.

*iii)* Al ejecutar el entrenamiento del sub-modelo para la proyección se obtuvo que la tasa de precisión más alta fue de 87.47% (Figura 49), esto se consiguió con los mismos parámetros que se dieron anteriormente, salvo el tamaño de muestra, el cual fue de 18 000 píxeles en este caso.

*iv)* Se realizó el potencial de transición entre los años 2010 y 2019 (Figura 50).

*v)* Con el potencial de transición creado se procedió a calcular la matriz de probabilidad de cambio entre clases para los mapas del año 2010 y 2019 (Cuadro 21).

Cuadro 21. *Matriz de probabilidad de cambio entre los años 2010 y 2019.*

|                  | <b>BOSQUE</b> | <b>ANTRÓPICO</b> | <b>RIO</b> |
|------------------|---------------|------------------|------------|
| <b>BOSQUE</b>    | 0.7803        | 0.2131           | 0.0066     |
| <b>ANTRÓPICO</b> | 0.2028        | 0.7951           | 0.0021     |
| <b>RIO</b>       | 0.369         | 0.3001           | 0.3309     |

Fuente. Elaboración propia con datos del software IDRISI Selva.

vi) Ya realizada la matriz de probabilidad se procedió a crear el mapa del Escenario 1 proyectado al año 2037, mediante el método de Cadenas de Markov (Figura 52).

**4.3.5.3 Escenario 2 proyectado al año 2037.** Esta proyección se realizó teniendo el mapa del año 2001 inicio y el del 2019 como fin. Se creó para comparar el Escenario 1 del mismo año, pero omitiendo el proceso de invasión y reforestación sucedido, con el fin de estimar la diferencia considerando dichos procesos.

i) Se obtuvieron los cambios entre las coberturas de suelo de los años 2001 y 2019 (Cuadro 22).

Cuadro 22. *Cambios de las clases, en hectáreas, entre los años 2001 y 2019.*

| CLASE/CAMBIO | AUMENTO | PÉRDIDA | CAMBIO NETO |
|--------------|---------|---------|-------------|
| BOSQUE       | 437     | 3043    | -2606       |
| ANTRÓPICO    | 2996    | 418     | 2578        |
| RIO          | 108     | 82      | 26          |

Fuente. Elaboración propia con datos del software IDRISI Selva.

ii) Se realizó la validación de los factores mediante la V de Cramer. Debido a que no se modificaron los factores de cambio ni el año final, se obtuvieron los mismos valores de V de Cramer que en el Escenario 1 proyectado para el año 2037 (Cuadro 20).

iii) Para el entrenamiento del sub-modelo se utilizaron los mismos parámetros que en las anteriores proyecciones, exceptuando el tamaño de muestra, el cual fue de 25 000 en este caso, y se obtuvo una tasa de precisión de 88.57% (Figura 49).

iv) Una vez realizado el entrenamiento se procedió a crear el potencial de transición (Figura 50).

v) Con este potencial de transición se creó la matriz de probabilidad de cambio (Cuadro 23).

Cuadro 23. *Matriz de probabilidad de cambio al Escenario 2 proyectado al año 2037.*

|                  | <b>BOSQUE</b> | <b>ANTRÓPICO</b> | <b>RIO</b> |
|------------------|---------------|------------------|------------|
| <b>BOSQUE</b>    | 0.8275        | 0.1679           | 0.0046     |
| <b>ANTRÓPICO</b> | 0.0272        | 0.9708           | 0.0019     |
| <b>RIO</b>       | 0.2997        | 0.2162           | 0.4841     |

Fuente. Elaboración propia con datos del software IDRISI Selva.

vi) Luego se procedió a crear la proyección al año 2037, utilizando el modelo de Cadenas de Markov (Figura 52).

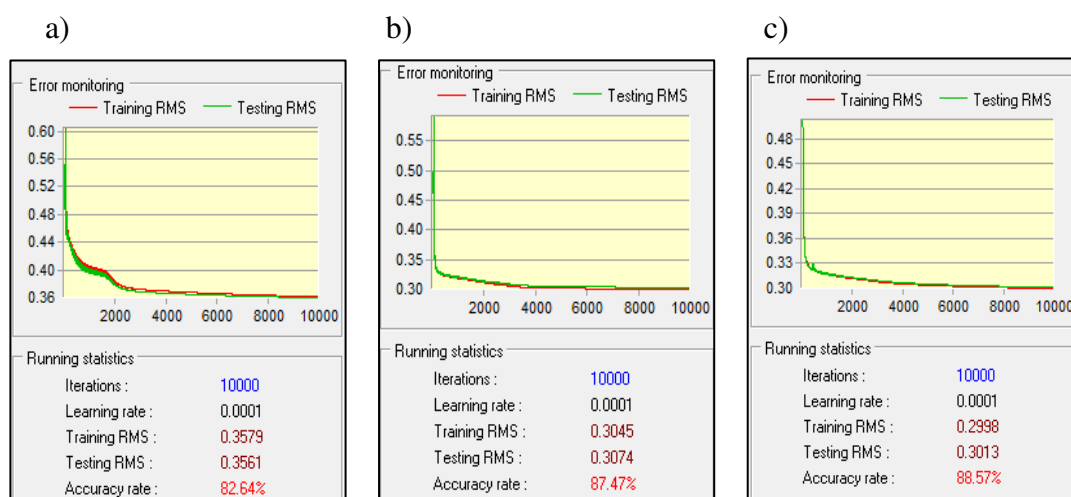


Figura 49. Estadísticas de la ejecución del entrenamiento del sub-modelo: a) Escenario 1 proyectado al año 2019, b), Escenario 1 proyectado al año 2037, c) Escenario 2 proyectado al año 2037. Software IDRISI Selva.

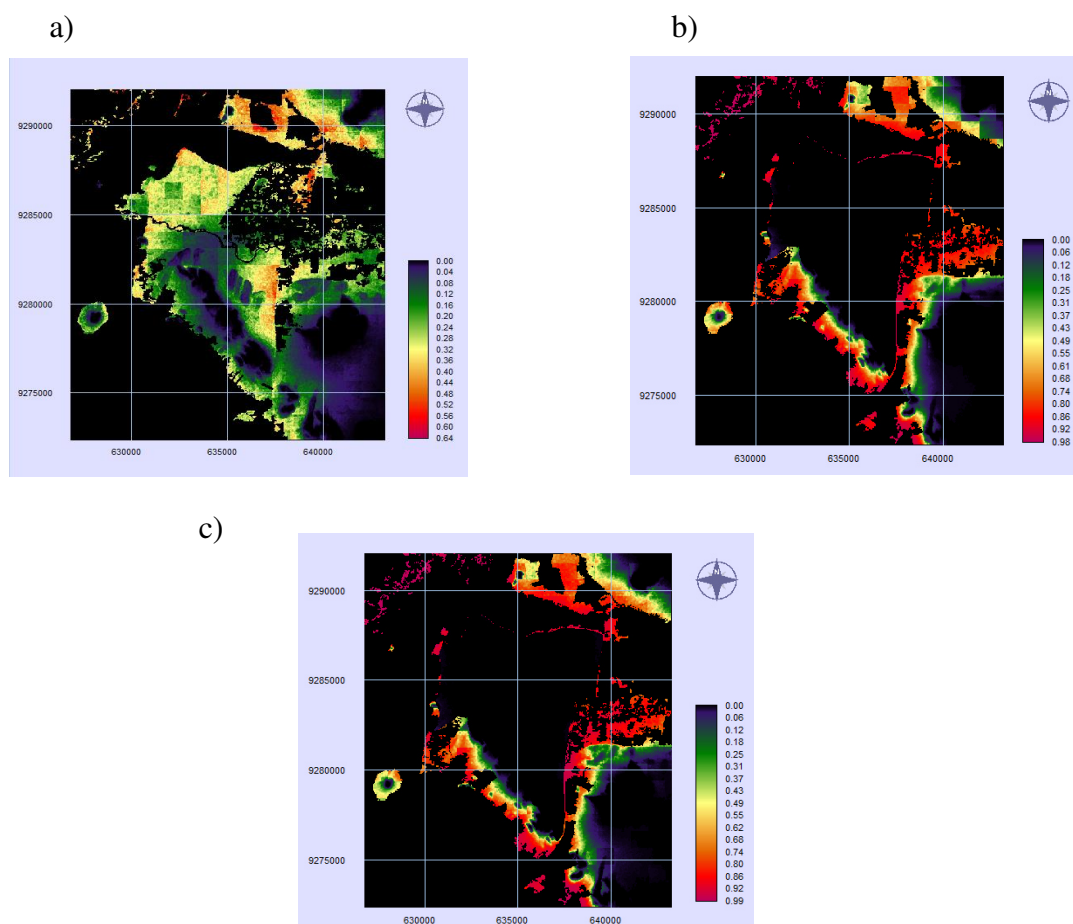


Figura 50. Mapa de potencial de transiciones basado en los años 2001 y 2010: a) Escenario 1 proyectado al año 2019, b) Escenario 2 proyectado al año 2037, c) Escenario 2 proyectado al año 2037. Software IDRISI Selva.

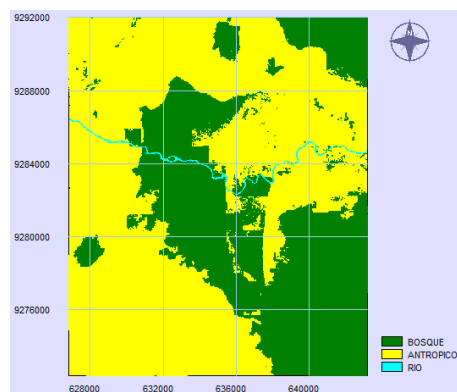


*Figura 51.* Mapa Proyectado a 2019, Escenario 1. Elaboración propia mediante el software IDRISI Selva

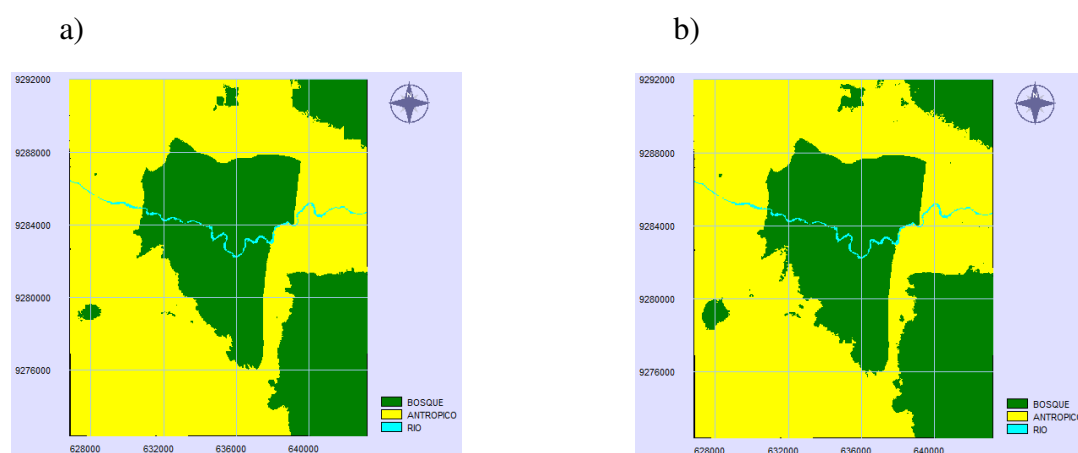


*Figura 52.* Mapas Proyectados a 2037: a) Escenario 1, b) Escenario 2. Elaboración propia mediante el software IDRISI Selva

#### **4.3.6 Validación Mediante el Método de Característica de Operación Relativa (ROC).**

La la validación ROC se requirió del uso de la herramienta del mismo nombre, perteneciente al software IDRISI, lo cual necesito de la reclasificación, tanto del mapa de proyección como del que representa la realidad. Se le asignó el valor de 1 a la clase de interés y de 0 a las otras clases; luego se necesitó convertir los datos del mapa proyectado, de enteros a reales, y la conversión del archivo a tipo binario; para el caso del mapa de referencia, se convirtió los datos de enteros al tipo byte y el archivo a tipo binario.

Para determinar el sub-modelo de entrenamiento que se usó solo se determinó el ROC de la clase ANTRÓPICO, debido a que con este era suficiente para determinar mejor precisión en los resultados.

**4.3.6.1 Proyección al Año 2010.** Usando los Años 2001 y 2007 se realizó la proyección al año 2010 para validar la proyección al 2019.

*i)* Se determinó el cambio en la cobertura terrestre entre los años 2001 y 2007 (Cuadro 24).

Cuadro 24. *Cambios de las clases, en hectáreas, entre los años 2001 y 2007.*

| CLASE/CAMBIO | AUMENTO | PÉRDIDA | CAMBIO NETO |
|--------------|---------|---------|-------------|
| BOSQUE       | 717     | 2498    | -1781       |
| ANTRÓPICO    | 2491    | 668     | 1823        |
| RIO          | 44      | 86      | -42         |

Fuente. Elaboración propia con datos del software IDRISI Selva.

ii) Ya definidos los cambios se procedió a verificar la V de Cramer de los factores (Cuadro 25).

*Cuadro 25. Confiabilidad de los factores de cambio para proyección a 2010.*

| FACTOR                       | V DE CRAMER |
|------------------------------|-------------|
| DEM                          | 0.4602      |
| Distancia a Vías             | 0.3515      |
| Distancia a Centros Poblados | 0.3313      |
| Pendiente                    | 0.2219      |
| Precipitación Media          | 0.337       |
| Límites SHBP                 | 0.2107      |
| Temperatura Media            | 0.206       |

Fuente. Elaboración propia con datos del software IDRISI Selva.

iii) Para realizar el entrenamiento del sub-modelo se utilizó todos los métodos disponibles en el software, para así realizar la comparación de la precisión de cada uno de ellos.

- La tasa de precisión más alta, al ejecutar el submodelo, fue de 81.60% (Figura 52), esta se consiguió utilizando los parámetros antes mencionados, salvo el tamaño de muestra, que fue de 27 516 en este caso.

- Para el modelo SimWeight se utilizó un tamaño de muestra de 2000 píxeles, tras elegir de entre la indicación del manual del software (usar un valor mayor a 1000 y menor a 2000); como variable k se usó el 10% de la muestra, también debido a sugerencia del manual del software. Con estos valores se obtuvo una tasa de aciertos del 60 % y de errores de 0.36, obteniendo un puntaje de habilidad de Peirce de 0.24 (Figura 53).

- En el caso de la ejecución del modelo de Regresión Logística solo se necesitó de establecer el porcentaje del área de cambio, por o cuál se realizó diferentes pruebas. Para validar este método el software ofrece un valor ROC, el cual se estabilizó en 0.7356 al usar el 20% del área de cambio, e incluso disminuir si se aumentaba dicho porcentaje (Figura 53).

iv) Una vez realizado el entrenamiento se creó el potencial de transición, el mismo procedimiento se realizó para los 3 modelos con los que se cuenta (Figura 54).

v) Ya creados los mapas de transición se creó la matriz de probabilidades de cambio entre los años 2001 y 2007 (Cuadro 26).

Cuadro 26. *Matriz de probabilidad de cambio entre los años 2001 y 2007.*

|                  | <b>BOSQUE</b> | <b>ANTRÓPICO</b> | <b>RIO</b> |
|------------------|---------------|------------------|------------|
| <b>BOSQUE</b>    | 0.9238        | 0.075            | 0.0012     |
| <b>ANTRÓPICO</b> | 0.0272        | 0.9708           | 0.006      |
| <b>RIO</b>       | 0.2835        | 0.0838           | 0.6327     |

Fuente. Elaboración propia con datos del Software IDRISI Selva.

vi) Por último, se creó la proyección de cobertura de suelo para el año 2010, utilizando los diferentes métodos de entrenamiento del sub-modelo, mediante el modelo de Cadenas de Markov (Figura 55).

Se decidió que el modelo a usar sería el MLP Neural Network, ya que posee el mayor ROC (Cuadro 26). Una vez decidido esto se procedió a realizar la validación ROC de la predicción al año 2010 con el mapa realizado en dicha fecha (Cuadro 27).

Cuadro 27. Valor ROC de la clase ANTRÓPICO para cada método de entrenamiento de sub-modelo de la Proyección a 2010.

| CLASE/MODELO | MLP NEURAL NETWORK | SIMWEIGHT | LOGISTIC REGRESSION |
|--------------|--------------------|-----------|---------------------|
| ROC          | 0.904              | 0.901     | 0.891               |

Fuente. Propia con datos del software IDRISI Selva.

Cuadro 28. Valor ROC de cada clase de la Proyección a 2010.

| CLASE | BOSQUE | ANTRÓPICO | RIO   |
|-------|--------|-----------|-------|
| ROC   | 0.898  | 0.904     | 0.785 |

Fuente. Elaboración propia con datos del software IDRISI Selva.

**4.3.6.2 Escenario 2 proyectado al año 2019.** Se cálculo los cambios en la zona desde el año 2010 al año 2016 para realizar otra predicción al año 2019 y validar la predicción al año 2037, específicamente el Escenario 1 de dicha fecha.

*i)* Se determinó el cambio de la cobertura de suelo entre los años 2010 y 2016. (Cuadro 29).

Cuadro 29. *Cambios de las clases, en hectáreas, entre los años 2010 y 2016.*

| CLASE/CAMBIO     | AUMENTO | PÉRDIDA | CAMBIO NETO |
|------------------|---------|---------|-------------|
| <b>BOSQUE</b>    | 1636    | 1676    | -40         |
| <b>ANTRÓPICO</b> | 1665    | 1605    | 60          |
| <b>RIO</b>       | 52      | 72      | -20         |

Fuente. Elaboración propia.

*ii)* Ya definidos los cambios se procedió a verificar la V de Cramer de los factores utilizados (Cuadro 30).

Cuadro 30. *Confiabilidad de los factores de cambio al Escenario 2 proyectado al año 2019.*

| FACTOR                       | V DE CRAMER |
|------------------------------|-------------|
| DEM                          | 0.3809      |
| Distancia a Vías             | 0.3273      |
| Distancia a Centros Poblados | 0.3019      |
| Pendiente                    | 0.1828      |
| Precipitación Media          | 0.28        |
| Límites SHBP                 | 0.2516      |
| Temperatura Media            | 0.1629      |

Fuente. Elaboración propia con datos del Software IDRISI Selva.

*iii)* La ejecución del sub-modelo con la tasa de precisión más alta fue de 86.69% (Figura 56), esto se logró utilizando los mismos parámetros que en los otros modelos, salvo el tamaño de muestra, que en este caso fue de 15 000 píxeles.

*iv)* Una vez realizado el entrenamiento se creó el potencial de transición de cobertura de suela entre los años 2010 al año 2016 (Figura 57).

*v)* Ya con el potencial de transición se procedió a crear la matriz de probabilidad de cambio (Cuadro 31).

Cuadro 31. *Matriz de probabilidad de cambio entre los años 2010 y 2016.*

|                  | <b>BOSQUE</b> | <b>ANTRÓPICO</b> | <b>RIO</b> |
|------------------|---------------|------------------|------------|
| <b>BOSQUE</b>    | 0.9389        | 0.0595           | 0.0016     |
| <b>ANTRÓPICO</b> | 0.0505        | 0.949            | 0.0005     |
| <b>RIO</b>       | 0.1688        | 0.0866           | 0.7446     |

Fuente. Elaboración propia con datos del software IDRISI Selva.

*vi)* Una vez creada la matriz de transición se procedió a realizar la predicción al año 2019 mediante el método de Cadenas de Markov (Figura 58).

*vii)* Realizada la proyección al 2019 se ejecutó la validación ROC para cada clase (Cuadro 32).

Cuadro 32. Valores ROC para las clases del Escenario 2 proyectado al año 2019.

| CLASE | BOSQUE | ANTRÓPICO | RIO   |
|-------|--------|-----------|-------|
| ROC   | 0.871  | 0.820     | 0.809 |

Fuente. Elaboración propia con datos del software IDRISI Selva.

**4.3.6.3 Escenario 3 proyectado al año 2019.** Esta proyección se realizó con el fin de validar la proyección al año 2037, específicamente el Escenario 2 de dicha fecha. Para esto se usó el mapa del 2001 de inicio y del 2016 como fin.

i) Se estimó los cambios en las coberturas de suelo entre los años 2001 y 2016 (Cuadro 33).

Cuadro 33. Cambios de las clases, en hectáreas, entre los años 2001 y 2016.

| CLASE/CAMBIO | AUMENTO | PÉRDIDA | CAMBIO NETO |
|--------------|---------|---------|-------------|
| BOSQUE       | 516     | 3301    | -2785       |
| ANTRÓPICO    | 3278    | 488     | 2790        |
| RIO          | 83      | 87      | -4          |

Fuente. Elaboración propia con datos del software IDRISI Selva.

ii) Ya definidos los cambios se procedió a verificar la V de Cramer de los factores, los cuales resultaron tener iguales valores que en la Proyección al año 2019, Escenario 2 (Cuadro 30).

iii) La ejecución del sub-modelo con la tasa de precisión más alta fue de 82.94% (Figura 56) y se consiguió utilizando los mismos parámetros que en las otras proyecciones, con la excepción del tamaño de la muestra, el cual fue de 25000 en este caso.

iv) Una vez realizado el entrenamiento se procedió a crear el potencial de transición (Figura 57).

v) Ya con el potencial de transición obtenido se realizó la creación de la matriz de probabilidad de cambio entre clases de los años 2001 a 2016 (Cuadro 34).

Cuadro 34. *Matriz de probabilidad de cambio entre los años 2001 y 2016.*

|                  | <b>BOSQUE</b> | <b>ANTRÓPICO</b> | <b>RIO</b> |
|------------------|---------------|------------------|------------|
| <b>BOSQUE</b>    | 0.9522        | 0.0463           | 0.0015     |
| <b>ANTRÓPICO</b> | 0.0077        | 0.9914           | 0.0009     |
| <b>RIO</b>       | 0.2052        | 0.0517           | 0.7431     |

*Fuente.* Elaboración propia con datos del Software IDRISI Selva.

vi) Finalmente, se creó la proyección al año 2019 utilizando el método de Cadenas de Markov (Figura 58).

vii) Ya realizada la proyección se calculó el ROC para cada clase contenida (Cuadro 35).

Cuadro 35. Valores ROC para las clases del Escenario 3 proyectado al año 2019.

| CLASE | BOSQUE | ANTRÓPICO | RIO   |
|-------|--------|-----------|-------|
| ROC   | 0.932  | 0.923     | 0.827 |

Fuente. Elaboración propia con datos del software IDRISI Selva.

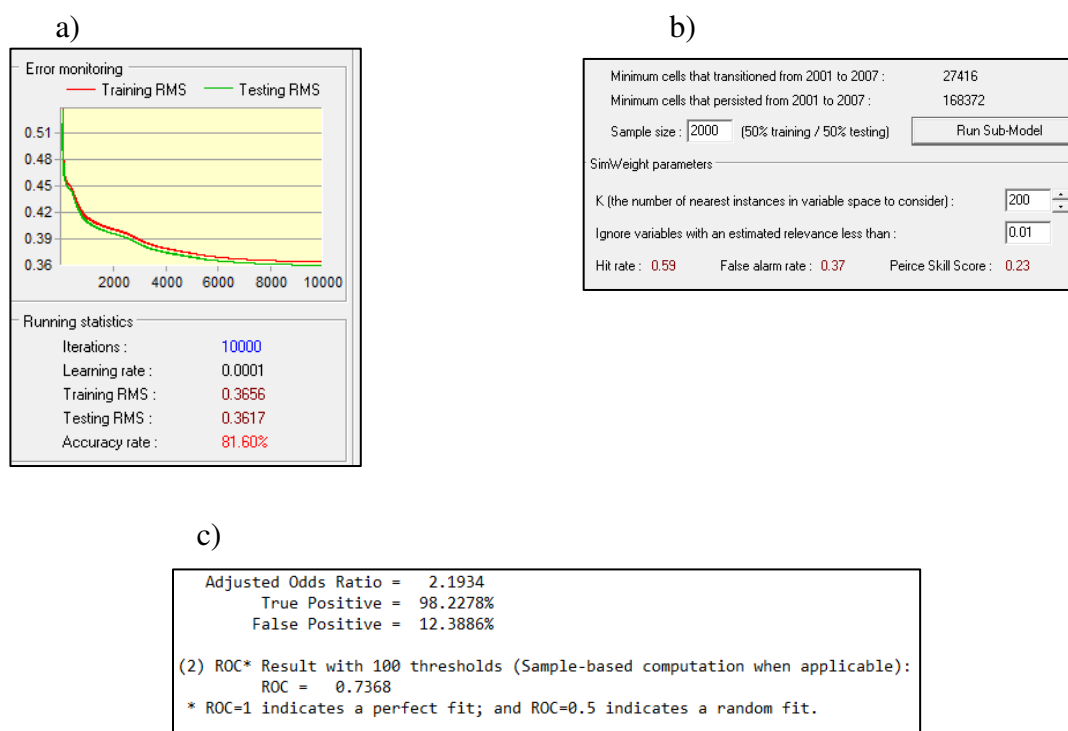


Figura 53. Estadísticas de la ejecución del entrenamiento para la proyección al año 2010: a) por el modelo MLP Neural Network, b) por el modelo SimWeight, c) por el modelo Logistic Regression. Software IDRISI Selva.

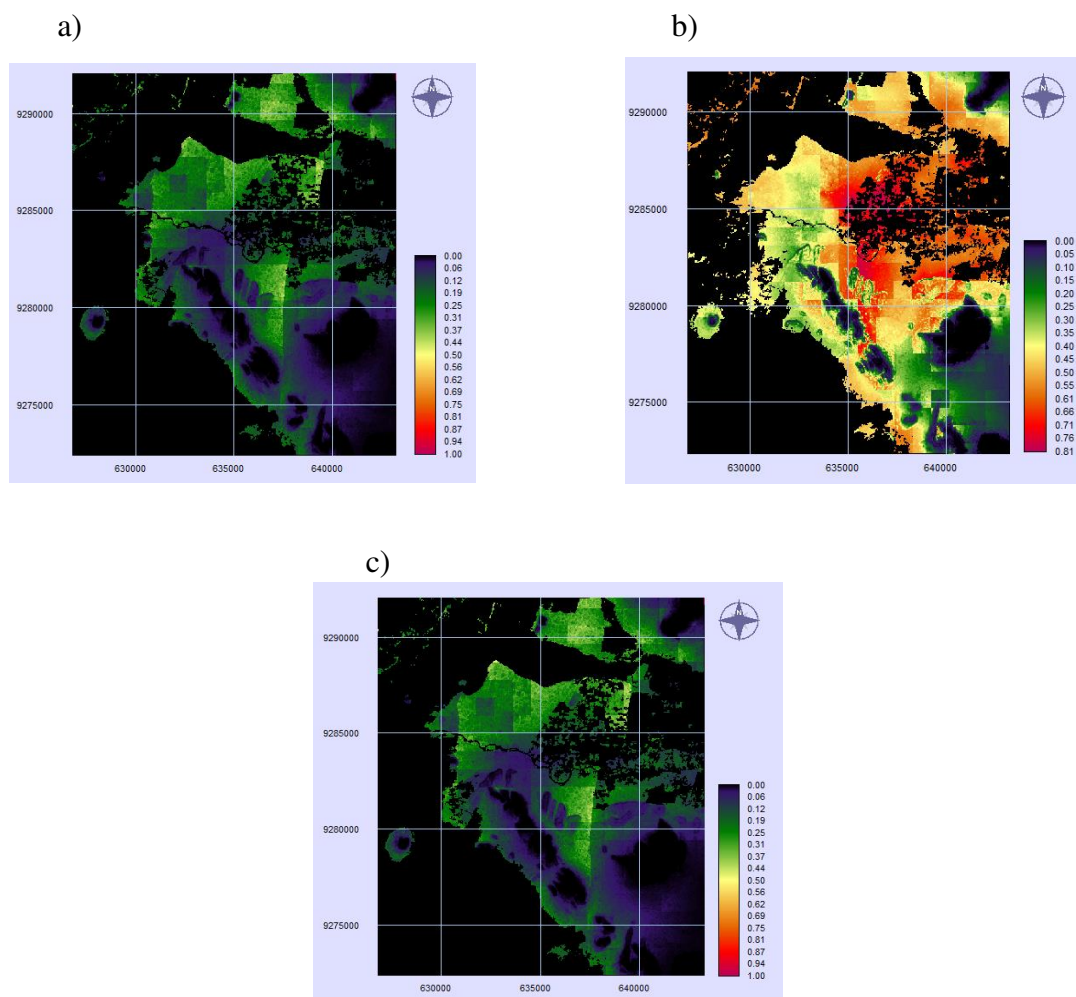


**Figura 54. Mapa de potencial de transiciones basado en los años 2001 y 2007 mediante los diferentes métodos: a) MLP Neural Network, b) SimWeight, c) Logistic Regression. Elaboración propia.**

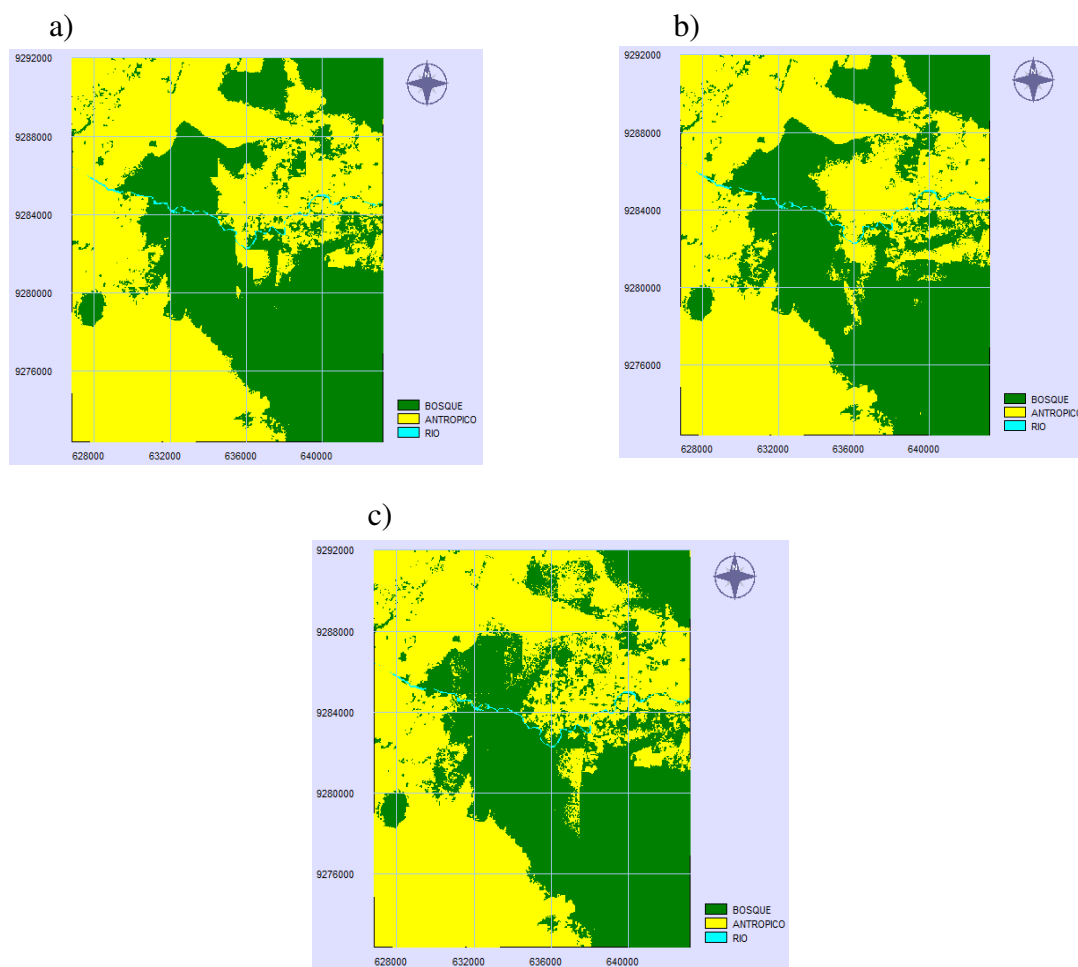


**Figura 55. Mapas de cobertura de suelo proyectados al año 2010: a) por el método MLP Neural Network, b) por el método SimWeight, c) por el método de Logistic Regression. Software IDRISI Selva.**

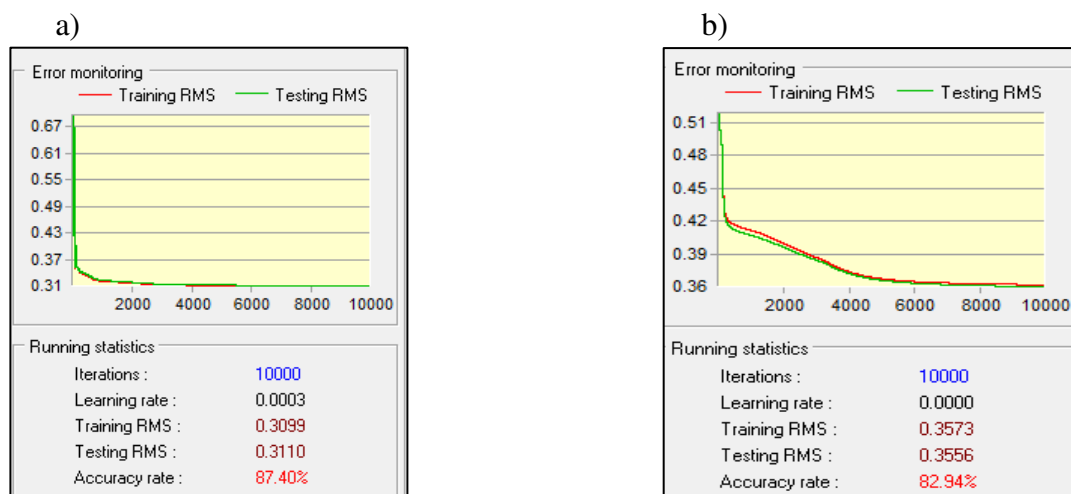


**Figura 56. Estadísticas de la ejecución del entrenamiento: a) para la Proyección al año 2019, Escenario 2, b) para la Proyección al año 2019, Escenario 3. Software IDRISI Selva.**

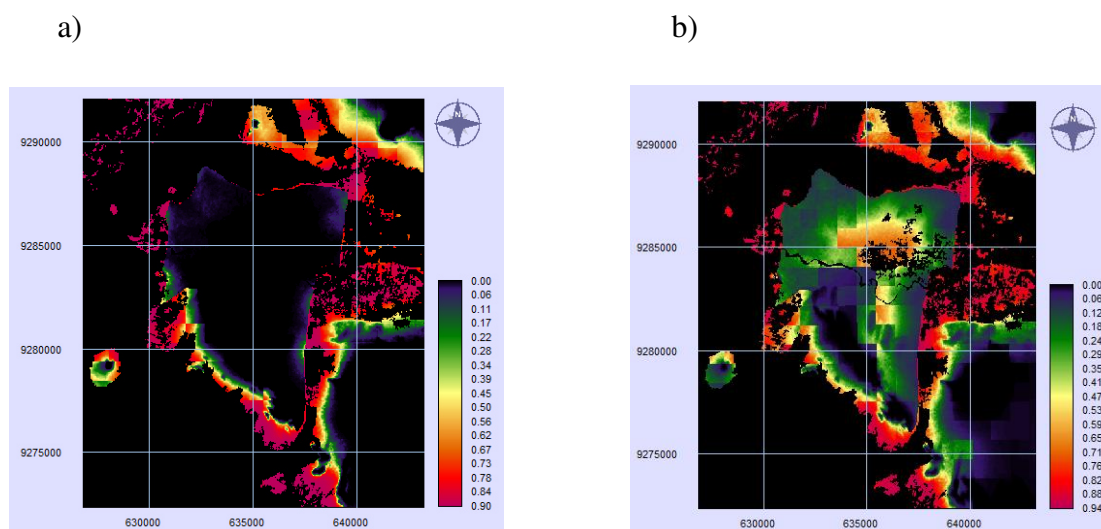


**Figura 57. Mapa de potencial de transiciones: a) basado en los años 2010 y 2016, b) basado en los años 2001 y 2016. Software IDRISI Selva.**

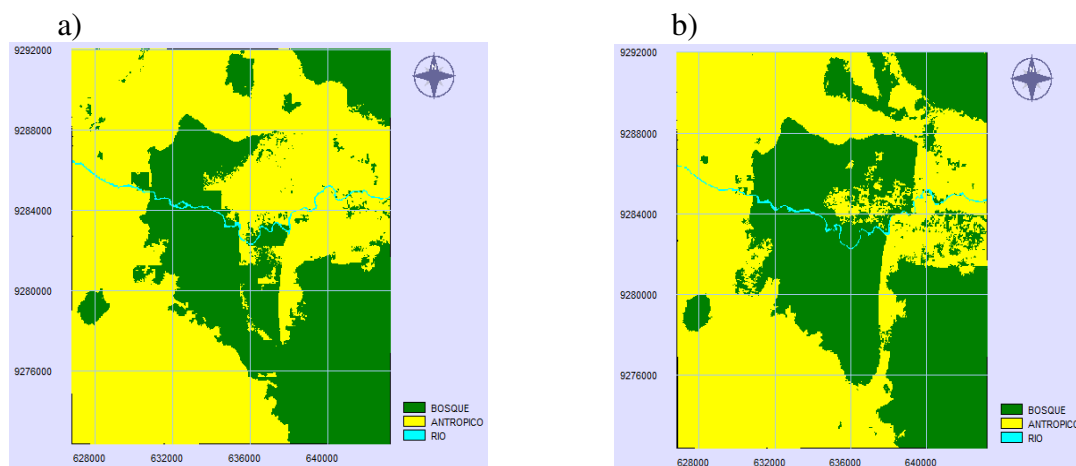


**Figura 58. Mapas Proyectados a 2019: a) Escenario 2, b) Escenario 3. Software IDRISI Selva.**

Una vez obtenidos los mapas resultados se procedió a recortar los resultados de todos los años para así obtener solo las áreas necesarias para el estudio. La realización de este proceso se logró con el uso de la herramienta *clip* del software ArcGIS 10.4.

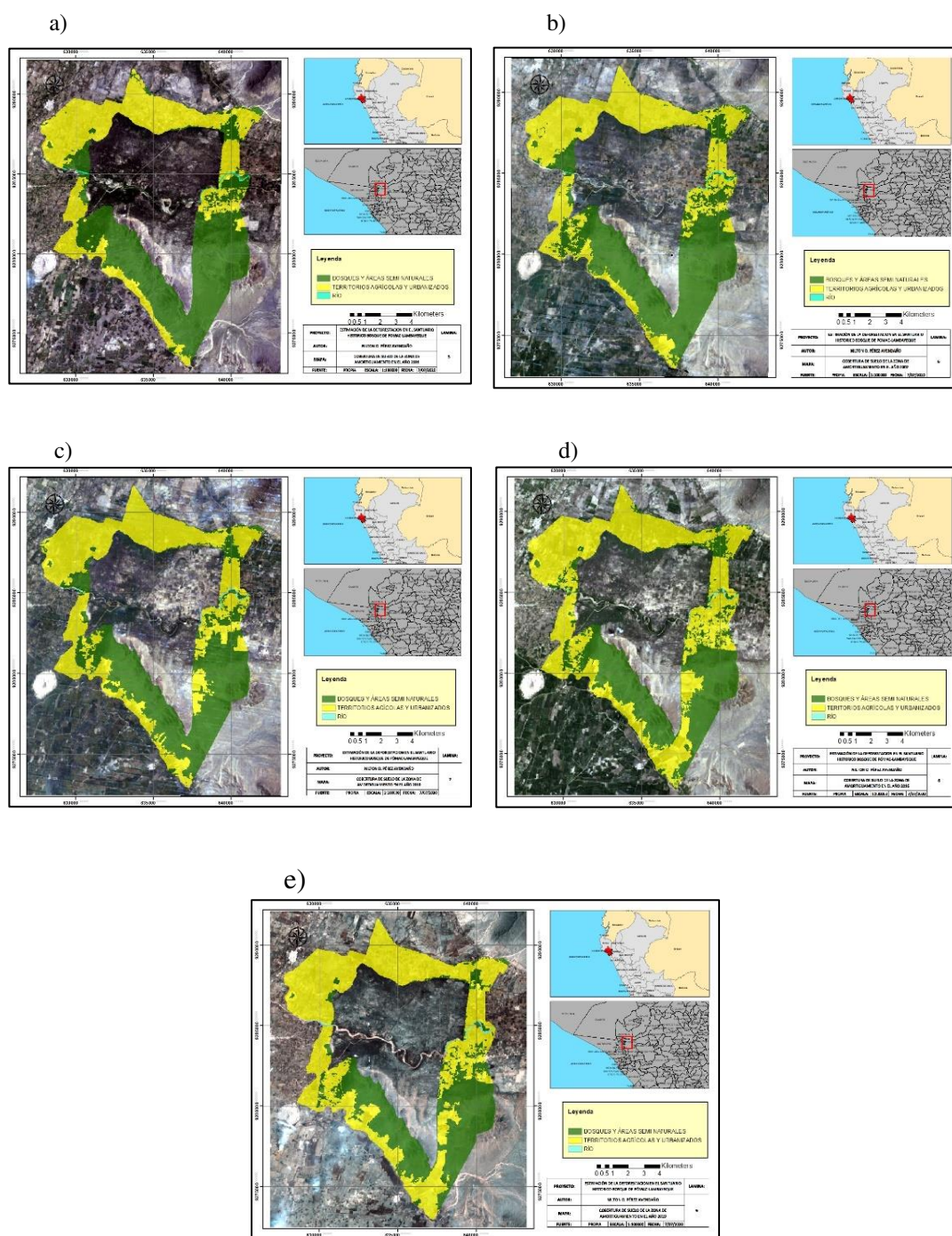


Figura 59. Mapas de cobertura de suelo en la Zona de Amortiguamiento del SHBP: a) 2001, b) 2007, c) 2010, d) 2016, e) 2019. Elaboración propia.

*Figura 60. Mapas de cobertura de suelo en el Santuario Histórico Bosque de Pómac: a)2001, b) 2007, c) 2010, d) 2016, e) 2019. Elaboración propia.*

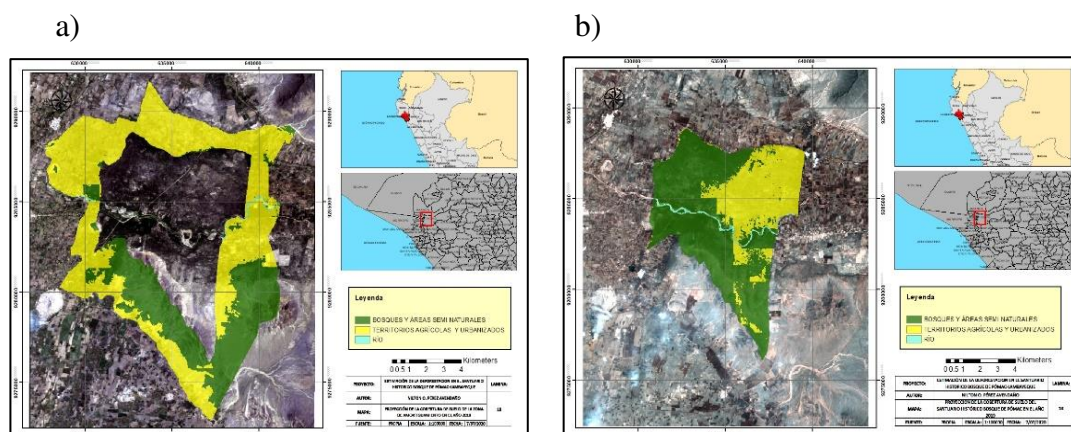


Figura 61. Proyección de la cobertura de suelos para el Escenario 1 al año 2019,: a) Zona de Amortiguamiento, b) SHBP. Elaboración propia.

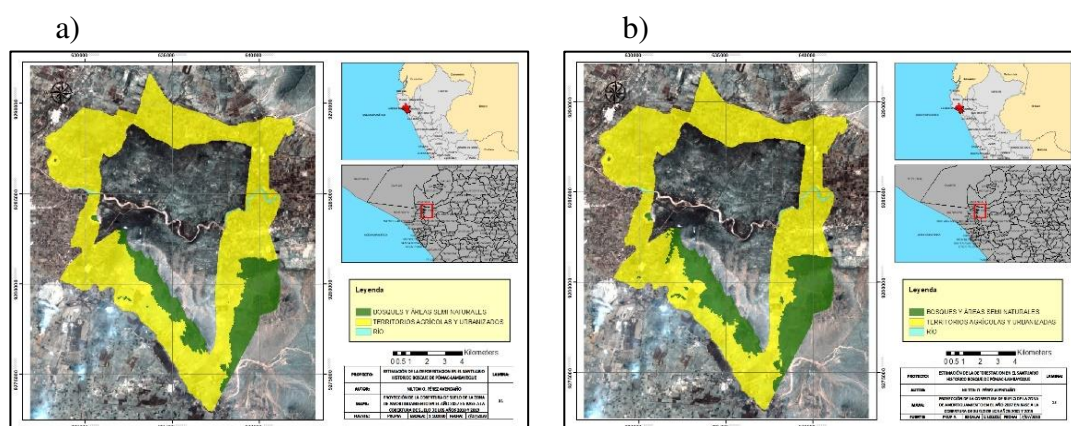


Figura 62. Mapa de cobertura de suelo en la Zona de Amortiguamiento del Santuario Histórico Bosque de Pómac en el año 2037: a) Escenario 1, b) Escenario 2. Elaboración propia.

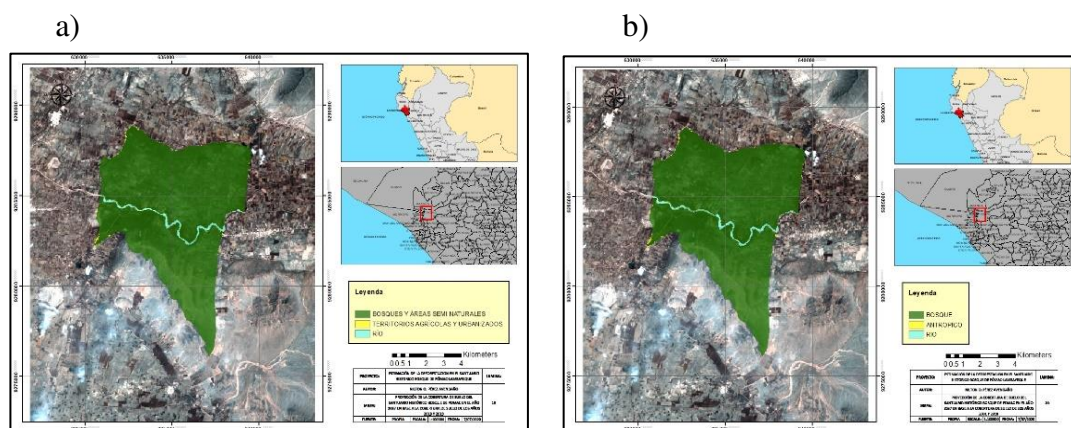


Figura 63. Mapa de cobertura de suelo en el Santuario Histórico Bosque de Pómac en el año 2037: a) Escenario 1, b) Escenario 2. Elaboración propia.

## CAPITULO V. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

### 5.1 Dinámica de la deforestación en el Santuario Histórico Bosque de Pómac y su Zona de Amortiguamiento.

- Para determinar la influencia de la dinámica de los Territorios Agrícolas y Urbanizados, primero, se requirió del cálculo del área de cada clase para los diferentes años de la Zona de Amortiguamiento del SHBP (Cuadro 36) y de dicha ANP (Cuadro 37).

Cuadro 36. Cobertura de suelo por año, en hectáreas, de la Zona de Amortiguamiento del SHBP.

| AÑO  | BOSQUE | ANTRÓPICO | RIO |
|------|--------|-----------|-----|
| 2001 | 5081   | 4174      | 42  |
| 2007 | 4931   | 4335      | 31  |
| 2010 | 4328   | 4924      | 45  |
| 2016 | 3703   | 5556      | 37  |
| 2019 | 3436   | 5809      | 53  |

Fuente. Elaboración propia.

Cuadro 37. Cobertura de suelos, en hectáreas, del SHBP para los diferentes años analizados, en el SHBP.

| AÑO  | BOSQUE | ANTRÓPICO | RIO |
|------|--------|-----------|-----|
| 2001 | 5774   | 35        | 78  |
| 2007 | 4699   | 1125      | 63  |
| 2010 | 4456   | 1344      | 88  |
| 2016 | 5361   | 443       | 84  |
| 2019 | 5769   | 18        | 100 |

Fuente. Elaboración propia.

- Así también se calculó las áreas de las proyecciones creadas, tanto para el año 2019 como para el 2037, en la Zona de Amortiguamiento del SHBP (Cuadro 38) y en dicha ANP (Cuadro 39).

Cuadro 38. Coberturas de suelo, en hectáreas, de los escenarios creados para el 2019 y 2037, en la Zona de Amortiguamiento del SHBP.

| AÑO                                 | BOSQUE | ANTRÓPICO | RIO |
|-------------------------------------|--------|-----------|-----|
| PROYECCIÓN AL AÑO 2019, ESCENARIO 1 | 3245   | 6007      | 45  |
| PROYECCIÓN AL AÑO 2037, ESCENARIO 1 | 1717   | 7527      | 53  |
| PROYECCIÓN AL AÑO 2037, ESCENARIO 2 | 2141   | 7104      | 53  |

Fuente. Elaboración propia.

Cuadro 39. Coberturas de suelo, en hectáreas, de los escenarios creados para el 2019 y 2037, del SHBP.

| AÑO                                 | BOSQUE | ANTRÓPICO | RIO |
|-------------------------------------|--------|-----------|-----|
| PROYECCIÓN AL AÑO 2019, ESCENARIO 1 | 3817   | 1983      | 88  |
| PROYECCIÓN AL AÑO 2037, ESCENARIO 1 | 5761   | 26        | 100 |
| PROYECCIÓN AL AÑO 2037, ESCENARIO 2 | 5762   | 25        | 100 |

Fuente. Elaboración propia.

- Una vez obtenidas la extensión de cada clase se procedió a determinar la deforestación ocurrida en distintos periodos, tanto en la Zona de Amortiguamiento del SHBP (Cuadro 40) como en dicha ANP (Cuadro 41). Para esto se requirió estimar el cambio entre la clase Bosques Secos a la clase Territorios Agrícolas y Urbanizados.

Cuadro 40. Matriz de cambios, en hectáreas, entre las clases Bosques Secos y Territorios Agrícolas y Urbanizados, en la Zona de Amortiguamiento del SHBP.

| CLASE         | TERRITORIOS AGRÍCOLAS Y URBANIZADOS |      |      |      |      |                      |                       |                       |
|---------------|-------------------------------------|------|------|------|------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| BOSQUES SECOS | AÑO                                 | 2007 | 2010 | 2016 | 2019 | 2019<br>(Escenario1) | 2037<br>(Escenario 1) | 2037<br>(Escenario 2) |
|               | 2001                                | 531  |      |      | 1795 | 1880                 | 3355                  | 2936                  |
|               | 2007                                |      | 813  |      |      |                      |                       |                       |
|               | 2010                                |      |      | 955  |      |                      |                       |                       |
|               | 2016                                |      |      |      | 609  |                      |                       |                       |
|               | 2019                                |      |      |      |      | 793                  | 1724                  | 1301                  |

Fuente. Elaboración propia

Cuadro 41. *Matriz de cambio, en hectáreas, entre la clase Bosque Secos a Territorios Agrícolas y Urbanizado., en el SHBP.*

| CLASE         | TERRITORIOS AGRÍCOLAS Y URBANIZADOS |      |      |      |      |                       |                       |                       |
|---------------|-------------------------------------|------|------|------|------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| BOSQUES SECOS | AÑO                                 | 2007 | 2010 | 2016 | 2019 | 2019<br>(Escenario 1) | 2037<br>(Escenario 1) | 2037<br>(Escenario 2) |
|               | 2001                                | 1097 | 1321 |      | 10   | 1954                  | 10                    | 10                    |
|               | 2007                                |      | 342  |      |      |                       |                       |                       |
|               | 2010                                |      |      | 21   |      |                       |                       |                       |
|               | 2016                                |      |      |      | 8    |                       |                       |                       |
|               | 2019                                |      |      |      |      | 1967                  | 1                     | 1                     |

Fuente. Elaboración propia

- Una vez obtenida la deforestación se procedió a estimar la superficie de recuperación de Bosques Secos, tanto de la Zona de Amortiguamiento del SHBP (Cuadro 42) como en dicha ANP (Cuadro 43). Para esto se calculó el área de cambio entre la clase Territorios Agrícolas y Urbanizados a la clase Bosques Secos.

Cuadro 42. *Matriz de cambios, en hectáreas, entre la clase Territorios Agrícolas y Urbanizados y la clase Bosques Secos, en la Zona de Amortiguamiento del SHBP.*

| CLASE                               | BOSQUES SECOS |      |      |      |      |                       |                       |                       |
|-------------------------------------|---------------|------|------|------|------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| TERRITORIOS AGRÍCOLAS Y URBANIZADOS | AÑO           | 2007 | 2010 | 2016 | 2019 | 2019<br>(Escenario 1) | 2037<br>(Escenario 1) | 2037<br>(Escenario 2) |
|                                     | 2001          | 373  |      |      | 158  | 50                    | 2                     | 5                     |
|                                     | 2007          |      | 211  |      |      |                       |                       |                       |
|                                     | 2010          |      |      | 328  |      |                       |                       |                       |
|                                     | 2016          |      |      |      | 351  |                       |                       |                       |
|                                     | 2019          |      |      |      |      | 603                   | 0                     | 0                     |

Fuente. Elaboración propia

Cuadro 43. *Matriz de cambio, en hectáreas, de la clase Territorios Agrícolas y Urbanizados a Bosques Secos, en el SHBP.*

| CLASE                                     | BOSQUES SECOS |      |      |      |      |                      |                      |                      |
|-------------------------------------------|---------------|------|------|------|------|----------------------|----------------------|----------------------|
| TERRITORIOS<br>AGRÍCOLAS Y<br>URBANIZADOS | AÑO           | 2007 | 2010 | 2016 | 2019 | 2019<br>(Escenario1) | 2037<br>(Escenario1) | 2037<br>(Escenario2) |
|                                           | 2001          | 7    | 10   |      | 25   | 9                    | 25                   | 25                   |
|                                           | 2007          |      | 112  |      |      |                      |                      |                      |
|                                           | 2010          |      |      | 921  |      |                      |                      |                      |
|                                           | 2016          |      |      |      | 433  |                      |                      |                      |
|                                           | 2019          |      |      |      |      | 10                   | 0                    | 0                    |

Fuente. Elaboración propia

- Ya obtenidas las cifras de deforestación y recuperación se procedió a determinar la deforestación neta, tanto en la Zona de Amortiguamiento de la SHBP (Cuadro 44) como para dicha ANP (Cuadro 45). Esta se estimó a partir de la diferencia entre la deforestación y la recuperación de Bosques Secos.

Cuadro 44. *Matriz de deforestación neta, en hectáreas, entre los diferentes años analizados, en la Zona de Amortiguamiento del SHBP.*

| AÑO  | 2007 | 2010 | 2016 | 2019 | 2019 (Escenario 1) | 2037 (Escenario 1) | 2037 (Escenario 2) |
|------|------|------|------|------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 2001 | 158  | 0    | 0    | 1637 | 1830               | 3353               | 2931               |
| 2007 | 0    | 602  | 0    | 0    | 0                  | 0                  | 0                  |
| 2010 | 0    | 0    | 627  | 0    | 0                  | 0                  | 0                  |
| 2016 | 0    | 0    | 0    | 258  | 0                  | 0                  | 0                  |
| 2019 | 0    | 0    | 0    | 0    | 190                | 1724               | 1301               |

Fuente. Elaboración propia

Cuadro 45. *Matriz de deforestación neta, en hectáreas, entre los diferentes años analizados, en el SHBP.*

| AÑO  | 2007 | 2010 | 2016 | 2019 | 2019<br>(Escenario 1) | 2037<br>(Escenario 1) | 2037<br>(Escenario 2) |
|------|------|------|------|------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 2001 | 1090 | 1311 | 0    | -15  | 1945                  | -15                   | -15                   |
| 2007 | 0    | 230  | 0    | 0    | 0                     | 0                     | 0                     |
| 2010 | 0    | 0    | -900 | 0    | 0                     | 0                     | 0                     |
| 2016 | 0    | 0    | 0    | -425 | 0                     | 0                     | 0                     |
| 2019 | 0    | 0    | 0    | 0    | 1957                  | 1                     | 1                     |

Fuente. Elaboración propia.

### **5.1.1 Influencia de la dinámica de los Territorios Agrícolas y Urbanizados sobre los Bosques Secos.**

De lo determinado anteriormente podemos afirmar que los Territorios Agrícolas y Urbanizados poseen una influencia negativa sobre los Bosques Secos de la Zona de Amortiguamiento, así como también en los de dicha ANP. Esto se infiere debido a la deforestación neta del 32.2% en la Zona de Amortiguamiento del SHBP, desde el año 2001 al año 2019; además se tiene también la deforestación neta del 22.7% del SHBP, desde el año 2001 al año 2010.

La Zona de Amortiguamiento del SHBP ha presentado una deforestación constante entre el año 2001 y 2019, aun cuando sus tasas de deforestación neta media anual en el periodo analizado no ha tenido un alza estable sino más bien una fluctuación en ella, aún continúan siendo cantidades muy altas (Cuadro 46).

Cuadro 46. *Tasa de deforestación neta media anual, por periodos, en la Zona de Amortiguamiento del SHBP.*

| <b>PERIODO</b> | <b>AÑO</b>                         | <b>DEFORESTACIÓN<br/>NETA (%)</b> | <b>DEFORESTACIÓN<br/>NETA PROMEDIO<br/>ANUAL (%)</b> |
|----------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------|
| <b>1</b>       | <b>2001-2007</b>                   | 3.1                               | 0.5                                                  |
| <b>2</b>       | <b>2007-2010</b>                   | 12.2                              | 4.1                                                  |
| <b>3</b>       | <b>2010-2016</b>                   | 14.5                              | 2.4                                                  |
| <b>4</b>       | <b>2016-2019</b>                   | 7                                 | 2.3                                                  |
| <b>5</b>       | <b>2019-2037<br/>(ESCENARIO 1)</b> | 50.2                              | 2.8                                                  |
| <b>5</b>       | <b>2019-2037<br/>(ESCENARIO 2)</b> | 37.9                              | 2.1                                                  |

Fuente. Elaboración propia.

Para el SHBP se obtuvo una deforestación neta del 22.7% de sus Bosques Secos desde el 2001 al 2010, lo cual representa una tasa de deforestación media anual del 2.5%. En el caso de la tasa de deforestación neta media se tuvo un alza abrupta en el periodo 2001 a 2007, que luego disminuyó entre el 2007 al 2010.

Cuadro 47. *Tasa de deforestación neta media anual, por periodos, en el SHBP.*

| <b>PERIODO</b> | <b>AÑO</b>       | <b>DEFORESTACIÓN<br/>NETA (%)</b> | <b>DEFORESTACIÓN<br/>NETA PROMEDIO<br/>ANUAL (%)</b> |
|----------------|------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------|
| <b>1</b>       | <b>2001-2007</b> | 18.9                              | 3.15                                                 |
| <b>2</b>       | <b>2007-2010</b> | 4.9                               | 1.633333                                             |

Fuente. Elaboración propia

A partir del año 2019 al 2037, según los escenarios creados, la deforestación neta alcanzaría un valor de entre 37.9% y 50.2% en la Zona de Amortiguamiento del SHBP, que significa una deforestación neta media anual en el intervalo de 2.1% y 2.8%, y representa una deforestación neta de entre 57.7% y 66% con respecto a la cobertura de suelo del 2001. Esta cifra representa que, desde el 2019 al 2037, la dinámica de los Territorios Agrícolas y Urbanizados provocará que la deforestación promedio de Bosques Secos aumente.

### ***5.1.2 Influencia de la gestión del SHBP sobre los Bosques Secos***

La gestión del SHBP permitió recuperar el 100% de la deforestación sucedida en el ANP desde el 2001 hasta al 2010, con un adicional del 0.3% de lo que se contaba en el 2001, debido a que en dicho año se estimaron 35 ha. de Territorios Agrícolas y Urbanizados y 18 ha. para el 2019; lo que contrasta a la situación de la Zona de Amortiguamiento, donde la administración del ANP no tiene jurisdicción.

En un escenario en el que la gestión del SHBP no hubiera intervenido con la deforestación que sucedía dentro de la mencionada ANP, se estima que la deforestación neta hubiera alcanzado un 33.7% en comparación a la extensión de Bosques Secos en el SHBP, este aumento en la deforestación también habría repercutido en la Zona de Amortiguamiento, donde se estimó una deforestación neta mayor en un 3.8% con respecto al año 2001.

Se obtuvieron cifras muy similares en ambas proyecciones al año 2037, para el caso del SHBP, en donde la deforestación es casi nula; sin embargo, se muestra una pérdida de 1 ha. A pesar de que se observa una recuperación, e incluso una mejora

del ANP con respecto al 2001, se estima la pérdida mencionada por causa de la grave deforestación sucedida en los alrededores del SHBP, se prevé un inminente avance sobre los límites, específicamente en el sector norte del ANP.

### **5.1.3 Comportamiento del avance de los Territorios Agrícolas y Urbanizados en la zona de amortiguamiento del SHB y en dicha ANP.**

Se logró determinar la enorme diferencia entre la tasa de deforestación que se presenta en la zona de amortiguamiento del SHBP, como en el ANP; así mismo, se logró identificar que el comportamiento de la deforestación en ambas zonas es totalmente diferente, habiéndose recuperado el ANP mientras que su zona de amortiguamiento viene presentando una tasa de deforestación acelerada (Figura 64).

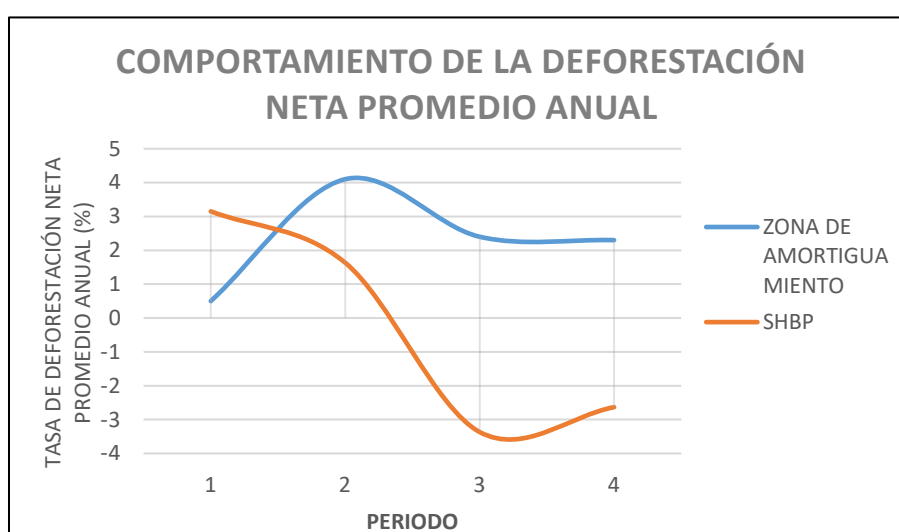


*Figura 64.* Comparación del comportamiento de la deforestación neta promedio anual en la Zona de Amortiguamiento y el SHBP. Elaboración propia.

## 5.2 CONTRASTACION DE HIPOTESIS

**Hipótesis Especifica 1: La dinámica de los Territorios Agrícolas y Urbanizados tendría una influencia moderada sobre la cobertura de Bosques Secos, según la metodología de modelos estocásticos y técnicas de teledetección.**

De acuerdo con la clasificación de la cobertura de suelos desde el año 2001 hasta el año 2019 se ha determinado una gran influencia de los Territorios Agrícolas y Urbanizados sobre los Bosques Secos, ya que el avance de los Territorios Agrícolas y Urbanizados viene mermando cada vez más los Bosques Secos del área de estudio.

**Hipótesis 2: La gestión del SHBP tendría una influencia significativa sobre la cobertura de Bosques Secos, según la metodología de modelos estocásticos y técnica de teledetección.**

Mediante la creación de un escenario proyectado para el año 2019, en el caso de que el ANP no hubiera tomado medidas contra el avance de la deforestación, y su posterior comparación con la clasificación de cobertura de suelo real, se determinó que la gestión del ANP tiene una gran influencia sobre el avance de la deforestación de Bosques Secos

**Hipótesis Especifica 3: Podría existir una diferencia significativa entre el comportamiento del avance de los Territorios Agrícolas y Urbanizados en la zona de amortiguamiento del Santuario Histórico Bosque de Pómac y dentro de los límites de dicha ANP.**

De acuerdo con la clasificación de cobertura de suelos, tanto en la zona de amortiguamiento como en dentro del ANP, así como las proyecciones creadas para el año 2037, se logró determinar que hay una gran diferencia en el comportamiento de la deforestación en la zona de amortiguamiento con el ANP, teniendo la zona de amortiguamiento grandes cantidades de áreas deforestadas y un constante

crecimiento de la deforestación; mientras que en el ANP se ha controlado la deforestación en su totalidad y apenas se estima una deforestación de 1 ha. para el año 2037.

**Hipótesis General: La dinámica de la deforestación en el Santuario Histórico Bosque de Pómac y su Zona de Amortiguamiento, según el método de modelos estocásticos y teledetección, tendría una tendencia creciente.**

Mediante la clasificación de la cobertura de suelos desde el año 2001 al año 2019, determinó grandes extensiones de Bosques Secos deforestadas en el área de estudio y se estima un gran aumento de esta deforestación hasta el año 2037, debido a que se logró observar una veloz tasa de deforestación.

## CAPITULO VI. CONCLUSIONES

- Los Territorios Agrícolas y Urbanizados presentan gran influencia sobre los Bosques Secos del SHBP y su zona de amortiguamiento. De entre las dos zonas mencionadas, la más perjudicada ha sido la zona de amortiguamiento, que posee una gran deforestación desde el año 2001 hasta el 2019, estimándose 1645 ha. de bosque seco deforestadas; además de esto, se estima que esta deforestación podría aumentar entre 1295 ha. y 1719 ha. desde el año 2019 hasta el año 2037.
- Se estima que el porcentaje de deforestación en la zona de amortiguamiento del SHBP, en el 2037, será de entre el 57.7% y 66% del área de Bosques Secos con que se contaba en el año 2001; mientras que en el SHBP se espera una mayor presión en los límites superiores del ANP, que ocasionaría una pérdida de Bosques Secos de 1 ha. con respecto al área de Bosques Secos con que se contaban en el año 2019, que indica una necesaria atención en la zona con el objetivo de detener el avance de la deforestación, aunque se trate de dimensiones mínimas con respecto a la extensión total (5887 ha.)
- La gestión del SHBP ha permitido la recuperación del 100% de la cantidad que había sido deforestada dentro del ANP, incluso se ha mejorado la condición de los Bosques Secos con respecto al 2001; esto, a su vez, ha repercutido de forma positiva en la Zona de Amortiguamiento, disminuyendo la tasa de deforestación neta promedio anual, lo cual no soluciona el problema, ya que las cantidades de bosque secos deforestados siguen siendo grandes. Sin embargo, lo mencionado líneas arriba permiten entender la relación entre la protección de bosques secos dentro y fuera del ANP.
- La diferencia entre la deforestación en el Santuario Histórico Bosque de Pómac y su zona de amortiguamiento es abismal, ya que, en el ANP, se identificó una deforestación de apenas 10 ha., a diferencia de las 1645 ha. deforestadas en la zona de amortiguamiento.

## CAPITULO VII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar imágenes provistas por satélites que tengan una alta resolución temporal, debido a que la constante presencia de nubes dificulta la obtención de imágenes en un tiempo atmosférico despejado.
- Se recomienda realizar un trabajo minucioso en la diferenciación de las firmas espectrales de los diferentes tipos de vegetación ubicada en la zona, sobre todo las vegetaciones que posean un origen natural y las que hayan sido ubicadas por el humano. Esta diferenciación permitirá un trabajo más automatizado, y por lo tanto, una mayor optimización del tiempo debido a que serán menos las confusiones entre 3 clases de cobertura de suelo que se tendrán que subsanar.
- Se recomienda que, para realizar las predicciones a futuro, se mantengan las clases de cobertura de suelos en la menor cantidad posible, debido a que así las probabilidades de ocurrencia del cambio estimado son mayores.
- Se recomienda que, para obtener una mejor proyección a futuro, se descarten los factores que contribuyen al avance de la deforestación con menor influencia en el modelo, así dicha influencia posea un índice de V de Cramer superior al aceptable.
- Se recomienda que, para controlar la pérdida de determinadas especies del bosque seco en específico, por ejemplo, el algarrobo, se necesitan imágenes satelitales de alta resolución espacial que permitan identificar cada individuo, los cuales se encuentran separados por amplias distancias y no pueden ser identificados de manera independiente con los satélites de la constelación Landsat.
- Se recomienda a las instituciones encargadas de la protección de los bosques secos en el área de investigación, como lo son el SERNANP o el SERFOR, prestar atención especial a las fronteras localizadas al norte del Santuario Histórico Bosque

de Pómac, debido a que en estas se presenta la única deforestación estimada para el año 2037 en el interior del ANP.

- Se recomienda fortalecer las medidas de protección de bosques secos para la Zona de Amortiguamiento, ya que, de acuerdo con el DS N° 038-2001, se aclara que el uso de este espacio debe ser especial para no poner en riesgo al ANP.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar Arias, H., Mora Zamora, R., & Vargas Bolaños, C. (2015). Metodología para la Corrección Atmosférica de Imágenes ASTER, RAPIDEYE, SPOT 2 y LANDSAT 8 con el Módulo FLAASH del Software ENVI. Atmospheric Correction Methodology for ASTER, RAPIDEYE, SPOT 2 and LANDSAT 8 IMAGES with ENVI FLAASH Module Software. *Revista Geográfica de América Central*, 2(53), 39-59. <https://doi.org/10.15359/rgac.2-53.2>
- Alderete, A. M. (2006). *Artículo Metodológico Fundamentos del Análisis de Regresión Logística en la Investigación Psicológica*. 16.
- Atkinson, P. M., & Tatnall, A. R. L. (1997). Introduction Neural Networks in Remote Sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 18(4), 699-709. <https://doi.org/10.1080/014311697218700>
- Bossard, M., Feranec, J., & Otahel, J. (2000). *CORINE Land Cover Technical Guide*. European Environment Agency.
- Buzai, G. D. (2013). *Sistema De Información Geográfica (SIG). Teoría y Aplicación* (Primera). Universidad Nacional de Luján.
- Cabrera Barona, P. (2012). *Modelamiento Geoestadístico de Cambio Futuro de cobertura de Suelo como Apoyo a los Planes de Ordenamiento Territorial en la Amazonia del Ecuador*. [https://www.researchgate.net/profile/Pablo\\_Cabrera\\_Barona/publication/259391258\\_Modelamiento\\_geoestadistico\\_de\\_cambio\\_futuro\\_de\\_cobertura\\_de\\_suelo\\_como\\_apoyo\\_a\\_los\\_planos\\_de\\_ordenamiento\\_territorial\\_en\\_la\\_Amazonia\\_del\\_Ecuador/links/59fda322aca272347a2606c4/Modelamiento-geoestadistico-de-cambio-futuro-de-cobertura-de-suelo-como-apoyo-a-los-planes-de-ordenamiento-territorial-en-la-Amazonia-del-Ecuador.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Pablo_Cabrera_Barona/publication/259391258_Modelamiento_geoestadistico_de_cambio_futuro_de_cobertura_de_suelo_como_apoyo_a_los_planos_de_ordenamiento_territorial_en_la_Amazonia_del_Ecuador/links/59fda322aca272347a2606c4/Modelamiento-geoestadistico-de-cambio-futuro-de-cobertura-de-suelo-como-apoyo-a-los-planes-de-ordenamiento-territorial-en-la-Amazonia-del-Ecuador.pdf)
- Chuvienco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial* (Segunda). EDICIONES RIALP, S.A.
- Congreso de la República del Perú. (1997). *Ley de Areas Naturales Protegidas. LEY N° 26834*. Diario Oficial El Peruano. <http://www.leyes.congreso.gob.pe/Documentos/Leyes/26834.pdf>
- CONIDA. (2018, enero 19). *PerúSAT-1, Satélite de Observación de la Tierra*. <https://www.gob.pe/institucion/conida/noticias/84706-perusat-1-satelite-de-observacion-de-la-tierra>
- Cuentas Romero, M. A. (2015). *El Uso del Espacio Natural para el Desarrollo del Territorio: Los Bosques Secos de Algarrobo para las Comunidades Rurales en Lambayeque, 1985-2015*. 14.

- Del Valle Benavides, A. R. (2017). *Curvas ROC (Receiver-Operating-Characteristic) y sus aplicaciones* [Trabajo de Fin de Grado]. Universidad de Sevilla.
- Díaz Salinas, F. (2013). *Determinación de la Deforestación en los Bosques Secos del Santuario Histórico de Pómac*. 2996-3002.
- El Perú. (2001). *Decreto Supremo N° 038-2001-AG*.
- Epple, C., Williamson, A., & Thorley, J. (2012). *Strengthening Benefits from REDD+ for Biodiversity, Ecosystem Services and Livelihoods*. 80.
- Espinoza Núñez, E. (2002). *Evaluación de Variedades e Híbridos de Maíz Amarillo Duro (Zea Mays L.) En La Provincia De Lambayeque* [Tesis Para Optar El Título De Ingeniero Agrónomo]. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- FAO. (2020). *Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2020*. <https://doi.org/10.4060/ca8753es>
- Fausett, L. (s. f.). *Fundamentals of Neural Networks. Architectures, Algorithms and Applications*.
- GIS & Beers. (2018, octubre 21). *Script para Descarga Masiva de Imágenes satelitales—Gis&Beers*. <http://www.gisandbeers.com/script-para-descarga-masiva-de-imagenes-satelitales/>
- Ibáñez, N., & Damman, G. (2013). Cambios de la Cobertura de los Suelos para la Elaboración de Escenarios Territoriales en la Región Apurímac. *Zonas Áridas*, 15(1), 48-67. <https://doi.org/10.21704/za.v15i1.108>
- Janzen, D. (1988). Chapter 14. Tropical Dry Forest. En E. O. Wilson (Ed.), *Biodiversity* (National Academy of Sciences, pp. 130-137). <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=qACfAwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT143&dq=janzen+dry+forest&ots=nM3i4gzlQc&sig=NCV6TjWq7WG7-BvLUuPHG33ubcQ#v=onepage&q=janzen%20dry%20forest&f=false>
- Kamusoko, C., Oono, K., Nakazawa, A., Wada, Y., Nakada, R., Hosokawa, T., Tomimura, S., Furuya, T., Iwata, A., Moriike, H., Someya, T., Yamase, T., Nasu, M., Gomi, Y., Sano, T., Isobe, T., & Homsysavath, K. (2011). Spatial Simulation Modelling of Future Forest Cover Change Scenarios in Luangprabang Province, Lao PDR. *forests*. <https://doi.org/10.3390/f2030707>
- Khan Academy. (2020). *La Luz: Ondas Electromagnéticas, Espectro Electromagnético y Fotones (artículo) | Khan Academy*. Khan Academy. <https://es.khanacademy.org/science/ap-chemistry/electronic-structure-of-atoms-ap/bohr-model-hydrogen-ap/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>

- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33(1), 159. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Lazo Clemente, J. I. (2018). *La Edad de los Árboles de Prosopis Limensis Benth en el Santuario Histórico Bosque de Pómac—Lambayeque* [Tesis para Optar el Grado de Magister Scientiae, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3804>
- Martin, R. M. (2008). *Deforestación, Cambio de Uso de la Tierra y REDD*. 59, 3-11.
- Martínez, N. J., & Murcia, U. G. (Eds.). (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra: Metodología CORINE Land Cover Adaptada para Colombia: Escala 1:100.000*. IDEAM.
- MINAM. (2016a). *Decreto Supremo N°007-2016-MINAM Estrategia Nacional sobre Bosques y Cambio Climático*. [http://www.bosques.gob.pe/archivo/ff3f54\\_ESTRATEGIACAMBIOCLIMATICO2016\\_ok.pdf](http://www.bosques.gob.pe/archivo/ff3f54_ESTRATEGIACAMBIOCLIMATICO2016_ok.pdf)
- MINAM. (2016b). *La Conservación de Bosques en el Perú (2011-2016). Conservando los bosques en un contexto de cambio climático como aporte al crecimiento verde*. <http://www.minam.gob.pe/informessectoriales/wp-content/uploads/sites/112/2016/02/11-La-conservaci%C3%B3n-de-bosques-en-el-Per%C3%BA.pdf>
- MINAM. (2014). *Informe Final del Proyecto. Análisis de las Dinámicas de Cambio de Cobertura de la Tierra en la Comunidad Andina. Componente Nacional. Perú—Primera Etapa*. <http://www.minam.gob.pe/ordenamientoterritorial/wp-content/uploads/sites/18/2013/10/Informe-final-de-Proyecto-Dinamica-de-los-Cambios-de-la-Tierra-CAN.pdf>
- Mishra, V., Rai, P., & Mohan, K. (2014). Prediction of Land Use Changes Based on Land Change Modeler (LCM) using remote sensing: A case study of Muzaffarpur (Bihar), India. *Journal of the Geographical Institute Jovan C vijic, SASA*, 64(1), 111-127. <https://doi.org/10.2298/IJGI1401111M>
- Montes Suay, F. (2007). *Procesos Estocásticos para Ingenieros: Teoría y Aplicaciones*.
- NASA. (2020a). *ASTER / Terra*. <https://terra.nasa.gov/about/terra-instruments/aster>
- NASA. (2020b). *Landsat 9 Instruments* [Text]. NASA. <http://www.nasa.gov/content/landsat-9-instruments>
- O'Brien Mazzini, E. (2015). *Propuesta de Análisis Espacial para el Manejo Forestal en los Bosques Secos del Norte. Estudio del Caso: Sector El Cardo, Caserío El Choloque, Lambayeque, Perú*. [Tesis Para Optar El Título De Ingeniero Forestal]. Universidad Nacional Agraria La Molina.

- ONERN. (1976). Guía Explicativa del Mapa Ecologico del Perú.
- OpenStreetMap Wiki. (2016). *ES:Cobertura del suelo*.  
[https://wiki.openstreetmap.org/wiki/ES:Cobertura\\_del\\_suelo](https://wiki.openstreetmap.org/wiki/ES:Cobertura_del_suelo)
- Palacios Vega, J. J., Zárate-Gómez, R., Minaya Vela, R. J., Martín Brañas, M., & Benavides Rios, J. E. (2019). Predicción de la Pérdida de la Cobertura Vegetal por Aumento de Áreas Urbanas en Iquitos, Perú. *Ciencia Amazónica (Iquitos)*, 7(1), 37-50.  
<https://doi.org/10.22386/ca.v7i1.263>
- Partida Bush, V. (1989). Aplicación de Cadenas de Markov para proyecciones demográficas en áreas geopolíticas menores. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 4(3), 549. <https://doi.org/10.24201/edu.v4i3.739>
- Portillo-Quintero, C. A., & Sánchez-Azofeifa, G. A. (2010). Extent and Conservation of Tropical Dry Forests in the Americas. *Biological Conservation*, 143(1), 144-155.  
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.09.020>
- Rodríguez Calampa, N. Y. (2018). *Determinación de la Deforestación entre los Años 1986 y 2016 Mediante Técnicas de Teledetección y SIG, Distrito Sauce – Perú* [Tesis para Aspirar al Título de Profesional de Ingeniero Ambiental, Universidad Peruana Unión]. <http://repositorio.upeu.edu.pe/handle/UPEU/1548>
- Rodríguez Eraso, N. (2011). *Deforestación y Cambio en la Cobertura del Suelo en Colombia: Dinámica Espacial, Factores de Cambio y Modelamiento* [Memoria para Optar al Grado de Doctor of Philosophy en Ecología Terrestre]. Centre de Recerca Ecológica i Aplicacions Forestals y Unidad de Ecología.
- Rojas Baez, E. J. R. (2017). *Análisis y Simulación para el Año 2030 de los Bosques Húmedos Amazónicos de Perú para el Cambio Climático* [Trabajo de Fin de Grado]. Universitat de Barcelona.
- Rosales Benites de Franco, M., & Valer Villegas, L. A. (2018). *Reporte Técnico N 01-2018-SERNANP-DDE. Análisis del Estado de Conservación de los Ecosistemas Dentro de las ANP Mediante la Evaluación de los Efectos Generados por las Actividades Antrópicas. Cuarto Trimestre Octubre – Diciembre 2017* (Reporte Técnico Cuarto; Reporte Técnico Trimestral, p. 33). SERNANP.
- Sangermano, F., Eastman, J. R., & Zhu, H. (2010). Similarity Weighted Instance-based Learning for the Generation of Transition Potentials in Land Use Change Modeling: Novel Method for Modeling Transition Potentials. *Transactions in GIS*, 14(5), 569-580.  
<https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2010.01226.x>
- SERNANP. (2017). *Resolución Presidencial N°91-2017-SERNANP. PLAN MAESTRO 2017-2021 Santuario Histórico Bósque de Pomac*.

- Sobrino, J. A., Ráissouni, N., Kerr, Y., Oliso, A., López-García, M. J., Belaid, M., El Kharraz, H., Cuenca, J., & Dempere, L. (2000). *Teledetección* (J. A. Sobrino, Ed.). Servicio de Publicaciones, Universidad de Valencia.
- Tafur Rojas, M. R. (2017). *Variación de la Cobertura Vegetal Boscosa del Santuario Histórico Bosque De Pomac - SHBP, del Año 2008 al Año 2015* [Tesis para Optar el Grado Académico de Maestro en Ciencias con Mención en Ingeniería Ambiental]. Pedro Ruiz Gallo.
- Vaca Genuit, R. A. (2012). *Deforestación y Fragmentación de Bosques Secos en la Depresión Central de Chiapas, México* [Tesis para Optar al Grado de Doctorado en Ciencias en Ecología y Desarrollo Sustentable]. El Colegio de la Frontera Sur.
- Vélez Guevara, J. R. (2008). *Análisis de la Adherencia de la Técnica de Secas en el Distrito de Pítipo* (Técnico N.º 3; Iniciativa de la Técnica de Riego con Secas Intermitentes en el Cultivo de Arroz para el Control Vectorial de la Malaria Región Lambayeque, P. 44). Usaid, Minsa, Proyecto Vigía, Ops.
- Wikipedia. (2020). Landsat 8. En *Wikipedia, la enciclopedia libre*. [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Landsat\\_8&oldid=128122672](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Landsat_8&oldid=128122672)

## ANEXOS

```

var IMGLandsat5= ee.ImageCollection ('LANDSAT/LT05/C01/T1_TOA')

.filterDate ('xxxx-12-01', 'xxxx-03-31')

.filterBounds (table)

.filterMetadata ('CLOUD_COVER', 'Less_Than', 40);

var Landsat5Filtro = ee.Image(IMGLandsat5.median());

var Landsat5Clip = Landsat5Filtro.clip (table);

Map.addLayer (Landsat5Clip, {

  min: 0.0,

  max: 0.4,

  gamma: 1.0,

  bands: ['B5','B4','B1']],

  'Imagen Landsat 5');

print (Landsat5Filtro);

Map.centerObject (Landsat5Clip);

Export.image.toDrive({

  image: Landsat5Clip.select("B1","B2","B3","B4","B5","B7"),

  description: 'Landsat_xxxx',

  scale: 30,

  region: table});

```

*Anexo 1. Script para descarga de mosaicos LANDSAT-5 libre de nubes en plataforma Google Earth Engine.* Elaboración propia con datos de Gis & Beers (2018).

```

function MascaraNubesL(image) {
  var qa = image.select('BQA');
  var RecorteMascaraL = 1 << 4;
  var MascaraL = qa.bitwiseAnd(RecorteMascaraL).eq(0);
  return image.updateMask(MascaraL);}

var Landsat7 = ee.ImageCollection('LANDSAT/LE07/C01/T1_TOA')
  .filterDate('xxxx-12-01', 'xxxx-03-30')
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUD_COVER', 20))
  .filterBounds(table)
  .map(MascaraNubesL);

var Landsat7Filtro = ee.Image(Landsat7.median());
var Landsat7Clip = Landsat7Filtro.clip(table);

Map.addLayer(Landsat7Clip, {
  min: 0.0,
  max: 0.5,
  gamma: 1.0,
  bands: ['B4','B3','B2']],
  'Imagen Landsat 7');

print(Landsat7Filtro);

Export.image.toDrive({
  image: Landsat7Clip.select("B1", "B2", "B3","B4","B5","B7"),
  description: 'Landsat8_xxxx',
  region: table,
  scale: 30,});

```

**Anexo 2. Script para descarga de mosaicos LANDSAT-7 libre de nubes en plataforma Google Earth Engine.** Elaboración propia con datos de Gis & Beers (2018).

```

var IMGLandsat8= ee.ImageCollection
('LANDSAT/LC08/C01/T1_TOA')

.filterDate ('xxx-12-01', 'xxx-03-31')

.filterBounds (table)

.filterMetadata ('CLOUD_COVER', 'Less_Than', 20);

var Landsat8Filtro = ee.Image(IMGLandsat8.first());

var Landsat8Clip = Landsat8Filtro.clip (table);

Map.addLayer (Landsat8Clip, {

  min: 0.0,

  max: 0.5,

  gamma: 1.0,

  bands: ['B5','B4','B3']],

'Imagen Landsat 8');

print (Landsat8Filtro);

Export.image.toDrive({

  image: Landsat8Clip.select("B1", "B2", "B3", "B4", "B5", "B6", "B7",
"B8"),

  description: 'Landsat_xxx',

  scale: 30,

  region: table});

```

**Anexo 3. Script para descarga de mosaicos LANDSAT-8 libre de nubes en plataforma Google Earth Engine.** Elaboración propia con datos de Gis & Beers (2018).

```

var IMGASTER= ee.ImageCollection ('ASTER/AST_L1T_003')

.filterDate ('xxxx-12-01', 'xxxx-03-31')

.filterBounds (table)

.filterMetadata ('CLOUDCOVER', 'Less_Than', 20);

var ASTERFiltro = ee.Image(IMGASTER.median());

var ASTERClip = ASTERFiltro.clip (table);

Map.addLayer (ASTERClip, {

  max: 255,

  min: 0.0,

  gamma: 1.0,

  bands: ['B3N', 'B02', 'B01']},

  'Imagen ASTER');

print (ASTERFiltro);

Map.centerObject (ASTERClip);

Export.image.toDrive({

  image: ASTERClip.select("B01", "B02", "B3N", "B04", "B05", "B06",

  "B07", "B08", "B09", "B10", "B11", "B12", "B13", "B14"),

  description: 'ASTER_xxxx',

  scale: 15,

  region: table});

```

**Anexo 4. Script para descarga de mosaicos ASTER libre de nubes en plataforma Google Earth Engine.** Elaboración propia con datos de Gis & Beers (2018).









|           |           |        |        |           |             |        |            |           |            |        |        |            |            |        |        |            |            |        |        |
|-----------|-----------|--------|--------|-----------|-------------|--------|------------|-----------|------------|--------|--------|------------|------------|--------|--------|------------|------------|--------|--------|
| 7281564   | 44070136  | ROGQUE | ROGQUE | 728282110 | 03964307    | ROGQUE | ROGQUE     | 728396447 | 44713168   | ROGQUE | ROGQUE | 728508318  | 43860232   | ROGQUE | ROGQUE | 727795197  | 43891130   | ROGQUE | ROGQUE |
| 72727672  | 43719109  | ROGQUE | ROGQUE | 727678737 | 03979171    | ROGQUE | ROGQUE     | 728095344 | 44711239   | ROGQUE | ROGQUE | 728398112  | 438883177  | ROGQUE | ROGQUE | 727666520  | 439110797  | ROGQUE | ROGQUE |
| 72780232  | 43924420  | ROGQUE | ROGQUE | 727683476 | 4363044254  | ROGQUE | ROGQUE     | 727838497 | 438700100  | ROGQUE | ROGQUE | 728096112  | 4390054811 | ROGQUE | ROGQUE | 728292107  | 4390978389 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72849864  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 728268340 | 4329941195  | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 727316435 | 4368441471  | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72827235  | 432317107 | ROGQUE | ROGQUE | 726714778 | 4331510751  | ROGQUE | ROGQUE     | 729123784 | 4393941915 | ROGQUE | ROGQUE | 728283819  | 4383434294 | ROGQUE | ROGQUE | 728090611  | 4324754054 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72770968  | 441853402 | ROGQUE | ROGQUE | 728498448 | 4310091098  | ROGQUE | ANTIPROTON | 727937485 | 4460045068 | ROGQUE | ROGQUE | 728361524  | 4411056133 | ROGQUE | ROGQUE | 728008539  | 4374819414 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72757647  | 440669872 | ROGQUE | ROGQUE | 728497476 | 4381315959  | ROGQUE | ROGQUE     | 727973831 | 4397024737 | ROGQUE | ROGQUE | 728322126  | 4342093797 | ROGQUE | ROGQUE | 728026466  | 4376011919 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 727713124 | 4362515271  | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72876204  | 431041826 | ROGQUE | ROGQUE | 728205439 | 4409711491  | ROGQUE | ROGQUE     | 728227416 | 4414274794 | ROGQUE | ROGQUE | 728398516  | 4383591190 | ROGQUE | ROGQUE | 728072445  | 4339951454 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72825525  | 429697050 | ROGQUE | ROGQUE | 727232404 | 4328287534  | ROGQUE | ROGQUE     | 728082176 | 4320270382 | ROGQUE | ROGQUE | 728298255  | 4390073395 | ROGQUE | ROGQUE | 728005169  | 4310027573 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 7271384   | 437491385 | ROGQUE | ROGQUE | 728009114 | 4327944195  | ROGQUE | ROGQUE     | 728570004 | 430171674  | ROGQUE | ROGQUE | 727565104  | 4332626574 | ROGQUE | ROGQUE | 7281581574 | 4346351742 | ROGQUE | ROGQUE |
| 728077848 | 442931397 | ROGQUE | ROGQUE | 728200407 | 43620265363 | ROGQUE | ANTIPROTON | 728376386 | 4394701636 | ROGQUE | ROGQUE | 7295055301 | 4409334798 | ROGQUE | ROGQUE | 728005365  | 4391298128 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72876712  | 427990135 | ROGQUE | ROGQUE | 72825128  | 4363694532  | ROGQUE | ANTIPROTON | 728096313 | 4428934043 | ROGQUE | ROGQUE | 728298124  | 4390264843 | ROGQUE | ROGQUE | 728179379  | 4362623522 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72824647  | 429691035 | ROGQUE | ROGQUE | 72825128  | 4363694532  | ROGQUE | ROGQUE     | 728096313 | 4428934043 | ROGQUE | ROGQUE | 728298124  | 4390264843 | ROGQUE | ROGQUE | 728179379  | 4362623522 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |
| 72810372  | 43851865  | ROGQUE | ROGQUE | 72811664  | 43099941435 | ROGQUE | ROGQUE     | 728103435 | 439267086  | ROGQUE | ROGQUE | 728297027  | 4374824431 | ROGQUE | ROGQUE | 727683436  | 4390146385 | ROGQUE | ROGQUE |

**Anexo 5. Puntos de validación para las clasificaciones.**

| N° | Item                                        | Unidades | Precio por unidad (soles) | Total (soles) |
|----|---------------------------------------------|----------|---------------------------|---------------|
| 1  | Workstation                                 | 1        | 6000                      | 7000          |
| 2  | Monitor                                     | 1        | 700                       | 700           |
| 3  | Costos por Manejo de Software               | 1        | 400                       | 400           |
| 4  | Costo por tiempo de procesamiento (mensual) | 6        | 750                       | 4500          |
| 5  | Costos por tiempo de redacción (mensual)    | 6        | 100                       | 600           |
| 6  | Pasajes                                     | 2        | 60                        | 120           |
| 7  | Revisión gramatical y ortográfica           | 1        | 50                        | 50            |
| 8  | Total                                       |          |                           | 13 370        |
| 9  | Imprevistos (7%)                            |          |                           | 935.9         |
| 10 | Total final                                 |          |                           | 14 305.9      |

Anexo 6. **Tabla de costos de la investigación.**

| N° | Actividades                                           | Meses Establecidos |           |           |           |           |           |
|----|-------------------------------------------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|    |                                                       | 2019               |           | 2020      |           |           | 2021      |
|    |                                                       | Jul - Set          | Oct - Dic | Ene - Abr | May - Ago | Set - Dic | Ene - Abr |
| 1  | REVISION DE BIBLIOGRAFIA                              | X                  |           |           |           |           |           |
| 2  | OBTENCION DE LA INFORMACION                           | X                  |           |           |           |           |           |
| 3  | CLASIFICACION DE LA COBERTURA DE SUELO                |                    | X         |           |           |           |           |
| 4  | REFINAMIENTO DE LOS RESULTADOS                        |                    | X         | X         |           |           |           |
| 5  | VALIDACION DE LA CLASIFICACION DE COBERTURA DE SUELOS |                    |           | X         |           |           |           |
| 6  | CREACION DE LOS FACTORES DE DEFORESTACION             |                    |           | X         |           |           |           |
| 7  | CREACION DE PROYECCIONES A FUTURO                     |                    |           |           | X         |           |           |
| 8  | VALIDACION DE LAS PROYECCIONES A FUTURO               |                    |           |           | X         |           |           |
| 9  | REDACCION DEL PROYECTO DE TESIS                       |                    |           |           |           | X         |           |
| 10 | ENTREGA DEL PRIMER BORRADOR                           |                    |           |           |           | X         |           |
| 11 | CORRECCION DEL PRIMER BORRADOR                        |                    |           |           |           |           | X         |

Anexo 7. **Tabla de actividades realizadas en la investigación.**