UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Impacto del aumento poblacional y del cambio del uso del suelo sobre las principales cuencas hidrográficas de los municipios del departamento de Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Valerie Nichole Godoy López
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2020

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Impacto del aumento poblacional y del cambio del uso del suelo sobre las principales cuencas hidrográficas de los municipios del departamento de Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Valerie Nichole Godoy López
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

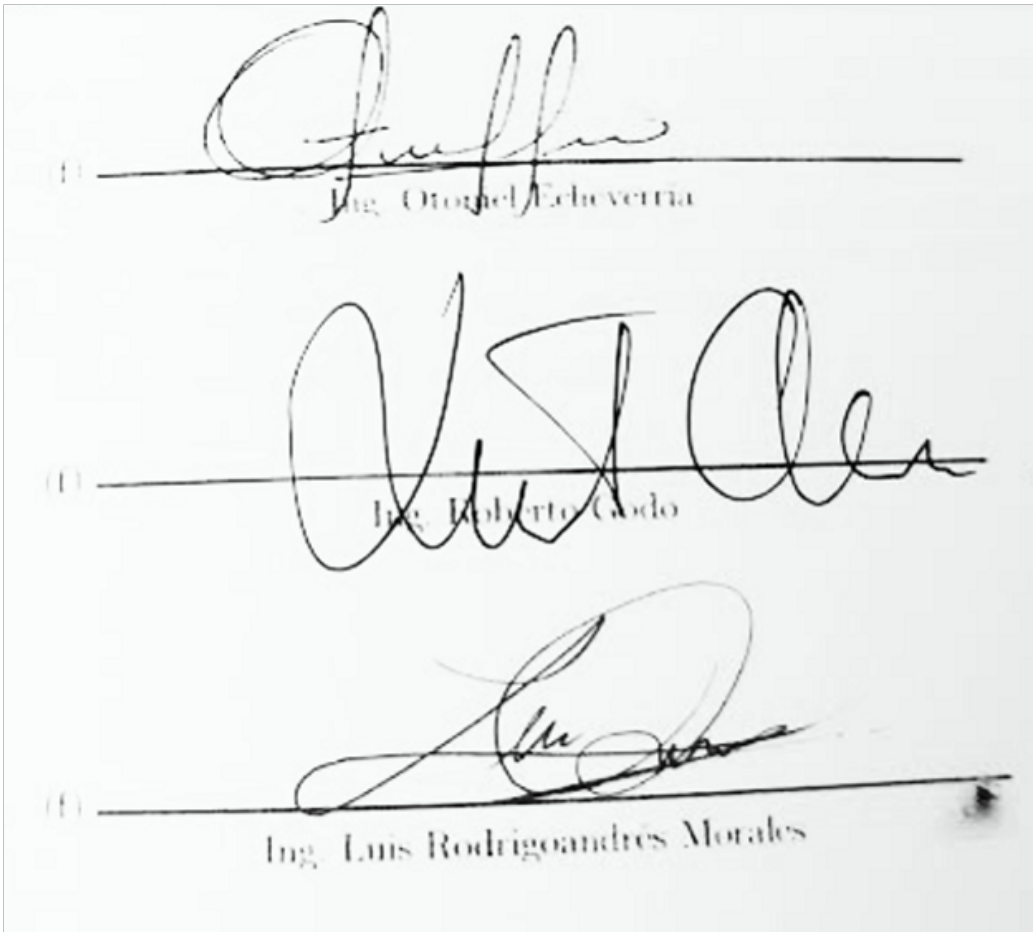
Guatemala,

2020

Vo.Bo.:



Tribunal Examinador:



Fecha de aprobación: Guatemala, 09 de diciembre de 2020.

Prefacio

La elaboración de esta tesis, se pudo realizar gracias a los conocimientos adquiridos a lo largo de mi carrera, como estudiante de ingeniería civil en la Universidad del Valle de Guatemala.

Agradezco al Arquitecto Al Moshe Asturias, Asesor de este trabajo de investigación, por su orientación y enseñanza en el campo de la teledetección, su invaluable apoyo hizo posible la culminación de esta investigación.

En el plano personal, agradezco a todas las personas que me han acompañado a lo largo de mi carrera. A mi madre, Susan López y a mis abuelos maternos, Héctor López y María Magdalena de López y a toda mi familia su apoyo incondicional.

A todos ellos reitero mis más sincero agradecimiento.

Lista de siglas y acrónimos

Acrónimo	Español	Inglés
DEM	Modelo de Elevación Digital	Digital Elevation Model
SHP		Shapefile
GNSS	Sistema Satelital de Navegación Global	Global Navigation Satellite System
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala.	
QGIS	Quantum GIS	Quantum GIS
ENVI	Entorno para Visualización de Imágenes	Environment for Visualizing Images
WGS84		World Geodetic System 1984
NASA		National Aeronautics and Space Administration
SEGEPLAN	Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia de la República de Guatemala	
SIG	Sistema de Información Geográfica	Geographic Information System
SWIR		Short Wave Infrared
NIR		Near Infrared
OLI		Operational land imager
NDVI	Índice de Vegetación Diferencial Normalizado	
NDWI	Índice de Agua Normalizado	
EMPAGUA	EMpresa Municipal del Agua	

Índice

Prefacio III

Lista de siglas y acrónimos IV

Lista de figuras XI

Lista de cuadros XII

Resumen XIII

Abstract XIV

1. Introducción 1

2. Antecedentes 3

3. Justificación 5

4. Objetivos 7
4.1. Objetivo general . . . 7
4.2. Objetivos específicos . . . 7

5. Objeto de estudio 8

6. Alcance 9

7. Marco teórico 10
7.1. Agua superficial y subterránea . . . 10
7.1.1. Agua superficial . . . 10
7.1.2. Agua subterránea . . . 11
7.2. Agua potable . . . 12
7.3. Agua residual . . . 13
7.3.1. Aguas residuales ordinarias o de tipo doméstico . . . 13
7.3.2. Aguas residuales especiales o industriales . . . 13

7.4. Acuíferos de la ciudad de Guatemala . . . 14
7.4.1. Acuífero superior . . . 14
7.4.2. Acuífero inferior . . . 14
7.5. Cuenca hidrográfica . . . 14
7.6. Cuenca hidrogeológica . . . 16
7.7. Cuenca hidrológica . . . 17
7.8. Cuenca hidrográfica como sistema . . . 17
7.9. Manejo de cuencas hidrográficas . . . 19
7.10. Delimitación de una cuenca hidrográfica . . . 21
7.11. División y partes de una cuenca hidrológica . . . 21
7.11.1. Subcuenca . . . 21
7.11.2. Microcuenca . . . 21
7.11.3. Quebrada . . . 21
7.11.4. Cuenca alta . . . 22
7.11.5. Cuenca media . . . 22
7.11.6. Cuenca baja o zonas de transicionales . . . 22
7.12. Contaminación del recurso hídrico . . . 23
7.12.1. Contaminantes orgánicos . . . 23
7.12.2. Contaminantes inorgánicos . . . 23
7.13. Seguridad hídrica . . . 24
7.14. Clasificación de cuencas por sistema de drenaje . . . 25
7.14.1. Arréicas . . . 25
7.14.2. Criptorréicas . . . 25
7.14.3. Endorréicas . . . 25
7.14.4. Exorréicas . . . 25
7.15. Zonas de funcionamiento hídrico . . . 26
7.15.1. Zona de cabecera . . . 26
7.15.2. Zona de captación . . . 26
7.15.3. Zona de emisión . . . 26
7.16. Manejo de cuencas . . . 27
7.16.1. Manejo integral de cuencas . . . 27
7.16.2. Gestión integral de cuencas . . . 27
7.16.3. Cogestión integral de cuencas . . . 28
7.17. Enfoque y elementos básicos de la gestión de cuencas . . . 28
7.17.1. Enfoque socioambiental . . . 30
7.17.2. Cuenca como unidad de planificación y evaluación de impactos . . . 30
7.17.3. Agua como recurso integrador de la cuenca . . . 30
7.17.4. Manejo de recursos naturales para el reducción de vulnerabilidad y riesgos a desastre . . . 30
7.18. El ciclo de la gestión de cuencas . . . 31
7.19. Situación del recuso hídrico en la ciudad de Guatemala . . . 32
7.19.1. Oferta hídrica . . . 32
7.19.2. Demanda del recurso hídrico . . . 32
7.19.3. Principales usos del agua . . . 33
7.20. Cobertura vegetal y el cambio del uso del suelo . . . 35
7.21. Modelos y estudios de cambio de uso de suelos . . . 35
7.21.1. Percepción remota y análisis de cambio del uso de suelos . . . 36
7.21.2. Clasificación de imágenes . . . 36

7.22. Herramientas de análisis . . . 37
7.22.1. Software para teledetección ENVI . . . 37
7.22.2. Software de información geográfoca QGIS . . . 38
7.23. Sistema de información geográfica . . . 39
7.23.1. Conceptos . . . 39
7.24. Satélite Landsat 8 . . . 43
7.24.1. Bandas espectrales . . . 43
7.25. Metodología . . . 44
7.25.1. Composiciones coloreadas en teledetección . . . 44
7.25.2. Cocientes en ENVI . . . 46
7.25.3. Índices en ENVI . . . 48
7.25.4. Clasificación supervisada y no supervisada . . . 49
7.26. Crecimiento poblacional . . . 51
7.26.1. Tipos de crecimiento poblacional . . . 52
7.26.2. Causas del crecmiento poblacional . . . 52
7.26.3. Consecuencias del crecimiento pobalcional . . . 53

8. Marco legal **54**
8.1. Situación de la escasez y condiciones de las cuencas hidrográficas . . . 54
8.2. Instituciones en el manejo del recurso hídrico . . . 54
8.3. Marco legal de los recursos hídricos del país . . . 58
8.3.1. Legislación vigente . . . 58
8.3.2. Uso agrícola del agua . . . 58
8.3.3. Uso doméstico del agua . . . 59
8.3.4. Uso energético del agua . . . 59
8.3.5. Uso minero y de hidrocarburos . . . 59
8.3.6. Uso para la navegación . . . 59
8.3.7. Lineamientos de planificación del recurso hídrico . . . 59
8.3.8. Régimen legal de aguas . . . 60

9. Diagnóstico del área de estudio **61**
9.1. Cuenca del Río Motagua . . . 61
9.2. Cuenca del Río María Linda . . . 63
9.3. Cuenca del Río Los Esclavos . . . 64
9.4. Cuenca del Río Achiguate . . . 65

10. Metodología **67**
10.1. Recursos de información: Datos espaciales . . . 67
10.2. Características generales de las imágenes de satélite . . . 68
10.3. Procesamiento de las imágenes satelitales . . . 68
10.4. Clasificación no supervisada . . . 69
10.5. Densidad poblacional . . . 69
10.6. Guía metodológica . . . 70

11. Análisis y procesamiento de información **72**
11.1. Procesamiento de imágenes teledetectadas . . . 72
11.1.1. Composiciones coloreadas con ENVI . . . 72
11.1.2. Cocientes de ENVI . . . 82

11.1.3. Combinación de bandas 91
11.1.4. Índices de ENVI 94
11.1.5. Clasificación no supervisada 106
11.1.6. Reclasificación 109
11.1.7. Uso del suelo en el Departamento de Guatemala 113
11.1.8. Cambios del uso de suelo en las cuencas del Departament de Guatemala 115
11.1.9. Densidad y aumento poblacional en el Departamento de Guatemala . 116
11.1.10. Efectos del aumento poblacional sobre los recursos hídricos de las principales cuencas del Departamento de Guatemala 121
11.2. Resumen de resultados 123
11.2.1. Río Motagua 123
11.2.2. Río María Linda 123
11.2.3. Río Los Esclavos 124
11.2.4. Río Achiguate 124

12. Conclusiones **126**

13. Recomendaciones **127**
13.1. Generales 127
13.2. Recomendaciones del manejo de las cuencas de los municipios de Guatemala . 128

14. Bibliografía **129**

15. Anexos **134**

16. Glosario **136**

Lista de figuras

1. Mapa de cuencas hidrográficas de la República de Guatemala 11
2. Escurrimiento superficial anual por vertiente 11
3. Proceso de potabilización 12
4. Estructura jerárquica de la cuenca hidrográfica 15
5. Impactos acumulados de las actividades humanas en una cuenca hidrografica 15
6. Estructura jerárquica de la cuenca hidrográfica 16
7. Divisoria de la cuenca hidrográfica la cuenca hidrogeológica 16
8. Cuenca hidrográfica de la República de Guatemala 17
9. Esquema del sistema natural de la cuenca hidrográfica 18
10. Componentes de una cuenca hidrográfica 19
11. Fases del manejo integral de la cuenca 20
12. Delimitación de una cuenca 21
13. Cuenca, subcuenca y microcuenca 22
14. Partes de una cuenca 22
15. Clasificación de los contaminantes 23
16. Seguridad hídrica 24
17. Indicadores de seguridad hídrica en municipios 24
18. Cuenca endorréica 25
19. Cuenca exorréica 26
20. Zonas principales de funcionamiento hídrico de una cuenca 27
21. Subsistemas de una cuenca hidrográfica que interaccionan en el tiempo y espacio 29
22. Visión integral de la cuenca como sistema con interacciones entre la parte alta, media y baja, el agua como recurso integrador y el análisis de problemas y potencialidades. 29
23. El ciclo y los procesos del manejo y la gestión de cuencas hidrográficas 31
24. Disponibilidad anual de agua a nivel nacional y por vertientes 32
25. Utilización de agua en Guatemala por actividades económicas para el 2010 . . 33
26. Matriz energética 34
27. Listado de hidroeléctricas de Guatemala 34
28. Proceso para la obtención de una imagen clasificada 36
29. ENVI 38
30. Sistema de información geográfica SIG 39
31. Fotogrametría terrestre 40

32. Sistema de teledetección 40
33. Mapa topográfico de Guatemala 41
34. Mapa temático de Guatemala 42
35. Distribución de las bandas en OLI y TIRS 44
36. Cuadro de las distintas combinaciones posibles. 46

37. Instituciones y organizaciones relacionadas con el manejo de recurso hídrico . 56
38. Instituciones y organizaciones relacionadas con el manejo de recurso hídrico . 56
39. Instituciones y organizaciones relacionadas con el manejo de recurso hídrico . 57
40. Instituciones y organizaciones relacionadas con el manejo de recurso hídrico . 57
41. Instituciones con programas de investigación sobre recursos hídricos 58
42. Régimen legal de aguas 60

43. Composición coloreada color natural para el año 2019 73
44. Composición coloreada color natural para el año 2017 73
45. Composición coloreada color natural para el año 2016 74
46. Composición coloreada color natural para el año 2015 74
47. Composición coloreada color falso natural para el año 2019 75
48. Composición coloreada color falso natural para el año 2017 76
49. Composición coloreada color falso natural para el año 2016 76
50. Composición coloreada color falso natural para el año 2015 77
51. Composición coloreada color suelo/agua para el año 2019 78
52. Composición coloreada color suelo/agua para el año 2017 78
53. Composición coloreada color suelo/agua para el año 2016 79
54. Composición coloreada color suelo/agua para el año 2015 79
55. Composición coloreada color natural con remoción atmosférica para el año 2019 80
56. Composición coloreada color natural con remoción atmosférica para el año 2017 81
57. Composición coloreada color natural con remoción atmosférica para el año 2016 81
58. Composición coloreada color natural con remoción atmosférica para el año 2015 82
59. Índice de cociente de vegetación (B4/B3) para el año 2019 83
60. Índice de cociente de vegetación (B4/B3) para el año 2017 83
61. Índice de cociente de vegetación (B4/B3) para el año 2016 84
62. Índice de cociente de vegetación (B4/B3) para el año 2015 84
63. Índice inverso del cociente de vegetación (B3/B4) para el año 2019 85
64. Índice inverso del cociente de vegetación (B3/B4) para el año 2017 86
65. Índice inverso del cociente de vegetación (B3/B4) para el año 2016 86
66. Índice inverso del cociente de vegetación (B3/B4) para el año 2015 87
67. Índice de cociente rojo verde - RGRI (B3/B2) para el año 2019 87
68. Índice de cociente rojo verde - RGRI (B3/B2) para el año 2017 88
69. Índice de cociente rojo verde - RGRI (B3/B2) para el año 2016 88
70. Índice de cociente rojo verde - RGRI (B3/B2) para el año 2015 89
71. Índice inverso del cociente rojo verde - RGRI (B2/B3) para el año 2019 . . . 89
72. Índice inverso del cociente rojo verde - RGRI (B2/B3) para el año 2017 . . . 90
73. Índice inverso del cociente rojo verde - RGRI (B2/B3) para el año 2016 . . . 90
74. Índice inverso del cociente rojo verde - RGRI (B2/B3) para el año 2015 . . . 91
75. Combinación de bandas para el año 2019 92
76. Combinación de bandas para el año 2017 92
77. Combinación de bandas para el año 2016 93

78. Combinación de bandas para el año 2015 93
79. Mapa temático: Índice de vegetación (NDVI) para el año 2019 94
80. Estadísticas obtenidas para el índice de vegetación (NDVI) para el año 2019 . 95
81. Mapa temático: Índice de vegetación (NDVI) para el año 2017 96
82. Mapa temático: Índice de vegetación (NDVI) para el año 2016 96
83. Mapa temático: Índice de vegetación (NDVI) para el año 2015 97
84. Planta muy sana para el índice de vegetación NDVI 98
85. Planta medianamente sana para el índice de vegetación NDVI 99
86. Planta muerta u objeto inanimado para el índice de vegetación NDVI 100
87. Mapa temático: Índice de agua normalizada (NDWI) para el año 2019 101
88. Estadísticas obtenidas para el índice de agua normalizada (NDWI) para el año 2019 102
89. Mapa temático: Índice de agua normalizada (NDWI) para el año 2017 103
90. Mapa temático: Índice de agua normalizada (NDWI) para el año 2016 103
91. Mapa temático: Índice de agua normalizada (NDWI) para el año 2015 104
92. Superficies sin vegetación o agua para el índice de agua normalizada NDWI . 105
93. Zonas con cobertura e hidratación creciente para el índice de agua normalizada NDWI 106
94. Cobertura asignada con la clasificación original 107
95. Mapa de cobertura de suelo para el Departamento de Guatemala en el año 2019 110
96. Estadísticas obtenidas para la cobertura de suelo para el Departamento de Guatemala para el año 2019 111
97. Mapa de cobertura de suelo para el Departamento de Guatemala en el año 2017 112
98. Mapa de cobertura de suelo para el Departamento de Guatemala en el año 2016 112
99. Mapa de cobertura de suelo para el Departamento de Guatemala en el año 2015 113
100. Comportamiento del cambios del uso del suelo en el Departamento de Guatemala 114
101. Densidad poblacional de las principales cuencas el Departamento de Guatemala 118
102. Mapa de densidad poblacional del Departamento de Guatemala 120
103. Mapa temático: Ejemplo de la cobertura de suelo en el Departamento de Guatemala. 125

104. Cobertura asignada con la clasificación original para el año 2015 134
105. Cobertura asignada con la clasificación nueva para el año 2015 135

Lista de cuadros

1. Características de las aguas residuales 13
2. Clasificación de cuencas 16

3. Nomenclatura de las bandas utilizadas 68

4. Clasificación asignada para la vegetación según el rango de NDVI. 97
5. Resumen de los resultados estadísticos obtenidos para cada año establecido . 97
6. Clasificación asignada para la hidratación de la vegetación según el rango de NDWI. 105
7. Resumen de los resultados estadísticos obtenidos para cada año establecido . 105
8. Cobertura asignada para cada clasificación generada en ENVI 108
9. Identificador para la cobertura asignada 108
10. Reclasificación de los distintos tipos de cobertura presentes en el área 109
11. Categoría de uso del suelo para el Departamento de Guatemala 114
12. Categoría de uso del suelo para la cuenca María Linda 115
13. Categoría de uso del suelo para la cuenca Los Esclavos 115
14. Categoría de uso del suelo para la cuenca Motagua 116
15. Uso de suelo en las cuencas que componen al Departamento de Guatemala . . 116
16. Densidad poblacional del Departamento de Guatemala 117
17. Densidad poblacional de la cuenca Río María Linda 119
18. Densidad poblacional de la cuenca Río Los Esclavos 119
19. Densidad poblacional de la cuenca Río Motagua 119
20. Densidad de la cuenca Río Achiguate 120

Resumen

En este trabajo de tesis, se llevó a cabo un análisis del cambio del uso de suelo, por medio de imágenes satelitales y del aumento poblacional en las principales cuencas hidrográficas del departamento de Guatemala, las cuales son: La cuenca del Río Motagua, Río María Linda, Río Los Esclavos y Río Achiguate. El objetivo del estudio fue relacionar el aumento poblacional, los cambios del uso del suelo y las actividades humanas con el deterioro del recurso hídrico.

Se utilizaron herramientas de información geográfica y aplicaciones de teledetección, para generar mapas temáticos que permiten de manera eficaz analizar el cambio de un territorio. Inicialmente se planteó analizar los años 2006, 2010, 2015 y 2019, sin embargo, las imágenes disponibles de dichos años no cumplían con los parámetros estipulados, para la implementación de la metodología, por lo que se analizaron los años 2015, 2016, 2017 y 2019.

La hipótesis planteada establece que el crecimiento poblacional influye en la cobertura vegetal del suelo y el aprovechamiento de los recursos hídricos del departamento de Guatemala. En el estudio la población en las cuatro cuencas presentaron un crecimiento considerable: La cuenca del Río Motagua presentó la mayor densidad poblacional para el año 2018, con una densidad promedio de 169,581 hab/km2, seguido por el Río María Linda con 93,610 hab/km2. A partir de lo analizado, se concluyó que la mayor tendencia en la dinámica del uso del suelo es hacia la expansión de los asentamiento humanos, la densidad poblacional presentó un incremento continuo por lo que se puede interpretar como un decrecimiento de áreas boscosas del territorio.

La metodología utilizada y la información generada, es de mucha utilidad para diferentes ramas de estudio, relacionados con el uso de los recursos naturales y el comportamiento humano. Permiten determinar riesgos y áreas de oportunidad para plantear proyectos de recuperación o de mejora.

Abstract

In this thesis work, an analysis of the change in land use was carried out, through satellite images and the population increase in the main hydrographic basins of the department of Guatemala, which are: The Motagua River basin, Río María Linda, Río Los Esclavos and Río Achiguate. The objective of the study was to relate the population increase, changes in land use and human activities with the deterioration of the water resource.

Geographic information tools and remote sensing applications were used to generate thematic maps that allow an efficient analysis of the change in a territory. Initially, it was proposed to analyze the years 2006, 2010, 2015 and 2019, however, the images available for those years did not meet the stipulated parameters for the implementation of the methodology, so the years 2015, 2016, 2017 and 2019 were used.

The proposed hypothesis establishes that population growth influences the vegetation cover of the soil and the use of water resources in the department of Guatemala. In the study, the population in the four basins showed considerable growth: The Motagua River basin presented the highest population density for 2018, with an average density of 169,581 inhabitants / km2, followed by the María Linda River with 93,610 inhabitants / km2 . Based on the analysis, it was concluded that the greatest trend in the dynamics of land use is towards the expansion of human settlements, the population density presented a continuous increase, which can be interpreted as a decrease in forest areas of the territory.

The methodology used and the information generated is very useful for different branches of study, related to the use of natural resources and human behavior. They make it possible to determine risks and areas of opportunity to propose recovery or improvement projects.

CAPÍTULO 1

Introducción

Guatemala es una país joven, con una población de dieciséis millones de habitantes a nivel nacional. Solo en el departamento de Guatemala, conformado por 272.65 km2, hay una población de 3.15 millones de habitantes y en su mayoría la expansión urbana se ha desarrollado a mayor escala en la zona central de la ciudad de Guatemala.

Datos de los censos poblacionales realizados en 1994 y 2002 por el Instituto Nacional de Estadística (INE), indican que el ritmo del crecimiento poblacional es muy parecido al de la expansión urbana, ambos con un 4.3 % anual. Los habitantes del municipio de Guatemala representan el 30 % de la población total del departamento de Guatemala, seguido de Mixco con el 15.5 %.

Por consiguiente, al analizar las actividades principales: comerciales e industriales de la ciudad capital de Guatemala, ambas han tenido un crecimiento considerable durante los años, cambiando constantemente el uso del suelo y por consiguiente se han reducido los recursos naturales, principalmente el hídrico causando falta de agua en diversas comunidades. De continuar este crecimiento de población sin políticas de control y recuperación, se corre el riesgo de mayor escasez y calidad de agua.

De acuerdo con los informes del Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA) la zona metropolitana se abastece principalmente de agua subterránea para satisfacer las demandas de diferentes servicios (Consumo humano, actividades de riego e industria). Los problemas relacionados con la contaminación ambiental en Guatemala son múltiples, entre los más importantes se debe a la deforestación, erosión acelerada del suelo y también el rápido crecimiento poblacional que producen una fuerte presión sobre los recursos naturales.

En este contexto es de vital importancia que todos los guatemaltecos tengan conocimientos sobre la situación demográfica que se está viviendo, principalmente para el uso adecuado de los recursos naturales que tiene el país.

Por esa razón y con el objetivo de identificar y analizar el uso de los suelos en el departamento de Guatemala y debido al crecimiento de la población y a la falta de políticas claras y procesos que ordenen de una manera eficiente dicho departamento, es necesario analizar el deterioro de las cuencas y el recurso hídrico, determinando el impacto que ha generado el aumento poblacional en los años 2015, 2016, 2017 y 2019; utilizando la siguiente clasificación: Boscosa, Urbanización, Pastos y Cultivos Generales.

Además, se hizo un procesamiento de imágenes por composición coloreada, cocientes e índices de ENVI, y la clasificación no supervisada del uso del suelo en las cuencas del Departamento de Guatemala. Que permite una mejor visualización de la imagen y poder diferenciar a simple vista las áreas urbanas de las áreas verdes y los cuerpos de agua.

Igualmente, se incluye un análisis de la densidad y aumento poblacional sobre la mancha urbana, para los municipios que integran el área de las cuencas del Departamento de Guatemala, con el cual se relaciona la cantidad de personas que viven en el territorio y la extensión de éste.

Las herramientas que se utilizaron para el análisis son: Qgis (Software gratuito sobre información geográfica) y ENVI (Entorno para Visualización de Imágenes). La integración de la teledetección y los SIG permite el mejoramiento de los productos derivados de la teledetección.

Asimismo, el análisis generado brinda información y datos para conocer el uso de suelo que tiene el departamento de Guatemala y sus cuatro cuencas principales: Río Motagua, Río María Linda, Río Los Esclavos y Río Achiguate.

CAPÍTULO 2

Antecedentes

La Ciudad de Guatemala se localiza en el Llano de la Virgen o de la Ermita, sitio que desde 1530 también era conoció como valle de Las Vacas, debido al ganado de reproducción que importara dese La Habana. El valle se encuentra rodeado de montañas, barrancos y volcanes, los cuales al paso del tiempo se han convertido en silenciosos y pacientes testigos de los procesos de su transformación desde su traslado hacia ente valle en 1773 hasta el día de hoy.

Alrededor de los años 1945 y 1976 Se registro un incremento de población, debido al inicio del proceso de industrialización del país. Se crean políticas de vivienda y las primeras lotificaciones, las cuales registraron problemáticas en la planificación urbana tanto de los constructores como de la Municipalidad de Guatemala. Desde la década de 1960, la Ciudad de Guatemala experimentó una expansión urbana acelerada, fruto de un crecimiento horizontal que se caracteriza por la baja densidad de habitantes por hectárea construida, cuya tendencia de crecimiento se preveía en ese entonces que para el año 2000 llegaría a tener cuatro millones de habitantes. Dicho evento llevó a plantear cambios en los patrones de asentamiento del área metropolitana.

El uso del suelo en el departamento de Guatemala a través del tiempo ha sido para actividades agrícolas, principalmente en la región de occidente, norte y sur siendo esta última de mayor importancia debido a que se encuentran algunos de los principales cultivos de exportación. El crecimiento de la frontera agrícola en dichas regiones ha llevado a que las áreas que se componen por zonas boscosas cambien su uso a cultivos, dentro de estas actividades agrícolas, el cambio de uso de la tierra se ha observado drásticamente.

La región metropolitana se ha visto a su vez influencia por el cambio de uso de la tierra principalmente por la expansión urbana (Demografía), esto se ve reflejado en los municipios que comprende esta región que son: San José Pínula, Mixco, San Juan, Villa Nueva, Amatitlán y San Lucas, este cambio de uso de la tierra ha impactado mayormente en el municipio de San Lucas Sacatepéquez, debido a que en este municipio se han otorgado licencias de aprovechamiento forestal aprobadas por el INAB, las cuales han provocado problemas con la sociedad civil, por la discrepancia en ideología del recurso forestal (Macario, 2011).

Por lo tanto diagnósticos realizados anteriormente en los municipios determinan que no existe un estudio de capacidad de uso de la tierra a una escala de detalle, que proporcione información base sobre la cual se pretenda, generar o proponer los lineamientos para este recurso, orientado principalmente en el tema de cambio de uso de la tierra en base a su capacidad de uso.

CAPÍTULO 3

Justificación

Al generar un estudio sobre el aprovechamiento de las fuentes de agua y el cambio de uso de suelo, respecto al aumento poblacional en la ciudad capital de Guatemala, se logra obtener una predisposición del manejo de los recursos, tanto para el ambiente social, económico, biofísico y como el ambiental.

La ciudad de Guatemala se cataloga como el núcleo urbano más grande y productivo de Centroamérica, actualmente se encuentra en un proceso rápido de expansión urbana y desarrollo económico, que ha generado problemáticas en el tema de los recursos hídricos que se asemejan a otras grandes ciudades latinoamericana. (FUNCAGUA, 2020)

El análisis de cuencas enfocado al aumento poblacional, su inadecuada distribución y el incremento de las actividades económicas y productivas, ejercen una fuerte presión sobre los recursos naturales de las cuencas hidrográficas, especialmente sobre los recursos hídricos.

Es un tema de gran importancia ya que existen muchos aspectos que se pueden utilizar, para la futura elaboración de un plan de manejo adecuado, y así evitar futuros riesgos como la escasez de dichas fuentes. Las cuencas hidrográficas son la base del ciclo del agua, cuando estos recursos son dañados el ciclo se rompe, por lo que, todos los elementos que interactúan sufren los daños (IARNA,2015).

Según los registros de Empagua el abastecimiento que presenta la Región Metropolitana de Guatemala, proviene en un 50.4 % de aguas superficiales y 49.6 % de aguas subterráneas. Para recuperar el volumen de agua subterránea se necesitan 330 años. La RMG presenta constante degradación de las cuencas que abastecen el agua y la contaminación de ríos y mantos acuíferos (EMPAGUA, 2015).

Con la ayuda de las herramienta SIG y de teledetección junto con sus diversas aplicaciones, se pueden realizar análisis sobre el impacto que se genera en la cuenca. Estas herramientas no solo facilitarán el análisis, sino, también permitirá que personas en el futuro puedan ir actualizando una base de datos existente, dando a conocer el cambio ocurrido con el proyectado. Además, la cuantificación de los cambios de uso del suelo, por medio de la

percepción remota junto con herramientas de análisis brindada por el Sistema de Información Geográfica, para modelar los procesos de cambio, permitirá de manera eficaz analizar el cambio de un territorio.

Para realizar el marco metodológico, se ejecutan diversas etapas que abarcan, desde la obtención de la información con la que se trabajará según las herramientas empleadas, hasta el resultado del análisis. Esta información generará una línea basal de estudio, que permita a las siguientes investigaciones y/o análisis dar seguimiento a partir de los resultados presentados.

CAPÍTULO 4

Objetivos

4.1. Objetivo general

Elaborar un diagnóstico de la situación actual de las cuencas en el departamento de Guatemala, para relacionar el aumento poblacional y el cambio de uso de suelo con el deterioro hídrico superficial.

4.2. Objetivos específicos

- Realizar un análisis multitemporal en el departamento de Guatemala, mediante percepción remota y SIG, tomando como información básica imágenes del sensor Landsat de los años 2006, 2010, 2015 y 2019.
- Analizar el cambio del uso del suelo en las cuencas del municipio de Guatemala.
- Desarrollar mapas temáticos, que comparen la información obtenida de cada periodo analizado.
- Estudiar las morfologías de las actividades humanas, realizadas en las cuencas hidrográficas.
- Recomendaciones del manejo de las cuencas de los municipios de Guatemala.

CAPÍTULO 5

Objeto de estudio

Cuantificar los cambios ocurridos en el uso del suelo de las cuencas hidrográficas del departamento de Guatemala, como resultado del crecimiento urbano en los años 2015, 2016, 2017 y 2019.

CAPÍTULO 6

Alcance

Este trabajo de graduación, busca trabajar con la herramienta de procesamiento de imágenes satelitales ENVI, para implementar técnicas de percepción remota y la clasificación no supervisada de uso de suelos y obtener información acerca del cambio de la cobertura vegetal. Asimismo, esta información será vinculada con Sistemas de Información Geográfica para acceder a los parámetros de estudios requeridos para los análisis posteriores.

La investigación abarca únicamente a las cuencas ubicadas dentro del departamento de Guatemala, las cuales son el Río Motagua, Río María Linda, Río Los Esclavos y Río Achiguate.

En cuanto a la delimitación temporal se centró en los años 2015, 2016, 2017 y 2019, además se realizó un análisis comparativo del uso del suelo y el cambio de la densidad poblacional durante el tiempo mencionado.

Por lo anterior, la delimitación espacial de la investigación se circunscribe en el ámbito de las imágenes provenientes de satélites espaciales, debido a que no toda la información gratuita disponible a todo público, cumple con las características necesarias para implementar la metodología.

Otra delimitación a tomar en cuenta, es la adquisición de los datos actualizados de la cantidad de población que habita en el departamento y municipios de Guatemala, por lo que se trabajó con proyecciones basadas en tasas de crecimiento.

Los distintos enfoques y métodos para la interpretación de imágenes, presentan variaciones y desventajas según la finalidad del análisis, por lo que se requiere de personal especializado y experimentado de la cobertura de la zona.

CAPÍTULO 7

Marco teórico

7.1. Agua superficial y subterránea

7.1.1. Agua superficial

Es la rama de la hidrología que se encarga de analizar los fenómenos y procesos hidrológicos que suceden en la superficie terrestre entre los flujos. Las aguas superficiales son flujos o corrientes en la superficie del suelo, usualmente provienen de las precipitaciones de cada cuenca. Existe dos clasificaciones importantes las cuales son:

Aguas lóticas

Se identifican como masas de agua que se mueven en una dirección como los ríos, manantiales, arroyos, ramblas y riachuelos.(Miteco, 2020).

Aguas lénticas

Se definen como aguas interiores con poco movimiento o estancadas como se comportan los lagos, lagunas, humedales, charcas y pantanos.

En Guatemala el sistema hidrográfico se divide en tres vertientes principales las cuales son: Vertiente del Océano Pacífico que compone el 24 % del territorio nacional con 18 cuencas y algunos ríos que arrastran sedimentos de origen volcánico que pueden llegar a causar inundaciones periódicas al ser depositadas en la llanura costera. La Vertiente del Mar Caribe compone el 34 % del territorio nacional con 10 cuencas, donde la principal es el Río Motagua y la tercera es la Vertiente del Golfo de México que conforma el 42 % del territorio nacional con 10 cuencas las cuales conforman los ríos más caudalosos que se depositan hacia el territorio mexicano (Miteco, 2020).

"El escurrimiento superficial se estima en 100.7 km3/año, distribuidos en 25.5 km3/año para la vertiente del Pacífico, 31.9 km3/año para la vertiente del Mar Caribe y 43.3 km3/año para la vertiente del Golfo de México." (FAO, 2019).



Figura 1: Mapa de cuencas hidrográficas de la República de Guatemala
Fuente: (MAGA, 2001).

Guatemala cuenta con cuatro regiones hidrogeológicas, la primera se compone por las llanuras aluviales cuaternarias del Pacífico, la segunda región se conforma por el altiplano volcánico de rocas terciarias y cuaternarias, la tercera región se conforma por la cadena montañosa de tierras altas cristalinas de rocas ígneas y metamórficas, la última consta de la región sedimentaria del Norte de rocas calizas del espacio.

Vertiente	Número de cuencas	Superficie total (km^2)	Superficie total (%)	Escorrentía superficial (km^3/año)	Escorrentía superficial (%)
Océano Pacífico	18	25 807	24	25.5	25
Mar Caribe	10	37 240	34	31.9	32
Golfo de México	10	45 843	42	43.3	43
Total	**38**	**108 890**	**100**	**100.7**	**100**

Figura 2: Escurrimiento superficial anual por vertiente

7.1.2. Agua subterránea

Es el agua que se localiza por debajo de la superficie terrestre y llena los poros y las fisuras de las rocas más sólidas. Se mantiene a una temperatura promedio según la zona en la que se encuentre. El agua subterránea desempeña una parte constante del ciclo hidrológico, esta se puede encontrar a poca profundidad.

El agua subterránea representa aproximadamente un 20 porciento más que el total de las aguas superficiales que se conforma por todos los continentes e islas a nivel global. Es de gran importancia ya que forma parte como recurso de agua dulce según el flujo anual, como reserva natural ya que es de carácter fundamental para mantener el caudal de muchos ríos y la humedad del suelo.

La movilidad del agua subterránea será diferente en cada zona ya que depende del tipo de roca que se encuentre bajo tierra. Los acuíferos se determinan como capas permeables saturadas que soportan un suministro útil de agua, se componen por arenas, gravas, caliza o basaltos. Existen diversas capas como las arcillas, glaciares y limos que reducen el flujo del agua subterránea (Ambientum, 2020).

7.2. Agua potable

El agua potable se entiende como aquella es adecuada para el consumo humano y para todo uso doméstico habitual. Para catalogar como agua potable debe cumplir con las siguientes características: limpia, inodora, sin turbidez, presencia de minerales como el cloro y yodo en sus cantidades adecuadas establecidas para el consumo. El agua debe pasar por un proceso de potabilización a base de filtros y otros agentes purificadores.

Es necesario que el agua pase por un proceso de potabilización riguroso debido a la contaminación que se presencia en la mayoría de los recursos hídricos, para ellos se somete a diversas operaciones que varían según de donde provenga ya sea de aguas superficiales o aguas subterráneas ya que de eso dependerá el tratamiento que se necesite. (Mitre, 2012).

En la siguiente imagen se visualizan los procesos para potabilizar el agua en donde se inicia con la captación en la toma del rio, desarenador, bombeo de baja, cámara de mezcla, decantador, filtro, desinfección, bombeo de alta, tanque de reserva y el control final.

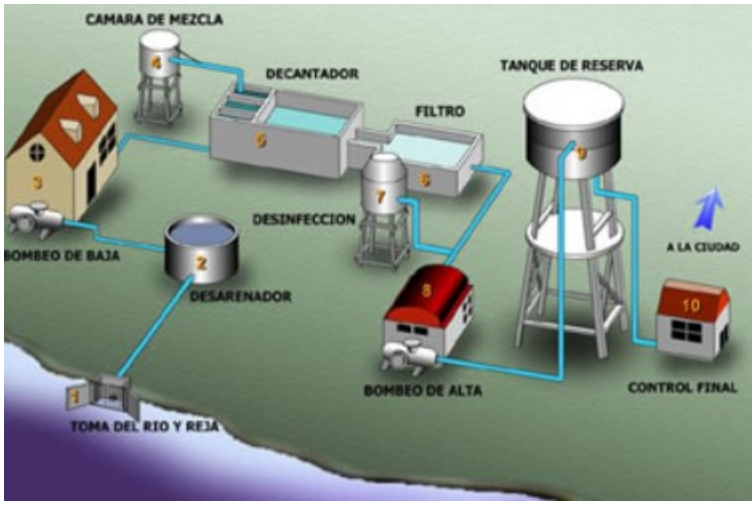


Figura 3: Proceso de potabilización

7.3. Agua residual

El agua residual se entiende como toda aquella que ha recibido un eso y cuyas características han sido modificadas. La descarga de aguas residuales es la acción del vertimiento de estas sin antes recibir un tratamiento adecuado. El manejo inadecuado de aguas residuales en lagos, ríos o cuerpos de aguas genera impactos negativos. Los desechos solios son otra causa que inicia la contaminación (Mijangos, 2006).

Las aguas residuales se pueden se clasifican según su origen y composición:

7.3.1. Aguas residuales ordinarias o de tipo doméstico

El agua que se utiliza en hogares contiene residuos provenientes de las diversas actividades humanas como la materia fecal, restos de alimentos, aceites, grasas, detergentes, sales, sedimentos, material orgánico y microorganismos patógenos entre otros. Las aguas residuales domesticas constituye una de las principales fuentes de contaminación de los recursos hídricos de Guatemala; el origen se basa en los sistemas de drenaje de los centros urbanos con mayor población los cuales tienden a descargar directamente en los causes de los ríos. En Guatemala los ríos mas contaminados en el área metropolitana son el de Villalobos con un 60 % de su composición es de aguas residuales urbanas y el río de las Vacas con un 40 % lo cual genera un gran impacto en las zonas aledañas a dichos cuerpos (Mijangos, 2006).

7.3.2. Aguas residuales especiales o industriales

La contaminación de aguas residuales provenientes de las industrias es de las mas complejas de tratar debido a que el proceso depende del tipo de industria ya sea de alimentos y textiles entre otros. Los caudales y las características de la descarga no es constante en el tiempo esto depende del tipo de producción y el proceso industrial por dicho motivo existe variación en el caudal y carga a lo largo del día (Mijangos, 2006).

Origen	**Contenido**	**Materiales Contaminantes**
Agrarias	Estiércol Restos abonos Restos de aditivos	Sólidos macroscópicos Materias en suspensión Materias disueltas
Domésticas	Residuos orgánicos Productos de lavado	Grasas y aceites Materia orgánica Gérmenes patógenos
Industriales	Muy variable Orgánico Inorgánico Mixto	Materia orgánica Metales Sólidos en suspensión

Cuadro 1: Características de las aguas residuales

7.4. Acuíferos de la ciudad de Guatemala

7.4.1. Acuífero superior

El acuífero superior es de tipo freático ya que se compone por sedimentos aluviales que se depositan en la parte media e inferior de los ríos Villalobos y Pinula los cuales tienen una extensión de 60 km cuadrados y de 10 a 30 m de espesor. Dentro del acuífero se localizan depósitos cuaternarios de piroclastos pomáceos compactos, debajo de estos sedimentos se observan lavas terciarias que forman la base del valle de la parte sur de la ciudad de Guatemala la cual presenta una extensión mayor a 200 km cuadrados.

El acuífero superior se compone por diversas características hidrológicas como: sus diferentes tamaños granulométricos ya que compone el material de relleno que varía entre bloques, gravas de rocas volcánicas, arenas de pómez, arcillas y limos lo cual compone una permeabilidad primaria dentro del acuífero.(Herrera, 2010).

"Los valores de transmisividad para los piroclastos varían de 50 a 750 m2 /día, mientras que los sedimentos aluviales del río Villalobos tienen una transmisividad entre 150 a 2000 m2 /día (Yol, 2002). Los valores de coeficiente de almacenamiento asignado para los depósitos piroclásticos es 0,09 y para los depósitos aluviales de 0,20 (Velásquez, 1998)."

7.4.2. Acuífero inferior

Se compone principalmente por lavas andesíticas, dichas lavas presentan características como: fracturación, espesor de 400m y alta permeabilidad por lo que constituyen el principal acuífero del área. El acuífero inferior se compone por diversas características hidrológicas como: permeabilidad secundaria, piroclastos compactos, sedimentos finos los cuales son impermeables. La transmisividad varía entre 500 y 5000 m2 /día, asignando un valor de 8x10-3 al coeficiente de almacenamiento para rocas volcánicas fracturadas del valle de Guatemala (Herrera, 2010).

7.5. Cuenca hidrográfica

La cuenca hidrográfica se entiende como espacios territoriales que se delimitan por un parteaguas (Punto más alto de la montaña) donde se concentran todos los escurrimientos como ríos y arroyos que desembocan en un punto en común llamado punto de salida de la cuenca; esta puede ser endorreica (lago) o exorreica (mar). El agua que forma parte de la cuenca proviene en su mayoría de lluvias y riego que filtra por la superficie del suelo lo que se le llama escurrimiento. Los bordes de las cuencas son vértices de las montañas y la boca es la salida del río, lo que forma una especie de embudo natural (Cotler, 2013).



Figura 4: Estructura jerárquica de la cuenca hidrográfica

Las cuencas hidrográficas permiten analizar y comprender el ciclo hidrológico con el objetivo de cuantificar e identificar los impactos acumulados provenientes de las diversas actividades humanas o externalidades como lo son los sedimentos, nutrientes y contaminantes entre otros.



Figura 5: Impactos acumulados de las actividades humanas en una cuenca hidrografica

Las cuencas hidrográficas presentan una estructura jerárquicamente ya que presenta limitantes en salidas puntuales; se dividen en subcuencas y microcuencas delimitadas por un parteaguas con el propósito de que se concentren los escurrimientos que desembocan

de los ríos. Los limitantes de las microcuencas pueden definirse según al municipio al que pertenezca (Cotler, 2013).

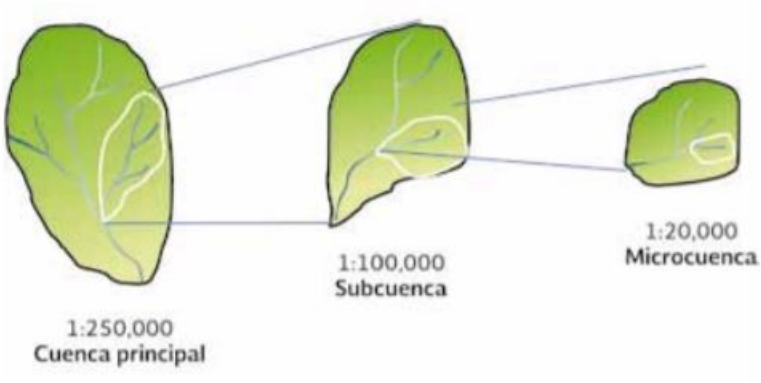


Figura 6: Estructura jerárquica de la cuenca hidrográfica

Unidad	No. de orden	Área (Km2)
Microcuenca	1,2,3	10 -500
Subcuenca	4,5	500-2000
Cuenca	6, 7 o más	Más de 2000

Cuadro 2: Clasificación de cuencas. Describe el rango de la cuenca según su número de orden y su área.
Fuente:Propia

7.6. Cuenca hidrogeológica

La cuenca hidrogeológica se diferencia de la hidrográfica debido a que se enfoca en el análisis de la estructura subterránea del acuífero. Ambos tipos de cuenca se dividen en zona de funcionamiento hídrico, zona de cabecera, zona de captación y zona de emisión (Villón, 2016).



Figura 7: Divisoria de la cuenca hidrográfica la cuenca hidrogeológica

7.7. Cuenca hidrológica

La cuenca hidrológica es una unidad que permite la gestión que se realiza dentro de la cuenca hidrográfica. Se define como el área en donde se almacenan las aguas provenientes de la precipitación con el objetivo de formar un solo curso de agua; considera la dinámica del agua en el subsuelo para identificar la localización de acuíferos y sus diversas zonas de recarga. Las cuencas hidrográficas de la República de Guatemala se dividen en tres clasificaciones: las que vierten al Océano Pacífico, Mar de las Antillas y las que vierten en el Golfo de México (Hernández, 2015).

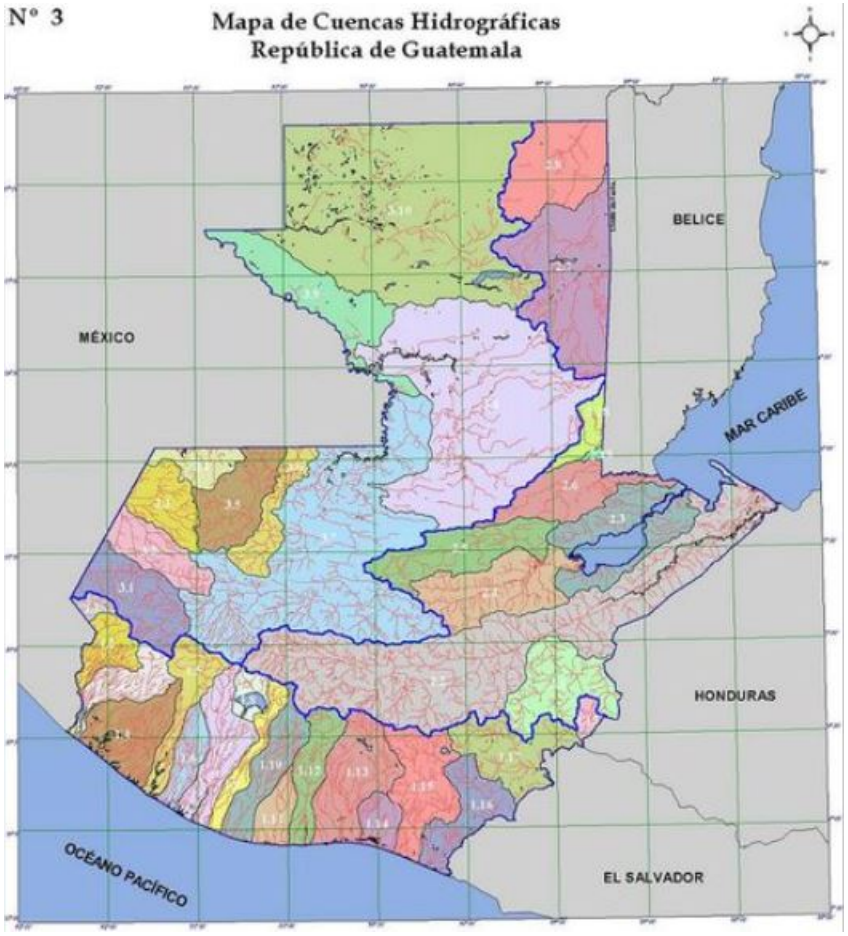


Figura 8: Cuenca hidrográfica de la República de Guatemala
Fuente: (MAGA, 2001).

7.8. Cuenca hidrográfica como sistema

El sistema de una cuenca hidrográfica es considerado como complejo ya que se compone por las interacciones de diversos subsistemas como: Sistema económico, social, biofísico y cultural. Como sistema biofísico se determina que la cuenca se conforma por una oferta ambiental en una proporción de área de limitada por divisoras de agua según características

específicas como el cima, suelos, bosques, uso de suelos y red hidrográfica entre otros. El subsistema económico que presenta una cuenca se basa en la disponibilidad de los recursos para producir bienes y servicios ya que en toda cuenca hidrográfica siempre existe la posibilidad de explotación o la manipulación de los recursos (García, 2003).



Figura 9: Esquema del sistema natural de la cuenca hidrográfica

En la Figura 9 se muestran los elementos que componen una cuenca hidrográfica en dicho sistema abierto existen influencias y dependencias entre los elementos de los subsistemas previamente planteados, lo cual la cuenca puede presentar un comportamiento complejo por lo que se le realiza un enfoque sistémico para un mejor conocimiento de la función de la cuenca hidrográfica y definir sus elementos y las relaciones que se generan ente ellos.

La correlación que se genera ente el medio social y el sistema natural se da fundamentalmente bajo tres aspectos los cuales son: El medio natural como fundamento de las actividades de los sistemas sociales, fuente de recursos naturales y receptor de residuos y efluentes. Los sistemas varían según la cuenca hidrográfica ya que cada una tiene un sistema complejo de procesos que relacionan los diversos sistemas sociales y naturales que se generan (García, 2003).

El uso de los fertilizantes en la práctica de la agricultura moderna es uno de los principales factores que deterioran el sistema natural originando la perdida de la fertilidad del suelo y a su misma vez genera la incapacidad para sustentar un grupo social. La disminución de las necesidades socioeconómicas se basa en la poca diversidad de especies en el sistema natural. La eliminación de los bosques tropicales genera la perdida de la biodiversidad lo que es decir una mayor vulnerabilidad del sistema natural y la alteración de los procesos autorreguladores (García, 2003).

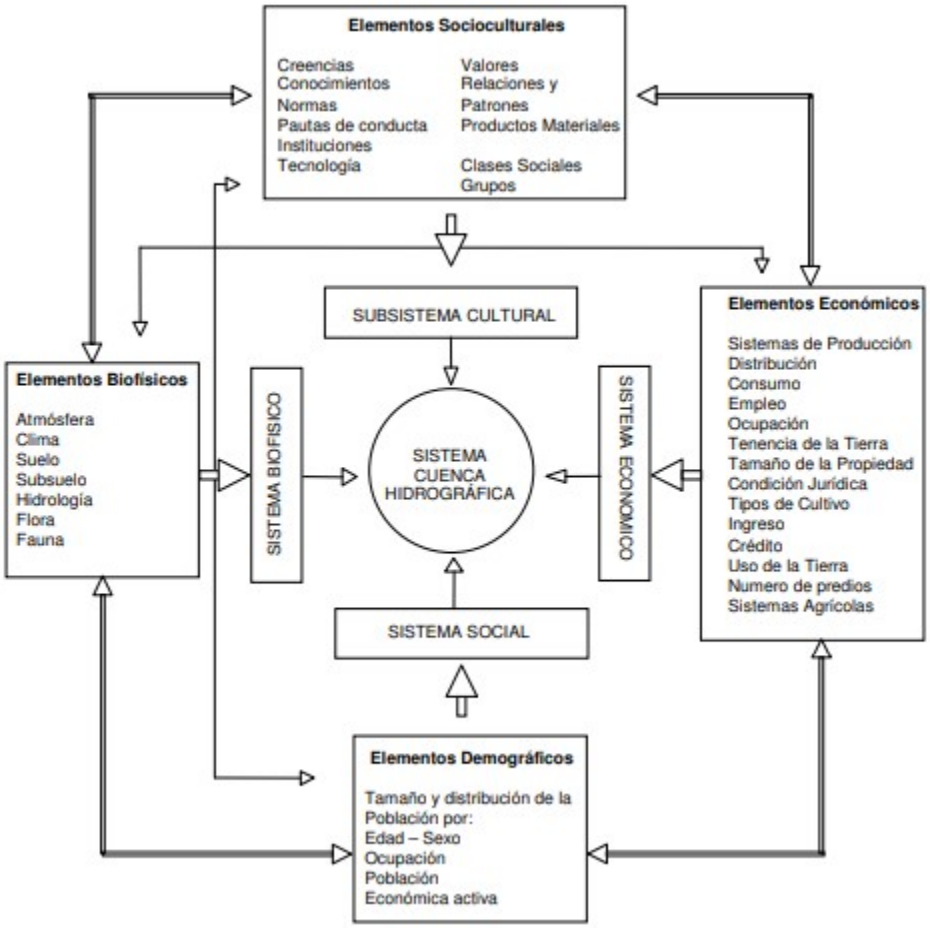


Figura 10: Componentes de una cuenca hidrográfica

7.9. Manejo de cuencas hidrográficas

El manejo de las cuencas se entiende como el proceso que busca la resolución de un conjunto de problemas interrelacionados. Dicho proceso se construye según la experiencia que se gana al sustentar y analizar la información científica y local.

Este proceso busca resolver problemas comunes, por lo que requiere de la concurrencia, la cooperación y la colaboración de diversos actores e instituciones con una visión común (Cotler, 2009).

El manejo apropiado de dicho recurso brinda beneficios a la sociedad, el cual da el paso para la generación de bienes y servicios que se enfocan en el ámbito ecológico, social y económico, eso se basa en el manejo participativo, adaptativo y sistemático a largo plazo. Como proceso flexible y adaptativo, el manejo de cuencas puede estar formado por distintas etapas, aunque por lo menos se pueden distinguir siempre cuatro fases (Cotler, 2009).



Figura 11: Fases del manejo integral de la cuenca

Dichas fases buscan identificar las causas de la problemática que se quiere resolver en conjunto con los actores involucrados con el objetivo de generar información para plantear las acciones alternas y corregir las practicas (Cotler, 2009).

El objetivo del manejo de cuencas es el desarrollo sostenible, con el propósito de mejorar la calidad de vida de las personas, crecimiento económico y desarrollo rural integral entre otros. A continuación, se describe la gestión que se debe de considerar en el manejo:

- Acción genérica:Consiste en desarrollar, rehabilitar, preservar y recuperar las cuencas hidrográficas. Dichas especificaciones se pueden aplicar en conjunto o separado.
- Sujetos de la acción genérica:Se entiende como el territorio o espacio geográfico hidrológico administrativo por ejemplo la cuenca como zona de captación o recepción del agua.
- Proceso de formulación y ejecución de un sistema de acción que incluye el manejo de los recursos de la cuenca para la obtención de bienes y servicios, sin afectar negativamente los recursos del suelo y agua. Debe considerar los factores sociales, económicos e institucionales que actúan dentro y fuera del área de la cuenca.

7.10. Delimitación de una cuenca hidrográfica

La delimitación de una cuenca se basa en las curvas de nivel, tomando como referencia las líneas del parteaguas la cual se constituye por los puntos mayores de las curvas de nivel y divide los cursos en los puntos de partida (Vargas, 2019).

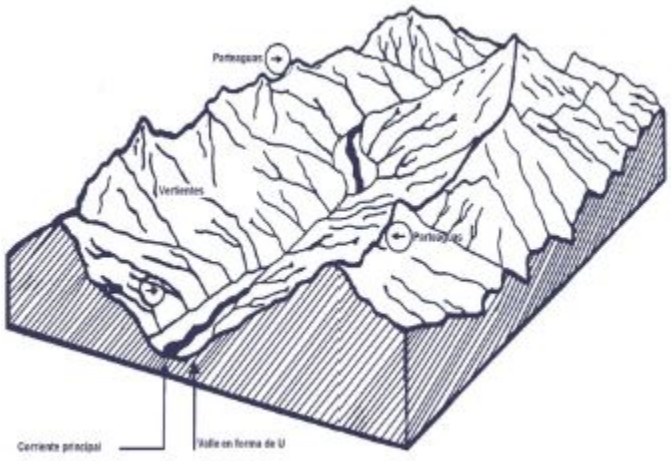


Figura 12: Delimitación de una cuenca

7.11. División y partes de una cuenca hidrológica

7.11.1. Subcuenca

Se entiende como el conjunto de microcuencas que drenan a un solo cauce con caudal fluctuante pero permanente

7.11.2. Microcuenca

Se define como el área en la que su drenaje va a dar al caudal principal de una subcuenca; por lo tanto, una subcuenca se compone o divide por varias microcuencas

7.11.3. Quebrada

Es el área que desarrolla su drenaje directamente a la corriente principal de una microcuenca (Ordoñez, 2011).

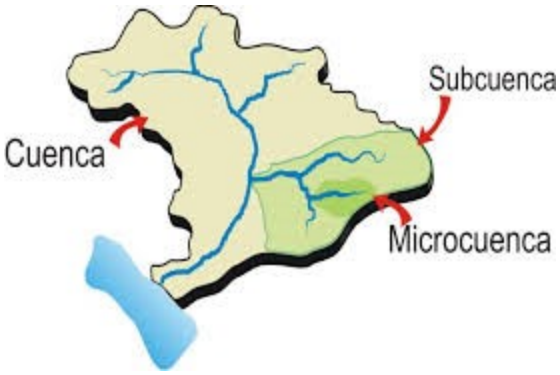


Figura 13: Cuenca, subcuenca y microcuenca

7.11.4. Cuenca alta

La cuenca alta corresponde a las áreas montañosas o cabeceras de los cerros, limitadas en su parte superior por las divisorias de aguas.

7.11.5. Cuenca media

Área donde se juntas las aguas recogidas provenientes de las partes altas y donde el río principal mantiene un cauce definido.

7.11.6. Cuenca baja o zonas de transicionales

Los ríos desembocan a ríos mayores o a zonas bajas tales como estuarios y humedales (Ordoñez, 2011).



Figura 14: Partes de una cuenca

7.12. Contaminación del recurso hídrico

La contaminación se entiende como la acción o efecto de contaminar la pureza o el estado del cuerpo. La contaminación en los recursos hídricos es la alteración de las propiedades físicas, quimas y biológicas que generan un efecto dañino a la salud, ecosistema y el bienestar de cualquier ser vivo que este en contacto de manera directa o indirecta con dicho sistema (Fernández, 2008).

La contaminación de los causes naturales proviene de las descargas de tipo ordinario, doméstico, especial o industrial y de contaminación difusa como lo es la lluvia y los lixiviados entre otros (Mijangos, 2016). Las sustancias contaminantes que se presencian en las aguas residuales se clasifican de la siguiente manera:

7.12.1. Contaminantes orgánicos

Su estructura química se forma por carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno; se presencian en descargas ordinarias y generados en la industria agroalimentaria como cultivos de verduras y legumbres.

7.12.2. Contaminantes inorgánicos

Son de origen mineral y de naturaleza variable como sales, óxidos, ácidos y bases inorgánicas. Dichos componentes se presencian en aguas residuales provenientes de industrias. Los componentes inorgánicos de las aguas residuales se clasifican según la función del material contaminantes o de su propia naturaleza; estos pueden ser: Arenas, grasas, residuos con requerimiento de oxígeno, agentes patógenos y petróleos entre otros (Mijangos, 2016).



Figura 15: Clasificación de los contaminantes

7.13. Seguridad hídrica

La seguridad hídrica se entiende como la provisión confiable de una cantidad y calidad de agua aceptable para la salud, la producción de bienes y servicios y los medios de subsistencia junto con un nivel aceptable de riesgos relacionados con el agua. La disposición de la población para resguardar el acceso sostenible a la cantidad de agua necesaria con calidad aceptable es uno de los principales factores que afectan la seguridad hídrica (CATHALAC, 2015).



Figura 16: Seguridad hídrica

#	Elemento de seguridad hídrica	Indicadores de evaluación
1	Disponibilidad de agua y fuentes de agua	▸ Disponibilidad de agua ▸ Grado de contaminación y degradación de fuentes de agua ▸ Cobertura boscosa ▸ Planes de manejo territorial / ordenanzas de manejo de cuenca
2	Agua y desarrollo	▸ Relevancia de los recursos hídricos a la economía ▸ Tecnologías de uso del agua y ahorro en los principales usos
3	Servicios	▸ Acceso a fuentes de agua mejoradas ▸ Calidad del agua de consumo ▸ Accesibilidad en precio del agua ▸ Acceso a instalaciones sanitarias mejoradas ▸ Manejo y disposición de residuos sólidos ▸ Manejo de residuos peligrosos y hospitalarios
4	Salud	▸ Incidencia de parasitosis y diarreas ▸ Incidencia de dengue y malaria
5	Seguridad alimentaria	▸ Incidencia de desnutrición, anemia, bajo peso al nacer o retardo en talla de menores de 5 años ▸ Producción local de alimentos
6	Seguridad energética	▸ Acceso a electricidad ▸ Disponibilidad local de fuentes de energía
7	Riesgos	▸ Riesgo a inundaciones ▸ Riesgo a sequías ▸ Riesgo a deslizamientos ▸ Riesgos a vendavales (para República Dominicana) /heladas (para Guatemala) ▸ Organización comunitaria ante desastres ▸ Accesibilidad en época de lluvias y comunicaciones ▸ Migración ocasionada por riesgo hidrometeorológico
8	Gobernabilidad	▸ Seguridad jurídica sobre los derechos de agua ▸ Participación del municipio en la gestión del agua ▸ Espacios de concertación y participación ▸ Transparencia y disposición de información ▸ Litigios relacionados con el agua

Figura 17: Indicadores de seguridad hídrica en municipios

7.14. Clasificación de cuencas por sistema de drenaje

7.14.1. Arréicas

Cuando el sistema no drena a un río, mar o lago. El agua que compone a la cuenca se pierde por la evaporación o infiltración ya que no se llega a formar un escurrimiento subterráneo (Francisco, 2000).

7.14.2. Criptorréicas

No se presenta un sistema de drenaje superficial organizado o aparente y corren como ríos subterráneos.

7.14.3. Endorréicas

El área de captación de la cuenca forma un sistema de corrientes que desemboca en un embalse o lago interior sin desembocar al mar (Aguírre, 2007).



Figura 18: Cuenca endorréica

7.14.4. Exorréicas

Las vertientes conducen las aguas por vía superficial o subterránea a un sistema con un drenaje mayor como río o mar.

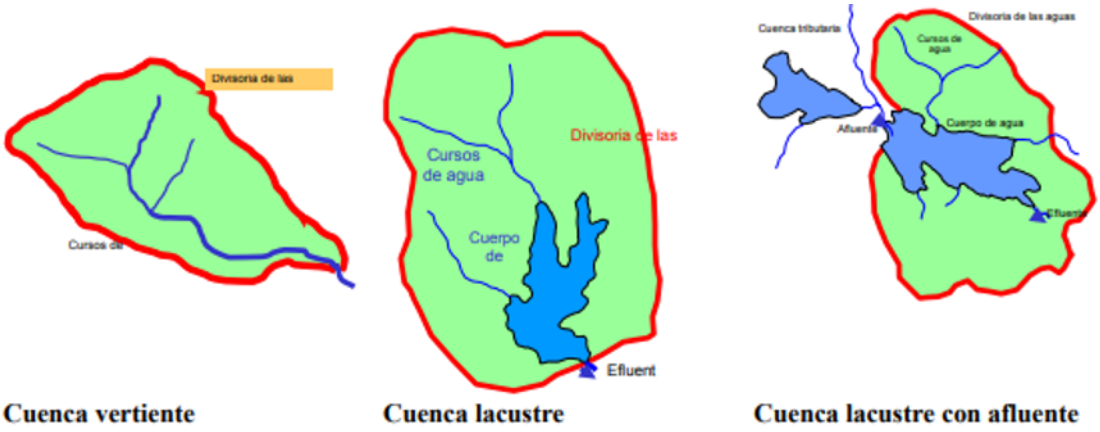


Figura 19: Cuenca exorréica

7.15. Zonas de funcionamiento hídrico

Las cuencas hidrográficas y las cuencas hidrogeológicas se pueden dividir según la zona de su funcionamiento las cuales son:

7.15.1. Zona de cabecera

Permite la captación inicial de las aguas en las cuencas hidrográficas y el suministro de estas a las zonas inferiores durante el ciclo de un año, constituye en la región en donde nacen las corrientes. Se ubican en las partes altas de la cuenca, presentan inestabilidad hidrológica debido a la captación.

7.15.2. Zona de captación

Su función es captar la mayor parte del agua, esta puede ser de diferentes características físico químicas que le entra al sistema y transportarla desde la zona mas alta a la mas baja.

7.15.3. Zona de emisión

También llamadas como las zonas bajas, estas se caracterizan por difundir el agua proveniente por las zonas de cabecera y captación hacia una corriente caudalosa (Faustino, 2015).

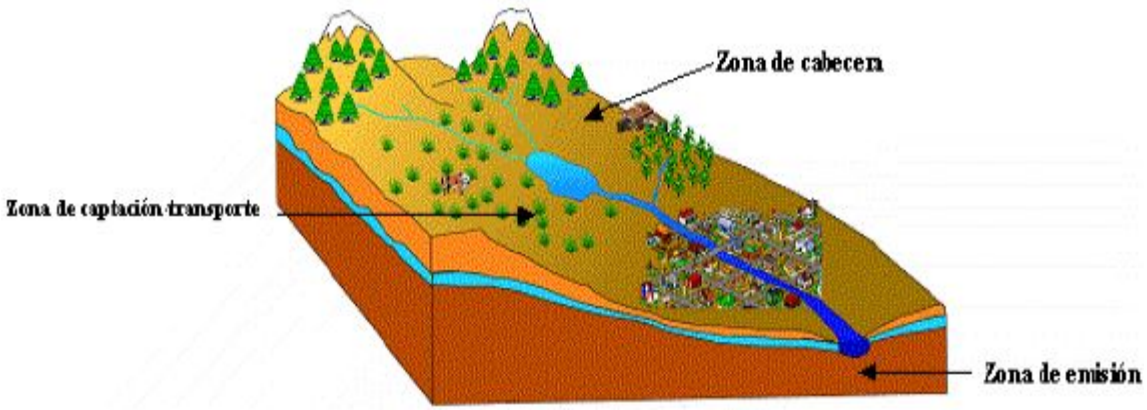


Figura 20: Zonas principales de funcionamiento hídrico de una cuenca

7.16. Manejo de cuencas

El manejo de cuencas consiste en darle un uso aprovechado y el manejo de los recursos naturales de la cuenca, donde generalmente existe un ente determinado que ejerce de manera principal la responsabilidad de implementar acciones para manejar los recursos. Dichas acciones se basan en ordenar, ejercer autoridad, disponer y organizar los recursos naturales en el área de análisis. La toma de decisiones y el manejo de los recursos se basa en las necesidades principales y las metas planteadas por los usuarios y partes interesadas. Al realizar un buen manejo de cuencas se pone mayor énfasis a los elementos y componentes biofísicos como lo es la vegetación, suelo, biodiversidad y el agua. La intervención humana se establece como un elemento que interactúa en el espacio territorial de la cuenca (Faustino, 2015).

7.16.1. Manejo integral de cuencas

Se establece como las acciones que se realizan para proteger, conservar, utilizar, manejar, aprovechar y rehabilitar los recursos naturales en las cuencas hidrográficas según los enfoques socioambiental, integral, multidisciplinario, multi intersectorial y del agua como recurso integrador de la cuenca. Promueve y busca la sostenibilidad ecológica, social y económica de los recursos naturales y el ambiente en el contexto de la intervención humana, sus necesidades y responsabilidades y del riesgo y la ocurrencia de desastres, principalmente de origen hidrometeorológico (Faustino, 2015).

7.16.2. Gestión integral de cuencas

Es parte del manejo integral de cuencas, este se basa en los procesos y acciones para lograr los recursos humanos, económicos, logísticos y administrativos requeridos cumplan con el manejo integral. El ciclo de la gestión incluye el reconocimiento de la cuenca, la identificación y análisis de los actores clavos, diagnostico y ordenamiento territorial estableciendo la línea para la elaboración e implementación del plan establecido.

7.16.3. Cogestión integral de cuencas

La cogestión de cuencas permite establecer una alternativa técnica y general para lograr el manejo. Resalta la participación de los actores en la toma de decisiones, en los procesos de empoderamiento comunitario y de organización local.

La cogestión busca la sistematización de experiencias, la generación e intercambio de conocimientos adaptados a las condiciones de territorio, utiliza mecanismos efectivos de comunicación, retroalimentación, reflexión, alianzas de aprendizaje y formación de capital humano. Con estos procesos se contribuye a lograr un dominio común y apropiación por los actores clave de herramientas, metodologías y conceptos de manejo y gestión de los recursos naturales y las cuencas. Mediante la cogestión, también se contribuye a la toma de mejores decisiones a diferentes niveles y la institucionalización de conceptos, actitudes, valores y herramientas para la gestión sostenible de los recursos naturales y el ambiente (Faustino, 2015).

7.17. Enfoque y elementos básicos de la gestión de cuencas

La cuenca hidrográfica se establece como sistema y se conforma por las interrelaciones dinámicas en el tiempo y en el espacio de diferentes subsistemas

- Social: Se basa en aspectos demográficos, organizacionales y participativos. Un factor importante es la calidad de vida, cantidad y la calidad de los servicios públicos e infraestructura que se brinda. Los conflictos sociales, amenazas humanas son otros factores que entra en dicha categoría.
- Económico: Tiene como objetivo manejar los ingresos, rentabilidad, inversiones, mercados, pago y cobro de servicios ambientales o cualquier tema que se relacione como vulnerabilidad y externalidades económicas entre otros.
- Político: Dicha categoría se basa en la creación de políticas, gobernabilidad y toma de decisiones que afecte a los municipios relacionados.
- Institucional: Se relaciona con la cuenca en términos de coordinación local, gubernamental, presencia, función y la coordinación.
- Cultural: Abarca temas de costumbres, tradiciones, creencias y valores.
- Legal: Se basa en la tenencia de la tierra, normas, reglamentos, leyes y ordenanzas.
- Tecnológico: Establece los tipos, niveles y competitividad de dicha rama.
- Productivo: En dicha categoría se establece el uso de la tierra, actividades productivas, sistemas, medios, accesos a mercados y distribución de la tierra.
- Físico: Se abarcan ramas que abarcan el suelo, clima, geomorfología, cantidad, calidad, disponibilidad de recursos naturales, amenazas, naturales y vulnerabilidad.
- Biológico: El subsistema constituye en los seres humanos, plantas y animales.

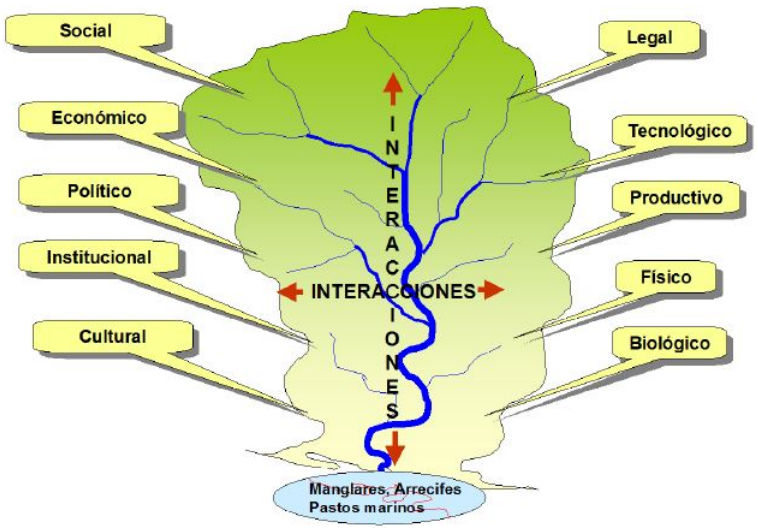


Figura 21: Subsistemas de una cuenca hidrográfica que interaccionan en el tiempo y espacio

Se reconocen los siguientes elementos que se pueden observan en la Figura 24 para la cuenca como sistema.

- Se genera una interacción entre la parte alta, media y baja de la cuenca y junto con la zona marino costera cuando corresponde.
- Identificación del análisis integral de las causas, efectos y soluciones a los problemas
- El papel del agua como recurso integrador de la cuenca.

Se generan dos grandes acciones para la visión integrada y sistémica de la gestión de cuenca, estas se orientan para aprovechar los recursos naturales existentes en la cuenca con el objetivo del crecimiento económico con fin de asegurar la sostenibilidad ambiental (Faustino, 2015).

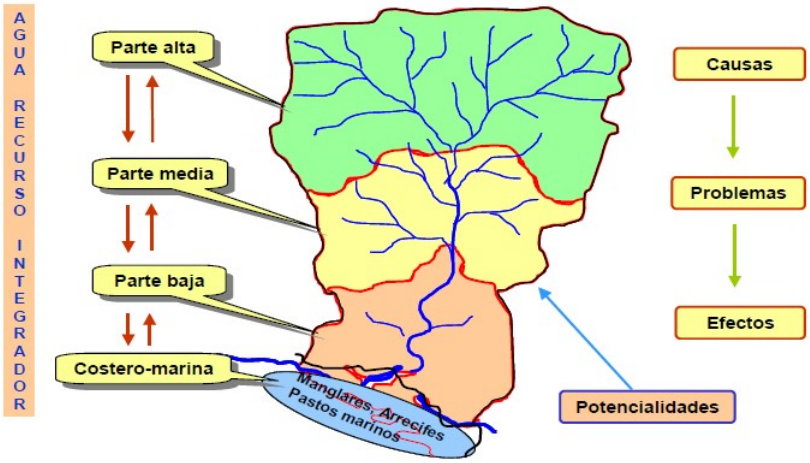


Figura 22: Visión integral de la cuenca como sistema con interacciones entre la parte alta, media y baja, el agua como recurso integrador y el análisis de problemas y potencialidades.

7.17.1. Enfoque socioambiental

Dicho enfoque tiene como objetivo principal el bienestar del ser humano y sus organizaciones debido a que la toma de decisiones y gestiones afectan directamente al manejo de la cuenca y la conservación de sus recursos naturales. Es de gran importancia buscar el cambio de actitudes y fortalecer las capacidades para generar el empoderamiento social y así mantener una articulación adecuada entre los gobiernos locales, las instituciones nacionales y otros entes responsables del manejo de cuencas. Por lo tanto, se trata de entender por qué se realizan malas prácticas, por qué no se adoptan las tecnologías disponibles, por qué no gestionan las soluciones (Faustino, 2015).

7.17.2. Cuenca como unidad de planificación y evaluación de impactos

La cuenca como unidad geográfica genera un ámbito socioeconómico y biofísico que se caracteriza por dar un diagnóstico, planificar y evaluar el estado de los recursos y el impacto que se presenta por el manejo global. La unificación de todos los sistemas y unidades de producción e intervención llevaran a el manejo integral de la cuenca.

7.17.3. Agua como recurso integrador de la cuenca

Debido a la zona de cabecera se puede garantizar la captación inicial de las aguas y el suministros de las zonas inferiores. Todas las acciones o sucesos que ocurran en la parte alta tendrán repercusiones en la parte baja inevitablemente, esto se debe al flujo unidireccional del agua, lo que dará como resultado el recurso integral de la cuenca. El agua tiene como función distribuir los insumos primarios es decir los nutrientes, materia orgánica o sedimentos producidos por actividades sistémicas. El desprendimiento y arrastre de partículas producido por la lluvia y los flujos superficiales a través de la red de drenaje inducen la formación de valles, llanuras de inundación o planicies (Faustino, 2015).

7.17.4. Manejo de recursos naturales para el reducción de vulnerabilidad y riesgos a desastre

En el enfoque de la cuenca como sistema es indispensable cuando se analizan interacciones físico biológicas y socio ambientales relacionadas al agua y su relación con otros recursos naturales en cuencas de montaña, a fin de tomar las acciones necesarias para la reducción de la vulnerabilidad y riesgo a desastres, principalmente la asociada a fenómenos hidro climáticos como inundaciones, sequías y deslizamientos entre otros.

Políticas, normas, ordenamiento territorial, buena gobernanza, manejo de recursos naturales, educación, organización, prevención y mecanismos de financiamiento son la base para un manejo de cuencas para la reducción de la vulnerabilidad y el riesgo a desastre.

7.18. El ciclo de la gestión de cuencas

Se requiere de un análisis cuidadoso y planificado para alcanzar los objetivos integrales a largo plazo y que sean sostenibles, se requiere de una planificación precisa que tenga como objetivo controlar la calidad y pertinencia tomando en cuenta el análisis de los procesos desde el momento inicial. Es necesario aplicar metodologías desde la etapa de identificación de las necesidades de ordenar, utilizar el territorio y los recursos naturales que ofrece (Faustino, 2015).

Es de gran importancia establecer que la gestión no será de una sola persona o grupo reducido de personas, requiere de organización, definida en forma participativa y democrática, en lo posible con competencia sobre el tema y con respaldo institucional o de los actores locales. Las capacidades de los gestores se van fortaleciendo en el proceso ya sea mediante acciones de capacitación, asesoría y acompañamiento técnico, administrativo e institucional. Para representar el ciclo y los procesos de gestión de una cuenca hidrográfica se pueden realizar mediante las siguientes etapas:

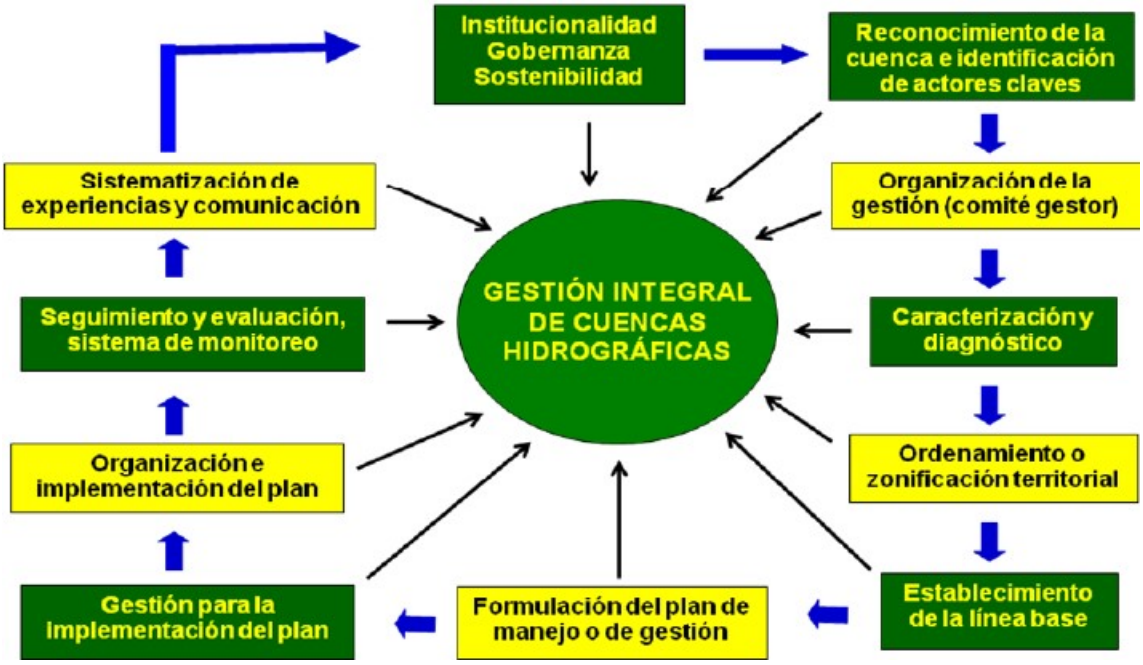


Figura 23: El ciclo y los procesos del manejo y la gestión de cuencas hidrográficas

7.19. Situación del recuso hídrico en la ciudad de Guatemala

7.19.1. Oferta hídrica

"Según el último balance hídrico nacional del 2003, el INSIVUMEH reporta una disponibilidad hídrica total de 93,338 millones de m3, al igual que IARNA en su Perfil Ambiental 2010-2012. Mientras que el diagnóstico de la Estrategia de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de Guatemala reporta un caudal total de 97,120 millones de m3" (Cobos, 2017).

Vertientes	Área (km^2)	% área	Población 2015	% hab.	Hab/km^2	Volumen Anual (millones de m^3)	Litros/ hab./día	Volumen mensual mes más seco (millones m^3)	Litros/ hab./día
Totales	108,889	100	16,176,133	100.0	148.5	97,119.84	16,449	2,644.50	5,449.39
Pacífico	23,990	22	8,492,471	52.5	354.0	22,973.03	7,411	755.28	2,964.51
Caribe	34,259	31	4,966,072	30.7	145,0	33,224.75	18,330	846.55	5,682.22
Golfo de México	50,640	47	2,717,590	16.8	53.7	40,922.06	41,255	1,042.67	12,789.15

Figura 24: Disponibilidad anual de agua a nivel nacional y por vertientes
Fuente: (GWP, 2017)

7.19.2. Demanda del recurso hídrico

"La demanda basada en el estudio de cuentas Ambientales del IARNA y Banco de Guatemala, (IARNA 2012) indica que la utilización anual de agua en 2010 representa el 22 % de la oferta hídrica disponible anualmente para Guatemala. De los 20,373.88 millones de m3 el 37.5 % (7,643.17 millones), fueron empleados por la industria, incluyendo la agroindustria. Por otro lado, las actividades agropecuarias y silviculturales usaron el 31.9 % (6,496.56 millones de m3), de los recursos hídricos del país. El otro usuario importante, aunque su uso no es consuntivo, es la generación hidroeléctrica que se estima usa un 24.8 % (5 mil millones de m3). Por su parte el consumo doméstico es apenas un 2.3 % (alrededor de los 461 millones). El resto de las actividades consume un 3.5 % del total."(Cobos, 2017).

Actividad y Consumo	2010
Agricultura, ganadería, caza y silvicultura	6,496.56
Pesca	514.02
Exploración de minas y canteras	6.19
Industrias de manufacturas	7,643.17
Suministro de electricidad, gas y agua	5,067.33
Construcción	76.26
Comercio al por mayor y por menor	48.22
Servicios	69.85
Hogares	461.68
Total	**20,383.28**

Figura 25: Utilización de agua en Guatemala por actividades económicas para el 2010
Fuente: (GWP, 2017)

7.19.3. Principales usos del agua

"El área potencial irrigable para usos productivos agrícolas es de 2.6 millones de hectáreas y según el último censo agrícola del año 2003, solamente se encontraban bajo riego 311,557 ha. Según la Política Nacional de Riego, se estima que para el año 2012 eran un total 337,471 ha bajo riego, de las cuales 86 % pertenecían al sector empresarial, 5 % al miniriego, 3 % a las unidades de riego y 6 % al riego artesanal (MAGA 2013). En base a las áreas y según los datos del IARNA el volumen anual de consumo de agua bajo riego es de 6,496 millones de m3, es decir 31 % de la demanda (IARNA 2012)."

"El otro consumo importante es la industria, con 7,643 millones de m3 (37.5 %). Se debe tomar en cuenta que en este análisis, el consumo de los ingenios azucareros y los beneficios de café se toma como industrial (IARNA 2012)."

"Según el último informe de cumplimiento de las metas del milenio el agua doméstica solo cubrirá un 81.5 % de los hogares quedando pendiente un 17.5 %. en el caso de saneamiento esta meta es de 66 %, por lo que queda por satisfacer las necesidades de un 34 % (SEGEPLAN 2010)." (Cobos, 2017).

El uso que se le da al agua para generar electricidad se tiene que actualmente según la Comisión Nacional de Energía Eléctrica en febrero del 2020 el 29.4 % de la matriz energética es hidroeléctrica como se observa en la Figura 28 (CNEE, 2020)

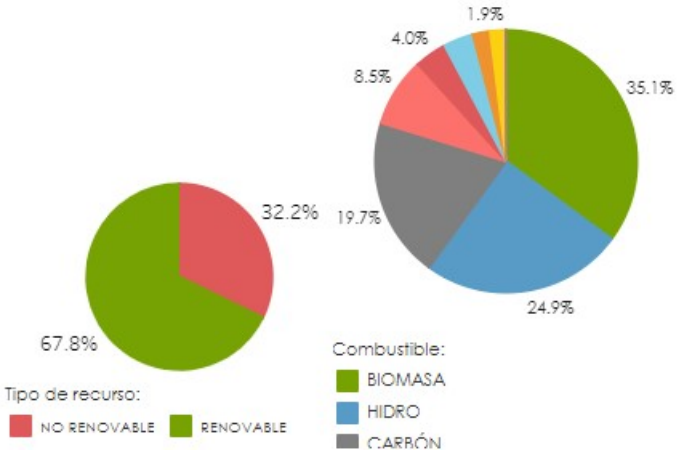


Figura 26: Matriz energética

Fuente: (CNEE, 2019).

Lista de Hidroeléctricas en Guatemala		
Vert. Pacífico	**Vert. Atlántico**	**Vert. Golfo México**
Aguacapa	La Perla	Palo Viejo
Canadá	Río Las Vacas	Xacbal
Poza Verde	San Isidro	Chixoy
Santa María	Matanzas	
El Capulín	Santa Teresa	
El Porvenir	Secacao	
El Recreo	Renace	
El Salto	Pasabién	
Jurún Marinalá	Río Bobos	
Panán	Chichaic	
Palín 2		
Los Esclavos		
Compuertas de Amatitlán		

Figura 27: Listado de hidroeléctricas de Guatemala

Fuente: (CNEE, 2019).

7.20. Cobertura vegetal y el cambio del uso del suelo

El término de cobertura de terreno se aplica en los objetos que se ubican sobre la superficie del planeta y que su origen se puede ser natural como bosques, ríos, lagos, entre otros o el origen puede ser producido y mantenido por el hombre como lo son las carreteras, ciudad y presas entre otros. La cobertura de terreno es estudiada por las ciencias naturales y se refiere al estado físico de la cobertura vegetal, dicha cobertura se rige por factores biofísicos como lo es el tipo de suelo, clima, topografía, tipo de vegetación y disponibilidad de agua.

Cuando se habla del término uso de suelo se refiere a la manera en el que las coberturas son utilizadas según las necesidades del hombre para cumplir con las necesidades espirituales y materiales como bienes y servicios. Una tipo de cobertura se puede componer por diversos usos como áreas de bosque, uso forestal y de conservación entre otras. Existen diferentes categorías de cobertura como pastos, cultivos, área urbana, suelo desnudo y suelo agrícola. La relación entre el tipo de cobertura y el uso del suelo no es una relación única, puede ser de un tipo de cobertura a un uso específico, de un tipo de cobertura a diferentes de usos, y de diferentes coberturas a diferentes usos (Pineda, 2011).

Los diversos usos que los humanos le asignan al suelo constituyen un tema de primordial importancia debido al creciente papel del hombre en su transformación y su degradación. La actuación del hombre en un territorio adquiere mayor significado con las primeras sociedades agrícolas, no obstante en épocas recientes con el desarrollo científico y tecnológico el hombre ha incrementado su capacidad para desarticular o perturbar el lugar que habita, ocupando posiciones cada vez más dominantes dentro de la estructura y dinámica de un territorio, sobrepasando así su capacidad de carga (Pineda, 2011).

7.21. Modelos y estudios de cambio de uso de suelos

Los modelos de cambio de uso se han transformado en una herramienta de análisis espacial orientada, principalmente, a los siguientes aspectos: 1) Explorar los variados mecanismos que fuerzan los cambios de uso del suelo y las variables sociales, económicas y espaciales que conducen a esto; 2) Proyectar los potenciales impactos ambientales y socioeconómicos derivados de los cambios en el uso del suelo, y; 3) Evaluar la influencia de alternativas políticas y regímenes de manejo sobre los patrones de desarrollo y uso del suelo (Pineda, 2011).

La cuantificación de cambios de uso de suelo por medio de la percepción remota en conjunto con las herramientas de análisis que brindas los sistemas de información geográfica para modelar los procesos de cambio es una metodología eficaz para comprender la dinámica del cambio de un territorio.

El objetivo de dichos modelos es identificar la relación que existe entre un conjunto de variables que se utilizan para estimar la localización de los cambios del paisaje. Los valores de las variables se obtienen por medio de imágenes satelitales o fotografías áreas (Pineda, 2011).

7.21.1. Percepción remota y análisis de cambio del uso de suelos

Las imágenes provenientes de satélites brindan una representación única del planeta Tierra, ya que muestran los recursos y el impacto que ejerce sobre los seres humanos dentro de un territorio delimitado se logra reconocer los diversos patrones espaciales. Las imágenes de satélite ofrecen un reconocimiento de patrones y pueden ser utilizadas como herramienta para adquirir información de un fenómeno especifico u objeto. Dichas imágenes se obtienen por medio de sensores instalados en plataformas espaciales con el objetivo de generar una interacción electromagnética entre la tierra y el sensor que compone el satélite, siendo la fuente de radiación el sol o el propio sensor (Pineda, 2011).

7.21.2. Clasificación de imágenes

La clasificación se define como un proceso de medición sobre las propiedades morfológicas y estadísticas de los objetos de estudio en las imágenes. Como fruto de la clasificación digital se obtiene una cartografía e inventario de las categorías propuestas en el objeto de estudio. La imagen multibanda se convierte en otra imagen con las mimas propiedades de tamaño y características originales, con la diferencia de que cada píxel que compone a la imagen no tiene relación con la radiancia detectada por el sensor, sino que se trata de una etiqueta que tiene como objetivo identificar las categorías asignadas a cada píxel. A partir de dicha imagen se pueden generar cartografías temáticas y por consiguiente un inventario estadístico del número de pixeles (Velásquez, 2018).

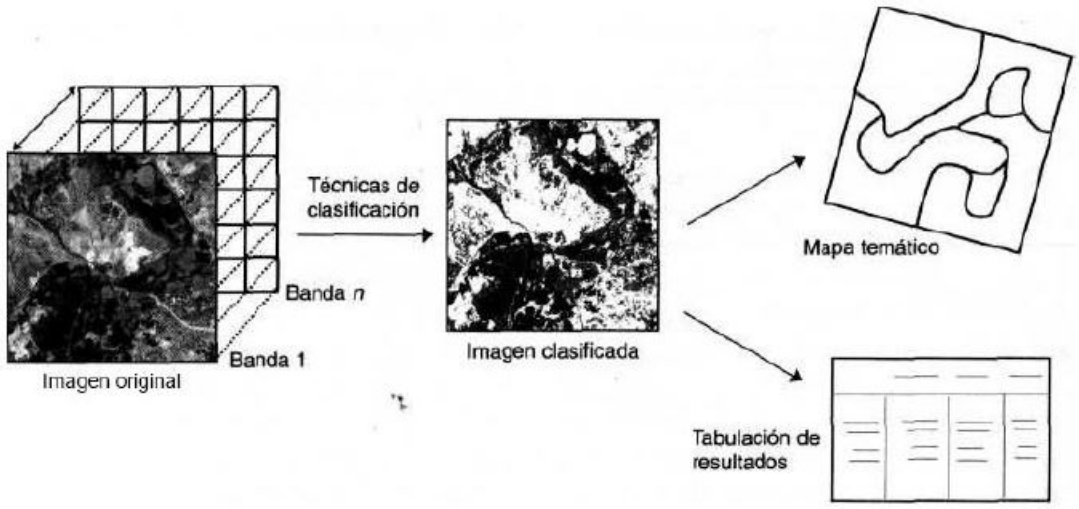


Figura 28: Proceso para la obtención de una imagen clasificada
Fuente: (Velásquez, 2018).

Para generar una metodología de clasificación se debe de contar con las siguientes características: 1) Exacto; 2) Reproducible por otros, dadas las mismas variables iniciales; 3) Robusto (no sensible a pequeños cambios en las condiciones de entrada); 4) Exhaustivo, que cubra roda el área de estudio y 5) Objetivo, que no se delimite por las decisiones del intérprete (Velásquez, 2018).

Es necesario tomar en cuenta que el conocimiento del interprete puede resolver algunos problemas que se presenten con respecto a la discriminación de cubiertas, debido a que algunos resultados de la clasificación no deben depender únicamente del criterio si el interprete es experto en el área de estudio o en el manejo de programas.

La clasificación digital implica categorizar una imagen multibanda. En términos estadísticos se entiende como reducir la escalada de medida de una variable continua a una escala categórica (tipo de vegetación) u ordinal (densidad de vegetación). La apariencia externa puede asemejarse a la imagen original y la clasificada; esto se debe a que presentan el mismo tamaño y pueden visualizarse en niveles de grises. Sin embargo es importante tomar en cuenta que no pueden aplicarse ciertas operaciones estadísticas a una imagen clasificada, ya que, pese a ser digital no está medida en una escala cuantitativa sino generalmente cualitativa (Velásquez, 2018).

Las clases de clasificación pueden describir distintos tipos de cubiertas (variable nominal o categórica) o bien intervalos de una misma categoría de interés (variable ordinal). La clasificación de imágenes digitales sigue el cauces análogos a los que se emplean en la foro interpretación. En este metodología el interprete identifica el patrón visual asociado a cada cubierta, de acuerdo con una serie de criterios como: tonos, texturas, forma, contexto, disposición, etc. Consiguientemente se delimita sobre el resto de las fotografías las zonas o áreas que corresponden con el modelo previamente definido (Velásquez, 2018).

Para el esquema de clasificación existen una serie de fases a seguir las cuales son: 1) Definición digital de las categorías (fases de entrenamiento); 2) Agrupación de los píxeles de la imagen en una de esas categorías (fase de asignación) y 3) Comprobación de resultados (Velásquez, 2018).

7.22. Herramientas de análisis

7.22.1. Software para teledetección ENVI

ENVI, Entorno para Visualización de Imágenes (Environment for Visualizing Images), es un moderno sistema de procesamiento de imágenes diseñado para proporcionar análisis multiespectral de los datos obtenidos por teledetección desde aviones y satélites. Proporciona un entorno potente, novedoso y de fácil uso para presentar y analizar imágenes de cualquier tamaño y tipo de datos en un amplio rango de plataformas (Velásquez, 2018).

Con su procesamiento de imágenes, basado en archivos y bandas, ENVI le permite trabajar con archivos de imágenes enteros, bandas individuales, o ambas. Cuando se abre un archivo de entrada, cada banda espectral está disponible para todas las funciones del sistema. Con múltiples archivos de entrada abiertos, puede fácilmente seleccionar bandas de diferentes archivos para procesarlas juntas. ENVI también incluye herramientas para extraer espectros, usar librerías espectrales (Velásquez, 2018).

ENVI está completamente escrito en IDL (Interactive Data Language), Lenguaje de Datos Interactivo. IDL es un potente lenguaje de programación estructurado, basado en matrices, que proporciona un procesamiento de imágenes integrado, grandes capacidades de

visualización y herramientas GUI fáciles de usar (Velásquez, 2018).

ENVI usa un formato de datos raster generalizado, consistente en un simple archivo binario plano y un pequeño archivo ASCII (texto) de cabecera (*.hdr) asociado. Este formato de archivo permite a ENVI usar casi cualquier archivo de imagen, incluyendo aquellos que contienen su información de cabecera insertada en el propio archivo de datos (Velásquez, 2018).

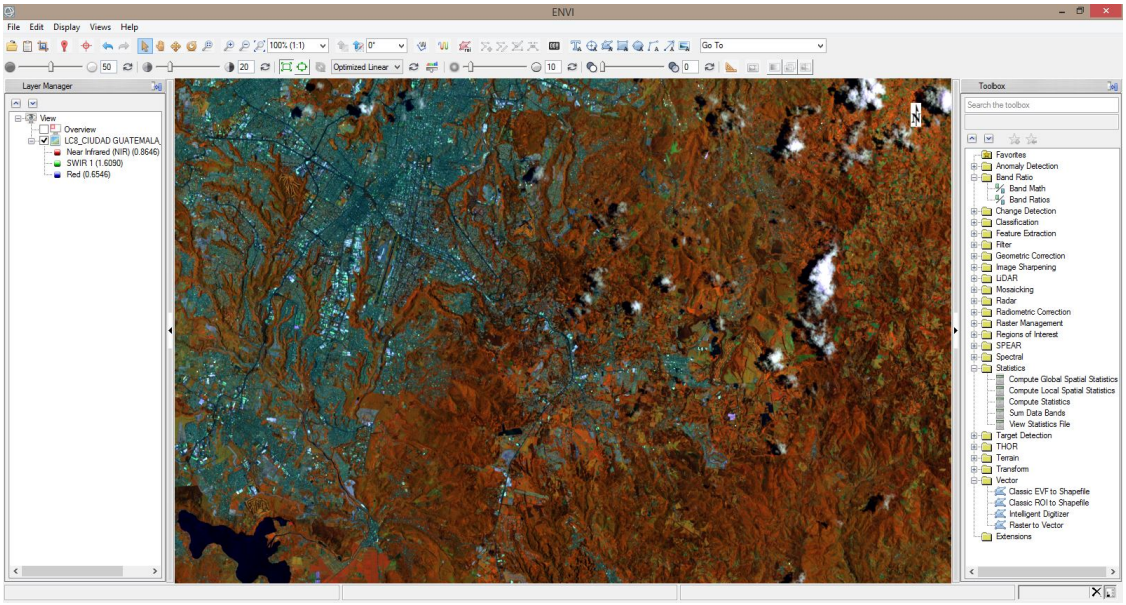


Figura 29: ENVI

Fuente:Propia.

7.22.2. Software de información geográfoca QGIS

Un SIG es una integración organizada de hardware, software y datos geográficos con el fin de capturar, almacenar, manipular, analizar y visualizar en todas sus formas la información espacialmente referenciada que permitan caracterizar el espacio geográfico para su estudio o gestión. Los SIG, son herramientas de alta complejidad, cuentan con una base de datos geográfica que permite separar en capas la información contenida, y de esta manera se hace más sencilla y rápida la interpretación. QGIS proporciona una creciente gama de capacidades a través de sus funciones básicas y complementos. Puede visualizar, gestionar, editar y analizar datos, y diseñar mapas imprimibles (DesdeLinux, 2020).

Teledetección e integración con SIG

La integración de la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) puede ser utilizada de tres maneras principales: 1) La teledetección se usa como una herramienta para obtener datos para utilizarlos en un SIG; 2) los datos de un SIG son utilizados como información auxiliar para mejorar los productos derivados de la teledetección, y 3) la

teledetección y el SIG son utilizados en conjunto para modelamiento y análisis (Velásquez, 2018).

7.23. Sistema de información geográfica

Es el sistema que se emplea para describir información orientada a la gestión, análisis de datos espaciales de temas de ciencia de la tierra y ambiental. Se genera por medio de un conjunto de herramientas para crear mapas temáticos y reportar las características de la investigación (INEGI, 2014).



Figura 30: Sistema de información geográfica SIG

7.23.1. Conceptos

- Fotogrametría La fotogrametría es la técnica que utiliza información métrica generada por fotogramas cuya principal característica proviene de fuentes de información como la fotografía.Se clasifica en dos categorías principales según el tipo de fotografía o de sensor que se emplea.

  La fotogrametría terrestre se genera cuando se obtienen fotogramas desde la superficie de la tierra y si estos son obtenidos por medio de una cámara o sensor situado en un avión se denomina fotogrametría área (EUPB, 2003). Se pueden generar otras clasificaciones según la función del sensor o método empleado estas son: Teledetección, Estereofotogrametría (Par de fotogramas), Monoscópia (Fotografías independientes), Radargrametría (Radar), Holografía (Hologramas), Fotogrametría submarina, Video-

grametría (Cámara de video) y Fotogrametría espacial (Sensor instalado en vehículos espaciales).

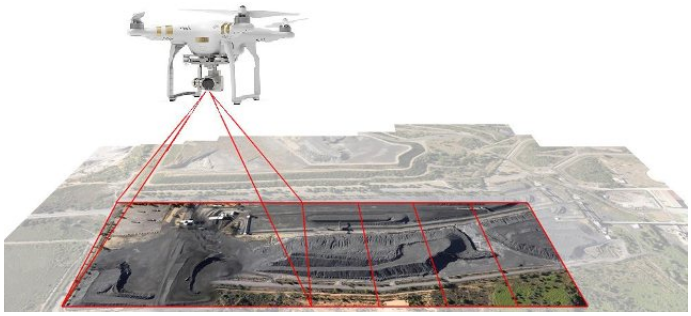


Figura 31: Fotogrametría terrestre

- Teledetección Técnica que tiene como objetivo obtener información a distancia de objetos sin que se genere un contacto material o físico. Para cumplir dicho objetivo tiene que existir una interacción entre lo observado situado sobre la superficie terrestre, marina o en la atmósfera y un sensor situado en la plataforma. La interacción que se produce es un flujo de radiación que parte de los objetos y se dirige hacia el sensor, este flujo se clasifica según su origen como: por medio de radiación solar que se refleja por los objetos (infrarrojo), por medio de radiación terrestre emitida por infrarrojo térmico y radiación generada por el sensor y reflejada por los objetos (UM, 2003).

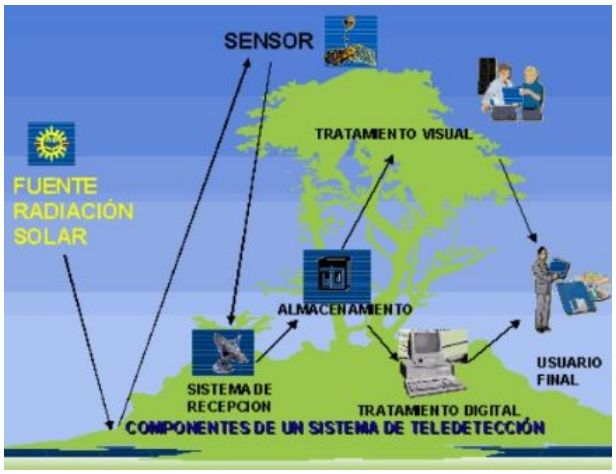


Figura 32: Sistema de teledetección

- Sensores remotos Los sensores remotos satelitales tienen como objetivo detectar niveles elevados de dimensión, crecimiento y transporte entre otros. Los sensores remotos reúnen y analizan datos de la zona u organismo de estudio que se encuentra físicamente alejado del equipo sensor, por ejemplo, instrumentos de detección de la superficie marina, satélites o aviones (McDaid, 2009).

- Geodesia Es el estudio que establece la forma y dimensión de la tierra, su campo de gravedad y las variaciones temporales que se pueda presentar. Dicha ciencia constituye en la determinación de posiciones se puntos en la superficie. La geodesia se emplea en distintas ramas como la topografía, cartografía, fotogrametría, navegación e ingeniería de todo tipo (Sevilla, 1999).

- Cartografía Se define como el estudio y la elaboración de mapas con diversos finales. Es el arte, ciencia y tecnología de la elaboración de mapas y la clasificación de estos como documentos científicos y obras de arte (Rystedt, 2019).

- Mapas topográficos Dichos mapas muestran la relación espacio entre los objetos o elementos geográficos como por ejemplo: carreteras, edificaciones, cuerpos de agua y limites territoriales entre otros. Los mapas topográficos se utilizan como base de la cartografía (Rystedt, 2019).

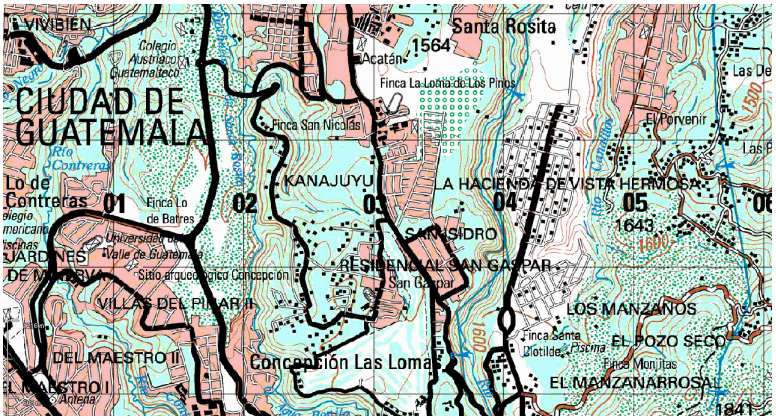


Figura 33: Mapa topográfico de Guatemala

- Mapas temáticos Los mapas meteorológicos o de tiempo es uno de los mapas temáticos más empleados para presentar condiciones del clima. Otro ejemplo de los mapas temáticos son los mapas geológicos ya que son utilizados para la búsqueda de minerales, petróleo y para visualizar las condiciones del suelo (Rystedt, 2019).

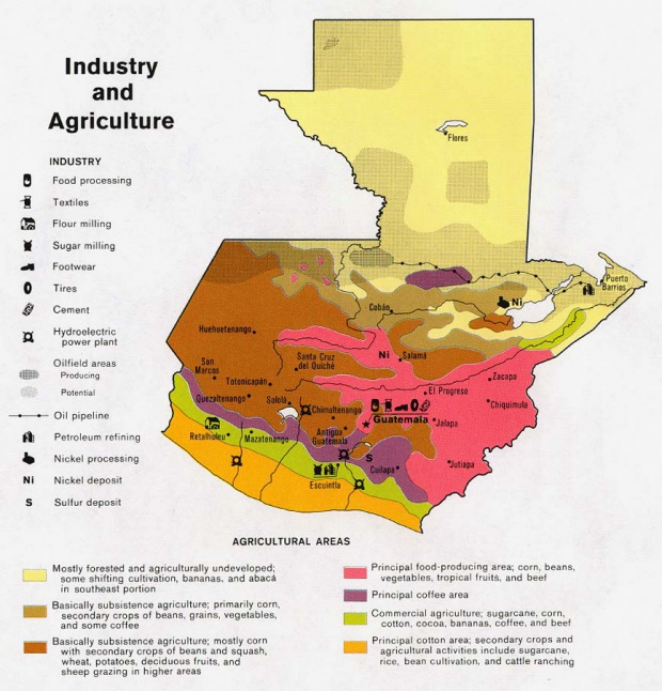


Figura 34: Mapa temático de Guatemala

- Elementos básicos de un mapa Los mapas son el método tradicional de almacenar y mostrar la información geográfica. Un mapa es una representación gráfica de los rasgos físicos (naturales, artificiales o ambos) de una parte de toda la superficie de la Tierra, por medio de signos y símbolos o imágenes fotográficas, a una escala establecida, en una proyección específica y con los medios de orientación indicados (McDaid, 2009). Un mapa muestra tres tipos de información sobre los rasgos geográficos: Ubicación y extensión del rasgo, Atributos (características) del rasgo y Relación del rasgo con otros rasgos.

- Coordenadas geográficas Se definen como las coordenadas que tienen el objetivo de identificar la posición de un punto en la superficie terrestre basándose en referencias como lo es la latitud y la longitud (Ibañez, 2010).

- Escala La escala es un factor de gran importancia en un mapa ya que este puede verse como una descripción real del mundo a través de formas simbólicas y de de formas geométricas. Un mapa se entiende como un compromiso entre la cantidad de objetos que se visualizaran con el fin de proporcionar un contenido comprensible (Rystedt, 2019).

- Relieve El relieve se entiende como el objetivo principal del estudio de la geografía y la geología, dichas diciplinas estudian y analizan las morfología, origen, edad y dinámica del mismo (Lugo, 2007).

7.24. Satélite Landsat 8

El programa Landsat, el cual se constituye en una serie de misiones de observación de la tierra por satélite gestionadas conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). El programa Landsat ha revolucionado la forma de ver y estudiar nuestro planeta. Esta serie de datos, que se inició en 1972, es la más larga de la historia y continúa registrando los cambios en la superficie terrestre desde el espacio. Landsat ha sido el único sistema de satélite diseñado y operado para observar repetidas veces la cubierta de la tierra con una resolución moderada; de manera general cada píxel en su imagen tiene un tamaño con el que se podría cubrir un campo de béisbol (Ariza, 2013).

En la actualidad el programa se encuentra en su octava versión denominada: "Landsat Data Continuity Mission" (LDCM) es el octavo satélite de observación de la serie Landsat y continuará el legado de archivo de los anteriores satélites, convirtiéndose de esta manera en el futuro de los satélites de observación de la tierra de mediana resolución con más historia. Este programa amplía, mejora y avanza en el registro de imágenes multiespectrales, mantenimiento la misma calidad de sus siete predecesores (Ariza, 2013).

El satélite Landsat 8 incorpora dos instrumentos de barrido: Operational Land Imager (OLI), y un sensor térmico infrarrojo llamado Thermal Infrared Sensor (TIRS). Dicho satélite proporciona información más detallada sobre la presencia de características tales como las nubes, agua y nieve. Aproximadamente se recogen 400 escenas al día, las cuales son cargadas en el servidor de USGS con el fin de que se encuentren disponibles para su descarga 24 horas después de la adquisición (Ariza, 2013).

7.24.1. Bandas espectrales

Las imágenes Landsat 8 obtenidas por el sensor (OLI) y (TIRS) constan de nueve bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros para las bandas de 1 a 7 y 9. Una banda nueva (1) (azul-profundo) es útil para estudios costeros y aerosoles. La nueva banda (9) es útil para la detección de cirrus. La resolución para la banda 8 (pancromática) es de 15 metros. Dos bandas térmicas 10 y 11 son útiles para proporcionar temperaturas más precisas de la superficie y se toman a 100 metros de resolución (Tabla. 2). El tamaño aproximado de la escena es de 170 km de norte-sur por 183 kilómetros de este a oeste (106 km por 114 km). (Ariza, 2013).

Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) February 11, 2013	Bandas	longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
	Banda 1 - Aerosol costero	0.43 - 0.45	30
	Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51	30
	Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59	30
	Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	30
	Banda5 – Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Banda 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Banda 8 - Pancromático	0.50 - 0.68	15
	Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	*Banda 10 – Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
	*Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100

Figura 35: Distribución de las bandas en OLI y TIRS
Fuente:(USGS, 2013).

7.25. Metodología

Para el procesamiento de imágenes satelitales por medio del software ENVI se realizan una serie de técnicas enfocadas al mejoramiento de la calidad visual de la imagen, es decir disponer de mejor manera los datos para su análisis visual de modo que sean más evidentes los rasgos que se presenten en la imagen de interés. (Velásquez, 2018).

7.25.1. Composiciones coloreadas en teledetección

A partir de la información multiespectral que generan la mayor parte de los sensores espaciales, pueden obtenerse distintas composiciones de color, basta para ello aplicar a cada uno de los tres colores "primarios", a una banda distinta de la imagen seleccionada con el criterio y en el orden que se estime más oportuno (Velásquez, 2018).

El proceso permite visualizar, simultáneamente imágenes de distintas porciones del espectro, lo que facilita la delimitación visual de algunas coberturas. Por tratarse de tres bandas distintas, la LUT aplicada a una composición en color presenta tres columnas con distintos valores.

La elección de las bandas para realizar la composición y el orden de los colores destinados a cada una, dependen del sensor sobre el que se trabaje y de la naturaleza del trabajo a realizar. La composición más habitual es la denominada falso color fruto de aplicar los cañones rojo verde y azul del monitor sobre las bandas correspondientes al infrarrojo cercano, rojo y verde. El sensor Landsat 8 con 11 bandas espectrales, ofrece la posibilidad de realizar un amplio número de composiciones coloreadas (Velásquez, 2018).

Combinación R=4, G=3, B=2

Se le conoce como la combinación "Falso color estándar". La vegetación aparece en tonos de rojo, las áreas urbanas en tonos de cian (celeste) y los suelos varían de café oscuro a café claro. La nieve, hielo y nubes aparecen en color blanco o ligeramente celeste. Los bosques de coníferas aparecen más oscuros que los bosques de latifoliadas. Esta combinación es útil para estudios de vegetación, monitoreo de patrones y drenaje de suelo y varios estados fenológicos de cultivos. Generalmente, tonos oscuros y brillantes de rojo indican vegetación de hoja ancha o vegetación saludable, mientras que los tonos más claros indican pasturas/sabanas o vegetación escasa. Áreas urbanas se observan en tonos claros de azul. Esta combinación de bandas da resultados parecidos a la fotografía infrarroja tradicional (Velásquez, 2018).

Combinación R=3, G=2, B=1

Es la combinación de "Color Natural", las bandas visibles son utilizadas en esta combinación, los elementos en el suelo aparecen en colores similares a su apariencia en el sistema visual humano. La vegetación sana aparece verde, los campos recientemente aclarados aparecen muy claros, vegetación poco sana aparece color café o marrón y amarilla, los caminos son grises y las líneas de costa son blancas.

Esta combinación de bandas provee la mejor información acerca del agua (superficial y profunda), así como de los sedimentos. Se usa para estudios urbanos. Áreas deforestadas o con vegetación escasa no son tan fáciles de detectar en esta combinación. También los diferentes tipos de vegetación son difíciles de distinguir a diferencia de otras combinaciones. La combinación no distingue bien entre agua profunda y suelo como otras combinaciones (Velásquez, 2018).

Combinación R=4, G=5, B=3

Esta combinación de las bandas NIR (4), (5) SWIR 1 y Red (3), ofrece una definición adicional de frontera agua-tierra y resalta detalles subyacentes no aparentes en las bandas del visible. Lagos internos y corrientes de agua pueden ser localizados con gran precisión cuando se utilizan las bandas del infrarrojo. Con esta combinación de bandas, el tipo de vegetación y su condición se muestran en variaciones de color (marrones, verdes y naranjas), así como en variaciones de tono. Es útil para análisis de suelo y condiciones de vegetación. Generalmente entre más húmedos estén los suelos más oscuros aparecen, debido a las propiedades de absorción del infrarrojo por el agua (Velásquez, 2018).

Combinación R=4, G=5, B=3

Provee una vista "parecida al natural", mientras que permite la penetración en las partículas atmosféricas y el humo. La vegetación sana será en color verde brillante y se puede saturar en temporadas de alto crecimiento, las pasturas aparecen verdes, el suelo desnudo es rosado, los naranjas y marrones representan área con vegetación escasa. La vegetación seca será naranja y el agua será azul. Las arenas, suelos y minerales son resaltados en varios

colores. Esta combinación de banda provee imágenes impactantes de áreas desérticas. Si se presentaran incendios en la imagen analizada estos aparecen en tonos rojizos (Velásquez, 2018).

Las áreas urbanas aparecen en una variedad de tonos magenta. Los pastos aparecen en verde claro. Los puntos verdes dentro de las áreas urbanas indican coberturas de pasto como los son: camposantos, campos de golf, fútbol, etc. Tonos que van de verde oliva a verde brillante normalmente indican áreas cubiertas con bosque, en donde las coníferas aparecen más oscuras que las áreas con deciduos (Velásquez, 2018).

Nombre de la combinación	RGB
Color natural	4 3 2 (3 2 1)
Falso color (urbano)	7 6 4 (6 5 3)
Color infrarrojo (vegetación)	5 4 3 (4 3 2)
Agricultura	6 5 2 (5 4 3)
Penetración atmosférica	7 6 5 (7 5 4)
Vegetación sana	5 6 2 (4 5 1)
Suelo/Agua	5 6 4 (4 5 3)
Natural con remoción atmosférica	7 5 3 (6 4 2)
Infrarrojo de onda corta (SWIR)	7 5 4 (6 4 3)
Análisis de Vegetación	6 5 4 (5 4 3)

Figura 36: Cuadro de las distintas combinaciones posibles.
Fuente:(ESRI, 2013).

7.25.2. Cocientes en ENVI

Los cocientes entre bandas pueden ser aplicados para reducir los efectos del ambiente. También proveen información única y reflectancia espacial subyacente o diferencias de color entre los materiales de la superficie que son a menudo difíciles de detectar en una imagen estándar. También son útiles para discriminar entre suelo y vegetación (Velásquez, 2018).

ENVI puede calcular cocientes de bandas ya sea en formato de punto flotante (decimal) o en formato byte. El formato de punto flotante es el que calcula por omisión. Se pueden combinar tres cocientes en una imagen de color compuesta para determinar aproximadamente la forma espectral para cada píxel del espectro (Velásquez, 2018).

Para calcular cocientes entre bandas se especifica la banda del numerador y la del denominador. El cociente de la banda es el numerador dividido entre el denominador. ENVI chequea por errores por división entre cero y lo convierte en cero. ENVI también permite

calcular cocientes múltiples como bandas múltiples en un solo archivo (Velásquez, 2018).

B4/B3 (Índice de vegetación)

Este cociente distingue vegetación, agua y tierras de cultivo. Ha probado ser efectivo para resaltar bosques y tierras yermas o infértiles. Ya que los bosque o la vegetación exhiben alta reflectancia en la región del IR cercano y tiene una fuerte absorción en la región roja. Este cociente únicamente define la distribución de la vegetación. Conforme los tonos son más claros mayor la cantidad de vegetación presente (Velásquez, 2018).

B3/B4

Este cociente define suelos infértiles y áreas urbanas. No puede definir cuerpos de agua, bosques o tierras de cultivo (Velásquez, 2018).

B3/B2 (Índice de cociente rojo verde - RGRI)

Este cociente ha separado bosques de cultivos. Ya que la banda 3 es la banda de absorción de la clorofila roja de la vegetación sana y la banda 2 es la banda de reflectancia de la superficie de las hojas. Este cociente puede ser útil para discriminar clases generales de vegetación. Los cultivos aparecen claros (tonos brillantes) y los bosques en tonos oscuros (Velásquez, 2018).

B2/B3

Este cociente ha distinguido cultivos y tierras en barbecho de manera efectiva. No ha separado cultivos, bosques y cuerpos de agua. Tanto los bosques como los cuerpos de agua aparecen en tonos claros y la tierra yerma en tonos oscuros. No resalta las áreas urbanas. La clorofila tiene una alta reflectancia en la banda 2 y una fuerte absorción en la banda 3, la vegetación ha aparecido en tonos altos (Velásquez, 2018).

B4/B3 en rojo, B2/B3 en verde y B3/B2 en azul

En esta combinación de cocientes el azul muestra los cuerpos de agua. La región roja delinea bosques y algunas tierras de cultivo arbustivos. Los cultivos limpios y los pastos se muestran en color verde claro y el suelo desnudo y las tierras en barbecho en color celeste. Esta combinación ha revelado cuerpos de agua, bosques, tierras en barbecho, urbanas o construidas (Velásquez, 2018).

7.25.3. Índices en ENVI

ENVI provee 27 índices de vegetación para ser utilizados para detectar la presencia y relativa abundancia de pigmentos, agua y carbono como se manifiestan en el espectro solar reflejado (400 a 2500 nm). Los IV's que pueden ser calculados para un set de datos están determinados por las bandas espectrales que contengan los datos de entrada. Si todas las bandas espectrales requeridas para un set de datos están disponibles, ese IV estará disponible para el set de datos (Velásquez, 2018).

Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

La fórmula de este índice muestra el cálculo del NDVI, donde NIR (B4) es la reflectancia de la banda del infrarrojo cercano y Red (B3) es la reflectancia de la banda roja visible. La clorofila absorbe la radiación en la banda visible, mientras que la estructura de la hoja y el contenido de humedad es responsable por la alta reflectancia en la región del infrarrojo cercano. El NDVI ha sido correlacionado con una variedad de parámetros de vegetación, incluyendo la cantidad, productividad, biomasa, etc. El valor del índice varía de -1 a 1, siendo el valor de la vegetación verde entre 0.2 y 0.8 (Velásquez, 2018).

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

Índice de agua normalizada (NDWI)

El índice NDWI nos permite identificar masas o cuerpos de agua y zonas elevadas de saturación de humedad por medio del análisis de imágenes satelitales. El índice se puede emplear como una unidad de mediad para determinar el estrés hídrico en una vegetación, saturación de humedad en el suelo o realizar delimitaciones directas de masas de agua como lagos y embalses (GyB, 2017).

Para calcular el índice NDWI se utiliza el Método Gao generado en el año 1996 donde se establece que los potenciales obtenidos pertenecen a un rango entre -1 y 1 cuyos valores describen la superficie de agua y la vegetación con contenido de agua o zonas con ausencia de humedad.

En este caso, la relación de bandas multiespectrales a analizar estará basadas en la banda NIR- Near InfraRed (o infrarrojo cercano) y la banda SWIR- Short Wavelength InfraRed (infrarrojo corto). La ecuación estará basada en la relación entre sus diferencias y sumas (GyB, 2017).

$$NDVI = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)}$$

7.25.4. Clasificación supervisada y no supervisada

Método supervisado

La metodología de la clasificación supervisada requiere de la participación del analista que está generando el análisis y clasificación de la imagen satelital. El especialista debe indicar en todo momento al software que tareas o procesos deben realizar en todo momento como debe clasificar cada uno de los pixeles existentes en el área de interés; a partir de la definición o categorización de áreas de entrenamiento de las cuales se posee un conocimiento previo de la naturaleza del terreno (Monterroso,2014).

Método no supervisado

Este método se dirige a definir las clases espectrales presentes en la imagen. No implica ningún conocimiento del área de estudio, por lo que la intervención humana se centra más en la interpretación que en la consecución de los resultados.

En esta metodología se asume que una serie de una serie de agrupaciones o conglomerados (clústeres), más o menos nítidos según los casos. Estos grupos equivaldrían a pixeles con un comportamiento espectral homogéneo y, por tanto, deberían definir clases temáticas de interés. Estas categorías espectrales no siempre pueden equipararse a las clases informacionales que el usuario pretende deducir, por lo que resta a éste interpretar el significado temático de esas categorías espectrales (Velásquez, 2018).

El método para definir los agrupamientos espectrales es muy similar al empleado en otras técnicas de clasificación automática de dato). Se basa en la selección de tres parámetros: 1) variables que intervienen en el análisis; 2) criterio para medir la similitud o distancia entre casos, y 3) criterio para agrupar los casos similares.

En nuestro contexto, las variables son las bandas espectrales seleccionadas para la clasificación, ya sean éstas originales o fruto de alguna transformación. Los casos son los pixeles que componen la imagen, cada uno de ellos definido por tantos ND como bandas intervienen en el análisis.

Un problema habitual para el usuario del método no supervisado atañe a la elección de los parámetros de control más convenientes para la imagen que se interpreta, puesto que habitualmente no conocemos, de partida, el número de grupos espectrales presentes en la imagen, ni el valor idóneo de dispersión interna o de distancia entre grupos. De esta forma, el análisis no supervisado se convierte en un proceso exploratorio, en donde el intérprete establece unos valores arbitrarios que se van modificando a la vista de los resultados (Velásquez, 2018).

Finalmente, el método no supervisado también presente como inconveniente el notable volumen de cálculo que precisa. Habitualmente, un buen agrupamiento se consigue tras un número alto de iteraciones, por lo que este criterio resulta muy lento para clasificar imágenes muy extensas.

En otras palabras, el análisis no supervisado se orienta no tanto a la clasificación de la imagen, como a definir precisamente los grupos o categorías que intervendrán en la clasificación propiamente dicha. En este sentido, el método no supervisado podría considerarse como exploratorio, dirigido a deducir las clases espectrales presentes en la imagen (Velásquez, 2018).

Eso es especialmente importante cuando se adoptan criterios de clasificación que asumen una distribución normal de los datos. El análisis no supervisado podría indicarnos si efectivamente esas clases informacionales tienen un sentido espectral claro o, por el contrario, algunas de ellas presentan una distribución bimodal o multimodal (o, lo que es lo mismo, se presentan en varias categorías espectrales).

Como en el caso del método supervisado, es necesario analizar los píxeles incluidos en cada grupo para obtener sus medidas estadísticas elementales: media, desviación típica, mínimo, máximo, etc., que servirán para abordar la fase posterior de clasificación (Velásquez, 2018).

Método ISODATA

En cuanto al algoritmo de agrupamiento, las opciones también son muy numerosas. Uno de los más extendidos es el denominado ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique), gracias a contar con un mecanismo iterativo bastante sólido. En esencia, este algoritmo procede a partir de las siguientes fases:

1. Se señalan una serie de centros de clase, de acuerdo con el número y forma indicados por el usuario.

2. Se asignan todos los píxeles de la imagen al centro de clase más próximo, utilizando el criterio de distancia antes comentado.

3. Se calculan de nuevo los centros de clase, teniendo en cuenta los valores de todos los píxeles que se le hayan incorporado en la fase anterior.

4. Se reordenan los centros de clase en función de los parámetros de control indicados por el usuario (distancia mínima entre grupos, tamaño mínimo de un grupo, varianza máxima de un grupo y número de grupos).

5. Se vuelven a asignar todos los píxeles de la imagen al centro más cercano, el cual debido al desplazamiento registrado en (3) no tiene por qué coincidir con la asignación realizada en (2).

6. Si el número de píxeles que han cambiado de categoría es inferior al señalado por el usuario se termina el proceso; en caso contrario, se retorna a la fase (3).

Desde el punto de vista estadístico, este algoritmo parece bastante adecuado para delimitar los grupos de valores homogéneos dentro de la imagen, si bien pueden darse en ocasiones bucles indefinidos, cuando los parámetros de control no están bien definidos y el algoritmo entra en una cadena de separaciones y fusiones interminable (Velásquez, 2018).

Método K-Medias

El método de K-Medias es uno de los métodos no supervisados más simples que resuelven el problema de definir conglomerados. El procedimientos sigue una forma fácil y simple de clasificar un set de datos (en nuestro caso pixeles) a través de un número de grupos (asumir k-grupos) fijados a priori. La idea principal es definir k-centroides uno para cada conglomerado. Estos centroides deben ser localizados de manera inteligente ya que diferentes localizaciones de los centroides dan diferentes resultados. Por lo tanto, la mejor escogencia es localizarlos tan lejos unos de otros como sea posible (Velásquez, 2018).

Después que se tienen estos nuevo centroides, se tiene que realizar una nueva asignación con los mismos pixeles y el centroide más cercano. A este punto se ha completado un ciclo. Como resultado de este ciclo se puede notar que los centroides cambian su ubicación paso a paso hasta que no se hacen más cambios de posición. En otras palabras, los centroides no se mueven más y los pixeles no cambian más de clúster (Velásquez, 2018).

Post proceso

Cuando se hace una clasificación automatizada, es común encontrar que algunos grupos de pixeles (a veces hasta uno) se encuentran embebidos en clases mucho mayores. Esto se debe a que estas técnicas que hemos estado tratando en esta práctica hacen la clasificación a nivel de píxel. Este efecto, llamado de "sal y pimienta" puede reducirse (e incluso elimarse), aplicando un filtro modal al ráster clasificado (Velásquez, 2018).

7.26. Crecimiento poblacional

El crecimiento poblacional se entiende como al cambio en el número de pobladores de una región geográfica determinada en un cierto plazo. Es el incremento poblacional en el número total de individuos a largo lapso establecido.

El estudio de la población tiene como objetivo establecer razones y teorías sobre el crecimiento y decrecimiento de las poblaciones, por lo mismo prever sus consecuencias a corto, mediano y largo plazo. Al generar datos estadísticos sobre las dinámicas de cambio se pueden diseñar o implementar medias en el ámbito político, social, económico y ecológico ente otros (Raffino, 2020).

La población humana mundial es un ejemplo de crecimiento poblacional sostenido, especialmente durante el último siglo. De ser 2.600 millones en 1950 en 1987 la cifra de humanos en el planeta alcanzó los 5.000 millones, en 1999 los 6.000 millones y en 2015 los 7.300 millones. Se prevé que para el 2030 esta cifra mundial alcance los 8.500 millones y en 2100 los 11.200 millones, si se mantuvieran las condiciones actuales (Raffino, 2020).

7.26.1. Tipos de crecimiento poblacional

Positivo

El crecimiento positivo se presenta cuando la población de la región de interés ha incrementad durante el período observado es decir hay más pobladores en el área.

Negativo

El crecimiento negativo se presenta cuando se ha registrado un decrecimiento en la población, es decir el porcentaje de habitantes en el área es menor.

7.26.2. Causas del crecmiento poblacional

Fecundidad y condiciones de salud

Esta causa se presenta cuando una población alcanza condiciones de salubridad óptimas, es decir se le permite vivir más allá de la edad reproductiva y ampliar las familias, generalmente las tasas de natalidad aumentan, la población se muestra fecunda y se reproduce cuantiosamente. En cambio, cuando las condiciones que se presentan son hostiles, la población prefiere no reproducirse o hacerlo poco, o simplemente no reúnen las condiciones mínimas para superar la edad reproductiva (Raffino, 2020).

Aumento de la longevidad

Si las personas viven más tiempo, podrán reproducirse más y además vivirán para ver a sus descendientes alcanzar la edad adulta, generando así una población anciana (Raffino, 2020).

Migraciones

Las llegadas y salidas de individuos que deciden hacer su vida en otros lados (emigrantes) o que vienen de otras regiones a la estudiada (inmigrantes), no solo contribuye al enriquecimiento cultural y genético, sino que además puede añadir nuevos pobladores o sustraer individuos que se marcharon (Raffino, 2020).

Cambios en la calidad de vida

Una economía pujante, una política estable, una gran demanda de trabajadores o un gran mercado de consumo de servicios suelen ser factores que generan inmigración y un crecimiento poblacional positivo, ya que los pobladores poseen un nivel de vida que les garantiza un futuro (Raffino, 2020).

7.26.3. Consecuencias del crecimiento pobalcional

Aumento de la demanda de bienes y servicios

Aquellas poblaciones que experimentan un crecimiento positivo sostenido en el tiempo empiezan a requerir más y más insumos para sostener el nivel de demanda, lo cual permite que se ocupen empleos, que se movilice la economía, pero también que exista una mayor competitividad y que se aviven ciertos sentimientos de inconformidad (Raffino, 2020).

Deterioro del nivel de vida

Cuando la sociedad receptora no puede ofrecer lo mínimamente necesario a los migrantes o a las nuevas generaciones, un aumento descontrolado de la población puede aumentar la contaminación, la densidad poblacional (ocasionando el hacinamiento y la escasez de ciertos bienes y servicios, lo cual lógicamente los encarece), o la pobreza (Raffino, 2020).

CAPÍTULO 8

Marco legal

8.1. Situación de la escasez y condiciones de las cuencas hidrográficas

Se define escasez como la limitación del desarrollo e índice en los indicadores de salud de la población. Se presenta escasez de agua en Guatemala, estos problemas se pueden identificar por las condiciones fisiográficas, estas situaciones son el producto de la degradación de las cuencas hidrográficas de mayor demanda y de un incremento de población que se concentra en las áreas urbanas del país.

El ciclo hidrológico de las principales cuencas de Guatemala sufre remoción debido a la cobertura vegetal y erosión, lo que es iguala a grandes aportes de sedimentos a los ríos y corrientes de agua. La recarga de los acuíferos se ve afectada por los procesos de urbanización descontrolada, esto obstaculiza el aprovechamiento de las corrientes fluviales para implementar el desarrollo agrícola, generación de energía hidroeléctrica, consumo humano y otras contribuciones que afecten al desarrollo económico (Gálvez,2007).

8.2. Instituciones en el manejo del recurso hídrico

A continuación se mencionan las principales instituciones, organizaciones y actores en el manejo de las cuencas en Guatemala (García, 2009).

- CONRED: Implementó el Sistema de Alerta Temprana establecido por el Programa de Emergencia por Desastres Naturales en las cuencas.
- INSIVUMEH: Mantiene el control periódico de la red de estaciones hidrometeorológicas en todo el país, el cual está ampliando y modernizando gracias al apoyo del Programa de Emergencia por Desastres Naturales.

- FAUSAC: Realiza el monitoreo de la cuenca del río Itzapa y la UVG realiza el monitoreo de la calidad del agua en diversas estaciones del río Motagua.
- MARN: Está desarrollando el Sistema Nacional de Evaluación Ambiental (Estudios de impacto ambiental, monitoreo ambiental, auditorías y riesgo ambientales), como instrumento para el ordenamiento ecológico y ambiental del país. La ley del Organismo Ejecutivo le faculta para formular la política de conservación, protección y mejoramiento de los recursos naturales, la política para el manejo del agua en materia de contaminación y la de manejo de cuencas.
- CATIE: El Proyecto de Asistencia Técnica y Generación de Información, del Programa de Emergencia por Desastres Naturales, durante 1999 - 2001 generó una base de información (60 capas temáticas de mapas digitalizados a escala 1: 250,000) para análisis y planificación a nivel nacional que puede aplicarse por cuenca.
- INDE: Opera la red hidrométrica y climática únicamente en las cuencas prioritarias para generación de energía sus estaciones hidrométricas fueron desmanteladas hace varios años pero para análisis en el tema, se siguen usando sus series de datos de décadas pasadas.
- MINISTERIO DE SALUD PÚBLICA: Tiene la responsabilidad de prestar los servicios de agua potable y aguas residuales, además de proteger la salud de la población. Propone normativa de calidad del agua potable y de saneamiento ambiental y vigilar por la calidad del agua potable.
- INSTITUTO DE FOMENTO MUNICIPAL: Tiene la responsabilidad de mejorar las capacidades institucionales y financieras con ocasión de su prestación. El Instituto de Fomento Municipal INFOM, conforme su ley orgánica, brinda asistencia técnica y financiera en todos los ámbitos del desarrollo municipal, incluyendo la prestación de estos servicios, pero no cuenta con una política institucional definida para lo mismo.
- MUNICIPALIDADES: La prestación de los servicios de agua potable y aguas residuales en la República de Guatemala es eminentemente descentralizada y compete a cada uno de los 331 municipios en que administrativamente se divide el país, autoridades locales que además deben regularlos, incluyendo la fijación de tarifas conforme lo dispone el Código Municipal.
- Ministerio de Comunicaciones, Transporte, Obras Públicas y Vivienda (MICIVI): La ley del organismo ejecutivo le faculta para actuar en obras públicas tales como canales de navegación y dragado de ríos.
- Ministerio de Energía y Minas (MEM): Asigna la atribución de fomentar el uso de fuentes renovables de energía y su aprovechamiento racional en función de lograr la autosuficiencia energética del país. Autoriza el derecho de uso de las fuentes para fines hidroeléctricos.
- Ministerio de Agricultura (MAGA): Es el encargado del riego en el país, su rol actual es el de facilitados, promoviendo proyectos de riego para ser financiados a través de créditos para agricultores.

INSTITUCION	FUNCION EN EL TEMA DE RECURSO HIDRICOS
AMASURLI Autoridad de Manejo Sustentable del Lago de Izabal (Decreto 10-98 del Congreso de la República).	Depende de la Presidencia de la República a través del MARN, con total autonomía de gestión. Planifica coordina y ejecuta acciones para la recuperación efectiva de los ecosistemas que tutela. Posee un Consejo de Administración integrado por Gobernación, Municipalidades del Estor, Los Amates y Livingston, la Base Naval de Atlántico, INGUAT, CONAP, un representante de las comunidades asentadas en la cuenca, del CACIF y de las Organizaciones Conservacionistas. Desarrolla actividades de monitoreo, control y vigilancia, coordina las actividades de investigación, educación ambiental y saneamiento. Proyecta desarrollar el Plan de Manejo Sustentable, rescate, conservación, manejo, preservación y resguardo de la cuenca.
AMSA Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (Decreto 64-96 del Congreso de la República y Acuerdo Gubernativo 186-99).	Depende directamente de la Presidencia de la República. Integrada por CONAP, CONAMA (actualmente MARN), INGUAT; MAGA; ONGs conservacionistas, Gobernación Departamental, Procuraduría del Medio Ambiente, ANAM y un representante de las comunidades asentadas en la cuenca. Su fin es planificar, coordinar y ejecutar todas las medidas y acciones del sector público y privado que sean necesarias para recuperar el ecosistema de la cuenca y mejorar la calidad de vida de las poblaciones.
AMSCLAE Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del lago de Atitlán. (Decreto133-96 del Congreso de la República	La conforman la Vicepresidencia de la República, Gobernación Departamental, Municipalidades, Fiscalía del Medio Ambiente del Ministerio Publico, INGUAT, Cámara de Turismo, ONGs, Procuraduría del Medio Ambiente y el MAGA. Tiene como fin, conservar, preservar y resguardar el ecosistema del lago y áreas circunvecinas.

Figura 37: Instituciones y organizaciones relacionadas con el manejo de recurso hídrico
Fuente: (García, 2009).

CONAP Consejo Nacional de Áreas Protegidas	Está fuertemente ligado al manejo de cuencas, principalmente en las cuencas altas del cinturón central del país, las tierras bajas de la costa norte y los ecosistemas marino-costeros (manglares). Actualmente las áreas protegidas declaradas cubren un 21.4% (23,361 Km.2) de la superficie total del país.
CONRED Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres	Desarrolla esfuerzos para introducir el componente de prevención al nivel de cuencas hidrográficas, a pesar de que en un alto nivel sus acciones son mitigadoras o de recostrucción-rehabilitación en zonas de desastres. Actualmente se implementan sistemas de alerta local a inundaciones en las cuencas de los ríos Coyolate y Alto Guacalate.
FIS Fondo de Inversión Social (liquidado en 2008)	Su enfoque es similar a otras instituciones que hacen uso de los recursos naturales, principalmente el hídrico, sin considerar otras acciones de manejo de cuencas. Financió proyectos de riego en pequeña escala, sistemas de saneamiento ambiental, agua potable en el ámbito rural y proyectos de reforestación, entre otros. Los fondos sociales que dispone son financiados con recursos nacionales e internacionales que dependen de la Presidencia.
FONAPAZ	Es el fondo nacional para la paz, creado para atender necesidades en las áreas afectadas por el conflicto armado interno, actualmente atiende la construcción de proyectos de introducción de agua potable, miniriego.
IGN Instituto Geográfico Nacional	Su función es generar información básica de tipo cartográfica e información geográfica. Anteriormente este Instituto estaba militarizado y a raíz de los acuerdos de paz en Guatemala se convirtió en una institución civil. Esta situación, dio la oportunidad de disponer de material cartográfico y temático que anteriormente estaba restringido al público en general. En el ámbito de cuencas, la institución ha realizado estudios de recursos hidráulicos, morfométricos, de uso y capacidad de uso de la tierra y diagnósticos de uso e impactos en los recursos naturales.
INAB Instituto Nacional de Bosques	Regulador del manejo forestal sostenible orientado hacia un desarrollo forestal nacional. Enfoca sus políticas también a otros beneficios que genera el bosque como servicios ambientales en la protección del suelo, regulador de zonas de recarga hídrica y oferta de agua, biodiversidad y conservación del paisaje, entre otros y parte del ordenamiento de la cuenca hidrográfica .
INDE Instituto de Electrificación Empresa de Generación de Energía	De acuerdo a la Ley General de electricidad promulgada a raíz de la nueva Ley General de Electricidad en 1996 (Decreto 93-96), se dio origen al programa de modernización el sector eléctrico, desagregándose en el sector privado de generación, de transporte y control, y de

Figura 38: Instituciones y organizaciones relacionadas con el manejo de recurso hídrico
Fuente: (García, 2009).

	distribución de la energía eléctrica. Actualmente tiene 43 estaciones climáticas y 34 estaciones hidrométricas instaladas en las principales cuencas generadoras de energía y su Unidad para Protección de Cuencas recién se restablece. A pesar de que se abrió al sector privado la generación hidroeléctrica, el manejo de cuencas no figura dentro de sus costos de operación.
INFOM Instituto Nacional de Fomento Municipal	Autónomo y descentralizado. Fue creado para apoyar el desarrollo económico-social de las 329 municipalidades del país. Hasta hace poco su gestión se limitaba al área urbana, al conferírsele la administración de la Unidad Ejecutora del Programa de Acueductos Rurales (UNEPAR) y el Programa de Agua y Saneamiento del Altiplano (PAYSA), se amplía el radio de acción de abastecimiento de agua hacia el sector rural. Estas unidades únicamente se encargan de los estudios básicos de las fuentes de agua, detectan necesidades de dotación de agua de la población y asesoran la construcción de los proyectos de captación, conducción y distribución.
INGUAT Instituto Guatemalteco de Turismo	La política global y sus objetivos en parte se orientan hacia un desarrollo turístico sustentable a través del manejo de los recursos naturales y desarrollo de productos a fin de mejorar la oferta turística natural de los sistemas turísticos del país.
INSIVUMEH Instituto Nacional de Vulcanología, Meteorología e Hidrología	Desarrolla estudios básicos e hidrológicos de cuencas, modelaje de caudales y prevención de inundaciones, calidad de agua, monitoreo de ríos del país. Posee una base de datos meteorológicos e hidrológicos del país. Se encarga del control y medición de parámetros climáticos e hidrológicos de las cuencas hidrográficas del país y todos los eventos geológicos que ocurren a escala nacional. Actualmente se necesita fortalecer la institución para ampliar el programa de registro en casi toda la red nacional e implementar sistemas de control en otros.
MAGA Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación	Ministerio de Gobierno, rige la producción agrícola, pecuaria, hidrobiológica y el control fito y zoosanitario. Responsable de la Política, régimen jurídico, autorizaciones de uso y aprovechamiento. Debe coordinar con el MARN el ordenamiento territorial y de administración de tierras nacionales y con otras instituciones la educación agropecuaria ambientalmente compatible, política de comercio exterior agropecuario y de hidrobiológicos y Desarrollar mecanismos y procedimientos que contribuyan a la seguridad alimentaria del país. Además, debe ejercer control supervisión y vigilancia en la calidad y seguridad de la producción, importación,

Figura 39: Instituciones y organizaciones relacionadas con el manejo de recurso hídrico Fuente: (García, 2009).

	exportación, transporte registro, disposición y uso de productos plaguicidas y fertilizantes.
MAGA / PLAMAR Plan de Acción para la Modernización y Fomento de la Agricultura bajo Riego y Drenaje	Propiciar el mejor uso de tierras bajo un uso actual y potencial de riego y asesor en técnicas para racionalizar el manejo del agua, y llevar a cabo la transferencia de las 26 unidades de riego estatal a los usuarios. Actualmente cada unidad cuenta con una asociación de usuarios y a nivel nacional se agrupan en la Federación Nacional de Usuarios de las Unidades de Riego de Guatemala (FENURGUA). Este Plan atiende el establecimiento de nuevos sistemas, genera la factibilidad de habilitar nuevas zonas con drenaje agrícola y atención de emergencias. En esto último resalta lo ocurrido con el fenómeno Mitch, teniendo como meta la rehabilitación de 29 unidades de riego, 50 sistemas artesanales de riego y 100 pequeñas unidades de riego.
MARN Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales	Asesorar y coordinar la protección y mejoramiento del ambiente. Actualmente coordina el manejo de 3 cuencas a través de la figura de Autoridad de Manejo de Cuencas (Amatitlán, Atitlán e Izabal-Río Dulce). Entre otras actividades que lleva a cabo es la administración del Fondo Guatemalteco del Medio Ambiente (FOGUAMA) que dentro de sus objetivos señala, financiar e invertir en proyectos de manejo de recursos naturales en cuencas hidrográficas.
MEM Ministerio de Energía y Minas	Coordina acciones con énfasis en preservar el ambiente derivado de actividades impactantes a nivel de cuencas como el aprovechamiento de recursos petroleros, explotación de minas y canteras y generación de energía en sus diversas modalidades (hidroeléctrica, termoeléctrica, con hidrocarburos, solar eólica).
MICIVI Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda	Responsable de la ejecución y o supervisión de la construcción y mantenimiento de obras de infraestructura en el país.
MIINSAL Ministerio de Salud Publica y Asistencia Social	Ente responsable de la aplicación del Código de Salud. Relacionado al manejo de cuencas y sus recursos naturales, debe velar por el cumplimiento de las Normas de Saneamiento (Calidad de agua, saneamiento, desechos sólidos y líquidos).
Ministerio de Relaciones exteriores Dirección de Límites y Aguas Internacionales	Promover y desarrollar estudios de manejo de aguas internacionales y humedales declarados ante la Convención Ramsar.

Figura 40: Instituciones y organizaciones relacionadas con el manejo de recurso hídrico Fuente: (García, 2009).

INSTITUCIONES Y ORGANIZACIONES	PROGRAMAS DE INVESTIGACIÓN SOBRE MANEJO RECURSOS HIDRICOS
MARN	Participación de comunidades rurales y poblaciones indígenas en cuencas de alta vulnerabilidad ecológica en el país.
PAFG	Metodologias para planificación de manejo y ordenamiento de cuencas. Valoración económica de los recursos naturales y servicios ambientales en las cuencas.
URL	A través del IARNA, investigación técnico - científica, la capacitación y la transferencia de información en los ámbitos de la agricultura sostenible, el manejo de los recursos naturales y las condiciones ambientales.
USAC	A través de la Dirección General de Investigación –DIGI-realiza investigación en recursos naturales, y específicamente en el tema de recursos hídricos.
UVG	Inventarios de carbono para hule, café y sistemas del uso del suelo.

Figura 41: Instituciones con programas de investigación sobre recursos hídricos
Fuente: (García, 2009).

8.3. Marco legal de los recursos hídricos del país

8.3.1. Legislación vigente

La situación de la legislación vigente en materia de agua no cuenta con una ley ni administración especial; el régimen jurídico se integra supletoriamente por un sinnúmero de disposiciones contenidas en distintos textos jurídicos, sin un concepto rector como lo podría ser el manejo integrado del recurso o integrador como podría serlo la previsión de un sistema nacional de planificación y presupuesto del agua (García, 2009).

8.3.2. Uso agrícola del agua

Ley de Pesca (2003), Ley de Transformación Agraria (1962), Reglamento de Riego (1972), Reglamento para la Operación, Conservación y Administración de los Distritos de Riego (1972), Servidumbres agrícolas (1972), Reglamento para el Cobro de las Cuotas de Riego en los Sistemas Construidos por el Estado (1980), Reglamento interno del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA) (1996), Reglamento para la Construcción, Operación y Administración de Sistemas de Miniriego con Aprovechamiento de Aguas Superficiales y Subterráneas, Arietes Hidráulicos, Rehilete para Fines de Riego y Embalses de Agua de Uso Múltiples 1992 (García, 2009).

8.3.3. Uso doméstico del agua

Código de Salud (1997), Código Municipal (2002), Ley de Medidas y Acciones Emergentes para Prevenir y Evitar la Propagación del Cólera (DC 66-91).(García, 2009).

8.3.4. Uso energético del agua

Ley Orgánica del Instituto Nacional de Electrificación, INDE (1994), servidumbres para instalaciones eléctricas (1969), la Ley General de Electricidad (1996) y normas técnicas emitidas por la Comisión Nacional de Energía (seguridad, construcción de presas 1999).(García, 2009).

8.3.5. Uso minero y de hidrocarburos

Ley de Minería (1997) y Ley de Hidrocarburos (1983, 1998) y sus reglamentos.

8.3.6. Uso para la navegación

Reglamento para el Gobierno y Policía de los Puertos (1938), reglamento de la Policía Naval (1985), Reglamento de Control de Ingreso, Permanencia y Egreso de las Embarcaciones Tipo Turístico (1990), Reglamento de Operadores de Marinas Turísticas (1990), Ley del Impuesto sobre Circulación de Vehículos Terrestres, Marítimos y Aéreos (1994), Ley de Tránsito (1997) y especialmente, el Convenio sobre el Reglamento Internacional para Prevenir los Abordajes (COLREG 1994).(García, 2009).

8.3.7. Lineamientos de planificación del recurso hídrico

El proceso de planeación hidráulica se basa en que el manejo del agua debe ser por medio de cuencas hidrográficas. La participación organizada de los usuarios es de gran importancia para alcanzar los objetivos propuestos.

Guatemala necesita contar con una Ley de aguas como se establece en la constitución política de la republica que se ubica en el articulo 127. Es necesario contar con un sistema de planificación nacional, plan nacional de desarrollo y un programa nacional hídrico que establezca los proyectos e inversiones (García, 2009).

8.3.8. Régimen legal de aguas

Tema	Institución	Ley	Artículos, Políticas y Reglamentos
Dominio	* Registro General de la Propiedad * Corte de Constitucionalidad * Tribunales de Justicia	* Código Civil * Código Procesal Civil y Mercantil	*Código Civil: Capitulo V (de la propiedad de las agua) Art. 579 -588 *Código Civil Mercantil: Art. 263
Uso común	* Municipalidades	* Código Civil * Ordenanzas Municipales	*Código Civil: Capitulo V (de la propiedad de las agua) Art. 579 -588
Aprovechamientos especiales	* Municipalidades * Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación * Ministerio de Energía y Minas * Ministerio de Salud Pública y Asistencial	* Código Municipal * Reglamentos de Riegos * Ley de Minería * Código Civil	* Código Municipal: Art. 23, 68, 142, 147 * Reglamentos de Riegos:Política de Promoción de Riego. * Ley de Minería: Art. 4, 71, 72, 75. * Código Civil: Capitulo V (de la propiedad de las agua) Art. 579 -588
Protección de las personas	* Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres	* Ley de la CONRED	* Art. 86
Protección de los recursos	* Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales	* Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente	* Art. 1, 6, 12, 15 * Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos
Abundamiento	* Instituto Nacional de Bosques * Consejo Nacional de Áreas Protegidas	* Ley Forestal * Ley Áreas Protegidas	* Ley Forestal: Art. 47, 67 * Ley Áreas Protegidas

Figura 42: Régimen legal de aguas

Fuente: (MARN, 2016).

Actualmente a nivel nacional se busca efectuar y cumplir con el Acuerdo Gubernativo 236-2006 "Reglamento de Descargas y Reusó de Aguas Residuales y de la disposición De Lodos" el cual establece los criterios y requisitos que deben cumplirse para la descarga y reúso de aguas residuales y disposición de lodos a través del mejoramiento de las características estableciendo un proceso continuo que permita proteger los cuerpos receptores de agua de los impactos provenientes de las diversas actividades humanas, restablecer los cuerpos receptores de agua en proceso de eutrofización y originar el desarrollo del recuso hídrico como visión de gestión integrada.

El Acuerdo Gubernativo 12-2012, "Reglamento de Descargas de Aguas Residuales en la Cuenca del Lago de Atitlán", busca los mismos fines del 236-2006, fijando los parámetros y límites máximos permisibles, para la descarga de aguas residuales a cuerpos receptores de la cuenca del Lago de Atitlán, ya sea de forma directa o indirecta, con el fin de rescatar, proteger y prevenir la contaminación de su sistema hídrico (MARN, 2016).

El Acuerdo Ministerial 573-2011, del Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social, norma el diseño de los sistemas rurales de eliminación y disposición final de excretas y aguas residuales, buscando eliminar el riesgo de contaminación ambiental, proteger la salud de la población del país (MARN, 2016).

CAPÍTULO 9

Diagnóstico del área de estudio

9.1. Cuenca del Río Motagua

- Descripción general

La cuenca del Río Motagua es la más extensa del país y es de relevante importancia por ser el río más largo del país. Se localiza en la vertiente del Océano Atlántico, en el sureste de Guatemala y noroccidente de Honduras, con una longitud de 486 km, ocupando un área que supera los 15 mil km2.

La cuenca se forma por 13 departamentos y 83 municipios, de los cuales 13 municipios forman parte del departamento de Guatemala los cuales son: San Raymundo, Palencia, San Pedro Ayampuc, Chinautla, Chuarrancho, Santa Catarina Pinula, San José del Golfo, Guatemala, San José Pinula, Mixco, Fraijanes, San Juan Sacatepéquez y San Pedro Sacatepéquez

- Fisiografía y suelos

Esta cuenca nace en el altiplano occidental de Guatemala y es uno de los accidentes geográficos clave del país, debido al aporte de agua de las montañas del altiplano, Sierra del Merendón, Sierra de las Minas y Chuacús. La Cuenca del Río Motagua está rodeada por la Sierra Madre, Sierra de las Minas, de Chuacús, de Santa Cruz, del Mico y de la Estrella, Merendón y Omoa en Honduras.

Dentro de la Cuenca del Río Motagua se encuentran varias fallas geológicas que han dado origen a una intensa actividad sísmica. La falla más importante es la llamada del Motagua, que atraviesa la cuenca en su totalidad y que provoca un tipo de erosión de origen sísmico. En cuanto a suelos se refiere, presenta cuatro diferentes formaciones (González, 1988), que se listan a continuación:

- Suelos desarrollados sobre ceniza volcánica a elevaciones medianas
- Suelos desarrollados sobre esquistos a elevaciones medianas
- Suelos desarrollados sobre ceniza volcánica a elevaciones altas
- Suelos desarrollados sobre depósitos marinos a elevaciones bajas

El 31.73 % del uso del suelo es empleado en agricultura limpia anual, el 1.9 2 % para café, el 3.92 % para pastos cultivados, el 9.52 % pastos naturales y solo el 1.58 % son centros poblados.

- Hidrografía

El río Motagua tiene 486 kilómetros de largo y un área estimada de 12,670 km2, que varía según distintos autores, dentro de la cual existen numerosas divisiones de cuenca. El análisis generado con la capa digital de microcuencas de Guatemala (Mapa de cuencas hidrográficas a escala 1:50,000, República de Guatemala, método de Pfafstetter - primera aproximación - MAGA), indica que a lo largo de la Cuenca del Motagua se tienen alrededor de 563 microcuencas. La Cuenca del Río Motagua se rodea de las cuencas de: río Polochic-Cahabón-Lago de IzabalRío Dulce, ríos Salinas o Chixoy, Samalá, Nahualate, Lago de Atitlán-Madre Vieja, ríos Coyolate-Acomé, Achiguate, María Linda, Los Esclavos, Ostúa-Güija y Olopa (MAGA, 2009).

Se estima que el caudal del Motagua alcanza los 6,500 millones de m3 anuales (IARNA/URL, 2006). Mientras tanto, De León (2003) indica que el río Motagua ocupa alrededor del 8.5 % del total del país, extendiéndose de occidente a oriente.

- Clima

La temperatura varía a lo largo de la cuenca del Motagua, registrando datos entre 25°C y 35°C para Izabal, mientras que en los departamentos de Totonicapán, Quiché, Sololá y Chimaltenango, zona que cuenta con la mayor cantidad de microclimas, las temperaturas promedio oscilan entre los 8°C y 29°C. Para Jalapa, Chiquimula y Baja Verapaz, la temperatura promedio puede encontrarse entre los 10°C a 25°C. En el caso de los departamentos de Guatemala, El Progreso y Zacapa, esta variable va desde los 14°C a los 40°C.

- Actividad económica

Las actividades productivas se basan en la producción agrícola por lo que se establece como su principal fuente de ingresos y subsistencia. El depender exclusivamente de las actividades agrícolas donde los ciclos para la recuperación de la inversión son mayores a 90 días, causa que un 39 % de las familias obtienen ingresos ocasionalmente, considerado como principal causante del porcentaje de familias que viven en pobreza extrema en el territorio (ASORECH ,2017).

- Población y vivienda

Únicamente un 1.58 % de la superficie de la cuenca corresponde a superficie urbana y el 54 % de la población se encuentra concentrado en el departamento de Guatemala. Los municipios de Guatemala, Mixco y San Juan Sacatepéquez concentran la mayor población en la cuenca, Guatemala con el 52 % del total de población.

9.2. Cuenca del Río María Linda

- Descripción general

La cuenca del río María Linda se extiende desde la Ciudad de Guatemala, en el altiplano, hasta la costa del Pacífico y comprende los volcanes Acatenango y Pacaya los cuales se encuentran en estado activo, aportando grandes cantidades de material que se deposita conformando una extensa llanura de material volcánico.

En la parte alta de la cuenca se originan los ríos Chapetón, Aguacapa y Michatoya que tras su unión, dan lugar al río María Linda, el cual tiene una longitud de 70km. La Ciudad de Guatemala forma parte de la cuenca y la calidad del agua se ve afectada por los contaminantes procedentes de la ciudad.

- Fisiografía y suelos

La cuenca comprende los volcanes Acatenango y Pacaya, la geología de la cuenca está determinada por el aporte de material del cinturón volcánico en las partes altas de la cuenca. Los materiales depositados por la actividad volcánica comprenden arenas, tobas, cenizas, lahares y sedimentos piro clásticos en general, que conforman una extensa planicie al pie de las montañas volcánicas como resultado de los procesos de erosión, transporte y sedimentación, el cual representa un 22 % de la superficie.

- Clima

El clima es variado en lo largo de la cuenca y desde 10°C hasta 27°C, siendo en promedio mayor entre 20°C y 25°C por la diferencia del terreno.

- Actividad económica

Los sistemas productivos agrícolas ocupan un 18 % de la superficie y varían a lo largo de la cuenca, los cultivos principales son café y caña, un 17 % por pastos naturales, 7.23 % por pastos cultivados, 1.79 % por bosques secundario y un 1.97 % por coladas de ceniza y/o arena volcánica.

- Población y vivienda

El 7 % de la superficie total de la cuenca corresponde a centros poblados, el 73 % de los poblados se encuentra en el departamento de Escuintla y el 27 % en el departamento de Guatemala en 8 municipios. La mayor concentración de la población se encuentra en Villa Canales seguido de Amatitlán, Villa Nueva, Fraijanes y Mixco.

9.3. Cuenca del Río Los Esclavos

- Descripción general

El río Los Esclavos se ubica en la vertiente del Pacífico, en el suroeste de Guatemala. A diferencia de otras cuencas de esta región, la cuenca de Los Esclavos no recibe el aporte de sedimento directo al no existir volcanes activos dentro de la cuenca. No obstante si existen tres volcanes inactivos en la cuenca: Tecuamburro, Moyuta y Jumaytepeque.

En la parte alta de la cuenca se originan numerosos afluentes: Las Cañas, Los Achiotes, San Antonio y Los Vados, entre otros. Todas estas corrientes se unen al cauce principal del río Los Esclavos, que recibe un importante aporte de otro afluente, las Margaritas, en el tramo final. El cauce principal tiene una longitud de 135.6 kilómetros, salvando un desnivel de 2,238 metros. La cuenca hidrológica abarca una extensión de 2,019 kilómetros cuadrados, formando parte de los departamentos de Santa Rosa, Guatemala, Jalapa y Jutiapa.

- Fisiografía y suelos

El 70 % de la superficie la cuenca es tierra no cultivable, y el 26 % es tierra sin limitaciones para cultivo, el 40 % del terreno no cultivable es montañoso y volcánico. Dentro del departamento de Guatemala la cuenca del rio los esclavos atraviesa 3 municipios que son Santa Catarina Pinula, San José Pinula y Fraijanes, ocupando 6.5 % de la superficie total de la cuenta y cuenta con 91 poblados.

A nivel de cultivos estos varían a lo largo del transcurso del río, en función del tipo del terreno. Se encuentran cultivos de hortalizas, maíz y café y en algunas zonas caña de azúcar y en la parte baja, predominan los pastos cultivados. El 28 % de la superficie total de la cuenca se usa correctamente los suelos y el 48 % está sobre utilizado.

- Clima

El clima es variado en lo largo de la cuenca y desde 12°C hasta 28°C, predominando 18°C en 24 % de la superficie y en otro 17 % 25°C. Para el Departamento de Guatemala se registran temperaturas de 18 a 20°C.

- Población y vivienda

Únicamente un 0.6 % de la superficie de la cuenca corresponde a superficie urbana. La mayor parte de ésta se ubica en el departamento de Guatemala y en los municipios de Nueva Santa Rosa, Santa Rosa de Lima y Oratorio, en el departamento de Santa Rosa.

9.4. Cuenca del Río Achiguate

- Descripción general

El río Achiguate se ubica en la vertiente del Océano Pacífico, en el suroeste de Guatemala. Los volcanes de Acatenango, Fuego y Agua, situados en la parte alta de la cuenca, aportan grandes cantidades de material que se deposita conformando una extensa llanura de material volcánico.

La cuenca hidrológica abarca una extensión de 1,048 Km2 y forma parte de los departamentos de Chimaltenango, Sacatepéquez, Escuintla y en un 0.05 % de la superficie de la cuenca en el departamento de Guatemala, municipio de Villa Nueva.

- Fisiografía y suelos

La geología está determinada por el aporte de material del cinturón volcánico en las partes altas de las cuencas. Los materiales arrojados y depositados por la actividad volcánica comprenden depósitos de arenas, tobas, cenizas, lahares y sedimentos piroclásticos en general, que conforman una extensa planicie al pie de las montañas volcánicas como resultado de los procesos de erosión, transporte y sedimentación.

En el departamento de Guatemala está presente en el municipio de Villa nueva siendo esta solo un 0.05 % de la superficie y la cuenca presenta agricultura limpia anual.

- Hidrografía

El río Achiguate es un corto río costero (104,7 km1) del suroccidente de Guatemala. Nace en la Sierra Madre, en las laderas sur del volcán de Fuego en los departamentos de Sacatepéquez y Escuintla. Discurre en dirección del sur, atravesando la planicie costera de Escuintla para desembocar en el océano Pacífico.

La proximidad del Achiquate al volcán de Fuego aumenta el riesgo de inundaciones y flujos de lodo. El principal afluente es el río Guacalate, de 90.2 km.4 El sistema más largo en la cuenca alcanza los 125 km, y es una combinación del Bajo Achiguate (34.8 km) con el Guacalate. El Guacalate drena el río Pensativo, el río que abastecía a la antigua capital de Antigua Guatemala.

- Clima

El clima es variado en lo largo de la cuenca y desde 10°C hasta 27°C, predominando 15°C, 25 y 26°C en un 15 % cada uno del total de la superficie. Para el Departamento de Guatemala municipio de Villa Nueva, se registra temperaturas de 20°C.

- Población y vivienda

En el departamento de Guatemala la superficie de la cuenca es del 0.05 % en el municipio de Villa Nueva, la cual no tiene presencia de población. Según el censo realizado en el año 2002,se presentó un total de 324,905 habitantes y su proyección para el 2010 era de 400,652 habitantes.

CAPÍTULO 10

Metodología

A continuación, se da una descripción de los procesos que conforman la metodología para la finalidad del trabajo de graduación. Se divide en tres etapas las cueles son: La obtención de los recursos de información, características generales de las imágenes de satélites y procesamiento de las imágenes satelitales junto con una guía metodológica que estable los pasos a seguir para replicar el proceso.

10.1. Recursos de información: Datos espaciales

La obtención de datos espaciales en los estudios de cambio de uso de suelo, pueden venir de diferentes fuentes como las fotografías aéreas, imágenes satelitales, cartas topográficas digitalizadas y otros. Poseen una ubicación geográfica que permite localizar un evento dentro del terreno analizado, lo cual diferencia este tipo de datos de los datos comunes.

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron 4 imágenes provenientes del satélite Landsat 8 OLI/TIRS. La resolución de las imágenes obtenidas por los sensores OLI y TIRS se conforman por 11 bandas espectrales, con una resolución espacial de 30 metros para las bandas de 1 a 7 y 9.

Las cuatro imágenes están en la proyección Universal transversal de Mercator (UTM) Zona 14 N WGS84 y las mismas corresponden a diversas fechas de los años establecidos.

Las imágenes Landsat se obtuvieron de la colección de imágenes de Land Geo Cover (https://glovis.usgs.gov/), dichas imágenes son de alta resolución espectral, y presentan una corrección geométrica.

10.2. Características generales de las imágenes de satélite

Inicialmente se planteó analizar las fechas 2006, 2010, 2015 y 2019 con el propósito de tener un rango representativo para la comparación de uso de suelo entre los años. Debido a que el satélite Landsat 8 fue lanzado en el año 2013, no se permite la obtención de las imágenes de años anteriores al 2015, conformadas por las nueve bandas necesarias para el análisis. Por consiguiente, se analizaron los años 2015, 2016, 2017 y 2019 de los cuales se obtuvieron imágenes que cumplían con las características necesarias.

10.3. Procesamiento de las imágenes satelitales

Como primer paso, se cargan las imágenes al Software ENVI donde se generar los procesos fotogramétricos necesarios, para generar la clasificación y una mejor visualización de la zona de estudio. Se delimita la zona de estudio en la imagen espectral original para obtener un recorte (subset) delimitado, solo por el área de interés.

A las imágenes se les aplicaron diversas composiciones coloreadas que dependen del orden establecido para la banda roja, verde y azul. Dicho proceso permite visualizar de manera simultánea, las distintas porciones del espectro con el objetivo de delimitar las coberturas.

Para efectos del análisis se suprimió una de las bandas (Coastal aerosol) que conforma el satélite, debido a que no es necesaria para el análisis, por lo que la numeración y nombres de las bandas utilizadas serán las siguientes:

No. de la banda en Landsat 8	No. de la banda en Landsat 8 para el análisis	Nombre de la banda
2	1	Blue
3	2	Green
4	3	Red
5	4	Near Infrared (NIR)
6	5	SWIR 1
7	6	SWIR 2

Cuadro 3: Nomenclatura de las bandas utilizadas

Fuente: Propia.

Como segundo paso, se obtuvieron los cocientes e índices de ENVI. Los cocientes permiten reducir los efectos del ambiente y discriminar entre suelo y vegetación. La posibilidad de cocientes depende de la cantidad de bandas que posea la imagen, en este análisis se trabajaron con cuatro cocientes provenientes de la división de bandas, de los cuales cada uno provee un diferente enfoque y visualización. Se generó una combinación de bandas obtenida por los cocientes anteriormente establecidos, con el propósito de unificar la información.

También, se utilizó ENVI que permite calcular 27 índices diferentes de vegetación, que determinan la abundancia de pigmentos, presencia de agua y carbono.

Como tercer paso se obtuvieron los índices NDVI y NDWI de los cuales se generaron una serie de mapas temáticos por año, con la ayuda del Software Qgis donde se le aplica una distribución por categoría, la cual muestra el rango de valores que presenta la zona analizada.

10.4. Clasificación no supervisada

Como tercer paso se genero una clasificación no supervisada del tipo de cobertura que presentan las imágenes por medio de la opción Classification Workflow, donde se estableció que el software corriera el análisis con 30 clasificaciones. Por consiguiente, se procede a realizar la identificación de los pixeles que conforman las clasificaciones para asignarles un tipo de cobertura con la ayuda de Google Earth Pro y el Atlas temático generado por el MAGA para adquirir conocimiento del tipo de terreno con el que se está trabajando, dicho proceso se repite para todas las muestras.

Para obtener una clasificación agrupada se procese a generar una nueva clasificación de la previamente generada, con el objetivo de unificar la información y obtener estadísticos concretos por categoría. Se genera una serie de mapas temáticos para visualizar la clasificación final junto con su leyenda de atributos.

Toda la información generada de las clasificaciones se procede a trabajarla en el software Qgis donde por medio de sus herramientas de geoprocesos se generan cortes e intersecciones entre los shapes de las cuencas hidrográficas, municipios y departamentos provenientes del Geoportal de SEGEPLAN y los archivos. evf generados en los procesos anteriores. De dicho análisis se obtiene información sobre cada clasificación por cuenca.

10.5. Densidad poblacional

Para calcular la densidad poblacional en los municipios que conforman las cuencas del Departamento de Guatemala se utilizaron los datos del censo del año 2018 generados por la INE. Se estimo la población del año 2002 y la actual por medio de tasas de crecimiento debido a que no existe información actualizada y disponible al público. Se utilizó el shape de Mancha Urbana del a ciudad de Guatemala generada por ortofotos del año 2006 con el objetivo de generar una tabla de atributos con la información de la población por municipio y la densidad poblacional medida en habitantes por kilómetro cuadrado y así generar mapas temáticos que comparen el año 2002 y el 2018.

10.6. Guía metodológica

A continuación se enlista una serie de pasos, donde se describe el proceso de investigación detalladamente para la obtención de los resultados con el objetivo de poder replicar la metodología en diversos escenarios.

1. Adquisición de imágenes satelitales Landsat 8 por medio de la página USGS.
    a) Proceso de selección de imágenes con un porcentaje de cobertura de nubes menor al 8 %, alta claridad y paquete completo de bandas (GeoTIFF).
2. Importar archivo txt por medio de la opción GeoTIFF con metada en el programa ENVI versión 5.1
3. Configuración de banas para obtener el color verdadero (R, G, B).
4. Cargar archivo shp del departamento de Guatemala para poder identificar el área a trabajar.
5. Realizar un rectángulo por medio de la herramienta ROI que enmarque el departamento de Guatemala.
6. Exportar el ROI como un archivo shp y cargarlo nuevamente al trabajo.
7. Se procede a guardar la imagen multiespectral con la que se desea trabajar y el opción de Subset by file se selecciona el archivo shp del ROI previamente creado.
8. Guardar la nuevo recorte de imagen satelital con el que se trabajara.
9. Para el calculo de cocientes se utiliza la opción de Band Ratio donde se escoge la banda del numerador y denominador para cada caso.
10. Para el calculo de los índices se utiliza la opción de Band Math donde se ingresa la expresión matemática conformada por la letra "B" seguida de caracteres numéricos.
11. Para la generación de la clasificación no supervisada se utiliza la opción Classification Workflow, seleccionar la imagen con la que se trabajar.
    a) Seleccionar la opción No Training Data
    b) Ingresar 30 clases espectrales (iniciales, requiere varias pruebas)
    c) Ingresar número de iteración (se recomienda iniciar con 15)
    d) Ingresar un umbral de cambio (se recomienda iniciar con un 2 %)
    e) Activar la opción de suavizar los datos con un valor de 3
    f) Activar la opción de agregación con un valor de 6
    g) Desactivar la opción de convertir el resultado en archivo vectorial
    h) Guardar el resultado de la clasificación como un archivo ENVI
    i) Apagar todas las clases generadas y encender una por una para poder identificar el tipo de uso de suelo al que pertenecen.

j) Generar tabla con el numero de clase y la cobertura asignada

k) Generar una combinación reducida de las previamente establecidas y asignar un número

l) Generar tabla con la nueva combinación numérica

m) Por consiguiente se utiliza la opción Post Classification y la opción Combine Classes.

n) Seleccionar el raster generado en la clasificación inicial

ñ) En la capa de dialogo de los parámetros de la combinación seleccionar Class 1 en la ventana Select Input Class y Class 4 en la ventana Select Output Class.

o) Utilizar la opción de Add Combination para adicionar las combinaciones reducidas

p) Seleccionar una combinación de entrada y una combinación de salida

q) Continuar asignando las combinaciones hasta cubrir las 30 o mas clases de entrada.

r) Para finalizar el procesamiento de la imagen satelital se utiliza la opción Post Classification seguido de Class Statistics

s) Seleccionar las clases de las que se desea obtener las estadísticas

t) Guardar la clasificación como un archivo vectorial

12. Exportar los resultados obtenidos en ENVI 5.1 a QGIS 3.2.

    a) Utilizar las herramientas de geo procesos para obtener los resultados deseados

    b) Insertar una nueva ventana de mapas

    c) Generar las vistas de la información que se desea en el mapa

13. Repetir proceso con cada imagen satelital que se esté trabajando.

CAPÍTULO 11

Análisis y procesamiento de información

11.1. Procesamiento de imágenes teledetectadas

A continuación se describen una serie de análisis enfocados a mejora de la calidad visual de las imágenes procesadas. El objetivo es disponer de un mejor análisis visual de manera que sean más evidentes los rasgos de las distintas coberturas presentes en el área de estudio.

11.1.1. Composiciones coloreadas con ENVI

Color natural

La combinación de color natural permite que los elementos en el suelo aparezcan en colores similares a su apariencia en el sistema visual humano. La vegetación sana aparece de color verde, los campos recientemente aclarados aparecen muy claros y la vegetación poco sana aparece de color café. Esta combinación de bandas provee la mejor información acerca del agua (superficial y profunda), así como sedimentos. Como se puede observar el año con una presencia de vegetación más visible y sana fue el 2015.

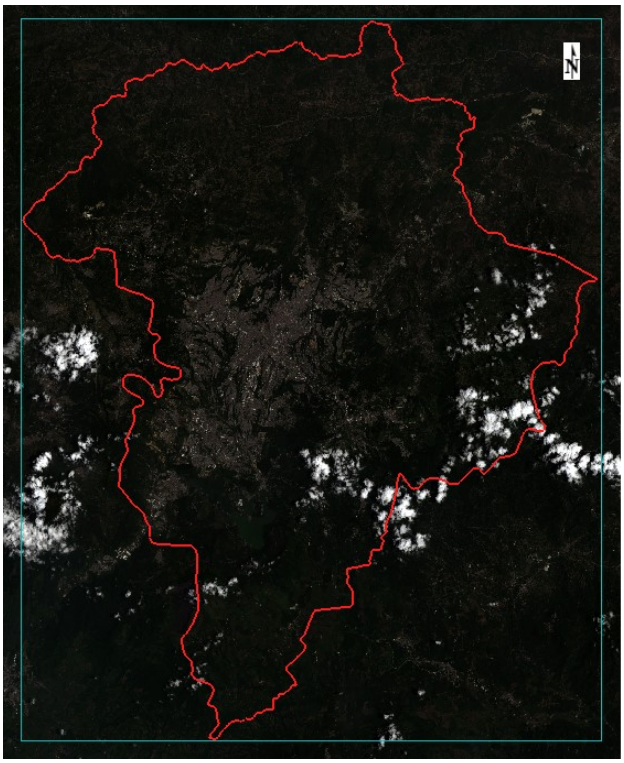


Figura 43: Composición coloreada color natural para el año 2019
Fuente:Propia.

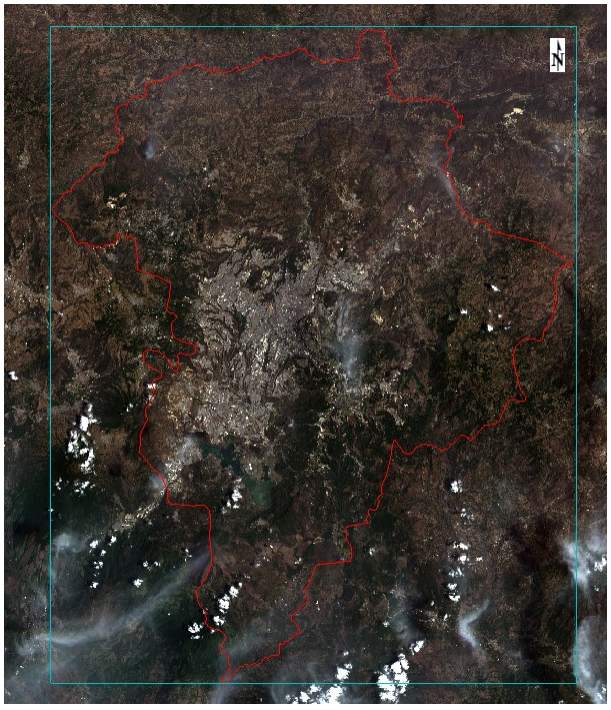


Figura 44: Composición coloreada color natural para el año 2017
Fuente:Propia.

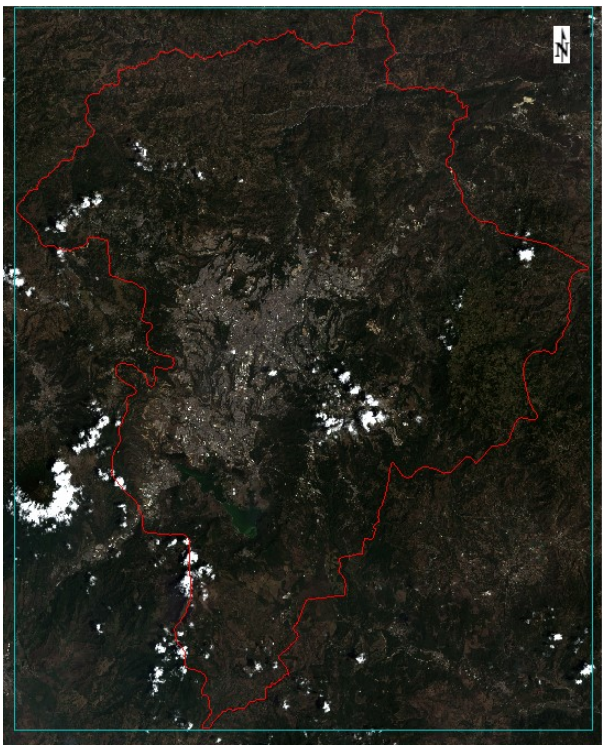


Figura 45: Composición coloreada color natural para el año 2016
Fuente:Propia.

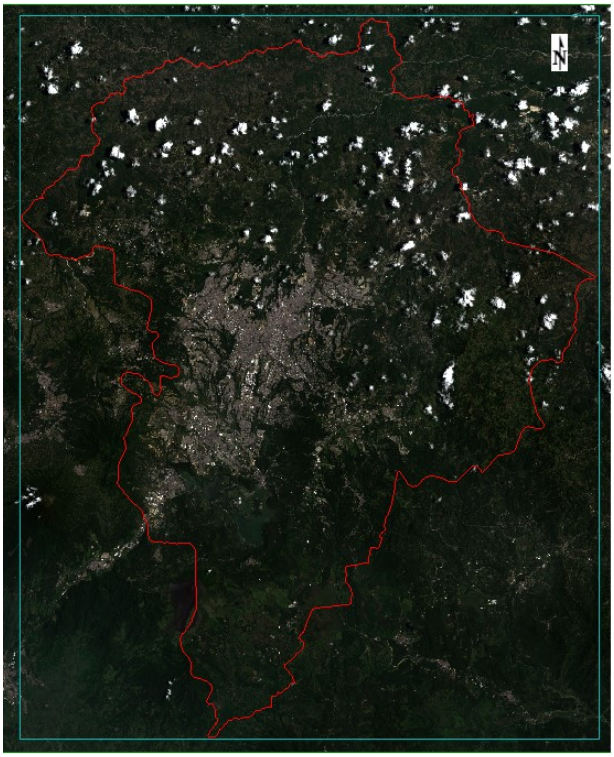


Figura 46: Composición coloreada color natural para el año 2015
Fuente:Propia.

Falso color (Urbano)

Esta combinación de bandas muestra en todos rojos las áreas de vegetación, las áreas urbanas en tonos celeste y los suelos en tonos café oscuro y café claro. Los bosques de coníferas aparecen en tonos más oscuros que los bosque latifoliadas. Dicha combinación es útil para el monitoreo de patrones y drenajes de suelo. Los tonos rojos brillantes representan la vegetación sana mientras que los tonos claros indican pasto o vegetación escasa. Al analizar los resultados obtenidos para los cuatro años es fácil observar cómo aumento el crecimiento urbano y como se redujo la vegetación entre el año 2015 y 2019.

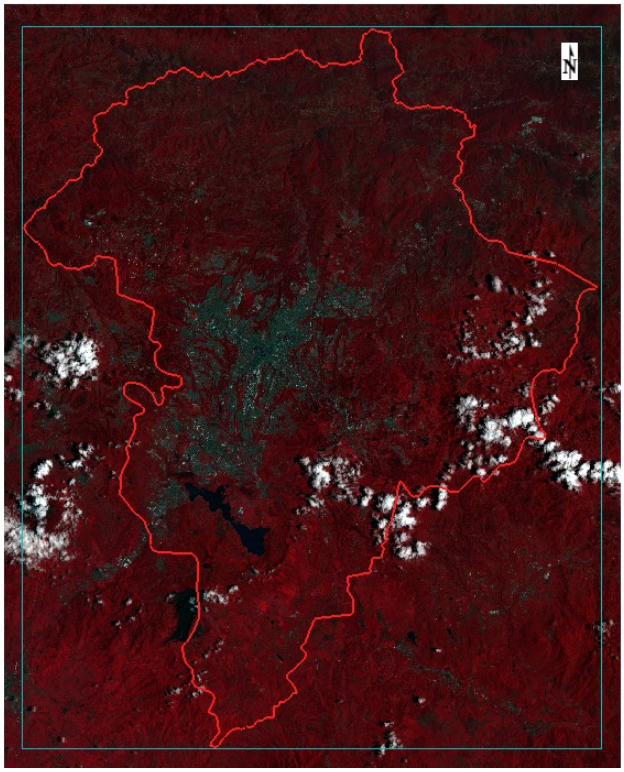


Figura 47: Composición coloreada color falso natural para el año 2019
Fuente:Propia.

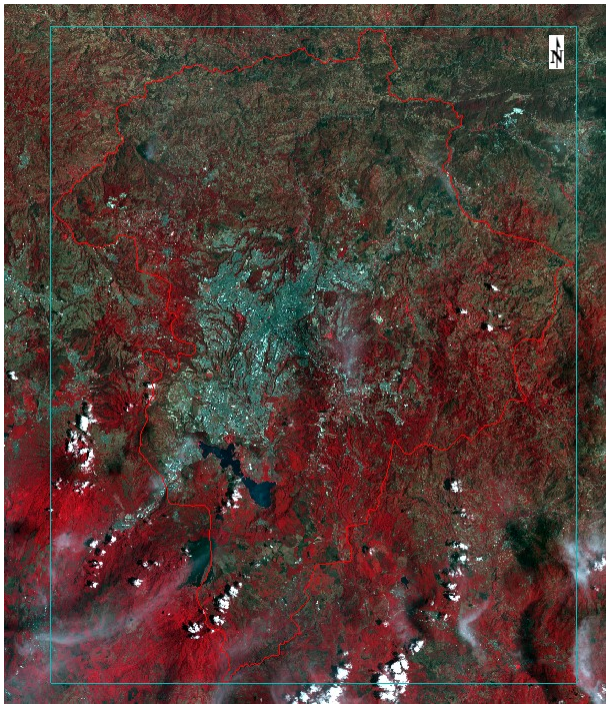


Figura 48: Composición coloreada color falso natural para el año 2017
Fuente:Propia.

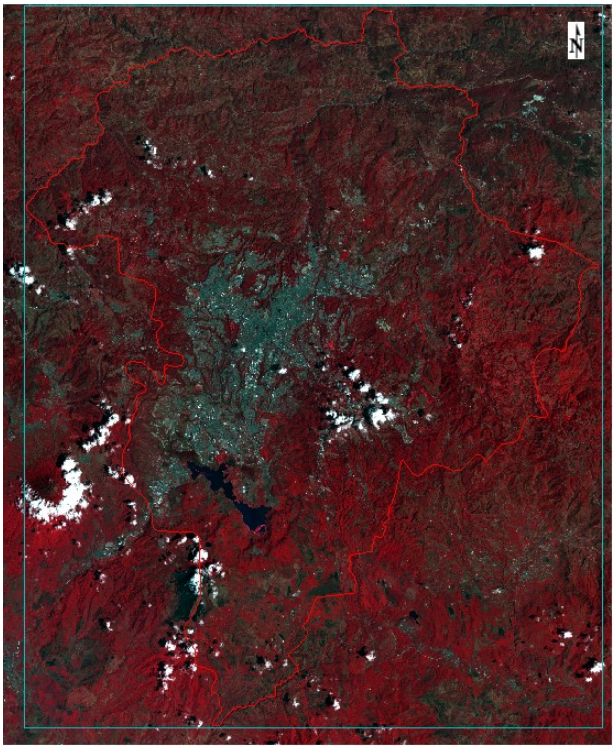


Figura 49: Composición coloreada color falso natural para el año 2016
Fuente:Propia.

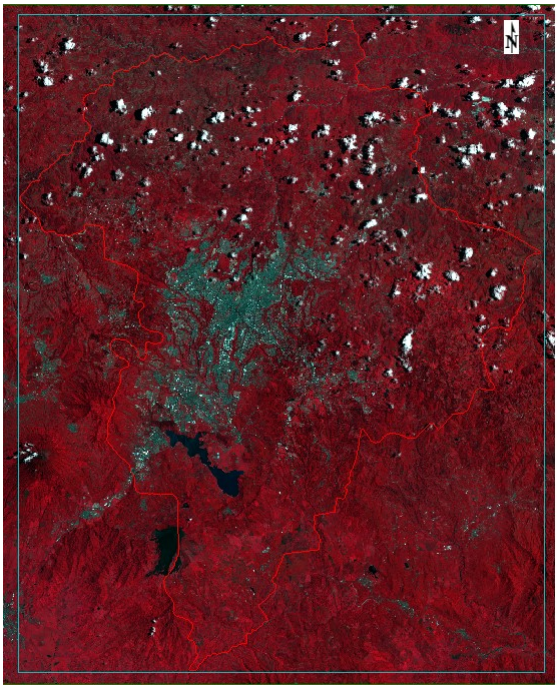


Figura 50: Composición coloreada color falso natural para el año 2015
Fuente:Propia.

Suelo/Agua

Esta combinación ofrece una definición adicional de frontera agua-tierra, lagos internos y corrientes de agua pueden ser localizados con gran precisión. El tipo de vegetación y su condición se identifican en tonos marrones, verdes y naranjas. Usualmente entre más húmedos estén los suelos más oscuros se reflectarán en la imagen debido a la absorción del infrarrojo por el agua. Al analizar los resultados obtenidos para el año 2015 el suelo presenta una mayor humedad por lo que la tasa de crecimiento de la vegetación aumenta.

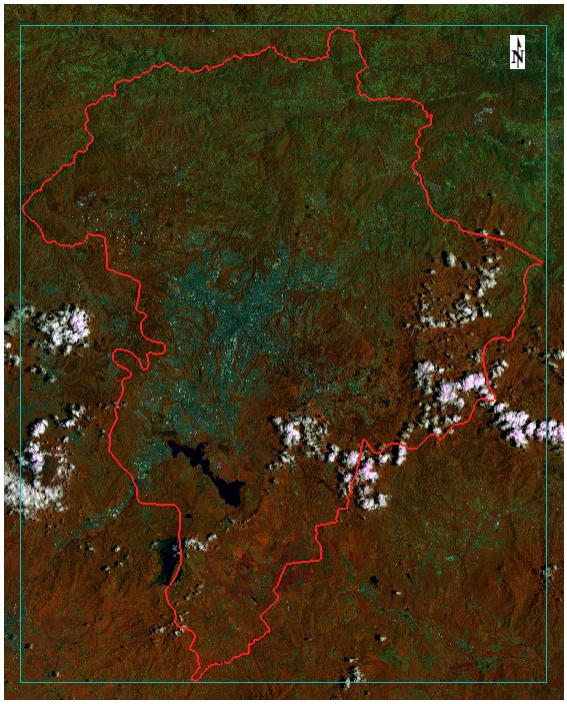


Figura 51: Composición coloreada color suelo/agua para el año 2019
Fuente:Propia.

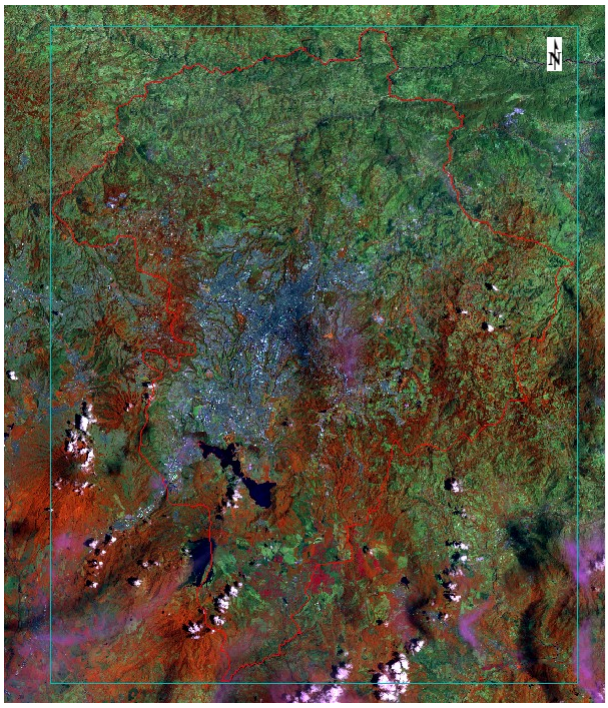


Figura 52: Composición coloreada color suelo/agua para el año 2017
Fuente:Propia.

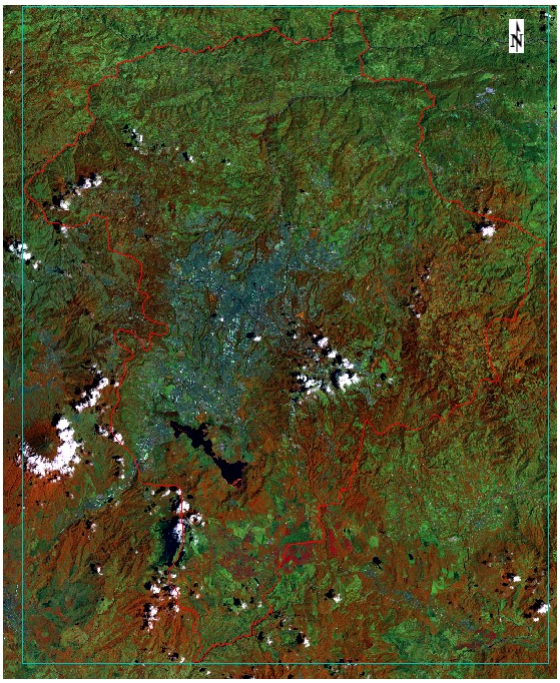


Figura 53: Composición coloreada color suelo/agua para el año 2016 Fuente:Propia.

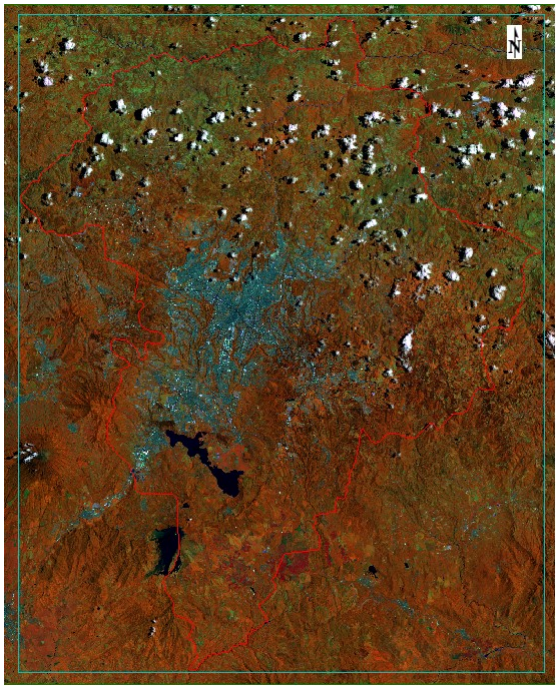


Figura 54: Composición coloreada color suelo/agua para el año 2015 Fuente:Propia.

Natural con remoción atmosférica

Provee una vista parecida a la natural, permite la penetración de partículas atmosféricas y el humo. La vegetación sana se refleja de color verde, el suelo desnudo en tonos rosados y en las áreas con vegetación escasa en tonos naranjas (vegetación seca) y cafés. Los puntos verdes dentro de las áreas urbanas indican cobertura de pastos como campos de golf. Como se puede observar la vegetación más sana se presenta de color verde brillante sin embargo comparado con las distintas combinaciones coloreadas previas se determina un cambio en el crecimiento urbano ya que el año 2017 presenta una mayor cobertura.

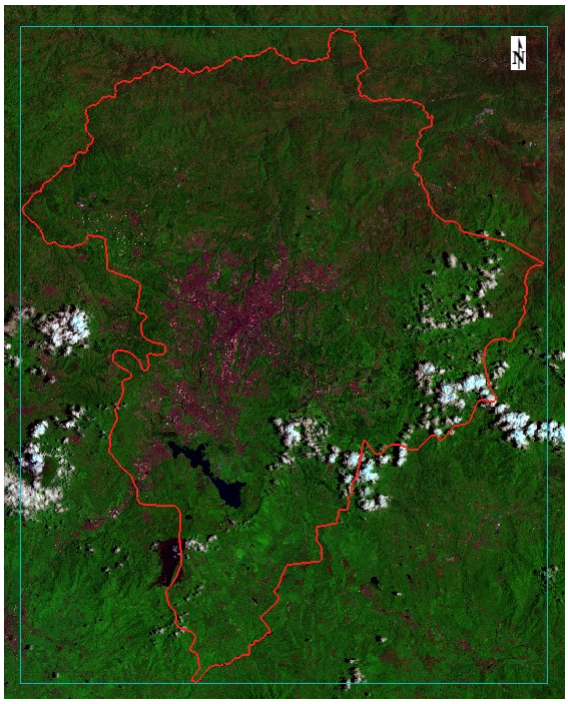


Figura 55: Composición coloreada color natural con remoción atmosférica para el año 2019 Fuente:Propia.

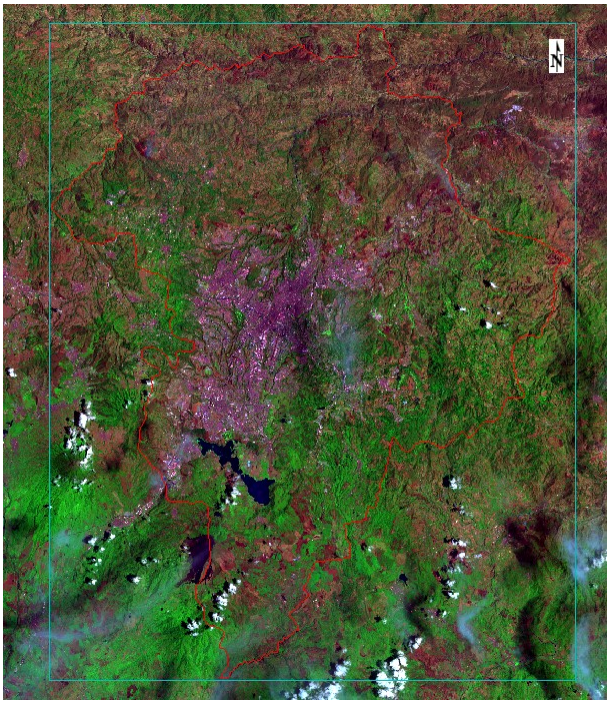


Figura 56: Composición coloreada color natural con remoción atmosférica para el año 2017 Fuente:Propia.

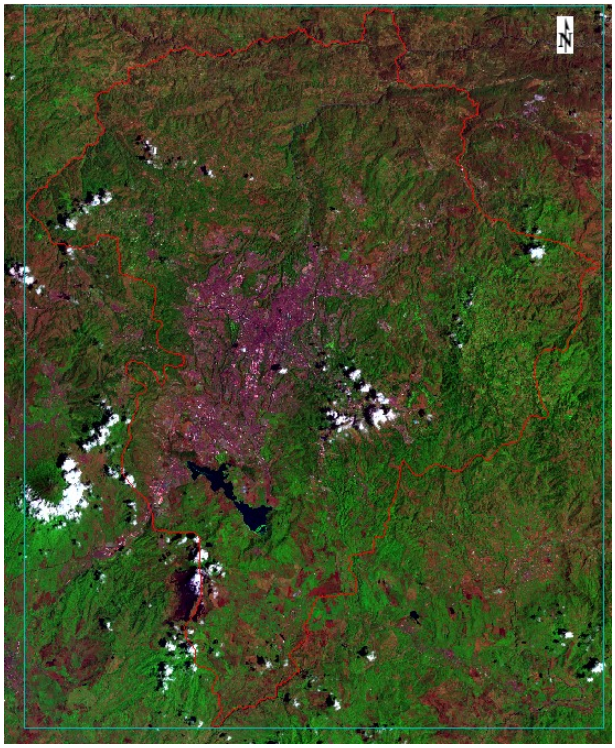


Figura 57: Composición coloreada color natural con remoción atmosférica para el año 2016 Fuente:Propia.

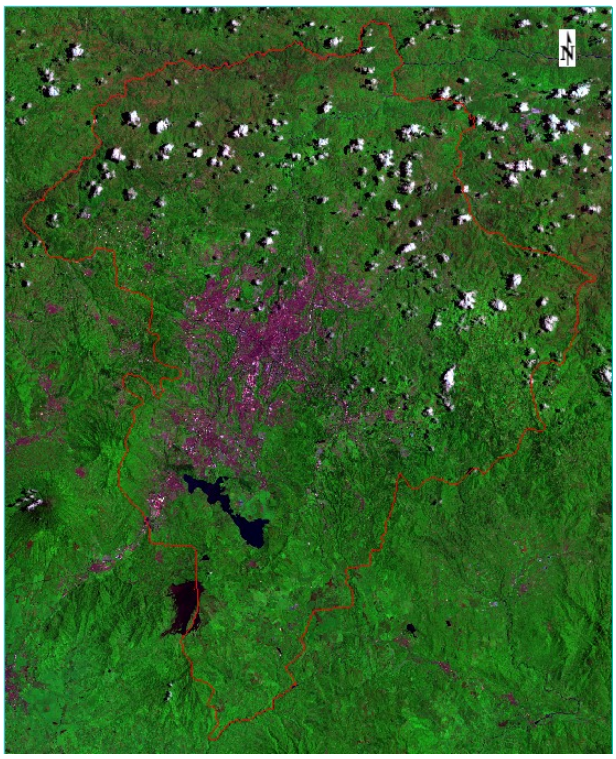


Figura 58: Composición coloreada color natural con remoción atmosférica para el año 2015 Fuente:Propia.

11.1.2. Cocientes de ENVI

Índice de cociente de vegetación (B4/B3)

Por medio de dicho cociente se puede distinguir la vegetación, agua y tierras de cultivo. Es útil para la identificación de bosques y tierras infértiles. Conforme los tonos más claros mayor será la cantidad de vegetación que se presente en el área. Con dicho análisis podemos recalcar que en el año 2015 la mayor parte del área se conforma por tonos claros es decir una mayor cobertura de vegetación.

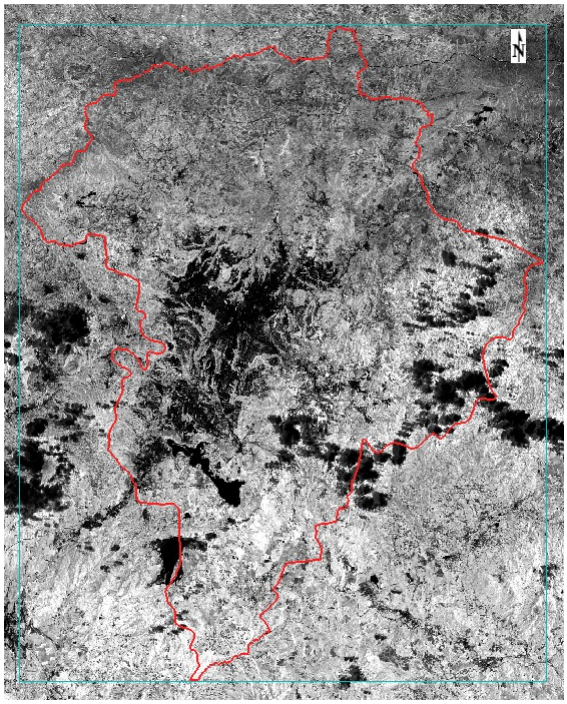


Figura 59: Índice de cociente de vegetación (B4/B3) para el año 2019
Fuente:Propia.

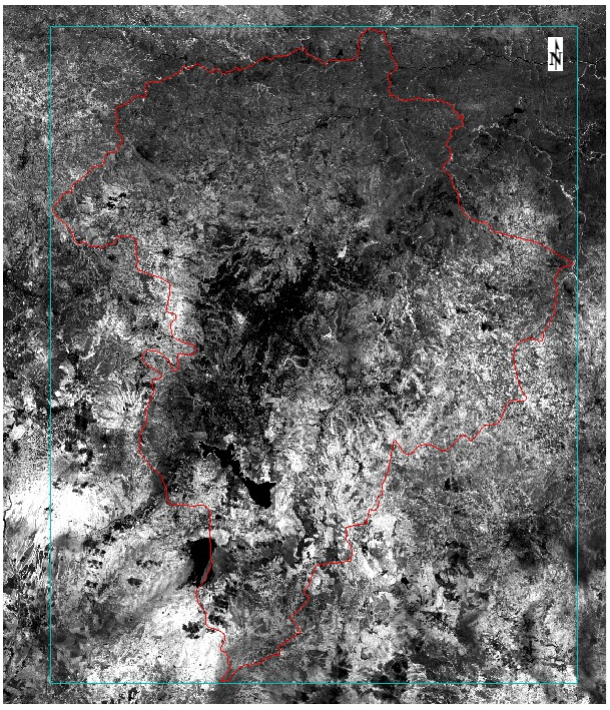


Figura 60: Índice de cociente de vegetación (B4/B3) para el año 2017
Fuente:Propia.

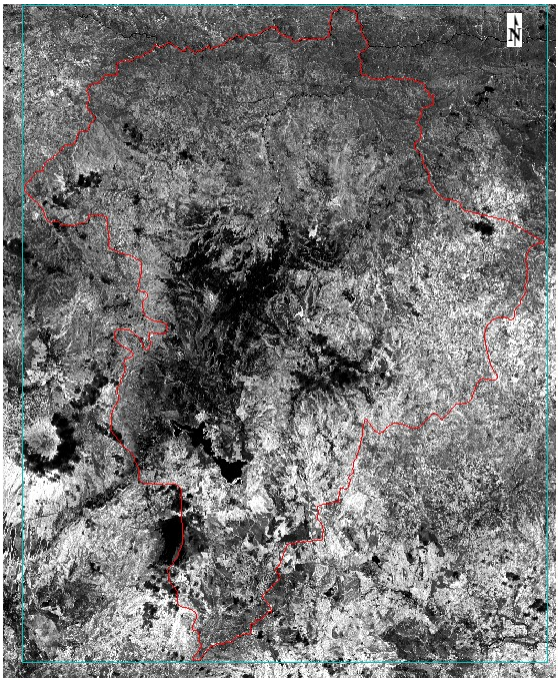


Figura 61: Índice de cociente de vegetación (B4/B3) para el año 2016
Fuente:Propia.

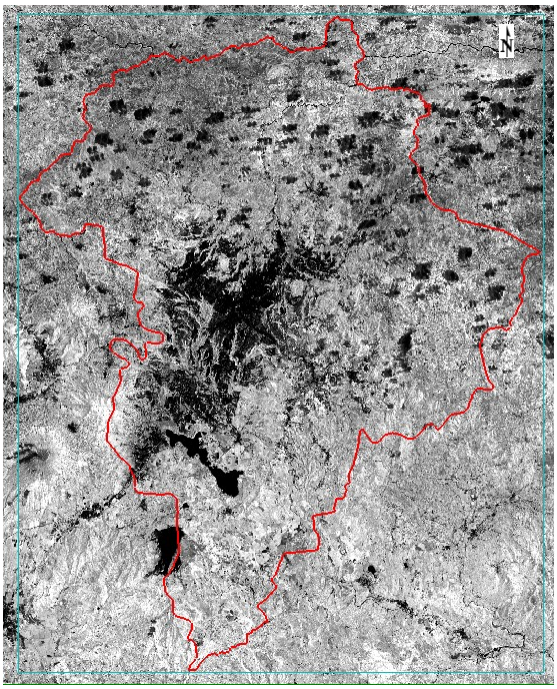


Figura 62: Índice de cociente de vegetación (B4/B3) para el año 2015
Fuente:Propia.

Índice inverso del cociente de vegetación (B3/B4)

Por medio de este cociente se definen los suelos infértiles y áreas urbanas en tonos claros y brillantes debido a que es el opuesto del índice de vegetación. No se define cuerpos de agua, bosques o tierra de cultivos. Para el año 2017 se refleja una mayor proporción de tonos claros es decir el área urbana tuvo un incremento significativo a comparación de los otros años.

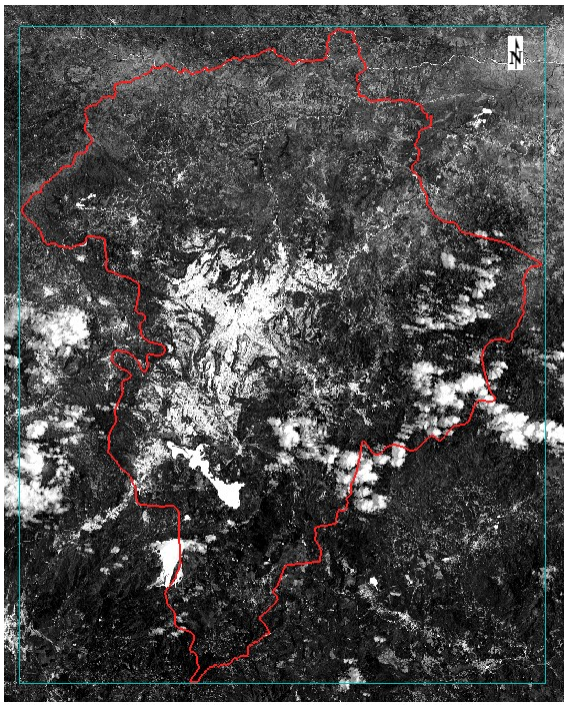


Figura 63: Índice inverso del cociente de vegetación (B3/B4) para el año 2019
Fuente:Propia.

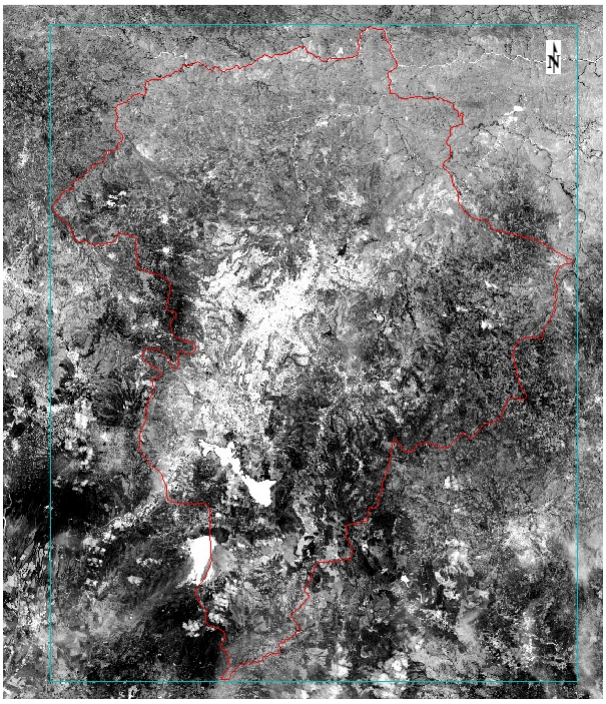


Figura 64: Índice inverso del cociente de vegetación (B3/B4) para el año 2017 Fuente:Propia.

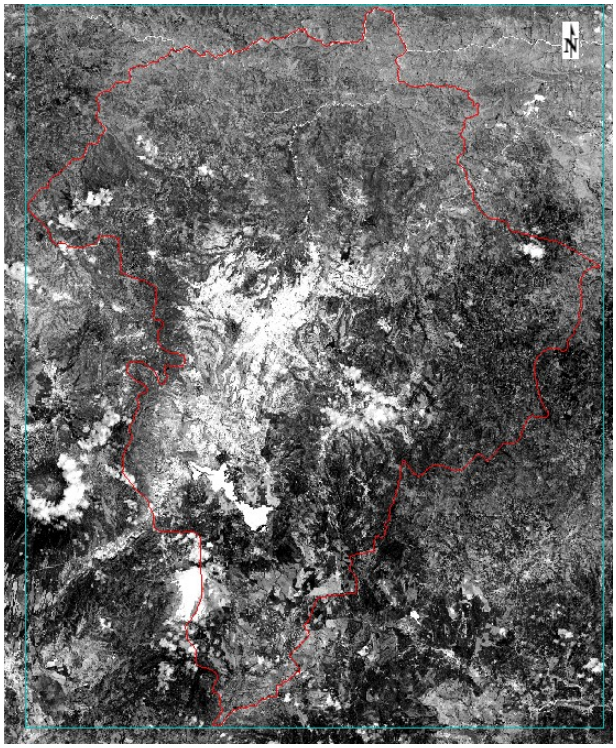


Figura 65: Índice inverso del cociente de vegetación (B3/B4) para el año 2016 Fuente:Propia.

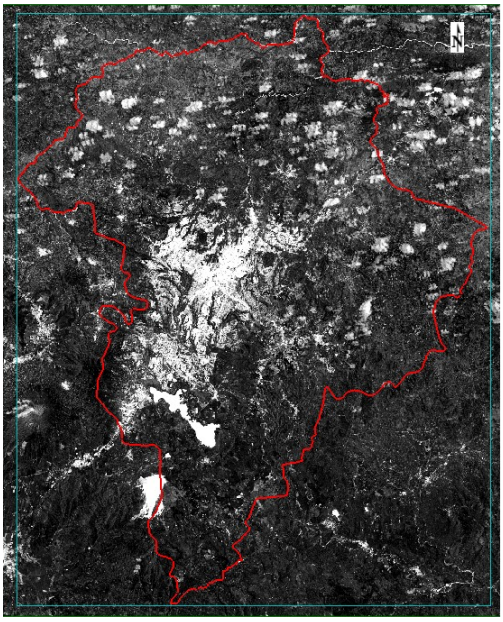


Figura 66: Índice inverso del cociente de vegetación (B3/B4) para el año 2015
Fuente:Propia.

Índice de cociente rojo verde - RGRI (B3/B2)

Separa bosques de cultivos. Dicho cociente puede ser útil para discriminar clases generales de vegetación. Los cultivos se identifican con tonos claros y brillantes y los bosques en tonos oscuros.

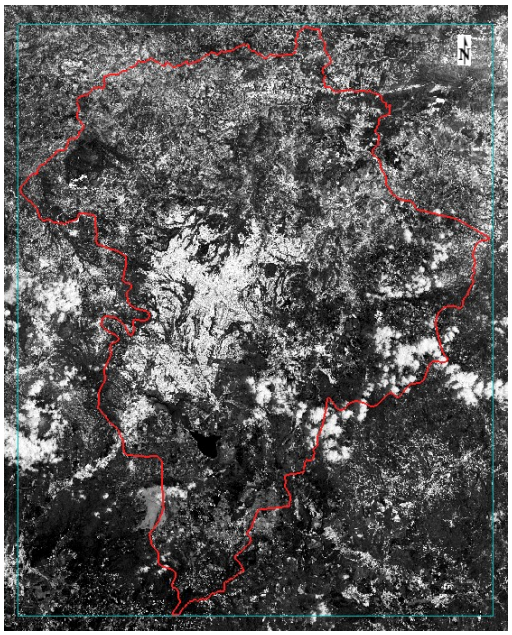


Figura 67: Índice de cociente rojo verde - RGRI (B3/B2) para el año 2019
Fuente:Propia.

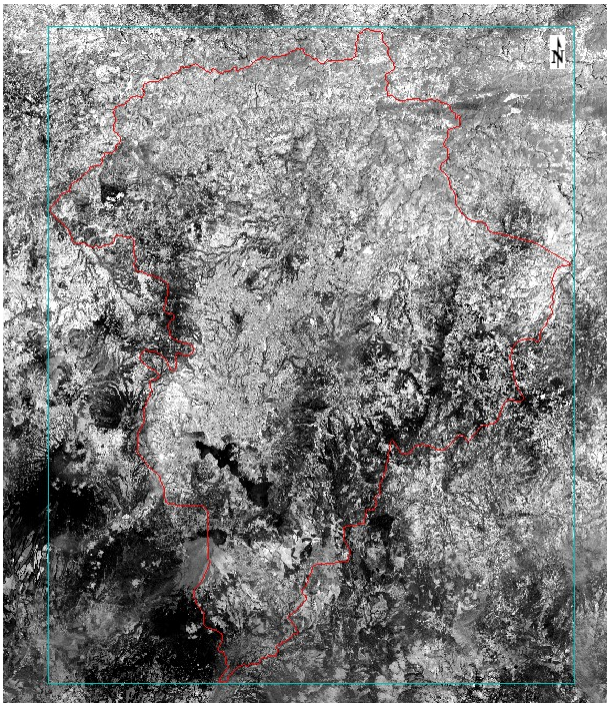


Figura 68: Índice de cociente rojo verde - RGRI (B3/B2) para el año 2017 Fuente:Propia.

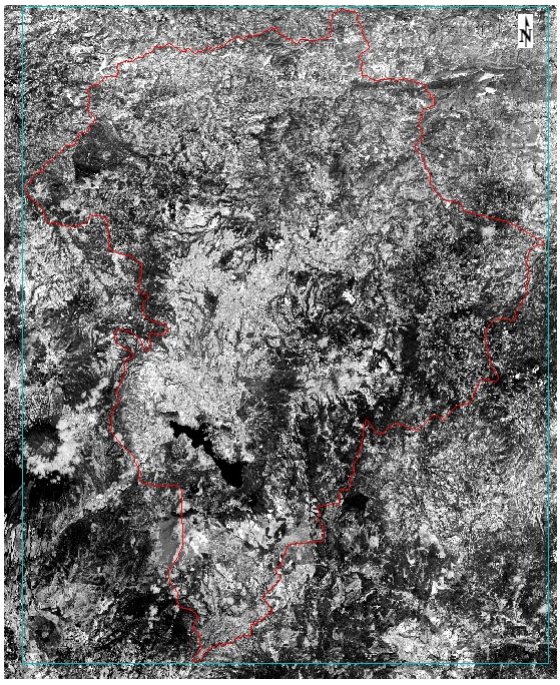


Figura 69: Índice de cociente rojo verde - RGRI (B3/B2) para el año 2016 Fuente:Propia.

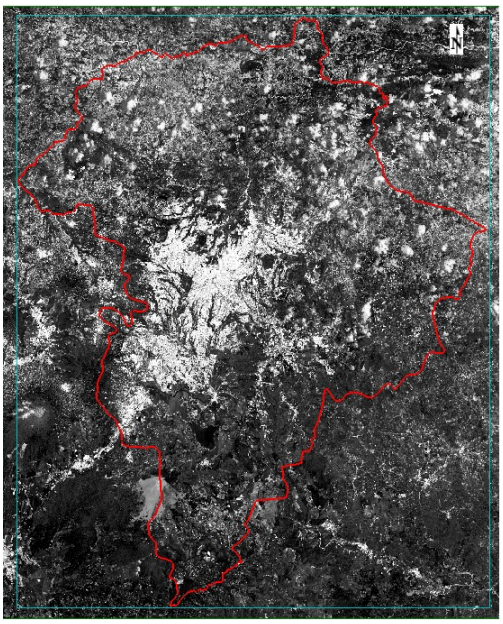


Figura 70: Índice de cociente rojo verde - RGRI (B3/B2) para el año 2015
Fuente:Propia.

Índice inverso del cociente rojo verde - RGRI (B2/B3)

Se distinguen cultivos y tierras de manera efectiva. Tanto los bosques como los cuerpos de agua aparecen en tonos claros y la tierra en tonos oscuros. No resalta las áreas urbanas. Es el opuesto del índice de cociente rojo.

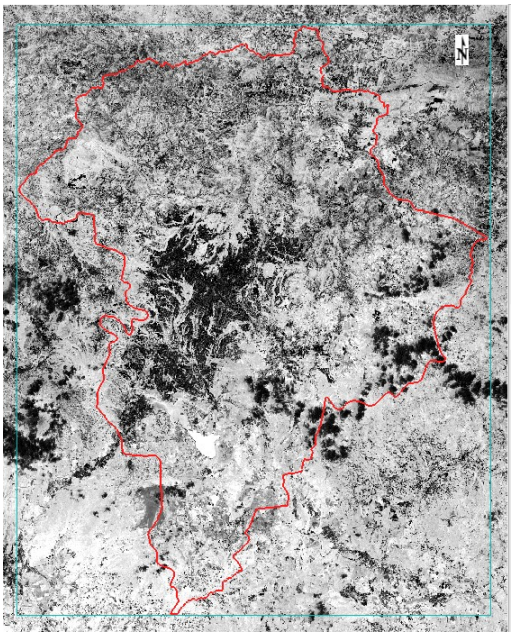


Figura 71: Índice inverso del cociente rojo verde - RGRI (B2/B3) para el año 2019
Fuente:Propia.

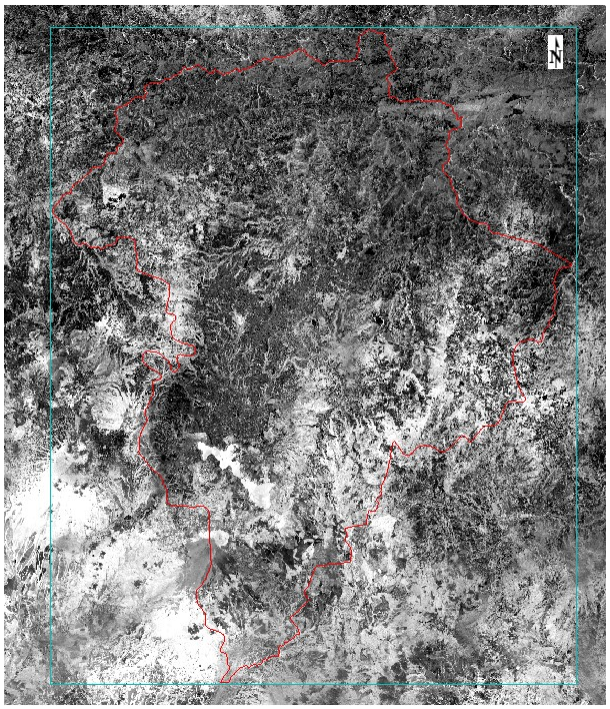


Figura 72: Índice inverso del cociente rojo verde - RGRI (B2/B3) para el año 2017 Fuente:Propia.

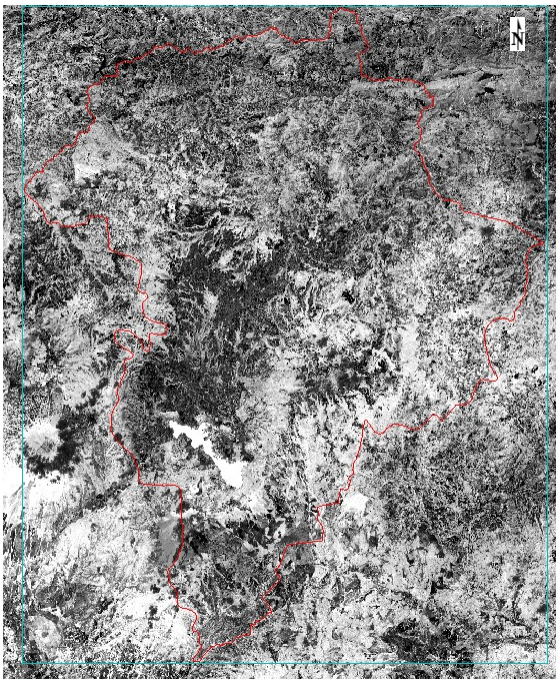


Figura 73: Índice inverso del cociente rojo verde - RGRI (B2/B3) para el año 2016 Fuente:Propia.

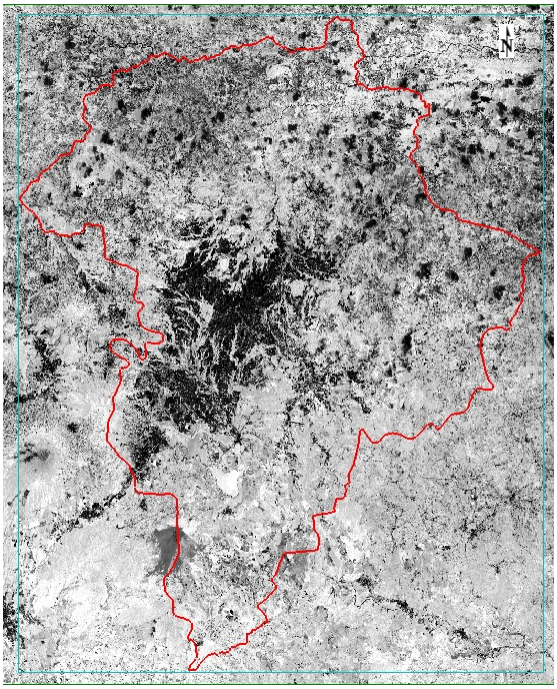


Figura 74: Índice inverso del cociente rojo verde - RGRI (B2/B3) para el año 2015
Fuente:Propia.

11.1.3. Combinación de bandas

Al generar una combinación de bandas con los cocientes B4/B3, B3/B4 Y B3/B2 previamente establecidos se obtiene una visualización mejorada, donde el color rojo refleja las áreas de bosque, el color celeste determina el área de suelo desnudo y nubes y el color verde representa los cultivos presentes en la zona. Al observar las combinaciones para los cuatro años se puede determinar que la mayor presencia de cultivos se encuentra en el año 2017 y la mayor cobertura de bosque en el año 2019.

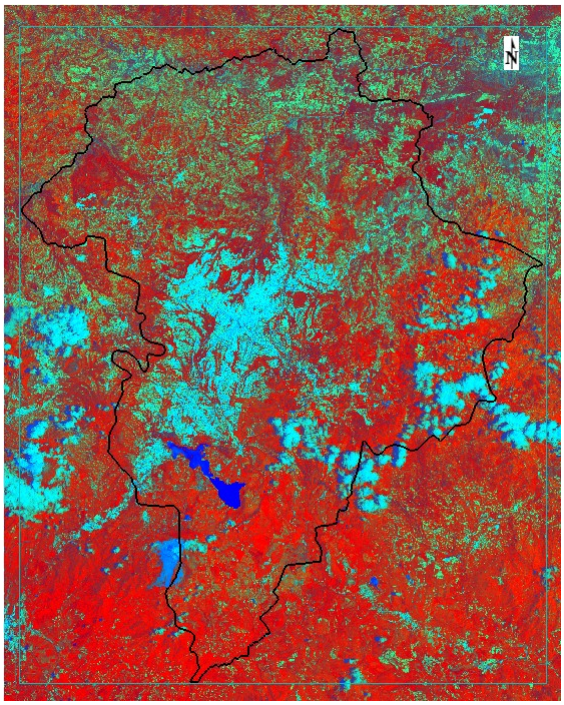


Figura 75: Combinación de bandas para el año 2019

Fuente:Propia.

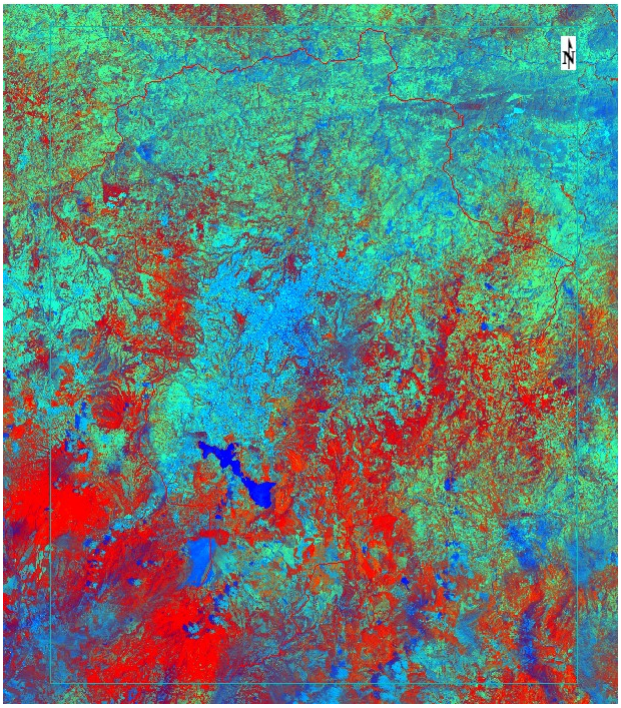


Figura 76: Combinación de bandas para el año 2017

Fuente:Propia.

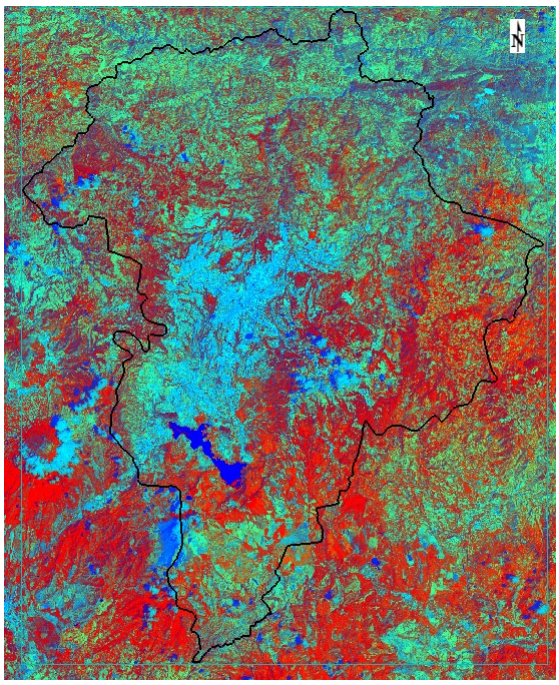


Figura 77: Combinación de bandas para el año 2016

Fuente:Propia.

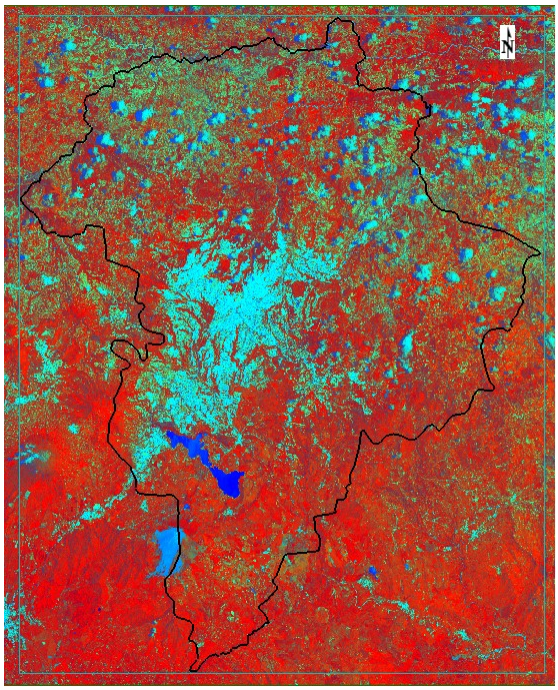


Figura 78: Combinación de bandas para el año 2015

Fuente:Propia.

11.1.4. Índices de ENVI

A continuación, se presenta los resultados obtenidos para los índices analizados con el objetivo de generar un mejor criterio sobre los cambios generados en el lapso analizado. Las imágenes ráster obtenidas de las distintas bandas espectrales nos permiten tener datos de entrada los cuales reflejan la presencia de pigmentos, agua y carbono.

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El índice se basa en la reflectancia de la vegetación debido a que esta se presenta alta en la banda 4 y baja en la banda 3. Por lo tanto, a mayor diferencia entre ambas bandas mayor será el porcentaje de cobertura vegetal. Al dividir el índice entre la suma de ambas reflectividades compensa tanto el efecto de mayor o menor luminosidad como el efecto de la atmósfera. El resultado es una imagen ráster que contiene valores desde -1 a 1 (siendo los valores más cercanos a 1 la vegetación más sana). Para comparar el índice en los años establecidos se generaron una serie de mapas temáticos y análisis estadísticos para delimitar el rango del NDVI que se posee.

Los resultados de NDVI se presentan como un mapa temático de colores generado por medio del software Qgis, donde cada color corresponde a un rango de valores, en este caso se utilizó una paleta de colores espectral done los tonos rojos y naranjas representan los valores negativos, es decir suelo sin vegetación o cuerpos de agua. Los tonos amarillos y verdes representan la vegetación enferma y medianamente sana y el color azul representa la vegetación sana.

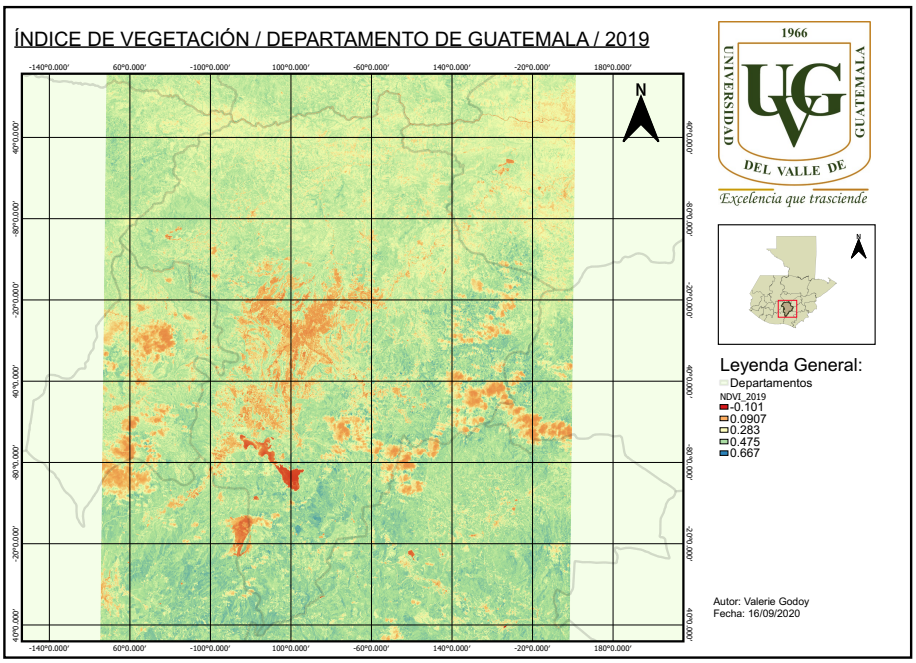
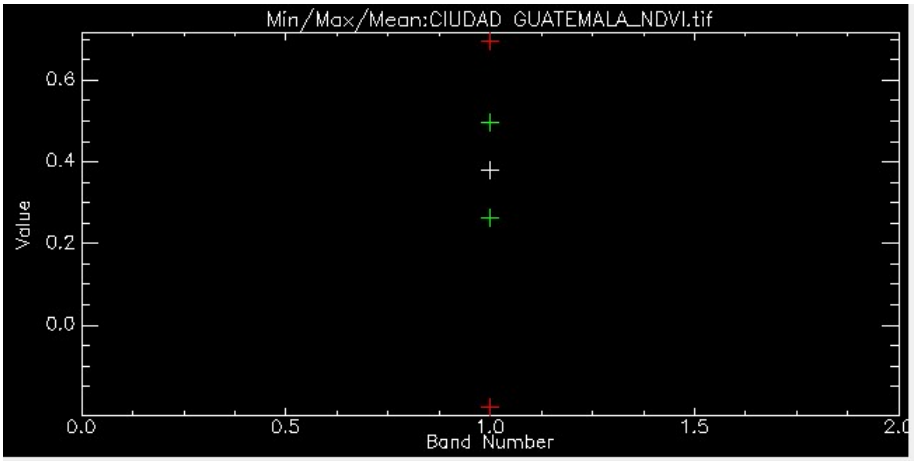


Figura 79: Mapa temático: Índice de vegetación (NDVI) para el año 2019
Fuente:Propia.

En la figura a continuación se muestra un ejemplo de las estadísticas principales del NDVI generadas por el software ENVI. Dichas estadísticas brindan los valores máximos, mínimos, media y de desviación estándar; además proporcionan información de los porcentajes de NDVI que posee cada valor de la imagen. Se realizará un análisis estadístico con los datos obtenidos donde se explica a detalle el resultado para los años establecidos.



Select Stat

Filename: G:\IMAGENES\2019\LC08_L1TP_020050_20190831_20190916_01_T1\INDICADORES\C
Dims: Full Scene (5,667,324 points)

Basic Stats	Min	Max	Mean	Stdev
Band 1	-0.199625	0.695585	0.380572	0.117654

Histogram	DN	Npts	Total	Percent	Acc Pct
Band 1	-0.199625	1	1	0.0000	0.0000
Bin=0.00351	-0.196115	0	1	0.0000	0.0000
	-0.192604	0	1	0.0000	0.0000
	-0.189093	1	2	0.0000	0.0000
	-0.185583	0	2	0.0000	0.0000
	-0.182072	0	2	0.0000	0.0000
	-0.178561	4	6	0.0001	0.0001
	-0.175051	2	8	0.0000	0.0001
	-0.171540	4	12	0.0001	0.0002
	-0.168030	5	17	0.0001	0.0003
	-0.164519	8	25	0.0001	0.0004
	-0.161008	8	33	0.0001	0.0006
	-0.157498	5	38	0.0001	0.0007
	-0.153987	9	47	0.0002	0.0008
	-0.150476	4	51	0.0001	0.0009
	-0.146966	4	55	0.0001	0.0010
	-0.143455	3	58	0.0001	0.0010
	-0.139945	2	60	0.0000	0.0011
	-0.136434	3	63	0.0001	0.0011
	-0.132923	3	66	0.0001	0.0012
	-0.129413	1	67	0.0000	0.0012
	-0.125902	3	70	0.0001	0.0012

Figura 80: Estadísticas obtenidas para el índice de vegetación (NDVI) para el año 2019 Fuente:Propia.

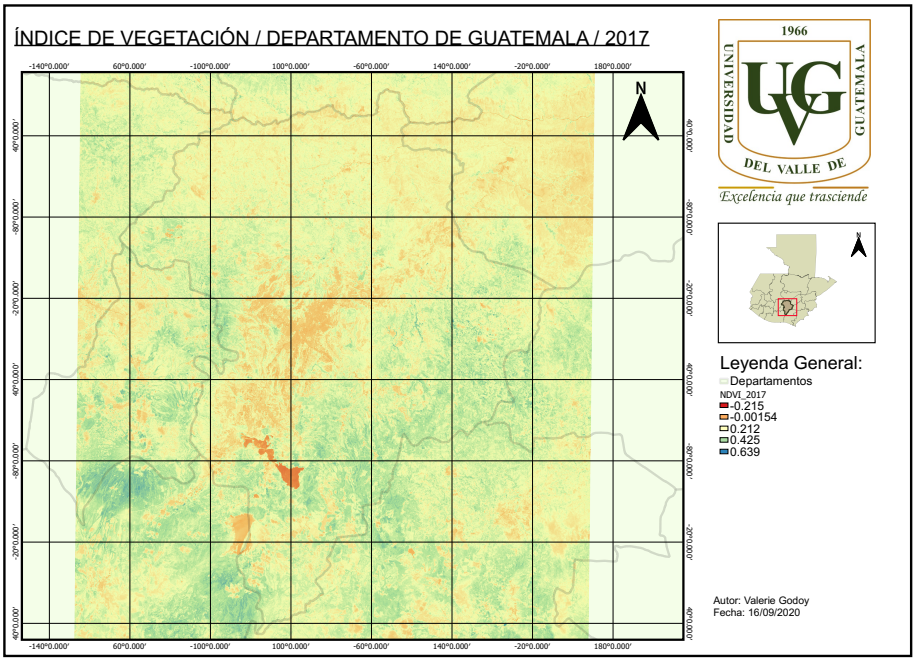


Figura 81: Mapa temático: Índice de vegetación (NDVI) para el año 2017 Fuente:Propia.

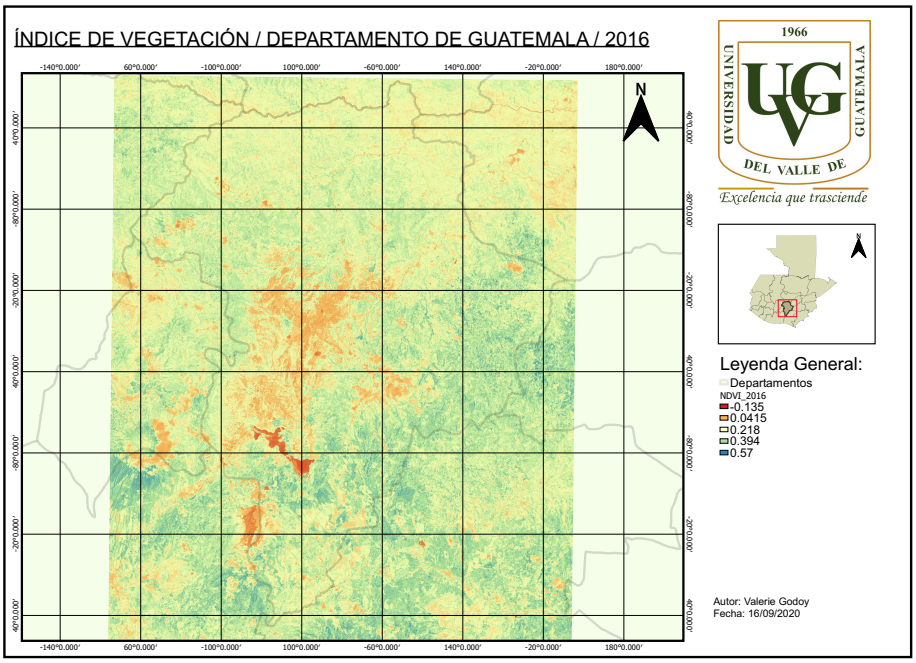


Figura 82: Mapa temático: Índice de vegetación (NDVI) para el año 2016 Fuente:Propia.

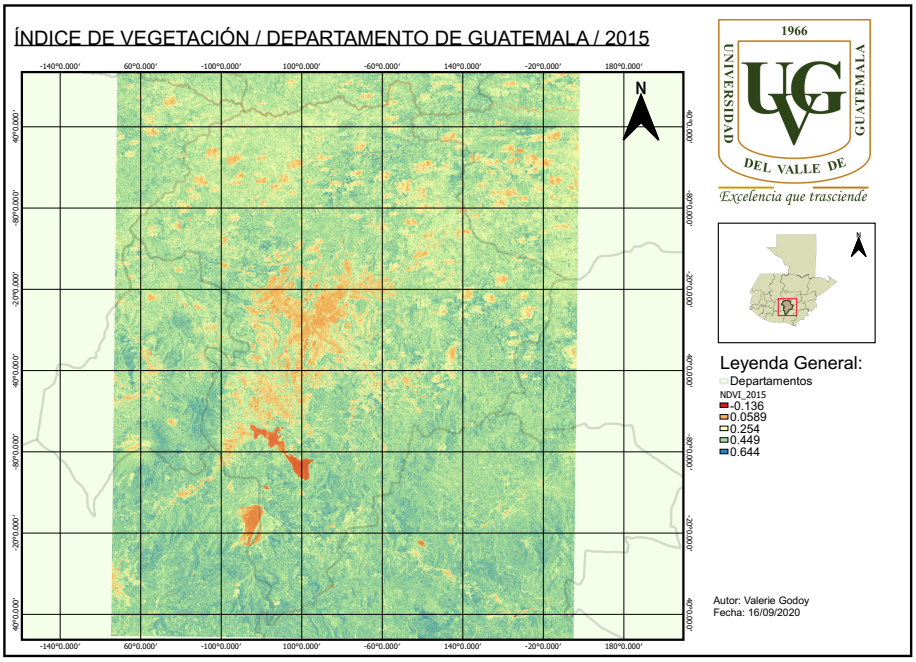


Figura 83: Mapa temático: Índice de vegetación (NDVI) para el año 2015
Fuente:Propia.

En la Cuadro 3 se especifica la clasificación asignada para los rangos de NDVI obtenidos en el análisis, con el objetivo de clasificar y tener un mejor criterio sobre el tipo de suelo que se presenta en el área de estudio.

Clasificación	Valor
Planta muerta u objeto inanimado	-1
Planta enferma	0-0.33
Planta mediantemente sana	0.33-0.66
Planta muy sana	0.66-1

Cuadro 4: Clasificación asignada para la vegetación según el rango de NDVI.
Fuente:Propia.

En el Cuadro 4 se presenta un resumen de los datos estadísticos obtenidos del análisis generado en el software ENVI para los años de estudio.

ESTADÍSTICA	NDVI 2019	NDVI 2017	NDVI 2016	NDVI 2015
MIN	-0.199	-0.214	-0.218	-0.226
MÁX	0.695	0.638	0.635	0.665
PROM	0.38	0.247	0.272	0.408
DESV.EST	0.117	0.092	0.098	0.112

Cuadro 5: Resumen de los resultados estadísticos obtenidos para cada año establecido
Fuente:Propia

Para Guatemala el NDVI promedio es de 0.37 a 0.45 (STAR,2020), por lo que se puede comprobar con el cuadro descrito anteriormente que solo los años 2019 y 2015 cumplen con dicho parámetro. Diversos factores pudieron afectar a los resultados de los años 2016 y 2017 como el crecimiento urbano y la escasez de áreas boscosas entre otras.

Con el fin de interpretar los datos obtenidos se determina que tres clasificaciones son las que se presentan en el análisis, por lo que se realizaron gráficos de barras para visualizar mejor los datos.

El gráfico a continuación representa la clasificación Planta muy sana donde el rango de NDVI se limita por valores 0.66-1. Del gráfico se puede interpretar que solo en los años 2015 y 2019 se presentó vegetación sana en el área de análisis debido a que en ambos años el NDVI sobrepasa el valor 0.66.

Se puede observar que el año 2019 el valor de NDVI es significativamente mayor que el resto de las muestras debido a que su valor máximo es de 0.693 por lo que podemos concluir que la mayor parte de la cobertura se forma por vegetación muy sana y medianamente sana.

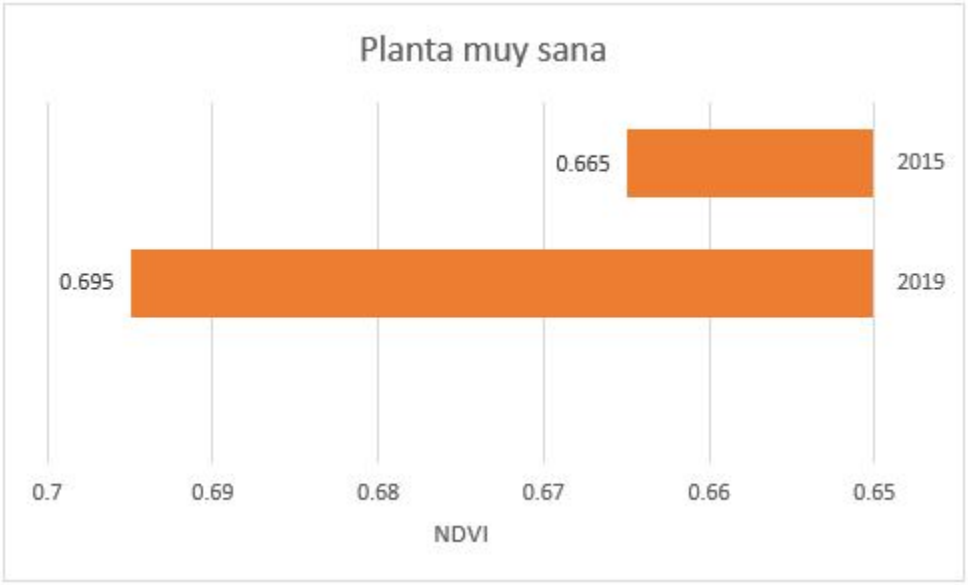


Figura 84: Planta muy sana para el índice de vegetación NDVI
Fuente:Propia.

El gráfico a continuación representa la clasificación Planta medianamente sana donde el rango de NDVI se limita por valores 0.33-0.66. Del gráfico se puede interpretar que solo en los años 2016 y 2017 se mostró vegetación medianamente sana en el área de análisis.

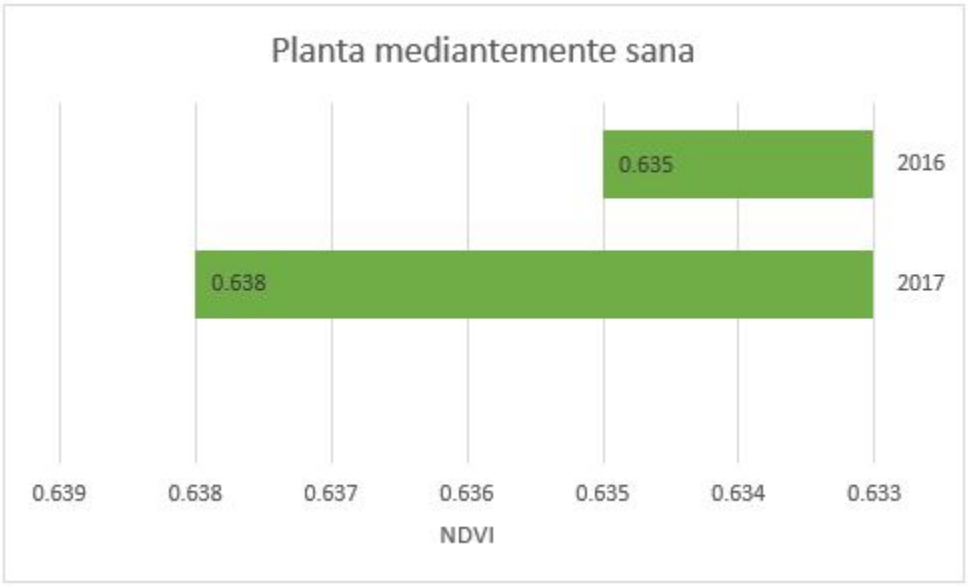


Figura 85: Planta medianamente sana para el índice de vegetación NDVI
Fuente:Propia.

Otro factor importante para tomar en cuenta es la diferencia drástica que se presenta en el año 2016 ya que el valor máximo de NDVI es de 0.635 lo que genera una diferencia de 0.057 comparado con el año 2019 lo que se puede corroborar en la imagen generada por la combinación de bandas donde se visualiza que la mayor parte de la cobertura de las áreas de suelo es desnudo y de cultivos.

El gráfico a continuación representa la clasificación Planta muerta u objeto inanimado (cuerpos de agua) donde el rango de NDVI se limita por valores -1-0. Al observar el gráfico se puede determinar que el NDVI del año 2017 presenta un rango mayor por lo que se puede determinar que la cobertura vegetal que se presentó en el área de análisis se conforma en su mayoría por cuerpos de agua, estructuras artificiales, rocas, planta muerta, suelo desierto y nubes lo cual concuerda con el gráfico descrito anteriormente debido a que el valor obtenido para el año 2019 es de -0.199 es decir la presencia de dicha clasificación es insignificante.

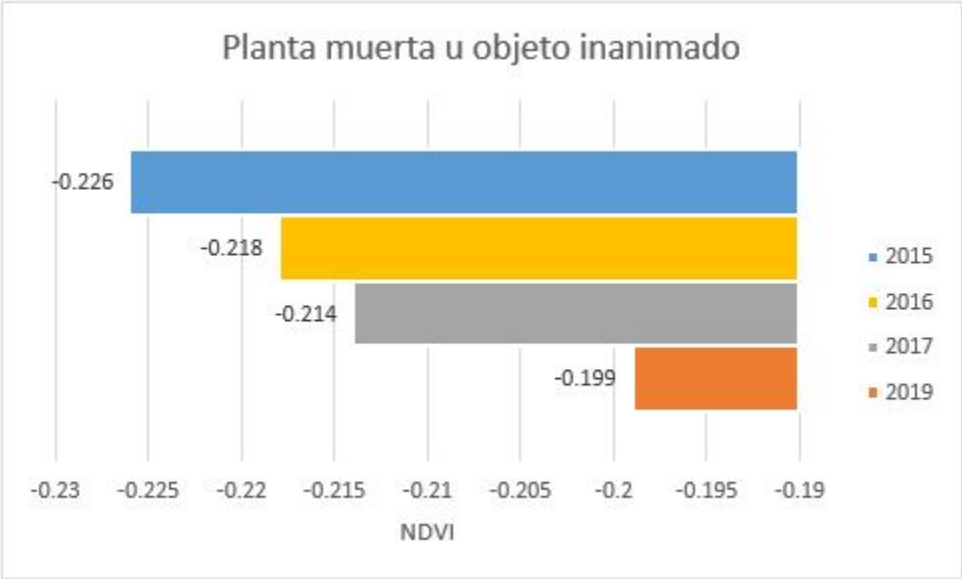


Figura 86: Planta muerta u objeto inanimado para el índice de vegetación NDVI
Fuente:Propia.

Índice de Agua normalizado (NDWI)

Por medio de la obtención del índice NDWI se puede determinar masas de agua y zonas elevadas de saturación de humedad. Se estable como unidad de medida para establecer el estrés hídrico en vegetación, saturación de humedad en el suelo o especificar directamente masas de agua como lagos y embalses. Al igual que en las especificaciones del índice de vegetación (NDVI) previamente establecidas, los valores obtenidos presentan un rango entre -1 (siendo los valores negativos la representación de áreas sin vegetación o cultivos) y 1 los cuales son utilizados para describir superficies de agua y vegetación con contenido de agua o áreas con poca presencia de humedad.

Para comparar el índice en los años establecidos se generaron una serie de mapas temáticos por medio del software Qgis y análisis estadísticos para delimitar el rango del NDWI que se posee. Los resultados se presentan como un mapa temático de colores, donde cada color corresponde a un rango de valores, en este caso se utilizó una paleta de colores Rojo-Azul done los tonos rojizos representan los valores negativos, es decir suelo sin vegetación. Los tonos blancos y azules representan el contenido de agua en la superficie.

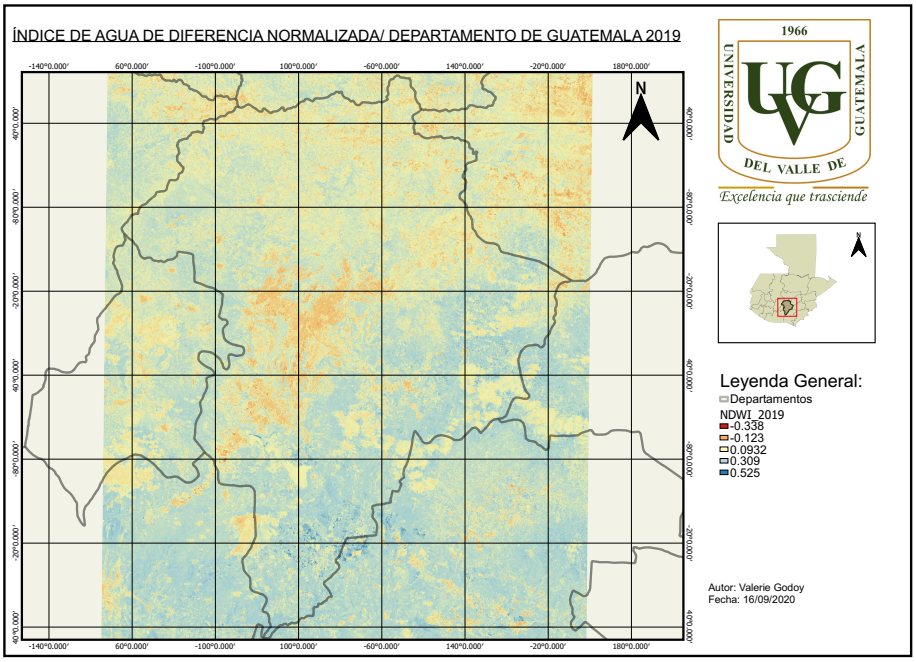
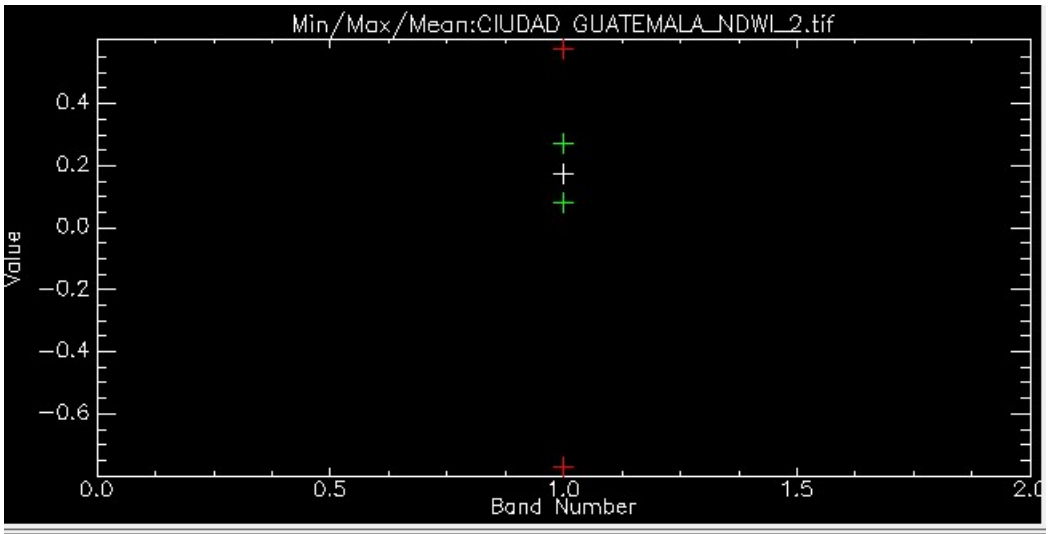


Figura 87: Mapa temático: Índice de agua normalizada (NDWI) para el año 2019 Fuente:Propia.

En las figura a continuación se muestran un ejemplo de las estadísticas principales del NDWI generadas por el software ENVI, dichas estadísticas brindan los valores máximos, mínimos, media y de desviación estándar. Se realizará un análisis estadístico con los datos obtenidos donde se explica a detalle los resultados obtenidos para los años establecidos.



Select Stat

Filename: G:\IMAGENES\2019\LC08_L1TP_020050_20190831_20190916_01_T1\INDICADORES\C
Dims: Full Scene (5,667,324 points)

Basic Stats	Min	Max	Mean	Stdev
Band 1	−0.769569	0.575773	0.175638	0.096315

Histogram	DN	Npts	Total	Percent	Acc Pct
Band 1	−0.769569	1	1	0.0000	0.0000
Bin=0.00527	−0.764293	0	1	0.0000	0.0000
	−0.759018	0	1	0.0000	0.0000
	−0.753742	1	2	0.0000	0.0000
	−0.748466	0	2	0.0000	0.0000
	−0.743190	0	2	0.0000	0.0000
	−0.737914	1	3	0.0000	0.0001
	−0.732638	0	3	0.0000	0.0001
	−0.727363	0	3	0.0000	0.0001
	−0.722087	0	3	0.0000	0.0001
	−0.716811	0	3	0.0000	0.0001
	−0.711535	0	3	0.0000	0.0001
	−0.706259	0	3	0.0000	0.0001
	−0.700983	0	3	0.0000	0.0001
	−0.695707	0	3	0.0000	0.0001
	−0.690432	0	3	0.0000	0.0001
	−0.685156	0	3	0.0000	0.0001
	−0.679880	0	3	0.0000	0.0001
	−0.674604	0	3	0.0000	0.0001
	−0.669328	0	3	0.0000	0.0001
	−0.664052	0	3	0.0000	0.0001
	−0.658776	0	3	0.0000	0.0001

Figura 88: Estadísticas obtenidas para el índice de agua normalizada (NDWI) para el año 2019 Fuente:Propia.

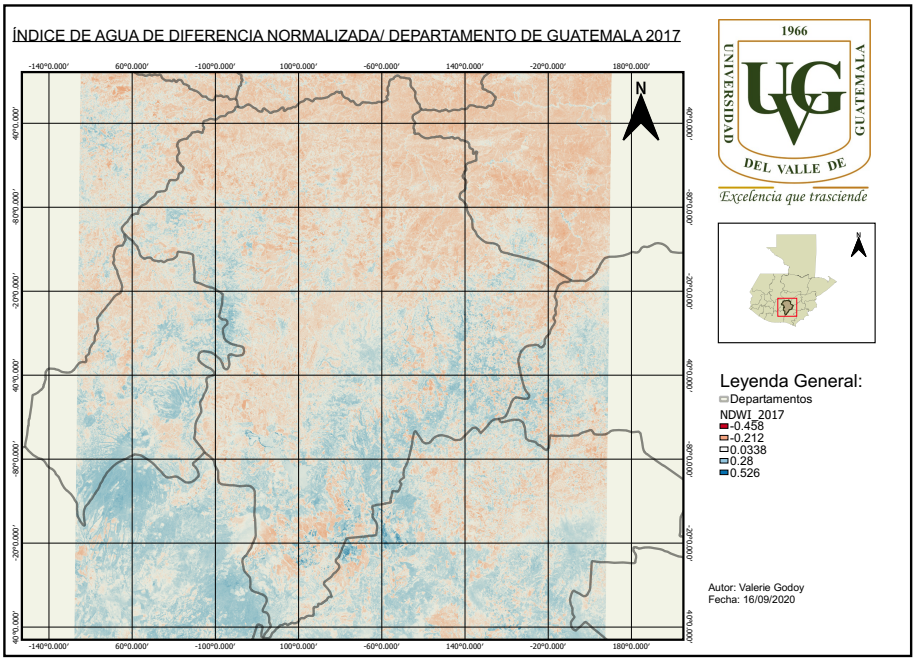


Figura 89: Mapa temático: Índice de agua normalizada (NDWI) para el año 2017 Fuente:Propia.

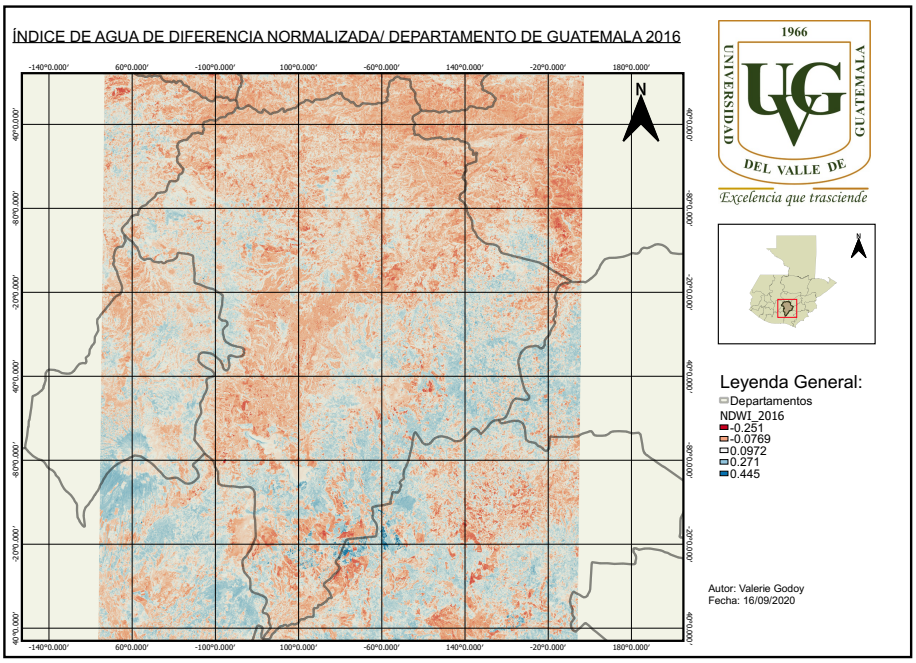


Figura 90: Mapa temático: Índice de agua normalizada (NDWI) para el año 2016 Fuente:Propia.

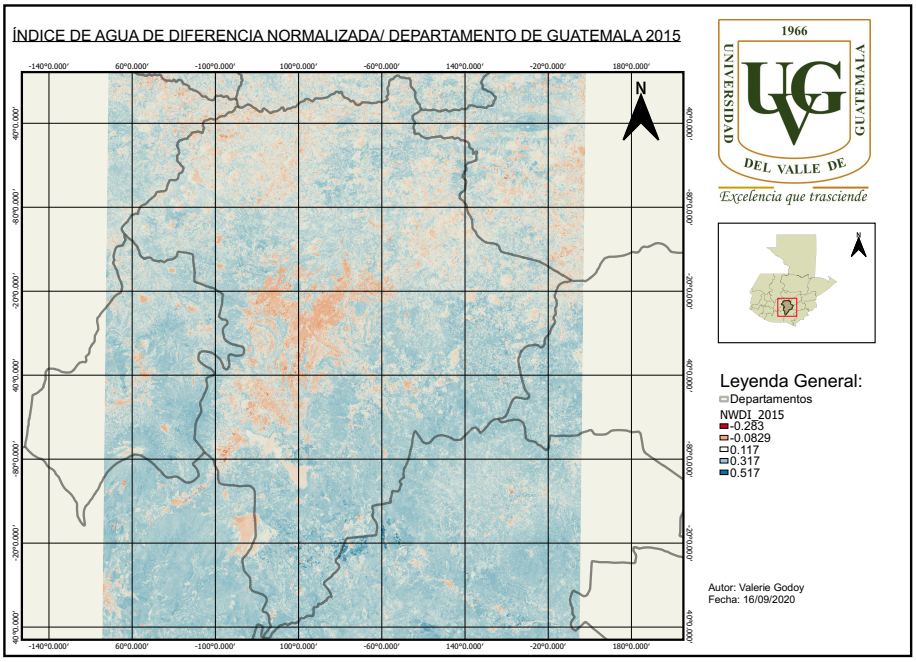


Figura 91: Mapa temático: Índice de agua normalizada (NDWI) para el año 2015
Fuente:Propia.

El análisis del índice diferencial de agua normalizada (NDWI) permite identificar las áreas afectadas por sequías ya que al no ser identificadas dichas superficies cultivos enteros pueden resultar dañados. La detección temprana del estrés hídrico permite prevenir impactos negativos en los cultivos. Como se estableció anteriormente los valores obtenidos en color azul corresponden a un alto contenido de agua en la planta y al recubrimiento de una gran parte de la planta. Los valores rojos representan bajo contenido de vegetación y una cobertura escasa. Durante los periodos de estés hídrico el valor de NDWI tiende a disminuir.

Como podemos observar en los mapas temáticos en el año 2016 se obtuvo un impacto significativo debido a que la mayoría del área presenta valores negativos (tonos rojos) de NDWI lo que determina que la vegetación presenta estrés hídrico o poca agua en el ambiente. Sin embargo, el año 2019 en su mayoría presenta tonos azules lo que significa que el valor de NDWI es cercano a 1 con lo cual se puede concluir según la clasificación del Cuadro 4 que la zona presenta hidratación creciente.

En el Cuadro 5 se especifica la clasificación asignada para los rangos de NDWI obtenidos en el análisis, con el objetivo de clasificar y tener un mejor criterio sobre la hidratación de la vegetación que se presenta en el área de estudio.

Clasificación	Valor
Superficies sin vegetación o agua	-1
Zonas con baja cobertura vegetal o alto estrés hídrico	0
Zonas con cobertura e hidratación creciente	0-1

Cuadro 6: Clasificación asignada para la hidratación de la vegetación según el rango de NDWI. Fuente:Propia.

En el Cuadro 6 se presenta un resumen de los datos estadísticos obtenidos del análisis generado en el software ENVI para los años de estudio.

ESTADÍSTICA	NDWI 2019	NDWI 2017	NDWI 2016	NDWI 2015
MIN	-0.769	-0.756	-0.625	-0.668
MÁX	0.575	0.559	0.527	0.551
PROM	0.175	0.038	0.061	0.199
DESV.EST	0.0963	0.1039	0.099	0.088

Cuadro 7: Resumen de los resultados estadísticos obtenidos para cada año establecido Fuente:Propia.

Se puede observar que el año 2019 el valor de NDWI es significativamente mayor que el resto de las muestras debido a que su valor máximo es de 0.575 por lo que podemos concluir que la mayor parte de la cobertura se forma por vegetación. El gráfico a continuación representa la clasificación de Superficies sin vegetación o agua donde el rango de NDWI se limita por valores -1-0. Del gráfico se puede interpretar que solo en los años 2016 presento poca presencia de vegetación, dicho evento pudo ocurrir por diversos factores como el incremento urbano, sequías y temperaturas altas.

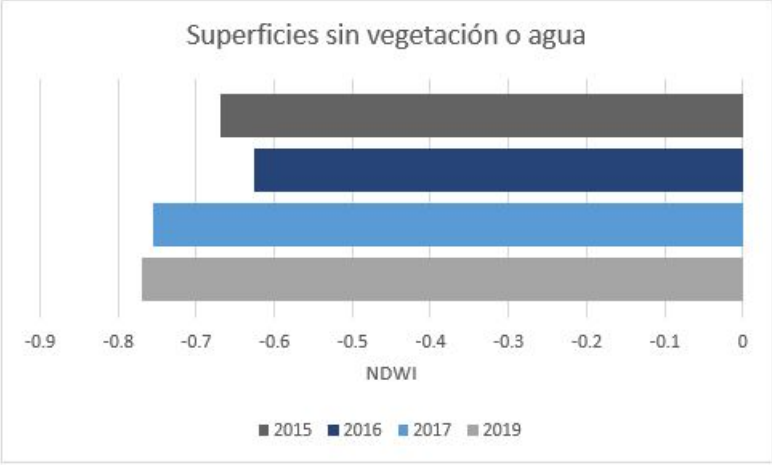


Figura 92: Superficies sin vegetación o agua para el índice de agua normalizada NDWI Fuente:Propia.

El gráfico a continuación representa la clasificación Zonas con cobertura e hidratación creciente donde el rango de NDWI se limita por valores 0-1. Al observar el gráfico se puede determinar que el NDWI del año 2019 presenta un rango mayor por lo que se puede determinar que la cobertura vegetal presente la cantidad de hidratación requerida para evitar daños en los cultivos o superficie. Por consiguiente, se observa que el año 2016 presenta el valor más pequeño el cual es de 0.527 lo que afirma la discusión previa.

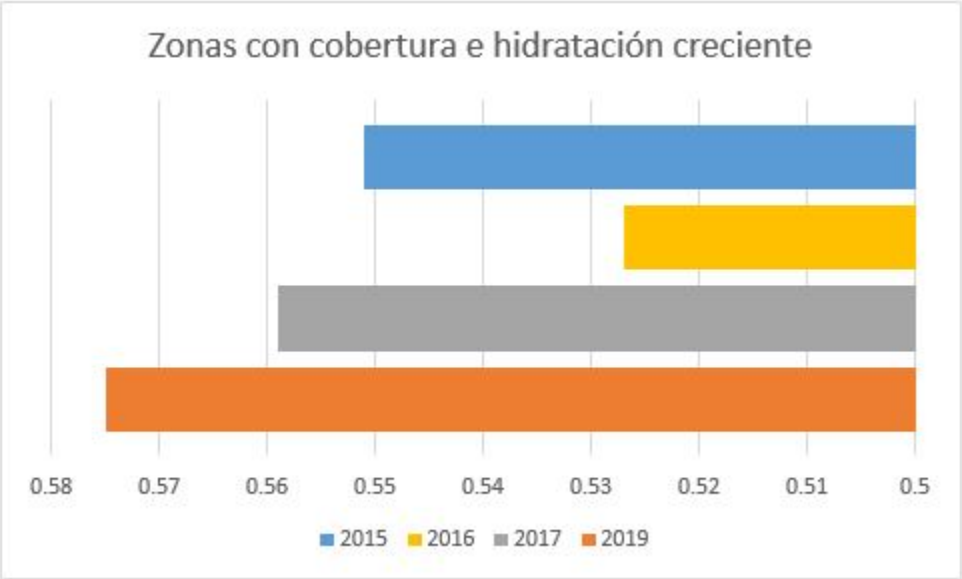


Figura 93: Zonas con cobertura e hidratación creciente para el índice de agua normalizada NDWI Fuente:Propia.

11.1.5. Clasificación no supervisada

La técnica de clasificación por medio de imágenes satelitales permite identificar el patrón visual asociado a cada cubierta, según una serie de criterios como el tono, textura, forma, contexto y disposición entre otras. Existen dos tipos de clasificación de cobertura de un área específica las cuales son: Clasificación supervisada y no supervisada. Para este trabajo de graduación se determinó que el mejor método para generar la clasificación es el no supervisado debido a que no se requiere de ir a medir y realizar observaciones en campo. Se emplearon diversas herramientas como Google EartPro y el Atlas temático generado por el (MAGA, 2005) para ampliar el conocimiento de la zona y así identificar la clasificación de los diversos tipos de coberturas presentes.

La clasificación consiste en seleccionar una muestra de pixeles homogéneos de la imagen que represente adecuadamente cada categoría de interés y así reducir lo preciso de las medidas en campo. Con los pixeles se puede calcular la variabilidad numérica de cada categoría en todas las bandas que intervienen en cada clasificación.

Para la clasificación no supervisada existen dos tipos de metodología las cuales son: Método Isodata y Método de K-Medias se trabajó con ambos la primera imagen analizada, debido al análisis de los resultados se identificó que se emplearía únicamente el método de

Isodata debido a que se genera una mayor cantidad de clasificaciones y por consiguiente la asignación de pixeles es más amplia lo que nos da la posibilidad de obtener resultados más certeros y congruentes para cada clasificación.

Método de Isodata

Por medio del Software ENVI y la opción de Classification Workflow se dispone a generar 30 clasificaciones de pixeles de las cuales se genera una imagen ráster como se puede observar en la figura a continuación donde cada clasificación se identifica con un color distinto. A la imagen obtenida se le aplica un filtro de suavización para eliminar todos aquellos pixeles que queden fuera de una clasificación o que sean insignificantes para el propósito del análisis.

Como segundo paso se empieza a identificar cada clasificación generada por separado para determinar a la clase que pertenece y con cada una de ellas se procede a generar una tabla con la información que describe cada clase; como se puede observar en el cuadro a continuación.

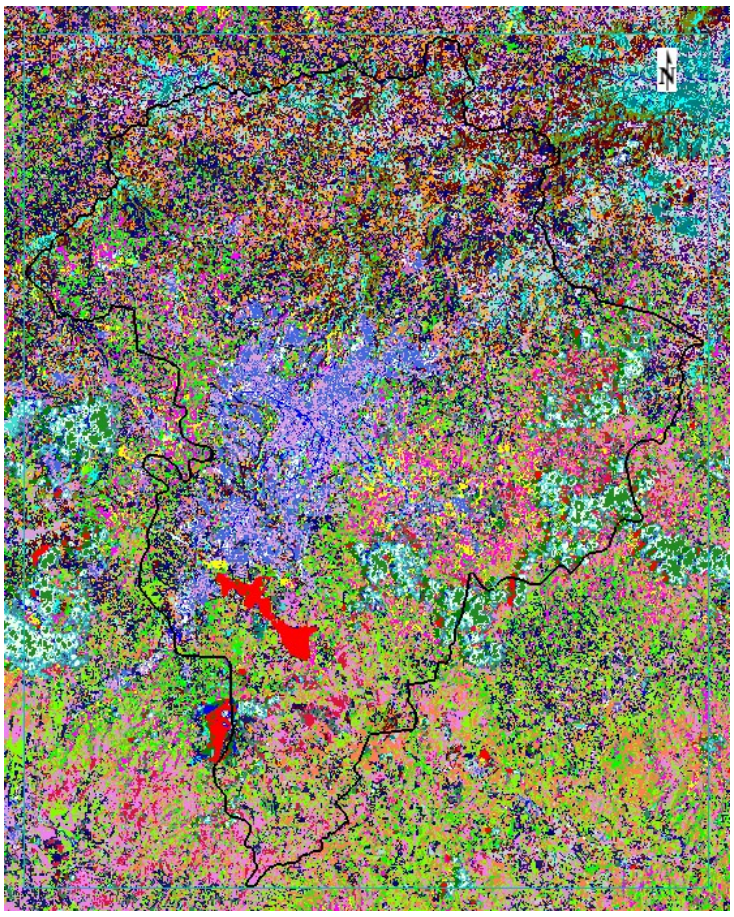


Figura 94: Cobertura asignada con la clasificación original

Fuente:Propia

Clasificación inicial

Clase original	Cobertura asignada
0	0
1	Sombras, lago
2	Sombras
3	Sombras
4	Bosque
5	Pasto
6	Bosque
7	Bosque
8	Bosque
9	Bosque
10	Bosque
11	Pasto
12	Bosque
13	Bosque
14	Bosque
15	Pasto, cultivos
16	Pasto, cultivos
17	Bosque
18	Bosque
19	Bosque
20	Bosque
21	Bosque
22	Urbanización
23	Bosque
24	Urbanización
25	Nubes, sombras
26	Urbanización
27	Urbanización
28	Nubes
29	Nubes
30	Nubes

Cuadro 8: Cobertura asignada para cada clasificación generada en ENVI
Fuente:Propia.

Como se puede observar en el cuadro descrito anteriormente, se puede reclasificar debido a que a la mayoría de las categorías presentadas en el área son repetitivas. Por lo tanto, la nueva clasificación pasa de 30 a 4 clasificaciones con el objetivo de tener resultados más homogéneos y facilitar el manejo de datos.

Identificador	Cobertura
1	Urbana
2	Bosque
3	Pastos
4	Nubes

Cuadro 9: Identificador para la cobertura asignada
Fuente:Propia.

Como tercer paso se genera una combinación de clases proveniente del proceso de clasificación con 4 clases. Se utiliza la opción Post Classification en el software ENVI done a las 30 clasificaciones previamente generadas en el Cuadro 6 se le asigna un nuevo identificador de cobertura según la clasificación asignada como se puede observar en el siguiente Cuadro.

Clase original	Cobertura asignada
0	0
1	4
2	4
3	4
4	2
5	3
6	2
7	2
8	2
9	2
10	2
11	3
12	2
13	2
14	2
15	3
16	3
17	2
18	2
19	2
20	2
21	2
22	1
23	2
24	1
25	4
26	1
27	1
28	4
29	4
30	4

Cuadro 10: Reclasificación de los distintos tipos de cobertura presentes en el área
Fuente:Propia.

11.1.6. Reclasificación

Como resultado de la combinación de clases se obtiene una reclasificación donde se aprecia de una manera más unificada las áreas de cada cobertura que se presentan. Para comparar cada clasificación presente se generaron una serie de mapas temáticos y análisis estadísticos. Los resultados se presentan como un mapa temático de colores, donde cada color corresponde a un rango de valores, en este caso se utilizó el color rosado para las áreas urbanas, el color verde para áreas de bosque, el color celeste para pasto o cultivos y el color amarillo para nubes. En este caso se requirió una categoría para nubes debido a que depende de que calidad y que tan limpia este la imagen que se utilizara para el análisis.

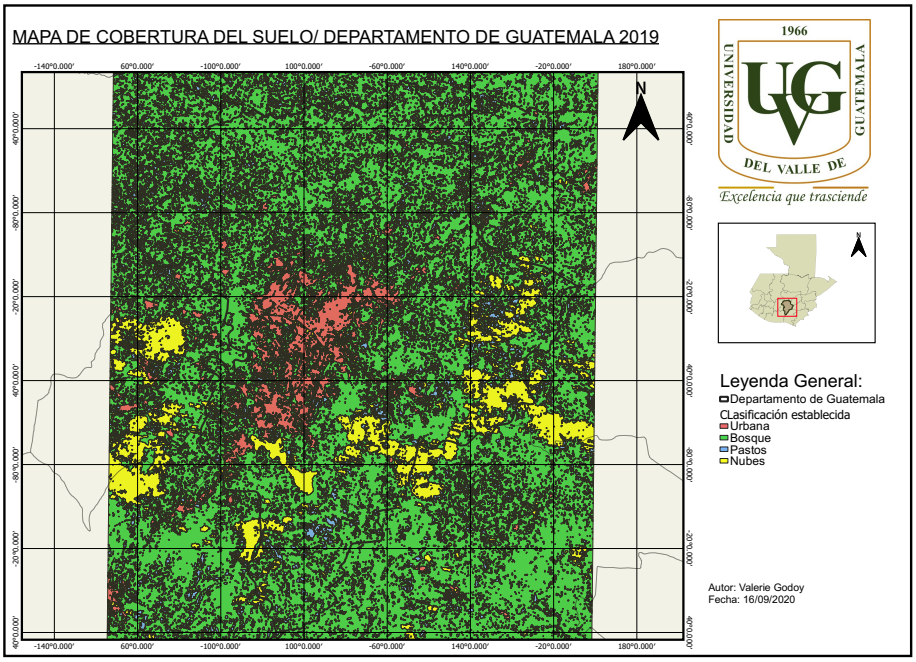
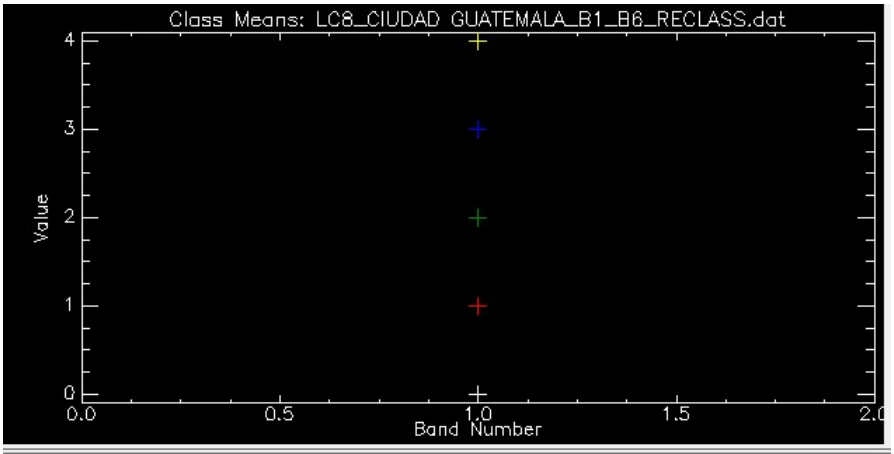


Figura 95: Mapa de cobertura de suelo para el Departamento de Guatemala en el año 2019 Fuente:Propia.

En la figura a continuación se muestran un ejemplo de las estadísticas principales de la clasificación de coberturas generadas por el software ENVI, dichas estadísticas brindan los valores promedios por cada clasificación y el área en metros cuadrados. Se realizó un análisis estadístico con los datos obtenidos donde se explica a detalle el resultado para los años establecidos.



Select Stat

```
Filename: G:\IMAGENES\2019\LC08_L1TP_020050_20190831_20190916_01_T1\CLASIFICACI
Dims: Full Scene (5,667,324 points)

Class Distribution Summary
Unclassified: 0 points (0.000%) (0.0000 Meters²)
Class 1: 363,316 points (6.411%) (326,984,400.0000 Meters²)
Class 2: 4,057,197 points (71.589%) (3,651,477,300.0000 Meters²)
Class 3: 807,182 points (14.243%) (726,463,800.0000 Meters²)
Class 4: 439,629 points (7.757%) (395,666,100.0000 Meters²)

Stats for Class: Unclassified
Basic Stats    Min    Max      Mean     Stdev
     Band 1      0      0  0.000000  0.000000

Histogram       DN     Npts    Total   Percent   Acc Pct
Band 1           0        0        0      -NaN      -NaN
                 1        0        0      -NaN      -NaN
                 2        0        0      -NaN      -NaN
                 3        0        0      -NaN      -NaN
                 4        0        0      -NaN      -NaN
                 5        0        0      -NaN      -NaN
                 6        0        0      -NaN      -NaN
                 7        0        0      -NaN      -NaN
                 8        0        0      -NaN      -NaN
                 9        0        0      -NaN      -NaN
                10        0        0      -NaN      -NaN
                11        0        0      -NaN      -NaN
```

Figura 96: Estadísticas obtenidas para la cobertura de suelo para el Departamento de Guatemala para el año 2019
Fuente:Propia.

Se realiza el mismo procedimiento de clasificación y reclasificación para los años 2017, 2016 y 2015 como se describió en los pasos anteriores. A continuación, se presentan los mapas temáticos y estadísticas obtenidas para cada uno de los años.

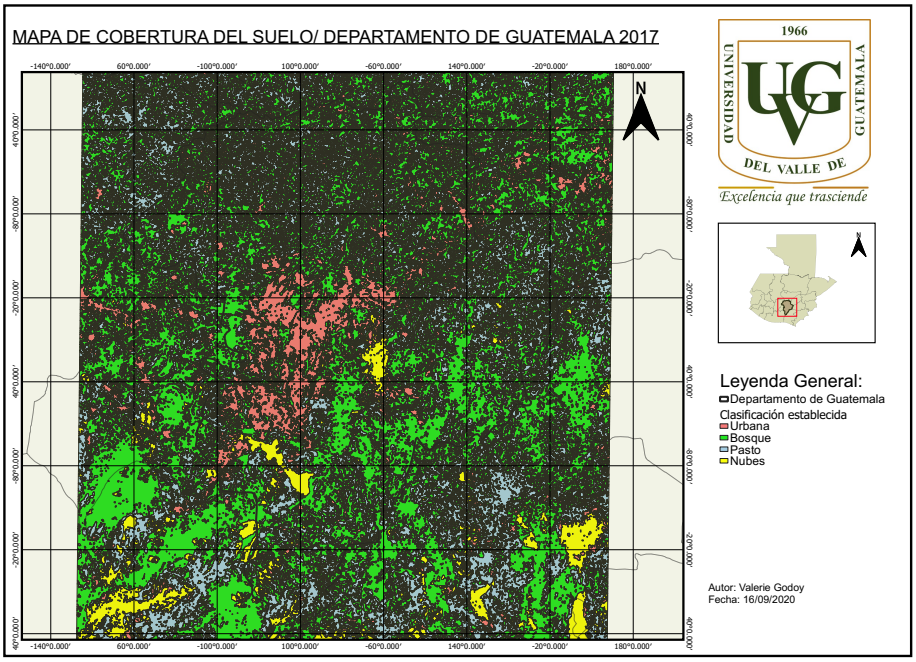


Figura 97: Mapa de cobertura de suelo para el Departamento de Guatemala en el año 2017 Fuente:Propia.

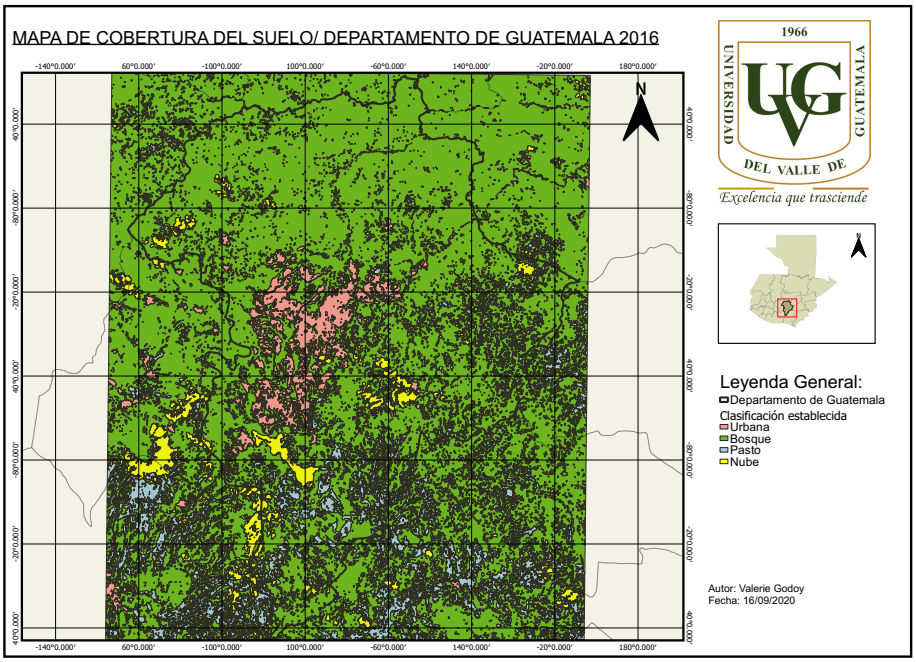


Figura 98: Mapa de cobertura de suelo para el Departamento de Guatemala en el año 2016 Fuente:Propia.

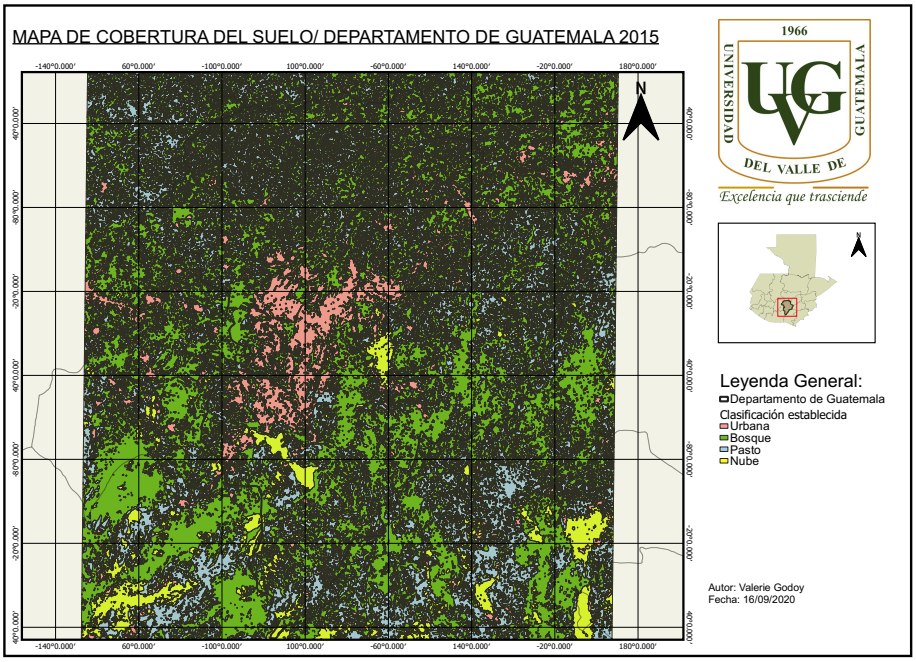


Figura 99: Mapa de cobertura de suelo para el Departamento de Guatemala en el año 2015 Fuente:Propia.

11.1.7. Uso del suelo en el Departamento de Guatemala

El Cuadro 10 muestra la distribución porcentual de las distintas categorías de uso del suelo obtenidas por el análisis generado en el software ENVI para el departamento de Guatemala.

Las principales categorías de uso de suelo que cubren al Departamento de Guatemala son la cobertura boscosa, asentamientos humanos o Urbanización y Pastos o suelo agrícola cuyas áreas ocupan alrededor del 70 %, 6 % y 15 % respectivamente del área total del departamento de Guatemala.

Considerando el área de las categorías de uso del suelo referida al total del Departamento de Guatemala (212,600 ha), la cobertura boscosa del año 2015 a 2016 aumento un 7.6 %, la urbanización disminuyo el 1.18 % y los pastos disminuyeron un 3.02 %. Es necesario recalcar que del año 2016 al 2017 la categoría de pasto incremento un 17.74 % por lo cual la cobertura boscosa sufre una disminución del 26.5 %.

Categoría de uso	Área (%)				Área (ha)			
	2015	2016	2017	2019	2015	2016	2017	2019
Urbanización	6.767	5.587	12.218	6.411	33,132.6	27,258.39	68,674.59	32,698.44
Bosque	69.416	76.971	50.525	71.589	339,859.35	375,506.1	283,997.25	365,147.73
Pastos y cultivos	17.05	13.848	31.583	14.243	83,478.69	67,557.15	177,523.65	72,646.38
Nubes	6.766	3.594	5.675	7.757	33,127.2	17,531.46	31,895.91	39,566.61
TOTAL	100	100	100	100	489,597.84	487,853.1	562,091.4	510,059.16

Cuadro 11: Categoría de uso del suelo para el Departamento de Guatemala
Fuente:Propia.

El gráfico que se observa a continuación, representa la tendencia del comportamiento del área para cada categoría de uso de suelo establecida dentro del análisis. Para la categoría de urbanización se tomó en cuenta zonas industriales y edificaciones ente otras. Se puede observar que él área de urbanización del año 2017 tiene un impacto negativo en el área boscosa, dicho evento puede suceder por diversos factores como por el crecimiento poblacional descontrolado o por exceso de deforestación.

Es importante destacar que la categoría de bosque presenta una tendencia creciente y las categorías de pastos o cultivos y urbanización presentan un comportamiento decreciente, por lo que se puede determinar que la relación entre estas últimas dos categorías es inversamente proporcional a la categoría de bosque, esto indica que mientras más bosque o áreas verdes menos urbanización se presentará y al existir mayor área urbanizada menos área boscosa existirá en la zona.

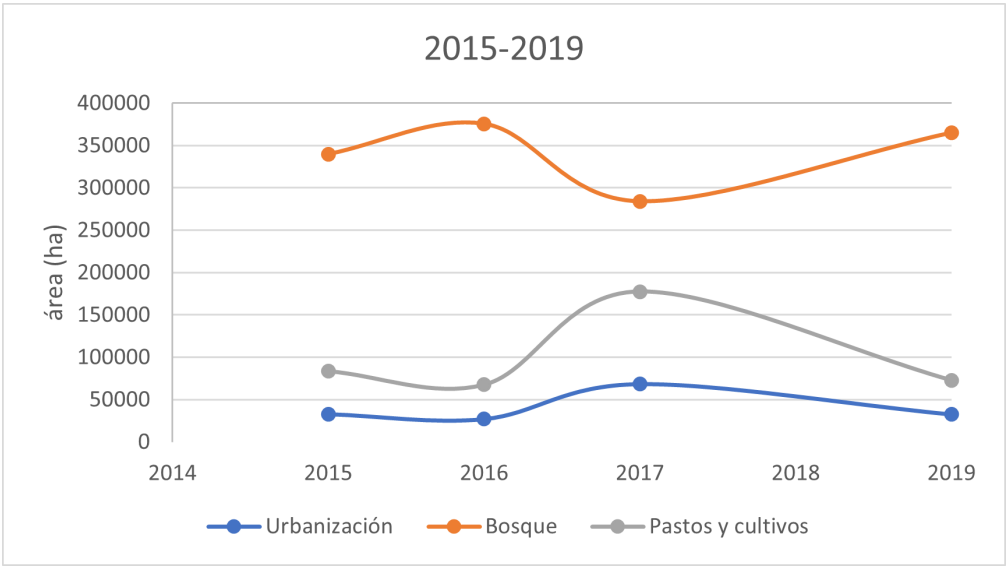


Figura 100: Comportamiento del cambios del uso del suelo en el Departamento de Guatemala
Fuente:Propia.

11.1.8. Cambios del uso de suelo en las cuencas del Departament de Guatemala

En los Cuadros 11 al 14 se presenta el área en hectáreas por categoría de uso de suelo para las cuatro cuentas analizadas en los diversos periodos establecidos. La categoría de nubes no fue despreciable debido a que los pixeles que la conforman tienen un impacto en los datos atípicos obtenidos para cada clasificación.

Cuenca Río María Linda

Al analizar los porcentajes obtenidos de diferencia entre las categorías de los años 2015 y 2019 podríamos destacar que el bosque incremento un 16 % con respecto al área de la cuenca (63,343 ha) y la urbanización y pastos disminuyeron un 6 % y 13 %. Se puede observar que se generó una brecha significativa entre los años 2017 y 2019 dicho suceso se puede deber a la presencia de nubes en la imagen o por el error humano a la hora de clasificar los pixeles.

Categoría de uso	**Área (ha)**				**%**
	2015	2016	2017	2019	**2015-2019**
Urbanización	15,364.80	10,734.70	15,333.80	11,028.40	-6
Bosque	31,813.20	44,585	31,813.2	42,568.8	16
Pastos y cultivos	18,346.20	9,984.36	18,207.90	9,473.56	-13
Nubes	3,868.00	4,087.65	4,037.10	6,321.36	4
TOTAL	69,392.20	69,391.71	69,392.00	69,392.12	

Cuadro 12: Categoría de uso del suelo para la cuenca María Linda
Fuente:Propia.

Cuenca Río Los Esclavos

Al analizar los porcentajes obtenidos de diferencia entre las categorías de los años 2015 y 2019 para la cuenca Los Esclavos podríamos destacar que el bosque disminuyo un 23 % con respecto al área de la cuenca (13,177 ha), la urbanización y pastos un 6 % y 13 %. Se puede observar que se generó una brecha significativa entre los años 2017 y 2019 dicho suceso se puede deber a la presencia de nubes en la imagen ya que dicha categoría tiene un incremento del 37 % es decir la imagen satelital del 2019 tiene una mayor zona no clasificada correctamente para esta cuenca.

Categoría de uso	**Área (ha)**				**%**
	2015	2016	2017	2019	**2015-2019**
Urbanización	640.595	454.95	344.58	413.00	-2
Bosque	9,234.35	10,493	10,493	6,258	-23
Pastos y cultivos	3,175.68	2,023.83	1,772.83	1,496.00	-13
Nubes	200	1516.86	566.464	5,083.00	37
TOTAL	13250.625	14,488.64	13,176.88	13,250.00	

Cuadro 13: Categoría de uso del suelo para la cuenca Los Esclavos
Fuente:Propia.

Cuenca Río Motagua

Al analizar los porcentajes obtenidos de diferencia entre las categorías de los años 2015 y 2019 podríamos destacar que el bosque disminuye un 11 % con respecto al área de la cuenca (140,557 ha) y la urbanización y pastos aumentaron un 2 % y 10 %. Se puede observar que el porcentaje de presencia de nubes sobre la cuenca es del 2 % por lo que da más confianza a los resultados obtenidos para cada clasificación.

Categoría de uso	**Área (ha)**				**%**
	2015	2016	2017	2019	**2015-2019**
Urbanización	11,180	11,181.2	11,181.20	13,354.20	2
Bosque	117,477	117,477	117,477	98,319	-14
Pastos y cultivos	8,244	8,182.65	8,182.65	22,209.80	10
Nubes	3,740	3,718.46	3,718.46	6,677.76	2
TOTAL	140,641.00	140,559.31	140,559.31	140,560.56	

Cuadro 14: Categoría de uso del suelo para la cuenca Motagua
Fuente:Propia.

Cuenca Río Achiguate

Al analizar los porcentajes obtenidos de diferencia entre las categorías de los años 2015 y 2019 podríamos destacar que el bosque disminuyo un 17 % con respecto al área de la cuenca (75.038 ha), la urbanización un 3 % y los pastos aumentaron un 17 %. Se puede observar que el porcentaje de presencia de nubes sobre la cuenca es del 2 % por lo que da más confianza a los resultados obtenidos para cada clasificación.

Categoría de uso	**Área (ha)**				**%**
	2015	2016	2017	2019	**2015-2019**
Urbanización	9.09	9.09	8.239	6.764	-3
Bosque	66.113	66.113	66.113	53.579	-17
Pastos y cultivos	0.687	0.687	0.687	13.428	17
Nubes	0.0	0.0	0.0	1.269	2
TOTAL	75.89	75.89	75.039	75.04	

Cuadro 15: Uso de suelo en las cuencas que componen al Departamento de Guatemala
Fuente:Propia.

11.1.9. Densidad y aumento poblacional en el Departamento de Guatemala

El cuadro a continuación muestra el aumento y la densidad poblacional en los municipios del departamento de Guatemala. Los datos censados del año 2018 se tomaron del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2020). Se calculó la población para el año 2000 y 2020 con una tasa de crecimiento de 2.4 y 1.5. Actualmente no se cuenta con información disponible y actualizada sobre la población de Guatemala, por lo que para los cálculos descritos a continuación se basan en estimaciones y proyecciones.

Con estos datos se comparó proporcionalmente la distribución de la población de las cuencas establecidas para el análisis. Para el 2020 la cuenca con mayor densidad poblacional se presenta en el Río Motagua con una densidad promedio de 174,712 Hab/km2 (Cuadro 13); seguido por la cuenca del Río María Linda con 96,447 Hab/km2 (Cuadro 11); la cuenca el Río Los Esclavos con 21,332 Hab/km2 (Cuadro 12) y la cuenca del Río Achiguate presento una densidad de 15,148 Hab/km2 (Cuadro 14).

Para el Río Motagua la diferencia entre la densidad poblacional para el 2020 con respecto a la del 2000 es de 712,693 habitantes; mientras que para la cuenca del Río María Linda es de 806,178 habitantes; para la cuenca del Río Achiguate es de 163, 819 habitantes y para la cuenca del Río Los Esclavos es de 82,847 habitantes.

Según el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de la Municipalidad de Guatemala Para el 2000, el área metropolitana de Guatemala tenía una extensión de entre 22,500 y 35,000 hectáreas y en los últimos doce años se ha producido más suelo urbano que en los 218 años de ocupación urbana desde la fundación de la ciudad, siguiendo el crecimiento espacial a un ritmo proyectado del 4.4 % anual (Muniguate,2020).

La segregación socioespacial de la población y de distribución de los distintos usos del suelo y el crecimiento desordenado y de baja densidad en el área metropolitana produce varios efectos como la fuerte presión sobre el medio ambiente por contaminación de cuencas, disposición de desechos sólidos, erosión del suelo y tala de árboles, producto de la expansión y ocupación desordenada del territorio (Muniguate,2020).

Municipio	Área (km2)	2000		2018-2019		2020	
		Población	Densidad (hab/km2)	Población	Densidad (hab/km2)	Población	Densidad (hab/km2)
Guatemala	94.17	602541	6398	923392	9805	951858	10108
Santa Catarina Pinula	18.69	52582	2813	80582	4311	83018	4442
San José Pinula	6.96	52101	7479	79844	11461	82257	11807
San José del Golfo	0.56	4717	8288	7229	12702	7447	13085
Palencia	5.42	46312	8541	70973	13089	73118	13484
Chinautla	5.15	74879	14538	114752	22279	118220	22953
San Pedro Ayampuc	2.94	38244	12976	58609	19885	60380	2086
Mixco	40.33	303931	7535	465773	11548	479851	11897
San Pedro Sacatepéquez	4.38	33470	32475	51292	11701	52842	12055
San Juan Sacatepéquez	14.2	142353	10021	218156	15358	224750	15822
San Raymundo	3.27	20623	6300	31605	9654	32560	9946
Chuarrancho	0.55	8247	14913	12638	22854	13020	23544
Fraijanes	11.94	38448	3220	58922	4934	60703	5083
Amatitlán	9.79	76157	7776	116711	11916	120239	12277
Villa Nueva	29.49	283025	9595	433734	14704	446844	15148
Villa Canales	15.64	101418	6482	155422	9933	160120	10233
San Miguel Petapa	9.17	88383	9630	135447	14758	139541	15204
Total	272.65	1,967,432	168,980	3,015,081	220,892	3,106,768	209,174

Cuadro 16: Densidad poblacional del Departamento de Guatemala
Fuente:Propia.

Los datos del censo realizado en el año 2000 proyectan una población de 1, 967, 432 habitantes para el departamento de Guatemala en un área de 27,265 hectáreas, lo que indica que porcentualmente cada habitante ocupa 0.0138 ha (138 metros cuadrados). Para el 2030 se estima una población de 3,438,055 habitantes en la mancha urbana del departamento de Guatemala, por lo que este porcentaje se reducirá a 0.0079 ha (79 metros cuadrados por habitante).

Por lo tanto del cuadro descrito anteriormente se puede determinar que los municipios con mayor incremento poblacional del año 2000 al 2020 según las proyecciones realizadas, son el municipio de Guatemala, Mixco y Villa Nueva con un incremento del mas del 57 %. Por otra parte existen un plan de ordenamiento territorial para el municipio de Guatemala el cual menciona que la ciudad de Guatemala ha crecido más en la última década que en toda su historia previa y que predice que el espacio urbano se duplicará para el 2020 albergando 3.3 millones de personas en toda el área metropolitana, lo cual se puede afirmar en las proyecciones realizadas en este análisis .

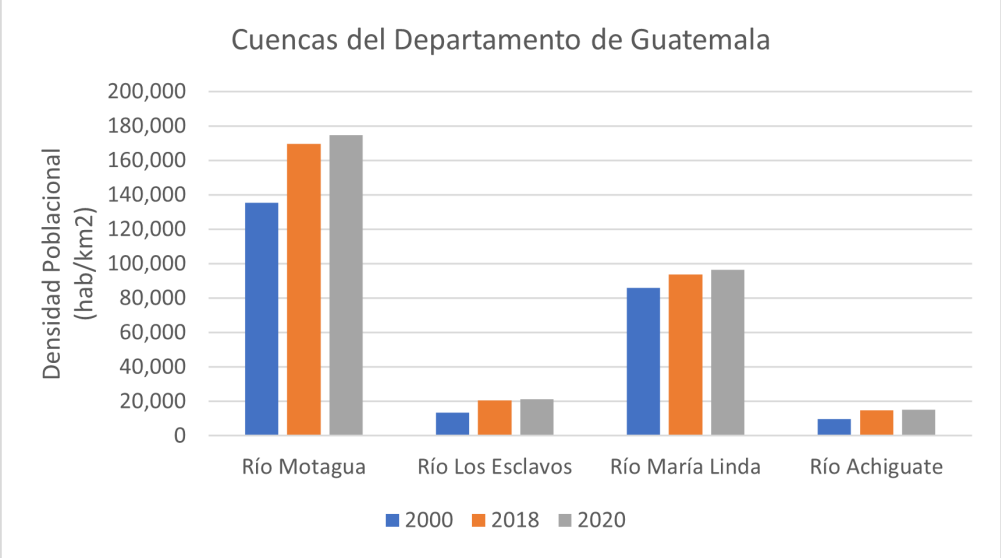


Figura 101: Densidad poblacional de las principales cuencas el Departamento de Guatemala Fuente:Propia.

Río María Linda	Área (km2)	2000		2018-2019		2020	
Municipios		Población	Densidad (hab/km2)	Población	Densidad (hab/km2)	Población	Densidad (hab/km2)
Villa Canales	15.647	101418	6482	155422	9933	160120	10233
Amatitlán	9.794	76157	7776	116711	11916	120239	12277
Guatemala	94.173	602541	6398	923392	9805	951858	10108
Villa Nueva	29.498	283025	9595	433734	14704	446844	15148
Fraijanes	11.942	38448	3220	58922	4934	60703	5083
Mixco	40.335	303931	7535	465773	11548	479851	11897
San Miguel Petapa	9.178	88383	9630	135447	14758	139541	15204
San Pedro Sacatepéquez	4.384	142353	32475	51292	11701	52842	12055
Santa Catarina Pinula	18.691	52582	2813	80582	4311	83018	4442
Total	233.642	1,688,838	85,924	24,212,75	93,610	2,495,016	96,447

Cuadro 17: Densidad poblacional de la cuenca Río María Linda
Fuente:Propia.

Río Los Esclavos	Área km2	2000		2018-2019		2020	
Municipios		Población	Densidad (hab/km2)	Población	Densidad (hab/km2)	Población	Densidad (hab/km2)
San José Pinula	6.967	52101	7479	79844	11461	82257	11807
Fraijanes	11.942	38448	3220	58922	4934	60703	5083
Santa Catarina Pinula	18.691	52582	2813	80582	4311	83018	4442
Total	37.599	143,131	13,512	219,348	20,706	225,978	21,332

Cuadro 18: Densidad poblacional de la cuenca Río Los Esclavos
Fuente:Propia.

Río Motagua	Área km2	2000		2018-2019		2020	
Municipios		Población	Densidad (hab/km2)	Población	Densidad (hab/km2)	Población	Densidad (hab/km2)
Chuarrancho	0.553	8247	14913	12638	22854	13020	23544
San Raymundo	3.274	20623	6300	31605	9654	32560	9946
San José del Golfo	0.569	4717	8288	7229	12702	7447	13085
San Juan Sacatepéquez	14.205	142353	10021	218156	15358	224750	15822
San Pedro Ayampuc	2.947	38244	12976	58609	19885	60380	20486
Palencia	5.422	46312	8541	70973	13089	73118	13484
Guatemala	94.173	602541	6398	923392	9805	951858	10108
Chinautla	5.151	74879	14538	114752	22279	118220	22953
Fraijanes	11.942	38448	3220	58922	4934	60703	5083
San José Pinula	6.967	52101	7479	79844	11461	82257	11807
Santa Catarina Pinula	18.691	52582	2813	80582	4311	83018	4442
San Pedro Sacatepéquez	4.384	142353	32475	51292	11701	52842	12055
Mixco	40.335	303931	7535	465773	11548	479851	11897
Total	208.612	1,527,331	135,497	2,173,767	169,581	2,240,024	174,712

Cuadro 19: Densidad poblacional de la cuenca Río Motagua
Fuente:Propia.

Río Achiguate	Área km2	2000		2018-2019		2020	
Municipios		Población	Densidad (hab/km2)	Población	Densidad (hab/km2)	Población	Densidad (hab/km2)
Villa Nueva	29.498	283025	9595	433734	14704	446844	15148
Total	29.498	283025	9595	433734	14704	446844	15148

Cuadro 20: Densidad de la cuenca Río Achiguate
Fuente:Propia.

En otras palabras de continuar el ritmo y la tendencia actual del crecimiento del uso residencial y asentamiento humanos en general, este continuara ocupando suelo establecido para otro uso y se asentaran viviendas en zonas de peligrosidad, invadiendo terrenos de altas pendientes situados en los ríos y quebradas. Por consiguiente se presentará un descontrolado crecimiento lineal sobre los caminos públicos que en muchas ocasiones no presentan las características y los servicios mínimos para el asentamiento humano

La figura a continuación muestra la densidad poblacional del departamento de Guatemala

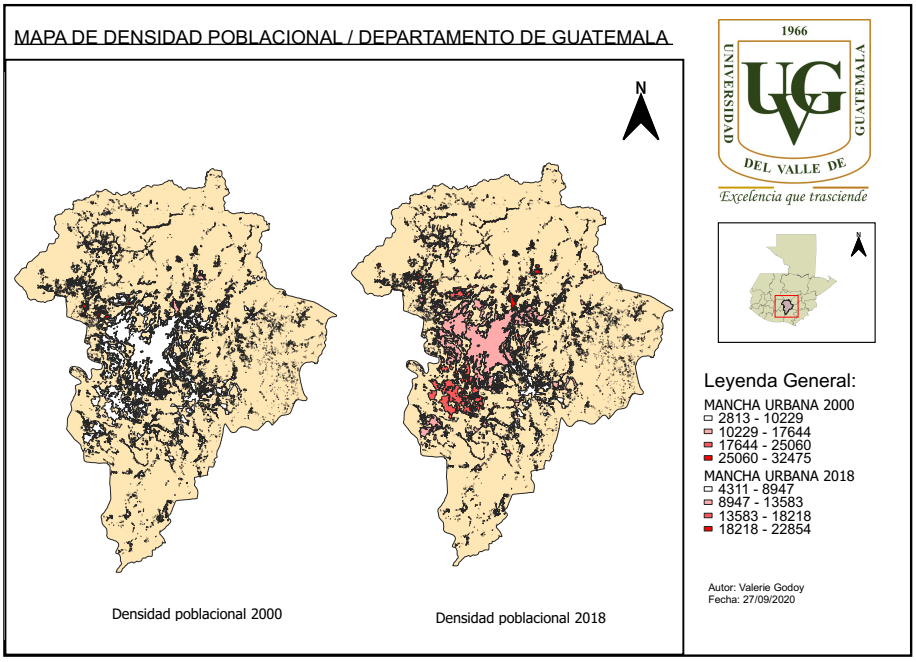


Figura 102: Mapa de densidad poblacional del Departamento de Guatemala
Fuente:Propia.

11.1.10. Efectos del aumento poblacional sobre los recursos hídricos de las principales cuencas del Departamento de Guatemala

A continuación se analizará algunos de los efectos directos e indirectos del aumento poblacional sobre los recursos hídricos de las cuencas establecidas para el estudio

Aumento poblacional y la cobertura del bosque

Las actividades que generan el deterioro forestal suman el 42 % de toda la deforestación del país, están vinculadas a la expansión de tierras para la ganadería extensiva, la expansión de monocultivos como la palma africana, los asentamientos humanos, los incendios forestales y la narcoactividad (MARN, 2016). Asimismo revertir la trayectoria negativa que presentan las dinámicas de cambios de uso de las tierras se ha convertido en el desafío primordial para el sector forestal guatemalteco.

El patrimonio natural de Guatemala ha sufrido un desgaste irreversible que sus consecuencias se reflejan en la contaminación de los ríos y el ambiente, la reducción de la masa boscosa, destrucción de los ecosistemas y extinción de las especies animales y vegetales (MARN, 2016).

Disminución de la cobertura forestal de 40,572.9 km2 (37 % del territorio) en el 2003, a 37,000 km2 (34 %) en el 2,007. En el caso de Guatemala, en el año 2010 se estimó que por habitante se disponía de 11 árboles, sin embargo al año 2014 fueron 9. El bosque está disminuyendo gradualmente en cantidades considerables y por la otra el crecimiento poblacional que incide negativamente en el mismo por el uso irracional del mismo y por la demanda de bienes y servicios necesarios para la vida del ser humano, como ocupación de tierras, uso de leña, etc. (INE, 2015).

En las partes alta y media de la cuenca del Río Motagua el cambio de uso del suelo, la tala inmoderada o ilegal, y el establecimiento de prácticas de cultivo no amigables ha generado un alto grado de fragmentación de la vegetación, afectando las funciones de los ecosistemas. Los más notables son la pérdida de suelos, y una reducción en la cantidad y calidad del agua. En la parte baja la calidad del agua sufre mayor contaminación por aguas servidas y agroquímicos. En el territorio las comunidades no cuentan con planes y estrategias de gestión ambiental y aprovechamiento sostenible de los recursos (ASORECH, 2017).

Según el informe de Desastres Naturales y Zonas de Riesgo en Guatemala, realizado por Asesoría Manuel Basterrechea Asociados, S.A (2000) la cuenca del Río Los Esclavos presenta el mayor grado de degradación ambiental, con relación al sobreuso del suelo y seguido por la cuenca el Río Motagua y el Río María Linda.

Asimismo la deforestación proveniente por cambios de uso de la tierra disminuye la capacidad de infiltración, según el manual de educación ambiental sobre el recurso hídrico en Guatemala por MARN (2016) establece que para el período del año 2001 al 2010 se registró una pérdida de 132,138 hectáreas de bosque anual. Dicho suceso provoca la disminución del flujo de aguas superficiales durante la época seca, ya que la capacidad de infiltración disminuye a un nivel tan bajo que la mayoría del agua proveniente de la lluvia escure superficialmente durante el invierno.

Eliminación de desechos en las cuencas

El 80 % de los desechos recolectados se depositan a cielo abierto y en basureros no registrados a nivel nacional, lo que trae como consecuencia daños en las cuencas hidrográficas, contaminación de las aguas superficiales, proliferando de esta manera plagas, incendios, enfermedades y contaminación atmosférica. En la cuenca del Río Motagua se establece que el 51 % de las familias queman la basura, práctica que contribuye a generar contaminación ambiental, el 35 % de las familias la tiran en cualquier lugar de la vivienda por lo que se encuentran patios sucios y calles con basura (ASORECH, 2017).

Según el censo realizado en el 2002 sobre la presencia de desechos sólidos en la cuenca del Río Los Esclavos se determinó que los centros poblados que se localizan dentro de la cuenca no disponen de forma adecuada debido a que únicamente en 6 de los municipios que conforman la cuenca disponen de botaderos municipales a cielo abierto. Con frecuencia se observan basureros clandestinos en el área urbana y rural, produciendo malestar a los pobladores que se ven propensos a sufrir enfermedades. Muchos de estos sitios están colindantes con fuentes de agua que se contaminan por escurrimiento y por traslado de restos en el período de lluvia (Escalante, 2011).

Eliminación de excretas en las cuencas

En la cuenca del Río Motagua no existen servicios de drenaje, causante de que el 87 % de las viviendas no aplican ninguna práctica de manejo de aguas negras, desde otro escenario se ha identificado que solo el 10 % de las fuentes de agua son aptas para el consumo humano, por lo tanto una causa de desnutrición es el consumo de agua considerando que el 82 % de familias consumen agua de vertientes, pozos o ríos, los cuales por lo escrito anteriormente en su mayoría están contaminados (ASORECH, 2017).

Por otra parte la cuenca del Río Los Esclavos cuenta con una piscina de recolección de desechos sólidos, la cual es constantemente monitoreada por un encargado. Debido a la presencia de cultivos alrededor el suelo no tiene la capacidad de retener y filtrar los drenajes debió a que por los extremos se presentan corrientes que trasladan las aguas servidas al río. Según el censo de población y habitación realizado en el año 2002 se estima que el 49 % de hogares utiliza pozos ciegos, el 13 % dispone de drenajes, el 9 % fosa séptica, el 17 % escusado lavable sin conexión a drenaje y el 12 % no cuenta con un servicio alguno (Escalante, 2011).

11.2. Resumen de resultados

11.2.1. Río Motagua

La cuenca del Río Motagua presenta un índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) promedio de 0.475 lo que indica que en su mayoría su cobertura se compone de plantas medianamente sanas. De igual importancia el índice de agua normalizado (NDWI) para la cuenca tiene un valor promedio de 0.20 lo que indica que la zona presenta una cobertura e hidratación creciente. Por otra parte, la clasificación del uso del suelo para la cuenca entre los años establecidos se determinó en base a las categorías previamente estipuladas donde se establece el cambio que presentaron cada una de ellas en el tiempo. Asimismo, la urbanización sufrió un aumento del 2 %, los bosques disminuyeron un 14 %, pastos y cultivos aumentaron un 10 % y la categoría de nubes cubre el 2 % de la zona de estudio.

De igual importancia, los resultados obtenidos para la densidad poblacional de la cuenca del Río Motagua, resalta que el municipio con mayor presencia de densidad poblacional en el año 2020 es Chuarrancho con un total de 23,544 hab/km2 y para el año 2000 el municipio con mayor densidad la presento San Pedro Sacatepéquez con 32,475 hab/km2.

11.2.2. Río María Linda

La cuenca del Río María Linda presenta un índice de vegetación de diferencia normalizada promedio de 0.60 lo que indica que en su mayoría su cobertura se compone de plantas medianamente sanas. De igual importancia el índice de agua normalizado (NDWI) para la cuenca tiene un valor promedio de 0.40 lo que indica que la zona presenta una cobertura e hidratación creciente. Por otra parte, la clasificación del uso del suelo para la cuenca entre los años establecidos se determinó según las categorías previamente estipuladas donde se establece el cambio que presentaron cada una de ellas en el tiempo. Asimismo, la urbanización sufrió un decrecimiento del 6 %, los bosques aumentaron un 16 %, pastos y cultivos disminuyeron un 13 % y la categoría de nubes cubre el 4 % de la zona de estudio.

De igual importancia, los resultados obtenidos para la densidad poblacional de la cuenca del Río María Linda resaltan que el municipio con mayor presencia de densidad poblacional en el año 2020 es San Miguel Petapa con un total de 15,204 hab/km2 y para el año 2000 el municipio con mayor densidad la presento San Pedro Sacatepéquez con 32,475 hab/km2.

11.2.3. Río Los Esclavos

La cuenca del Río Los Esclavos presenta un índice de vegetación de diferencia normalizada promedio de 0.55 lo que indica que en su mayoría su cobertura se compone de plantas medianamente sanas. De igual importancia el índice de agua normalizado (NDWI) para la cuenca tiene un valor promedio de 0.35 lo que indica que la zona presenta una cobertura e hidratación creciente. Por otra parte, la clasificación del uso del suelo para la cuenca entre los años establecidos se determinó en base a las categorías previamente estipuladas donde se establece el cambio que presentaron cada una de ellas en el tiempo. Asimismo, la urbanización sufrió un decrecimiento del 2 %, los bosques disminuyeron un 23 %, pastos y cultivos disminuyeron un 13 % y la categoría de nubes cubre el 37 % de la zona de estudio.

De igual importancia, los resultados obtenidos para la densidad poblacional de la cuenca del Río Los Esclavos resalta que el municipio con mayor presencia de densidad poblacional en el año 2020 es San José Pinula con un total de 11,807 hab/km2 y para el año 2000 un total de 7,479 hab/km2.

11.2.4. Río Achiguate

La cuenca del Río Achiguate presenta un índice de vegetación de diferencia normalizada promedio de 0.48 lo que indica que en su mayoría su cobertura se compone de plantas medianamente sanas. De igual importancia el índice de agua normalizado (NDWI) para la cuenca tiene un valor promedio de 0.30 lo que indica que la zona presenta una cobertura e hidratación creciente. Por otra parte, la clasificación del uso del suelo para la cuenca entre los años establecidos se determinó en base a las categorías previamente estipuladas donde se establece el cambio que presentaron cada una de ellas en el tiempo. Asimismo, la urbanización sufrió un decrecimiento del 3 %, los bosques disminuyeron un 17 %, pastos y cultivos aumentaron un 17 % y la categoría de nubes cubre el 2 % de la zona de estudio.

De igual importancia, los resultados obtenidos para la densidad poblacional de la cuenca del Río Achiguate resaltan que el municipio de Villa Nueva presencia de densidad poblacional para el año 2020 un total de 15,148 hab/km2 y para el año 2000 un total de 9,595 hab/km2.

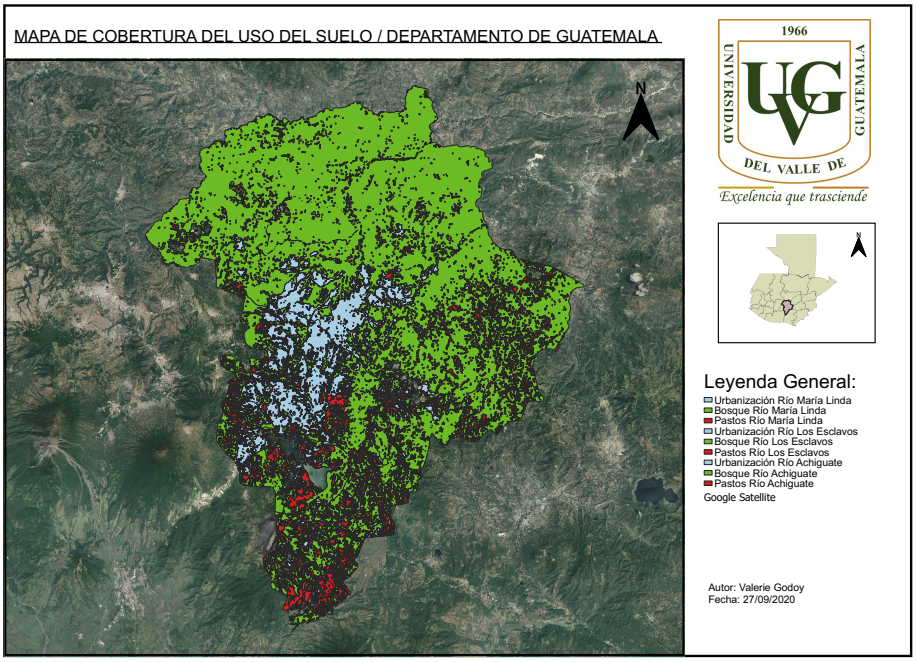


Figura 103: Mapa temático: Ejemplo de la cobertura de suelo en el Departamento de Guatemala. Fuente:Propia.

CAPÍTULO 12

Conclusiones

1. Se logró analizar el cambio de uso de suelo en las cuencas de Guatemala a través del uso de teledetección y uso del software Qgis para los años analizados. No se logró estimar el cambio de uso de suelos de los años 2006 y 2010 debido a que no se cuenta con la información correspondiente para implementar la metodología.

2. La mayor tendencia en la dinámica del uso del suelo en las cuencas para los períodos analizados es hacia la expansión de los asentamientos humanos. Entre 2015 y 2019 pueden apreciarse los cambios en el uso del suelo, donde destaca el fuerte crecimiento del área urbana y el decrecimiento del área para uso forestal.

3. Se elaboraron mapas temáticos de los años correspondientes para poder observar y comparar los resultados obtenidos en los cuales se puede identificar las diferentes clasificaciones de uso de suelo.

4. Las diversas actividades humanas representan un gran impacto en la contaminación de las fuentes debido a la falta de normativas que las regulen y el escaso conocimiento de la situación actual de las fuentes naturales del país.

5. A través del análisis de la información en este trabajo se pueden proponer recomendaciones para el manejo de las cuencas.

CAPÍTULO 13

Recomendaciones

13.1. Generales

1. Garantizar que el satélite establecido para el estudio brinde la información requerida, ya que algunos equipos son más nuevos y no cuentan con información de años anteriores.
2. Tener conocimiento previo o utilizar una fuente que permita ampliar el conocimiento de la zona para asegurar que la información obtenida para la clasificación sea válida.
3. La metodología utilizada es apta para poder implementar en diversas cuencas del país, que permitirá tener un mejor conocimiento del cambio de uso de suelo.
4. La implementación del uso de teledetección en la universidad brindara un mejor conocimiento a los estudiantes de esta herramienta y sus diversas aplicaciones.
5. Utilizar una mayor cantidad de clasificaciones dentro del programa ENVI, para delimitar con mayor certeza el área de estudio.
6. Esta herramienta se puede ser utilizado como un complemento para varios cursos y así estar más preparados profesionalmente.
7. Estar en contacto con las entidades y municipalidades pertinentes, para aplicar la información recopilar en los proyectos y mejorar el control del cambio de uso de suelo.
8. Implementar y fortalecer planes de educación ambiental en los municipios de las cuencas.
9. Se recomienda para una segunda fase realizar una matriz de confusión para poder validar los resultados obtenidos en la metodología.

13.2. Recomendaciones del manejo de las cuencas de los municipios de Guatemala

1. Composición de políticas concernientes al manejo de cuencas hidrográficas.
2. Enfatizar la participación de la sociedad civil.
3. Constante supervisión y utilización de instrumentos de evaluación o medición de impacto ambiental.
4. Fortificar la estructura municipal: crear un área federada acueducto y ambiente que cuente con profesionales como ingenieros civiles e hidráulicos, sanitarios, hidrogeólogos, ambientalistas.
5. Fomentar talleres educativos y de concientización de la comunidad, involucrando al sector educativo, sobre el manejo del agua.
6. Instruir a las comunidad sobre el manejo y los riegos principales que confronta los recursos.
7. Efectuar estudios precisos sobre suelos, para permitir la construcción.
8. Crear campañas de reforestación en los municipios y hacer un buen uso de los recursos hídricos, evitar el desperdicio y hacer plantas de tratamientos que sean eficientes.

CAPÍTULO 14

Bibliografía

Literatura citada:

- Aguírre, Níkolay. (2007). *Manual para el manejo sustentable de cuencas hidrográficas.* Universidad Nacional de Loja. Ecuador. 117 págs.
- Ariza, Alexander. (2013). *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM Versión 1.* Centro de Investigación y Desarrollo (CIAF). Bogotá, Colombia. 46 págs.
- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Faustino, Jorge. (2015). *"Manejo y Gestión integral de cuencas Hidrográficas I".* Maestría Virtual en manejo y gestión integral de cuencas hidrográficas. Turrialba, Costa Rica. 45 págs.
- Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latuna y el Caribe (CATHALAC). (2015). *Seguridad Hídrica y cambio climático.* 1ª Edición.IDRC.Canadá. 102 págs.
- Centro Agrónomico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Velásquez, Sergio. (2018). *Práctica No.1: Introducción a ENVI 5.1.* Diplomado Virtual en Procesamiento de Imágenes Teledetectadas. Turrialba, Costa Rica. 48 págs.
- Centro Agrónomico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Velásquez, Sergio. (2018). *Práctica No.4: Realces y Mejoras en el Contraste.* Diplomado Virtual en Procesamiento de Imágenes Teledetectadas. Turrialba, Costa Rica. 62 págs.
- Centro Agrónomico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Velásquez, Sergio. (2018). *Práctica No.5: Transformación de Imágenes.* Diplomado Virtual en Procesamiento de Imágenes Teledetectadas. Turrialba, Costa Rica. 33 págs.
- Centro Agrónomico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Velásquez, Sergio. (2018). *Práctica No.6: Clasificación No Supervisada.* Diplomado Virtual en Procesamiento de Imágenes Teledetectadas. Turrialba, Costa Rica. 49 págs.

- Centro Agrónomico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Velásquez, Sergio. (2018). *Práctica No.9: ENVI 5.1 e integración con QGIS*. Diplomado Virtual en Procesamiento de Imágenes Teledetectadas. Turrialba, Costa Rica. 58 págs.
- Cobos, Carlos y Colom, Elisa. (2017). *La Situación de los recursos hídricos en Centoamérica*.Guatemala. 102 págs.
- Cotler, Helena y Claire, Georgina. (2009). *Lecciones aprendidas del maneo de cuencas en México*. 1ª Edición. Red Mexicana de Cuencas Hidrográficas. 380 págs.
- Cotler, Helena y Galindo, Adalberto. (2013). *Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión*. 1ª Edición. Red Mexicana de Cuencas Hidrográficas. 36 págs.
- Duro, José y Mardoqueo, Rovoham. (2005). *Atlas Temático de la República de Guatemala.* Ministerio de Agricultura, Ganaderia y Alimentacion (MAGA). Guatemala. 66 págs.
- Escalante, Ana. (2011). *"La contaminación del agua en la parte alta del Río Los Esclavos"*. Tesis Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC), Facultad de Ciencias Económicas. Guatemala. 133 págs.
- Falcón, Oswaldo. (2014). *Dinamica de cambio en la cobertura/uso del suelo*. Tesis de la Universidad Nacional Autónoma de México.México, D.F. 111 págs.
- Fernández, Diana. (2008). *La prevención y control de la contaminación del recurso hídrico en Guatemala,Necesidad de una reglamentación efectiva*. Tesis Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC), Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales. 117 págs.
- Francisco, Jorge. (2000). *Manejo de cuencas Hidrográficas*. Centro Tropilca de Investigación y Enseñanza, Área de Cuencas y Sistemas Agroforestales. Costa Rica. 35 págs.
- Fundación Ayuda en Acción.(2017). *Diagnóstico Área de desarrollo territorial-ADT-Çuenca el Motagua"*. Guatemala. 319 págs.
- Fundación para la Conservación de los Recursos Naturales y Ambiente en Guatemala (FCG). (2012). *Diagnóstico Preliminar de Situación de la Cuenca del Río Motagua*. FCG. Guatemala. 78 págs.
- Gálvez, Carlos. (2007). *Plan de manejo integral de la microcuenca .El Playon"*. Tesis Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC), Facultad de Agronomia instito de investigaciones agronómicas. Morales, Izabal. 51 págs.
- García, Edwin. (2009). *Proyecto de Investigación en Recursos Hídricos Compilación de Textos*. Proyecto de Investigación de Rápida Ejecución de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC). 46 págs.
- García, Wilealdo. (2003).*El Sistema complejo de la cuenca Hidrográfica*. 22 págs.
- Hernández, Raúl y Mestre, Eduardo. (2015).*El manejo de cuencas desde un enfoque socioecosistémico*.Cuencas de México. 44 págs.

- Herrera,Isaac y Orozco, Eugenio.(2010).*Hidrogeología de ojo de Agua, Cuenca Sur de la Ciudad de Guatemala*. 14 págs.
- Ibañez, Sara y Gisbert, Juan. (2010). *Sistema de Coordenadas Geográficas.*Universidad Politecnica de Valencia. España. 8 págs.
- Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA).(2015).*Balance hidrológico de las subcuencas de la República de Guatemala Bases funda-mentales para la gestión del agua con visión a largo plazo.*
- Instituto de Astronomía y Geodesia.(IAG). (1999). *Introducción histórica a la Geodesia*. 1ª Edición.CSIC. Madrid. 51 págs.
- Instituto Nacional de Estadística (INE).(2015). *COMPENDIO Estadístico Ambiental 2014*. Guatemala. 319 págs.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Rob, Roberto. (2014). *Sistema de Información Geográfica*. México. 60 págs.
- Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC). (2012). *Estudio Hidrológico de la cuenca del Río Los Esclavos*. Guatemala. 71 págs.
- Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC). (2017). *Estudio Hidrológico de la cuenca del Río Maía Linda*. FCG. Guatemala. 70 págs.
- Lugo, José (2007). *Elementos de geomorfología aplicada: Métodos Cartográficos* Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.1998 Edición.ISBN. México. 128págs.
- McDaid, James y Aguilar, José. (2009). *Sistemas de información geográfica, sensores remotos y mapeo para el desarrollo y la gestión de la acuicultura marina*. Roma. 140 págs.
- Mijangos,Nadia y Aceituno,Álvaro.(2016).*Manual de educación ambiental sobre el recurso hídrico en Guatemala*. 81 págs.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN). Rob, Roberto. (2017). *Informe Ambiental del Estado 2016-Guatemala*. Guatemala. 138 págs.
- Monterroso, Mario. (2014). *Guia Práctica: Clasificación de Impagenes Satelitales*Una guía práctica sobre la realización de clasificación supervisada y no supervisada de imágenes Satelitales utilizando el software ILWIS 3.3. 31 págs.
- Muñoz, Pedro. (2013). *Apuntes de Teledetección:Índices ded vegetación*. Centro de Investigación de Recursos Naturales(CIREN). 15 págs.
- Ordoñez, Juan. (2011). *¿Qué es cuenca hidrólogica?*. 1ª Edición. Sociedad Geográfica de Lima. 44 págs.
- Pineda, Olivia. (2011). *Análisis de Cambio de uso de Suelo mediante percepción remota en el municipio de Valle de Santiago*. Tesis Centro de Investigación en Geografía y Geomática. México, D.F. 88 págs.

- Pineda, Oliva. (2011). *Análisis de cambio de uso de suelo mediante percepción remota en el muncipio de valle de Santiago*. Tesis de Centro Público de Investigación (CONACYT). México, D.F. 88 págs.
- Rystedt, Bengt. (2019). *Cartografía*. International Cartographic Association (ICA). Suecia. 7 págs.
- TECHO.(2015). *CENSO de Asentamientos*. Guatemala. 144 págs.
- Universidad de Murcia (UM). (2003). *Capítulo 10: Teledetección*. Cartagena. 38 págs.
- Universidad Plotécnica de Catalunya (EUPB). (2003). *Fotogrametría analítica*. 1ª Edición.CPET.Barcelona. 79 págs.
- Vargas, Ximena. (2019). *Elaboración de una guía de la metodología GASS (Gestión de Agua y Saneamiento Sostenible) para la cuenca del Río Ocosito, Quetzaltenango, Guatemala*. Tesis Universidad del Valle de Guatemala. Facultad de Ingeniería Civil. Guatemala. 99 págs.
- Villón, Máximo. (2014). *Hidrología*. 1ª Edición. Universidad Nacional Agraría "La Molina", Lima Perú. 216 págs.

Enlaces web:

- Ambientum. (2020).*Agua subterránea.*Marzo 11, 2020. Sitio web: https://www.ambientum.com/enciclopedia medioambiental/aguas/agua subterranea.asp
- Comisción Nacional de Energía Eléctrica (CNEE). (2020). *Matriz de Generación de Energía Eléctrica.*Agosto 12, 2020. Sitio web: http://www.cnee.gob.gt/
- DesdeLinux.(2020). *QGIS:Software libre para sistemas de información geográfica.* Septiembre 18, 2020. Sitio web:https://blog.desdelinux.net/qgis-software-libre-para-sistemas
-de-informacion-geografica/
- Earth Observing System (EOS). (2020). *NDWI.* Septiembre 16, 2020. Sitio web: https://eos.com/ndwi/es/
- FUNCAGUA. (2020).*Situación actual del Agua.*Marzo 11, 2020. Sitio web:https://funcagua.org.gt/situacion-actual-del-agua/
- Gis y Beers (GyB). (2017). *Cálcilo del índice NDWI.*Septiembre 18, 2020. Sitio web: http://www.gisand
beers.com/calculo-del-indice-ndwi-diferencial-de-agua-normalizado/

- Instituto Nacional de Estadística (INE). (2018). *Presebtación resultados del Censo 2018.* Septiembre 25, 2020. Sitio web: https://www.censopoblacion.gt/explorador
- Instituto Nacional de Estadística (INE). (2018). *Resultados del Censo 2018.* Septiembre 25, 2020. Sitio web: https://www.censopoblacion.gt/explorador
- Jiménez, Carlos. (2016). *NDVI con imagen sateliral Landsat 5 en ENVI.* Septiembre 18, 2020. Sitio web:https://www.hidraulicafacil.com/2016/04/NDVIenENVI.html
- Martínez, Anita. (2018). *Las imágenes NDWI y cómo pueden ayudarnos en la agricultua.* Septiembre 20, 2020. Sitio web: https://sinergia4.tech/las-imagenes-ndwi-pueden-ayudarnos-la-agricultura/
- Ministerio de Agricultura, Ganaderia y Alimentación (MAGA).(2001).*Mapa de Cuencas Hidrográficas.*República de Guatemala.Agosto 2, 2020. Sitio web: https://www.gifex.com/images/500X0/2011-11-23-15007 /Cuencashidrograficasde Guatemala2001.jpg
- MITECO. (2020).*Agua superficial.*Marzo 11, 2020. Sitio web: https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/aguas-superficiales/
- Mitre, B. (2012). *Agua Potable.*Abril 16, 2020. Sitio web: http://www.enteregulador salta.gov.ar/
- Municipalidad de Guatemala. (2020). *Situación territoril de la Ciudad de Guatemala.* Septiembre 28, 2020. Sitio web: http://pot.muniguate.com/doctssoporte/01situacion territorial.phpftn3
- NOAA STAR. (2020). *World-Greenness (No Noise NDVI).* Septiembre 16, 2020. Sitio web: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vhbrowse.php
- Raffino, María. (2020). *Crecimiento Poblacional.*Septiembre 18, 2020. Sitio web: https://concepto.de/crecimiento-poblacional/
- Real Academia Española (DLE). (2020). *Diccionario de la lengua española.* Octubre 02, 2020. Sitio web: https://dle.rae.es/
- Torbino, Gladys. (2019). *NDVI, Qué es y para qué sirve?.* Septiembre 26, 2020. Sitio web:https://www.cursosteledeteccion.com/ndvi-que-es-y-para-que-sirve/
- USGS sciences for a changing wold. (2020). *Global Land Survey.* Septiembre 15, 2020. Sitio web: https://glovis.usgs.gov/app

CAPÍTULO 15

Anexos

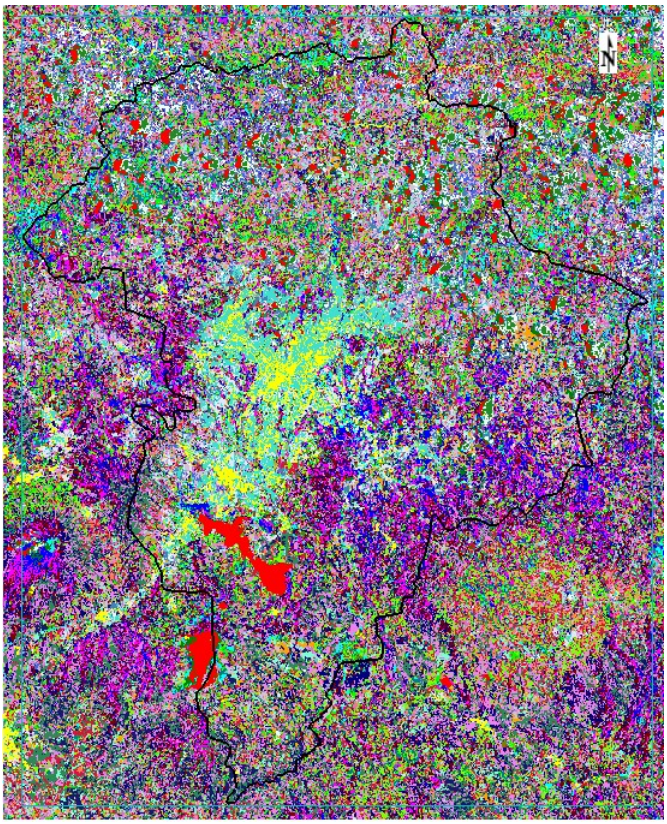


Figura 104: Cobertura asignada con la clasificación original para el año 2015
Fuente:Propia

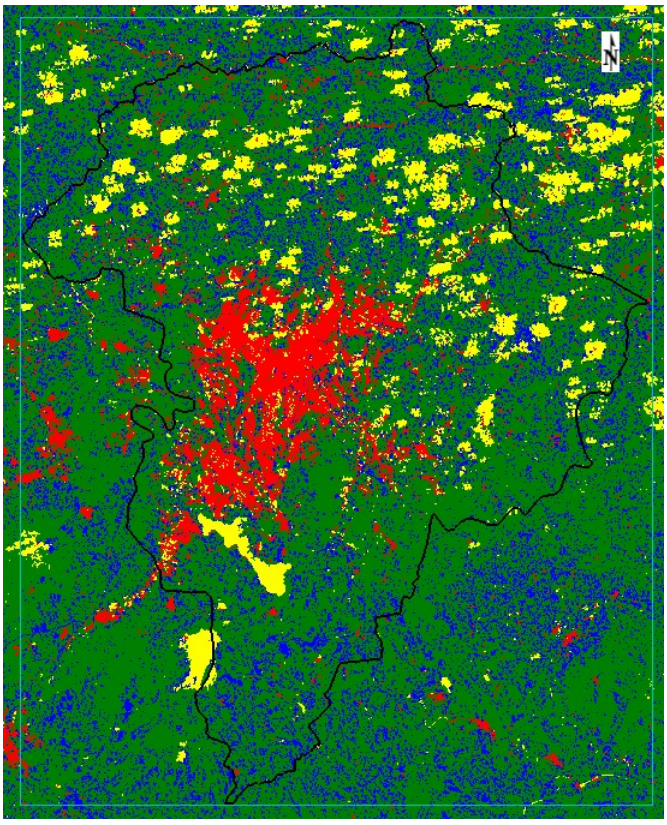


Figura 105: Cobertura asignada con la clasificación nueva para el año 2015
Fuente:Propia

CAPÍTULO 16

Glosario

- Análisis multiespectral: Es una herramienta para monitorear los cambios en el uso del suelo y de cobertura boscosa a través del tiempo y espacio
- Banda espectral: Es una selección de longitudes de onda con comportamientos electromagnéticos similares.
- Cartografía: Es la ciencia y arte que estudia los mapas geográficos y su trazo.
- Cobertura vegetal: Porcentaje del suelo ocupado por una comunidad vegetal determinada.
- Cuenca: Territorio cuyas aguas afluyen todas a un mismo río, lago o mar.
- Deforestación: Acción y efecto de deforestar.
- Estrés hídrico: Se entiende como cuando la demanda de agua es más importante que la cantidad disponible durante un periodo determinado o cuando su uso se ve restringido por su baja calidad.
- Fotogrametría: Procedimiento para obtener planos de grandes extensiones de terreno por medio de fotografías aéreas.
- Geoprocesamiento: Es la ejecución metódica de una secuencia de operaciones en los datos geográficos para crear nueva información.
- GeoTIFF: Es un estándar de metadatos de dominio público que permite que información georreferenciada sea encajada en un archivo de imagen de formato TIFF.
- Ordenamiento territorial: Es una herramienta o un recurso multidisciplinario que apunta a la gestión apropiada de los espacios geográficos.
- Ortofoto: Es una imagen digital que ha sido procesada para corregir desplazamientos debido a la perspectiva del sensor y al relieve.
- Suelo: Superficie terrestre de una nación, región, etc.
- SWIR: Bandas infrarrojas de longitud de onda corta.
- Teledetección: Técnica mediante la cual se obtiene información sobre la superficie de la Tierra, a través del análisis de los datos adquiridos por un sensor o dispositivo situado a cierta distancia, apoyándose en medidas de energía electromagnética reflejadas o emitidas.
- Urbanización: Acción y efecto de urbanizar.