



**Detección de cambios y modelación de la ocupación del suelo mediante Autómatas Celulares
como herramientas de apoyo a la conservación ambiental del área de protección del Cerro
Atacazo (Zona Este)**

Aingla Vega, Katherine Alexandra y Gavilanez Defaz, Josselyn Elizabeth

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniera Geógrafa y del Medio
Ambiente

Ing. Kirby Powney, Eduardo Patricio Msc.

25 de febrero del 2022



TESIS_AINGLA_GAVILANEZ.pdf

Scanned on: 19:50 February 4, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	799
Words with Minor Changes	175
Paraphrased Words	562
Omitted Words	4332



Website | Education | Businesses

Firma:



Firmado electrónicamente por:
**EDUARDO
 PATRICIO KIRBY
 POWNEY**

Ing. Kirby Powney, Eduardo Patricio Msc.

C.C.: 0102611811



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**Detección de cambios y modelación de la ocupación del suelo mediante Autómatas Celulares como herramientas de apoyo a la conservación ambiental del área de protección del Cerro Atacazo (Zona Este)**” fue realizado por las señoritas **Aingla Vega, Katherine Alexandra y Gavilanez Defaz, Josselyn Elizabeth**; el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 25 de febrero del 2022

Firma:



Firmado electrónicamente por:
**EDUARDO
PATRICIO KIRBY
POWNEY**

.....

Ing. Kirby Powney, Eduardo Patricio Msc.

C.C.: 0102611811



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotras, **Aingla Vega, Katherine Alexandra y Gavilanez Defaz, Josselyn Elizabeth**, con cédulas de ciudadanía n° 1724164999, 1723436554 declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Detección de cambios y modelación de la ocupación del suelo mediante Autómatas Celulares como herramientas de apoyo a la conservación ambiental del área de protección del Cerro Atacazo (Zona Este)**, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 25 de febrero del 2022

.....
Aingla Vega, Katherine Alexandra

C.C.: 1724164999

.....
Gavilanez Defaz, Josselyn Elizabeth

C.C.: 1723436554



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotras, **Aingla Vega, Katherine Alexandra y Gavilanez Defaz, Josselyn Elizabeth**, con cédulas de ciudadanía n° 1724164999, 1723436554, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Detección de cambios y modelación de la ocupación del suelo mediante Autómatas Celulares como herramientas de apoyo a la conservación ambiental del área de protección del Cerro Atacazo (Zona Este)**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 25 de febrero del 2022

.....
Aingla Vega, Katherine Alexandra

C.C.: 1724164999

.....
Gavilanez Defaz, Josselyn Elizabeth

C.C.: 1723436554

Dedicatoria

Con mucho amor y cariño dedico este trabajo a mi madre, ella es la persona más importante en mi vida, sin su apoyo incondicional y amor verdadero, nada de esto sería posible, muchas gracias mamita por ser la primera persona en creer en mí, incluso antes que yo misma, usted es mi inspiración y ganas de seguir adelante.

Katherine Alexandra, Aingla Vega

Dedicatoria

Todo el esfuerzo realizado en este proyecto y durante toda mi etapa de estudios, se lo dedico a mi madre, su amor, dedicación, fortaleza, guía y enseñanzas han sido fundamentales para alcanzar este logro, gracias por acompañarme en cada paso y enseñarme a ser una mujer fuerte, que no se deja vencer por nada, siempre serás mi inspiración.

A mi querido abuelito, por su infinito amor y consejos, por enseñarme que con lucha y perseverancia se pueden cumplir todos los sueños, sé que en el cielo estás orgulloso de mi, siempre estarás en mi corazón. Cuídame y protégeme. Te extraño.

A mi querida abuelita, porque sus mimos y cariño nunca me han faltado, por todo su amor y por toda la atención que me ha brindado a lo largo de toda mi vida.

Josselyn Elizabeth, Gavilanez Defaz

Agradecimiento

En primer lugar, doy gracias a mi Dios, por permitirme: aprender, vivir, conocer, disfrutar y hacer realidad mi sueño, gracias por estar siempre junto a mí y no dejarme caer.

A mi madre, Rocío Vega, muchas gracias por absolutamente todo lo que ha hecho por mí, por ayudarme en cada pasito que he dado. Su tenacidad y lucha sin fin se ha convertido en un buen ejemplo para imitar a mis hermanos y a mí.

A mi compañera de tesis y mejor amiga, Joss bb, quiero agradecer infinitamente por todos los buenos y malos momentos compartidos, gracias por tus enseñanzas, consejos, risas, llantos y sobre todo paciencia, eres y serás lo más bonito que pude encontrar en la universidad.

A mi tutor, Ingeniero Eduardo Kirby, por motivarnos en cada paso de este largo proyecto llamado tesis, por compartir todo su conocimiento con nosotras y gracias por ser un excelente profesor y ser humano.

A mis hermanos, Stefany y Andrés, gracias por regalarme tantas alegrías y grandes momentos, son mis bebés y mi fuente de inspiración para levantarme cada día en busca de nuevos logros.

A mi mejor amigo, Pepe bb, gracias por tener la oportunidad de conocerte y construir esta tan hermosa amistad, gracias por escucharme en mis peores momentos y darme las fuerzas necesarias para continuar pese a los obstáculos, muchas gracias de todo corazón.

A mi beffa, Alex, mi compañera de aventuras en la infancia, nos conocemos desde que tenemos memoria, gracias por siempre motivarme a ser mejor persona y seguirme preparando profesionalmente.

A mis amigas: Tamy, Eri, Les y Dianita, mis amigas y futuras colegas, gracias por las largas horas de estudios y deducciones, por levantarme los ánimos con sus ocurrencias y consejos, gracias por brindarme palabras de aliento cuando he estado a punto de renunciar.

Katherine Alexandra, Aingla Vega

Agradecimiento

A Dios, por guiarme y protegerme en todas las etapas de mi vida y sobre todo por permitirme llegar hasta este momento tan importante.

A mi hermana, Anabel, por su paciencia y apoyo, por todos los consejos que me ha brindado a lo largo de esta etapa, su compañía es un pilar fundamental en mi vida.

A toda mi familia, y especialmente de mi querido tío José, por nunca dejarme sola, siempre estar pendiente, creer en mí, brindarme su confianza y motivación.

A mi tutor de tesis, el Ing. Eduardo Kirby, le agradezco por las arduas horas de trabajo, su guía y consejos han sido fundamentales para mi formación profesional, gracias por ser un gran maestro y sobre todo por siempre sacarnos una sonrisa en los momentos de tensión.

A mi mejor amiga y compañera de tesis, Kathy, sus risas y ocurrencias han hecho que esta etapa sea más llevadera, por toda la paciencia y empeño puesto en este trabajo, gracias por ser mi amiga incondicional y apoyarme en los buenos y malos momentos.

A mi mejor amigo, Pepe, gracias por los ánimos, por escucharme siempre que lo necesito y darme sus sabios consejos, eres un excelente ser humano y tengo la dicha de tenerte en mi vida.

A Danny, por brindarme su cariño y estar siempre pendiente, por animarme y apoyarme en todos los momentos y sobre todo por siempre incentivarme a culminar este trabajo.

A mis queridos amigos, especialmente a Esteban, Chris, Omi, Angie, y Karen, que desde el primer día de clases me brindaron su amistad y permanecieron constantes durante toda mi etapa universitaria, brindándome su apoyo incondicional.

Josselyn Elizabeth, Gavilanez Defaz

Agradecimiento

De manera conjunta, queremos agradecer a nuestro hermoso team: Pepe, Xavi, David Ct, Dany, Crisi, Diablito y Bryan, que, a pesar de no ser de nuestra carrera, hicieron nuestra estancia en la universidad uno de los mejores momentos vividos, gracias chicos por sus buenos consejos, diversión absoluta, risas nunca nos faltaron, son unos grandes amigos. Esperamos tenerlos siempre en nuestras vidas y seguir conservando esta tan bonita amistad.

Kathy y Joss

ÍNDICE DE CONTENIDO

Copyleaks	2
Certificación	3
Responsabilidad de autoría	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria	5
Agradecimiento	8
RESUMEN	24
ABSTRACT	25
CAPÍTULO I	26
ASPECTOS GENERALES	26
Antecedentes.....	26
Planteamiento del problema	28
Justificación e Importancia	29
Descripción del área de estudio.....	30
Objetivos.....	31
Objetivo General.....	31
Objetivos Específicos	31
Metas.....	32
CAPÍTULO II	33
MARCO TEÓRICO	33
Fotogrametría.....	33
Ortorrectificación.....	33

Ortofotos	34
Teledetección	34
Radiación electromagnética.....	34
Espectro electromagnético	35
Resolución del Sensor	35
Resolución espacial.....	35
Resolución espectral	35
Resolución radiométrica	35
Resolución temporal	36
Corrección Geométrica	36
Localización de puntos de control.....	36
Cálculo de las funciones de transformación	37
Transferencia de los niveles digitales originales a la posición corregida	38
Registro o Corregistro de imágenes.....	39
Ocupación del suelo.....	40
Cobertura del suelo (Land Cover, LC).....	40
Uso de del suelo (Land Use, LU).....	41
Leyenda temática.....	41
Leyenda temática del Ecuador	41
Unidad mínima de mapeo.....	43
Sistema de información de la ocupación del suelo en España (SIOSE).....	43
Características técnicas del SIOSE	44
Modelo de datos SIOSE	44
Leyenda SIOSE.....	45

Clases Simples.....	45
Clases Compuestas	51
Clasificación del suelo	55
Suelo urbano.....	55
Suelo rural.....	55
Clasificación de los usos de suelo en el Distrito Metropolitano de Quito	56
Clasificación de los usos de suelo en el cantón Mejía.....	59
Clasificación de imágenes.....	61
Clasificación de imágenes basadas en la interpretación y digitalización.....	61
Interpretación	61
Criterios visuales para interpretación de imágenes	61
Digitalización.....	63
Clasificación automatizada de imágenes	63
Clasificación Supervisada.	64
Clasificación No Supervisada.....	64
Método de clasificación basado en píxeles	65
Métodos de clasificación basados en objetos.....	65
Detección de cambios	65
Mapa de diferencias de detección de cambios.....	66
Estadísticas de detección de cambios	67
Geodatabase.....	67
Modelación	68
Cadenas de Markov	68
Autómatas celulares	69

Estadísticos	72
Media	72
Desviación estándar	72
Exactitud Posicional	73
Exactitud posicional de acuerdo al Estándar Nacional de Precisión de Datos Espaciales (NSSDA).....	73
Error Cuadrático Medio (RMS).....	74
Cálculo de la precisión horizontal	75
Exactitud Posicional de acuerdo al Instituto Geográfico Militar (IGM)	78
Determinación de la precisión horizontal del mapa	78
Validación de la cartografía temática.....	78
Tipos de muestreo en la validación de la cartografía temática	79
Tamaño de la muestra	80
Matriz de confusión	80
Prueba de Cramer	83
Áreas de protección y conservación ambiental	84
CAPÍTULO III.....	85
METODOLOGÍA.....	85
Recopilación y estandarización de la información secundaria	86
Evaluación de la exactitud posicional.....	88
Registro o corrección de imágenes	89
Registro de imágenes, en ENVI	89
Registro de imágenes, en ERDAS IMAGINE	90
Generación del ortomosaico.....	91

Definición de la leyenda temática.....	92
Unidad mínima de mapeo.....	93
Clasificación de imágenes	94
Clasificación automatizada no supervisada por píxeles, en ERDAS IMAGINE	94
Clasificación automatizada supervisada por píxeles, en ERDAS IMAGINE	94
Clasificación automatizada supervisada basada en objetos, en ENVI	95
Clasificación de las coberturas mediante interpretación y digitalización.....	96
Clasificación de los usos del suelo mediante la interpretación y digitalización.....	98
Validación de la clasificación.....	98
Matriz de confusión	99
Cálculo de la fiabilidad global e índice Kappa	100
Cálculo de la diferencia de las coberturas del suelo obtenidas por la herramienta Intersect de los años 2010, 2014 y 2019.....	101
Cálculo de la diferencia de usos del suelo obtenidos por la herramienta Intersect de los años 2010, 2014 y 2019.....	101
Detección de cambios de las coberturas del suelo a partir del método de change detection	101
Detección de cambios en ENVI, imagen vs imagen	102
Detección de cambios en ENVI, imagen clasificada vs imagen clasificada	103
Detección de cambios en ERDAS IMAGINE, imagen vs. imagen.....	103
Detección de cambios en ERDAS IMAGINE, imagen clasificada vs. imagen clasificada	104
Detección de cambios de los usos del suelo a partir del método change detection, en ENVI	104
Generación del modelo predictivo de cambio de cobertura del suelo para el año 2030.....	104

Obtención de las variables impulsoras de cambio	105
Simulación de la cobertura de suelo proyectada al 2019	106
Validación del modelo predictivo de coberturas del suelo 2019	109
Generación del modelo predictivo de cambio de uso del suelo para el año 2030	110
CAPÍTULO IV	111
RESULTADOS	111
Resultados de la recopilación y estandarización de la información	111
Resultados de la evaluación de la exactitud posicional.....	112
Resultados del registro de imágenes, en ENVI	113
Resultados del registro de imágenes, en ERDAS IMAGINE.....	115
Resultado de la generación del ortomosaico	117
Resultado de la clasificación automatizada no supervisada por píxeles, en ERDAS IMAGINE	118
Resultado de la clasificación automatizada supervisada por píxeles, en el ERDAS IMAGINE	119
Resultado de la clasificación supervisada basada en objetos, en ENVI	120
Resultado de la interpretación/digitalización de las coberturas del suelo	122
Resultado de la interpretación / digitalización de los usos del suelo	127
Resultado de la validación de la clasificación	131
Análisis de los resultados de las diferencias de coberturas del suelo en el período 2010-2014	132
Análisis de los resultados de las diferencias de las coberturas del suelo en el período 2014- 2019	133
Análisis de los resultados de las diferencias de usos del suelo en el período 2010 - 2014 ...	135
Análisis de los resultados de las diferencias de usos del suelo en el período 2014-2019	136

Resultados de la detección de cambios de las coberturas del suelo en ENVI, imagen vs. imagen	137
Resultados de la detección de cambios de las coberturas del suelo en ENVI, imagen clasificada vs. imagen clasificada	139
Resultados de la detección de cambios de las coberturas del suelo en ERDAS IMAGINE, imagen vs. imagen	142
Resultados de la detección de cambios de las coberturas del suelo en ERDAS IMAGINE, imagen clasificada vs. imagen clasificada.....	146
Resultados de la detección de cambios de los usos del suelo en ENVI, imagen clasificada vs. imagen clasificada.....	149
Resultados de la simulación de la cobertura del suelo proyectada al 2019	151
Resultados de la validación del modelo predictivo de coberturas del suelo 2019	153
Resultados de la modelación de la cobertura del suelo para el año 2030	154
Resultados de la simulación del uso del suelo proyectado al 2019.....	155
Resultados de la validación del modelo predictivo de usos del suelo del 2019	157
Resultados de la modelación del uso de suelo para el año 2030	157
CAPÍTULO V	160
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	160
Conclusiones	160
Recomendaciones.....	162
BIBLIOGRAFÍA	162

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Leyenda temática de cobertura y uso de la tierra, nivel I y nivel II	42
Tabla 2. Estructura de una matriz de confusión.....	81
Tabla 3. Valores de aceptación del Índice Kappa.	83
Tabla 4. Características de las ortofotos y el modelo digital del terreno (MDT)	86
Tabla 5. Archivos recopilados.....	87
Tabla 6. Matriz de confusión para la clasificación de la cobertura del año 2019	100
Tabla 7. Resultados de la evaluación de la exactitud posicional	112
Tabla 8. Resultados de los RMS obtenidos en el registro de las ortofotos, en ENVI	113
Tabla 9. Resultados de los RMS obtenidos en el registro de las ortofotos, en ERDAS IMAGINE	116
Tabla 10. Cambios de las coberturas entre el período 2010 - 2014	132
Tabla 11. Cambios de las coberturas entre el período 2014 - 2019	134
Tabla 12. Cambios de usos del suelo entre el período 2010 - 2014	135
Tabla 13. Cambios de usos del suelo entre el período 2014-2019	136
Tabla 14. Comparación de los resultados obtenidos mediante detección de cambios, en ENVI	142
Tabla 15. Comparación de los resultados obtenidos mediante detección de cambios, en ERDAS IMAGINE	149
Tabla 16. Resultados de la detección de cambios de los usos del suelo, en ENVI.....	150
Tabla 17. Valores de Cramer por cada variable para la modelación de la cobertura	151
Tabla 18. Valores de Cramer por cada variable para la modelación del uso del suelo.....	155

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio	31
Figura 2. Espectro electromagnético	35
Figura 3. Métodos de interpolación	39
Figura 4. Registro de imágenes	40
Figura 5. Modelo de datos jerárquicos vs modelo de datos orientado a objetos	45
Figura 6. Ejemplo de arbolado forestal	46
Figura 7. Ejemplo de cultivos	46
Figura 8. Ejemplo de edificaciones	47
Figura 9. Ejemplo de matorral.....	47
Figura 10. Ejemplo de páramo	48
Figura 11. Ejemplo de prado	48
Figura 12. Ejemplo de suelo desnudo	49
Figura 13. Ejemplo de suelo no edificado	49
Figura 14. Ejemplo de vial, aparcamiento o zona peatonal sin vegetación	50
Figura 15. Ejemplo de zona de extracción.....	50
Figura 16. Ejemplo de zonas quemadas	51
Figura 17. Ejemplo de zona agrícola residencial.....	52
Figura 18. Ejemplo de casco.....	53
Figura 19. Ejemplo de ensanche	53
Figura 20. Clases simples y compuestas SIOSE	54
Figura 21. Métodos de clasificación de imágenes	64
Figura 22. Imagen clasificada mediante detección de cambios, en ENVI	66
Figura 23. Elementos principales de autómatas celulares	71

Figura 24. Ejemplo del proceso de transición de un autómata celular	72
Figura 25. Distribución de error circular normal	76
Figura 26. Distribución de error circular probable	77
Figura 27. Esquema general de la metodología empleada	85
Figura 28. Ortofotos y modelo digital del terreno.....	86
Figura 29. Ejemplo de puntos de control vs. puntos colocados sobre las ortofotos de los años 2014 y 2019	88
Figura 30. Configuración principal para el registro de imágenes, en ENVI	90
Figura 31. Configuración principal para el registro de imágenes, en ERDAS IMAGINE.....	91
Figura 32. Generación del ortomosaico con la herramienta Seamless Mosaic	92
Figura 33. Leyenda temática usada para el estudio	93
Figura 34. Configuración para la clasificación automatizada no supervisada por píxeles	94
Figura 35. Áreas de entrenamiento de la clasificación automatizada supervisada por píxeles....	95
Figura 36. Selección de muestras de entrenamiento de la clasificación automatizada supervisada basada en objetos	96
Figura 37. Coberturas simples.....	97
Figura 38. Distribución aleatoria de los puntos muestreados	99
Figura 39. Herramienta de análisis espacial, Intersect	101
Figura 40. Configuración para la detección de cambios, en ENVI	102
Figura 41. Herramienta Poligon to Raster	103
Figura 42. Configuración para la detección de cambios, en ERDAS IMAGINE	104
Figura 43. Flujograma del proceso de modelación con Autómatas Celulares	105
Figura 44. Variables condicionantes.....	106
Figura 45. Leyenda homogeneizada para todos los mapas de cobertura de suelo	107

Figura 46. Ejemplo del valor de Cramer obtenido para la variable pendiente	108
Figura 47. Ejemplo de una imagen de potencial de transición de páramo a cultivo	108
Figura 48. Pestaña de simulación del módulo Land Change Modeler	109
Figura 49. Configuración de la herramienta Validate	110
Figura 50. Resultado de la recopilación y estandarización de la información	111
Figura 51. Comparación de ortofotos originales vs. registradas, en ENVI	115
Figura 52. Comparación de ortofotos originales vs. registradas, en ERDAS IMAGINE	117
Figura 53. Ortomosaico generado.....	118
Figura 54. Resultado de la clasificación automatizada no supervisada por píxeles, en ERDAS IMAGINE	119
Figura 55. Resultado de la clasificación automatizada supervisada por píxeles, en ERDAS IMAGINE	120
Figura 56. Resultado de la clasificación automatizada supervisada basada en objetos, en ENVI	121
Figura 57. Coberturas del suelo, año 2010.....	122
Figura 58. Distribución porcentual de las coberturas del suelo, año 2010.....	123
Figura 59. Coberturas del suelo, año 2014.....	124
Figura 60. Distribución porcentual de las coberturas del suelo, año 2014.....	124
Figura 61. Cobertura del suelo, año 2019	125
Figura 62. Distribución porcentual de la cobertura del suelo, año 2019.....	126
Figura 63. Usos del suelo, año 2010.....	127
Figura 64. Distribución porcentual de los usos del suelo, año 2010.....	128
Figura 65. Usos del suelo, año 2014.....	129
Figura 66. Distribución porcentual de los usos del suelo, año 2014.....	129

Figura 67. Usos del suelo, año 2019.....	130
Figura 68. Distribución porcentual de los usos del suelo, año 2019.....	131
Figura 69. Imágenes resultantes de la detección de cambios de las coberturas en ENVI, imagen vs. imagen.....	137
Figura 70. Comparación de las ortofotos 2010 y 2014 vs. imagen de detección de cambios de las coberturas, en ENVI.....	138
Figura 71. Comparación de las ortofotos 2014 y 2019 vs. imagen de detección de cambios de las coberturas, en ENVI.....	139
Figura 72. Resultados de la detección de cambios de las coberturas del suelo en ENVI, imagen clasificada vs. imagen clasificada.....	140
Figura 73. Comparación de las imágenes clasificadas 2010 y 2014 vs. imagen de detección de cambios de las coberturas, en ENVI.....	140
Figura 74. Comparación de las imágenes clasificadas 2014 y 2019 vs. imagen de detección de cambios de las coberturas, en ENVI.....	141
Figura 75. Resultados de la detección de cambios de las coberturas (imagen vs. imagen), en ERDAS IMAGINE.....	143
Figura 76. Comparación de las ortofotos 2010 y 2014 vs. imagen de detección de cambios de las coberturas, en ERDAS IMAGINE.....	144
Figura 77. Comparación de las ortofotos 2010 y 2019 vs. imagen de detección de cambios de las coberturas, en ERDAS IMAGINE.....	145
Figura 78. Resultados de la detección de cambios (imagen clasificada vs. imagen clasificada) de las coberturas, en ERDAS IMAGINE.....	146
Figura 79. Comparación de las imágenes clasificadas 2010 y 2014 vs. imagen de detección de cambios de las coberturas, en ERDAS IMAGINE.....	147

Figura 80. Comparación de las imágenes clasificadas 2014 y 2019 vs. imagen de detección de cambios (imagen clasificada vs. imagen clasificada) de las coberturas, en ERDAS IMAGINE	148
Figura 81. Resultados de la detección de cambios de los usos del suelo entre el período 2010 - 2014 y 2014 – 2019, en ENVI	150
Figura 82. Imágenes de potencial de transición	152
Figura 83. Imagen de cambio de cobertura del suelo simulado al año 2019	153
Figura 84. Resultado de la validación de las coberturas al 2019	153
Figura 85. Coberturas del suelo para el año 2030.....	154
Figura 86. Área ocupada por cada cobertura del suelo para el 2030	154
Figura 87. Imagen del potencial de transición entre los usos Recurso Natural de Producción Sostenible y Residencial	156
Figura 88. Imagen de los uso del suelo simulado al año 2019	156
Figura 89. Resultados de la validación de la simulación de los usos del suelo al 2019.....	157
Figura 90. Usos del suelo para el año 2030	158
Figura 91. Área ocupada por cada uso del suelo para el año 2030	158

RESUMEN

Los modelos prospectivos de cambios de ocupación del suelo son herramientas fundamentales en la planificación y la conservación; puesto que, permiten tener una visión de lo que sucederá en el territorio, permitiendo tomar decisiones enfocadas a la prevención de problemas futuros. En el caso, de la zona este del cerro Atacazo se ha evidenciado grandes cambios en la ocupación del suelo debido a varios factores como: el crecimiento de asentamientos irregulares, avance de la frontera agrícola, sumado a la falta de herramientas de planificación a largo plazo; en ese sentido, el presente proyecto tiene como finalidad identificar y modelar los cambios de ocupación del suelo mediante Autómatas Celulares como herramientas de apoyo a la conservación ambiental del área de protección del Cerro Atacazo. A partir de, la recopilación de información, se evaluó la exactitud posicional de las ortofotos; luego, se corregistraron las imágenes y se generó un ortomosaico; después, se definió la leyenda temática (SIOSE) y la unidad mínima de mapeo; posteriormente, se clasificó las imágenes mediante técnicas automáticas e interpretación/digitalización; a continuación, se tomaron muestras en campo para validar la clasificación con la matriz de confusión y el índice kappa; seguidamente, se hizo la detección de cambios con imágenes e imágenes clasificadas; luego, se modeló la ocupación del suelo para el año 2030 usando Autómatas Celulares. Igualmente, con los usos del suelo se realizó los siguientes procesos: recopilar información, interpretar/digitalizar, detectar los cambios y modelar los usos del suelo para el año 2030. Los resultados mostraron que: existe una disminución en la cobertura de arbolado forestal, con 112 ha, desde año 2010 al 2019; mientras que, la cobertura de edificaciones aumenta, con 64.11 ha entre este periodo. En el caso de usos de suelo, el uso agrícola se reemplaza por residencial, con 42.92 ha; asimismo, el área de promoción se sustituye por el uso de protección ecológica, con 222.81 ha. La proyección para el año 2030, muestra una seria reducción de la cobertura arbolado forestal; puesto que, para este año se espera que en la zona de estudio solamente exista 6.76 ha de bosque.

Palabras clave:

- **OCUPACIÓN DEL SUELO**
- **MODELACIÓN**
- **AUTÓMATAS CELULARES**
- **DETECCIÓN DE CAMBIOS**

ABSTRACT

Prospective models of changes in land use are fundamental tools in planning and conservation; since, it allows to have a vision of what will happen in the territory, allowing decisions focused on the prevention of future problems. In the case of the eastern area of Cerro Atacazo, great changes in land occupation have been evidenced due to several factors such as: the growth of irregular settlements, the advance of the agricultural frontier, added to the lack of long-term planning tools. ; In this sense, the purpose of this project is to identify and model changes in land use through Cellular Automata as tools to support the environmental conservation of the Cerro Atacazo protection area. From the collection of information, the positional accuracy of the orthophotos was evaluated; then, the images were corrected and an orthomosaic was finished; later, the thematic legend (SIOSE) and the minimum mapping unit were defined; subsequently, the images were classified using automatic techniques and interpretation/digitalization; next, samples were taken in the field to validate the classification with the confusion matrix and the kappa index; next, the detection of changes was made with images and classified images; then, land occupation for the year 2030 was modeled using Cellular Automata. Similarly, with land use, the following processes were carried out: collect information, interpret/digitalize, detect changes and model soils for the year 2030. The results showed that: there is a decrease in forest tree cover, with 112 ha, from 2010 to 2019; while the coverage of buildings increases, with 64.11 ha between this period. In the case of land uses, agricultural use is replaced by residential, with 42.92 ha; since, the promotion area is replaced by the use of ecological protection, with 222.81 ha. The projection for the year 2030 shows a serious reduction in forest tree cover; since, for this year it is expected that in the study area there will only be 6.76 ha of forest.

Keywords:

- **LAND USE**
- **MODELING**
- **CELLULAR AUTOMATA**
- **CHANGE DETECTION**

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

El presente capítulo parte con una breve introducción del proyecto, seguido de: planteamiento del problema, justificación, descripción del área de estudio, objetivos y finaliza con las metas. A continuación, se describe cada apartado.

Antecedentes

El elevado crecimiento de la población en el mundo ha provocado cambios significativos en el uso que el ser humano le da al suelo y ha ocasionado la pérdida de áreas de cobertura vegetal, especies de fauna y flora, entre otros cambios en el ambiente. El incremento poblacional y la expansión demográfica son considerados como las principales causas que afectan la cobertura vegetal natural (Chacon, 2014).

La expansión urbana es un fenómeno que está cambiando los paisajes en toda América Latina (Heinrichs et al., 2009). La expansión física de las ciudades ocurre a expensas de las áreas agrícolas, forestales o naturales, sin tener en cuenta si estas tierras fueron designadas para uso urbano o no, deteriorando así los recursos naturales que sustentan la ciudad (Mejean et al., 2020).

En el caso de Quito, se han realizado algunas acciones para frenar el avance de la frontera urbana. Sin embargo, el esfuerzo por enfrentar este complejo problema con las herramientas que la planificación brinda, no ha sido suficiente (Instituto Metropolitano de Planificación Urbana, 2018).

Por otra parte, en el cantón Mejía, la parroquia de Cutuglagua, en los últimos años, pasó de ser un pequeño caserío, en medio de la zona agrícola- ganadera, a constituirse en una zona de poblamiento creciente por la cercanía al sur de Quito; esta parroquia se ha caracterizado por su aumento poblacional y desarrollo interno debido a su ubicación estratégica (Vega, 2010).

En Ecuador se han realizado algunos estudios relacionados con el cambio de ocupación del suelo, entre estos, se detallan los siguientes:

Salazar et al. (2020), realizaron un estudio sobre la “Evaluación de escenarios espaciales para el desarrollo sostenible en Quito, Ecuador”, donde se analizan los cambios en el uso de la tierra en la metrópoli. Usando el modelo Dyna-CLUE, se simularon demandas espaciales para futuros usos de la tierra para 2050, en base a dos escenarios de crecimiento: el escenario de tendencia (crecimiento sin restricciones) y el escenario regulado. Ambos escenarios mostraron cómo la expansión urbana consume áreas agrícolas y naturales.

León (2015), realizó un estudio sobre la generación de un modelo predictivo de crecimiento urbano mediante la técnica de autómatas celulares en las parroquias de Conocoto, Guangopolo, Alangasí, la Merced y San Rafael. Se generaron capas de información de cobertura del suelo para 3 distintos años (1999, 2007 y 2014), por medio de clasificación de imágenes satelitales y se obtuvo dos modelos de cobertura del suelo simulados para los años 2020 y 2025. El análisis del resultado permitió identificar la dinámica de crecimiento, caracterizada principalmente por la transformación de zonas agrícolas en usos urbanos.

Padilla et al. (2015), utilizaron autómatas celulares como técnica de modelamiento espacial para la determinación del cambio de uso de suelo y cobertura vegetal en el sector de La Compañía Agrícola Payamino y la población Callanayacu ubicados en la provincia de Orellana, Ecuador. Se aplicó la técnica de Interpretación Digital para el análisis de los periodos comprendidos entre 1965 y 2001; posteriormente, sobre esta base, se generaron dos escenarios prospectivos a los años 2011 y 2020, que indican que: para el año 2011 el 91.4 % del bosque primario ha desaparecido y para el 2020 desaparecerá el 95.5%, quedando únicamente el 4.5 % de la totalidad del área de bosques primarios, con tendencia a desaparecer por completo en el caso de continuar con las mismas condiciones actuales.

Planteamiento del problema

El Distrito Metropolitano de Quito se ha expandido progresivamente hacia la ladera occidental, a través de la creación de barrios periféricos ubicados en quebradas, laderas e incluso en zonas de protección ecológica o de riesgo, donde los barrios carecen de adecuada planificación (Carrera et al., 2016).

El Cantón Mejía a partir del año 2000 ha comenzado a tener un fuerte crecimiento urbanístico, sobre todo en la parroquia de Cutuglagua cuyos límites se encuentran en el sur de Quito, donde es prácticamente imposible frenar este factor, pues la presión demográfica y el desarrollo de la ciudad de Quito, han ocasionado que esta parroquia crezca desordenadamente, sin ningún tipo de planificación y con carencias de obras de infraestructura básica (Yáñez, 2010).

El área de protección del Cerro del Atacazo, importante fuente de agua para Quito ha sido sometida a: la presión del crecimiento urbano, la ganadería, la agricultura, los incendios, invasiones, cambio de uso de suelo, así como, la falta de control y seguimiento de las autoridades para evitar que el límite urbano siga avanzando hacia esta importante zona de protección. A esto se suma: la falta de herramientas de planificación a largo plazo y firmeza de ciertas autoridades, sumadas a la desobediencia, necedad e imprudencia de los ciudadanos, agravando el problema que se ha convertido en un círculo vicioso, que no puede ser resuelto a corto plazo (Instituto Metropolitano de Planificación Urbana, 2018).

De acuerdo a lo mencionado, no basta el análisis retrospectivo de los cambios de ocupación de suelo, sino también tener una visión a largo plazo. Los modelos prospectivos son una herramienta indispensable para la formulación de adecuadas políticas que apoyen a la planificación urbana orientadas a un crecimiento armónico, equitativo y sostenible dirigido a prevenir problemas futuros que afecten a la población, la biodiversidad, los ecosistemas y las fuentes de agua que alberga el área de protección del Cerro Atacazo.

Por tal motivo, el presente proyecto, a través del uso de diferentes herramientas de las tecnologías geoespaciales, propone identificar y modelar los cambios de ocupación del suelo mediante Autómatas Celulares como herramientas de apoyo a la conservación ambiental en el área de estudio que se encuentra en la zona de protección del Cerro Atacazo; en ese sentido, al realizar este proyecto se podrá identificar y cuantificar: el uso y las coberturas vegetales que han cambiado desde el año 2010 hasta el año 2019 mediante el uso de ortofotos, y utilizando el método de Autómatas Celulares se generará una proyección del cambio de ocupación del suelo en apoyo a la planificación y conservación del Cerro Atacazo, en el área de estudio, que pueda contribuir a la toma de decisiones del Distrito Metropolitano de Quito y Mejía.

Justificación e Importancia

La cuenca del cerro Atacazo cuenta con ecosistemas únicos y muy sensibles como son: el Bosque – Alto Andino y los Páramos; estos ecosistemas, contribuyen a la conservación de la biodiversidad, la disminución de la erosión, el control de contaminantes, la regulación del agua y también actúan como un corredor ecológico que facilita el intercambio de especies (FONAG, 2017).

A pesar de la importancia de los ecosistemas presentes en el cerro Atacazo, durante los últimos años, éstos se han visto afectados por el crecimiento de los asentamientos irregulares, el avance de la frontera agrícola, las quemadas frecuentes y el pastoreo intensivo, lo que ha causado que esta área de protección se someta a grandes cambios en la ocupación del suelo (Carrera et al., 2016).

Con el fin de prevenir y reducir los impactos negativos del crecimiento urbano, los planificadores y los responsables de la toma de decisiones requieren información precisa y detallada sobre el crecimiento urbano que permita tomar decisiones a futuro (Verburg et al., 2002).

Por esta razón, resulta necesario conocer cómo ha crecido la frontera urbana y cómo ha funcionado la dinámica del cambio de ocupación del suelo en la última década. A su vez, el modelo prospectivo permitirá apreciar los cambios futuros de la ocupación del suelo que se darán en la zona de estudio, brindando de esta manera una herramienta de apoyo a la planificación y conservación del Cerro Atacazo, ya que es un área clave para prevenir desastres naturales; además, aquí existe una amplia gama de ecosistemas, pisos climáticos, biodiversidad y es una fuente importante de provisión de agua para la ciudad.

Por otra parte, el presente proyecto propondrá una metodología para la detección de cambios y modelación de la ocupación de suelo mediante Autómatas Celulares, la cual puede ser replicada para estudios futuros por diferentes instituciones, organismos y estudiantes de la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente/Ingeniería en Tecnologías Geoespaciales o carreras afines.

Descripción del área de estudio

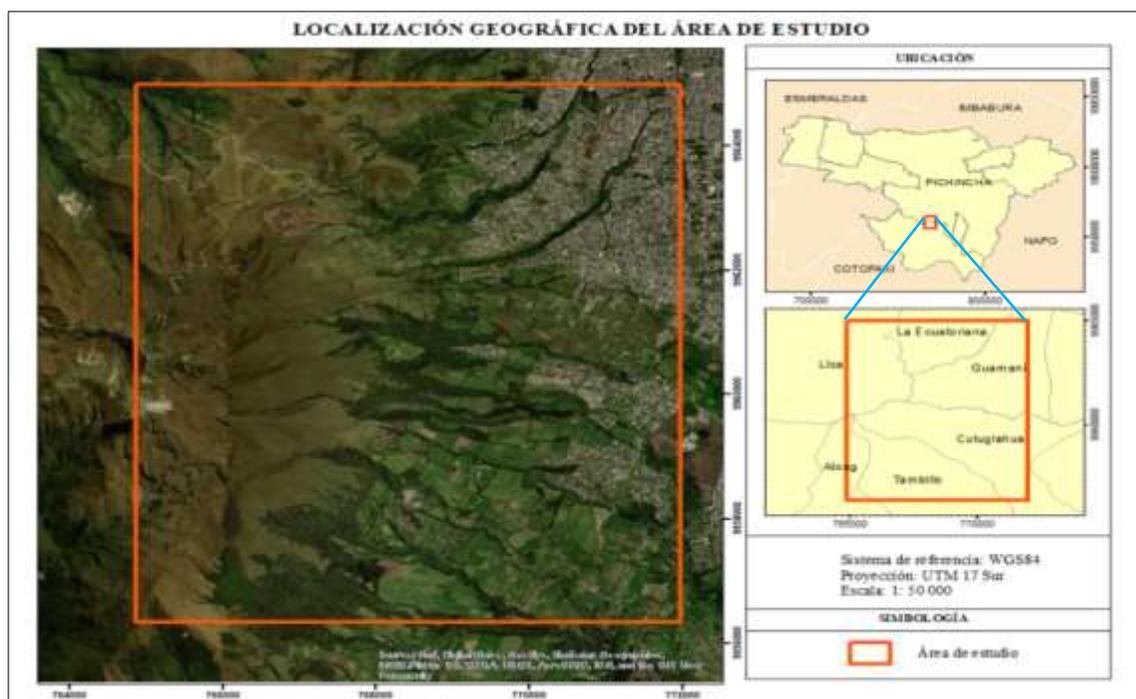
El área de estudio se encuentra ubicada en la provincia de Pichincha, entre los cantones de Quito y Mejía, cubre la zona Este del cerro Atacazo, la cual está comprendida entre las parroquias de La Ecuatoriana, Guamaní, Cutuglahua, Tambillo, Alóag y Lloa, y tiene un área de 61.5 km². El cerro Atacazo se localiza en la cordillera occidental de los Andes a 4570 msnm, tiene una zona de vida muy húmedo sub-temperado y lluvioso sub-temperado; además, cuenta con formaciones vegetales de: matorral húmedo montano, bosque siempre verde montano alto y páramo herbáceo. La especie más abundante es *Brachyotum ledifolium*, seguida por *Alnus acuminata*; de igual forma, los géneros *Brachyotum* y *Alnus* son los más frecuentes. *Asteraceae* es la familia más abundante y diversa (Fernández et al., 2000).

El cerro Atacazo cuenta con doce vertientes de agua; de las cuales, tres proveen de agua a 270 mil personas que habitan en el centro y sur de la ciudad de Quito (FONAG, 2020).

En la Figura 1, se ilustra la localización geográfica del área de estudio.

Figura 1

Área de estudio



Objetivos

Objetivo General

Identificar y modelar los cambios de ocupación del suelo mediante Autómatas Celulares como herramientas de apoyo a la conservación ambiental del área de protección del Cerro Atacazo.

Objetivos Específicos

- Recopilar y estandarizar la información secundaria existente y estructurarla en una geodatabase.
- Realizar las correcciones de las imágenes de estudio a partir de herramientas de análisis digital de imágenes con el objetivo de ajustar dichas imágenes para la detección de cambios y clasificación de la ocupación del suelo.

- Identificar las zonas que han cambiado espectralmente mediante diferentes algoritmos para detección de cambios con la finalidad de cuantificar los cambios existentes en el uso y la cobertura del suelo en la zona de estudio.
- Clasificar las imágenes por métodos de interpretación/digitalización o clasificación automática de imágenes para generar el mapa de cobertura vegetal y uso de suelo, además de verificar el uso de suelo existente contrastado con la ordenanza municipal vigente.
- Evaluar la confiabilidad temática de los mapas de ocupación del suelo mediante una matriz de confusión para cuantificar la calidad de los productos cartográficos obtenidos.
- Generar un modelo prospectivo del cambio de ocupación del suelo en el área de protección del Cerro Atacazo para el año 2030 mediante el método de Autómatas Celulares con el fin de crear un escenario de las posibles afectaciones en la conservación ambiental del área de protección del cerro Atacazo.

Metas

- Una Geodatabase con la información recopilada.
- Tres imágenes corregidas.
- Dos mapas con la detección de cambios a escala 1: 25 000.
- Un manual con la metodología de la detección de cambios.
- Tres mapas temáticos de cobertura vegetal y uso de suelo de los años 2011, 2015 y 2019 para escala 1:25 000.
- Un informe con el análisis de las matrices de confusión generadas.
- Un modelo prospectivo del cambio de ocupación de suelo para el año 2030.
- Un Informe del análisis del cambio de uso de suelo.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describe el enfoque teórico básico utilizado en la presente investigación; en el cual, las principales ramas son la fotogrametría y la teledetección. Asimismo, se mencionan aspectos como: corrección geométrica, corregistro de imágenes, ocupación del suelo, leyenda temática, clasificación de imágenes, detección de cambios, modelación, cadenas de Markov, autómatas celulares, evaluación de la exactitud posicional, validación de la cartografía temática y áreas de protección y conservación ambiental.

Fotogrametría

La fotogrametría es la técnica la cual tiene como objetivo estudiar y definir con precisión características métricas y geométricas (forma, dimensión y ubicación) en el espacio de un objeto o área a través de medidas hechas sobre una o más fotografías (Quirós, 2014).

Ortorrectificación

La ortorrectificación es el proceso en el cual se corrige la geometría de una imagen, en este proceso se remueve la distorsión geométrica presente en las imágenes, ocasionada por el desplazamiento debido al relieve, curvatura terrestre, orientación y error sistemático asociado con la cámara o el sensor (ERDAS Inc., 2022).

El proceso de ortorrectificación toma las imágenes digitales sin procesar, utilizando el modelo digital de superficie (MDS) y los resultados de la triangulación, se crea una imagen ortorrectificada, donde cada píxel dentro de la imagen posee fidelidad geométrica. Por lo tanto, las medidas tomadas de una imagen ortorrectificada representan las medidas correspondientes como si se hubieran elegido en la superficie de la tierra (ERDAS Inc., 2022).

Ortofotos

Una ortofoto es una imagen formada por una o más fotografías aéreas en la que se han corregido los desplazamientos y distorsiones producidos por el movimiento e inclinación de la cámara o sensor, la altura de vuelo y el relieve del terreno. Tiene una proyección cartográfica, por lo que, posee las características geométricas de un mapa (Instituto Geográfico Militar, 2008b; Vojkovic, 1996).

Las ortofotos permiten realizar mediciones precisas, puesto que combinan las propiedades geométricas un plano con el alto nivel de detalle de las fotografías aéreas, por lo que, las convierten en valiosos insumos para la planificación del territorio (SIGTIERRAS, 2022).

Teledetección

La teledetección es “la técnica que permite adquirir información de un objeto, área o fenómeno a través del análisis de datos usando dispositivos que no están en contacto con dicho objeto, área o fenómeno estudiado” (Lillesand et al., 2015).

Sabins y Ellis (1997), definen a la teledetección como “la ciencia de adquirir, procesar e interpretar imágenes y datos, que normalmente se obtienen de aeronaves y satélites con sistemas de sensores que registran digitalmente la interacción entre la energía electromagnética y la materia. La fotografía aérea, las imágenes satelitales y el radar son formas de datos de detección remota”.

Radiación electromagnética

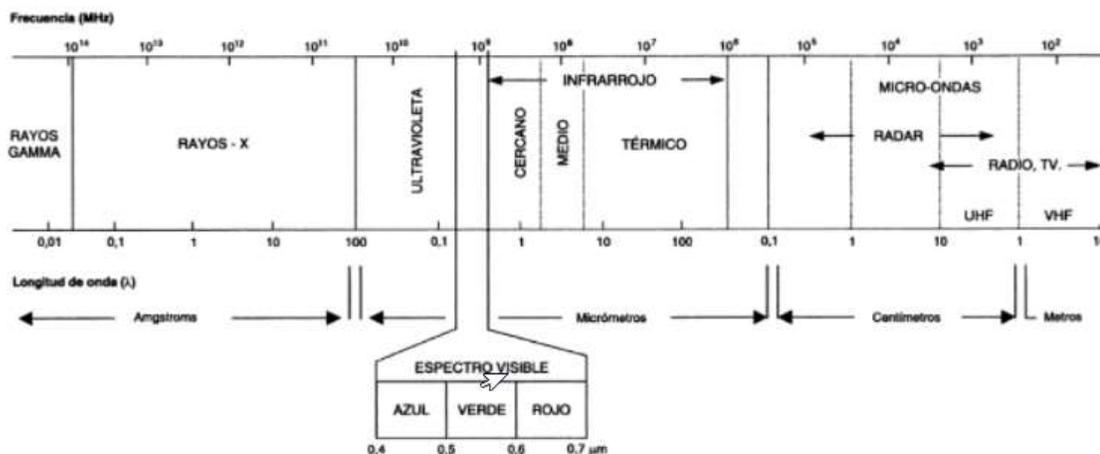
Los sensores de las plataformas de teledetección suelen registrar la radiación electromagnética. De acuerdo con Star y Estes (1990), la radiación electromagnética es energía transmitida a través del espacio en forma de ondas eléctricas y magnéticas las cuales se propagan por el espacio a la velocidad de la luz.

Espectro electromagnético

Chuvieco (2008) señala que, “el espectro electromagnético es el rango de radiación electromagnética clasificado principalmente por su longitud de onda que se extiende desde las ondas cósmicas hasta las ondas de radio”, como se observa en la figura 2.

Figura 2

Espectro electromagnético



Nota. Recuperado de (Chuvieco, 2008).

Resolución del Sensor

Los sensores tienen algunas particularidades que determinan las características de las imágenes que van a proporcionar; es por ello que, cuando se trabaja con imágenes se debe tener en cuenta los diferentes tipos de resolución del sensor:

Resolución espacial. Es una medida del objeto más pequeño que puede ser identificada por el sensor, o el área en el suelo representada por cada píxel (ERDAS Inc., 2022).

Resolución espectral. Indica el número de bandas espectrales y los intervalos de longitud de onda específicos que un sensor puede registrar (ERDAS Inc., 2022).

Resolución radiométrica. Se refiere a la cantidad de niveles digitales en la que es posible guardar la información recibida por una imagen (indicado por el número de bits) (ERDAS Inc., 2022).

Resolución temporal. Es la frecuencia con la que un sensor capturan imágenes de un área en particular (ERDAS Inc., 2022).

Corrección Geométrica

La corrección geométrica es un requisito previo para la mayoría de aplicaciones de medición y monitoreo, pues, la finalidad de este proceso es cambiar la geometría de los píxeles de una imagen de tal manera que se encuentren en su posición correcta y exacta en la superficie de la tierra, tratando de no alterar su radiometría (Green et al., 2000).

Este procedimiento se usa con la finalidad de realizar ajustes entre dos o más imágenes de geometría similar, que cubren la misma área geográfica, y hacer coincidir los elementos geográficos existentes; esta condición es necesaria ya que se obtiene resultados comparables entre las imágenes usadas (Valdez et al., 2006).

De acuerdo con Chuvieco (2008), el proceso de corrección geométrica, se realiza en tres etapas: localización de los puntos de control, cálculo de las funciones de transformación y finalmente, la transformación de los niveles digitales originales a la posición corregida. A continuación, se detalla cada una de estas etapas.

Localización de puntos de control

En esta etapa se requiere contar con las coordenadas de una serie de puntos comunes entre la imagen y una fuente de mayor precisión llamados puntos de control, pues, con estas coordenadas se estiman las funciones de transformación y, la calidad de la georreferenciación dependerá del cuidado con que se localicen. Por ello, hay que tomar en cuenta el número, la ubicación y la distribución de los puntos de control (Chuvieco, 2008).

- El número óptimo de puntos de control es dependiente del tamaño, la complejidad geométrica de la imagen y la topografía del terreno. Green et al. (2000), menciona que en términos matemáticos se requieren de 3 puntos de control para un polinomio de

primer orden, 6 para uno de segundo y 10 para uno de tercero. Sin embargo, estos son solo números para asegurar que sea matemáticamente posible calcular los coeficientes de las ecuaciones. Algunos textos estadísticos recomiendan que entre 10 y 15 puntos de control se dan resultados aceptables.

- Para la ubicación de los puntos de control, se aconseja colocarlos en sitios identificables, así como objetos perfectamente reconocibles (por ejemplo, intersección de senderos, esquinas de canchas o cruce de ríos) (Chuvienco, 2008).
- En cuanto a la distribución, los puntos tienen que estar ubicados de manera homogénea por toda la imagen, además, debe tener en cuenta los cambios que se presenten en el relieve (zonas con pendientes altas necesitan mayor densidad de puntos para un mejor ajuste) (Chuvienco, 2008).

Por otro lado, es importante señalar que hay que colocar los puntos de control en sitios que prevalezcan en la época, es decir que no vayan a modificarse o desplazarse y que de preferencia estén al ras del suelo (Chuvienco, 2008).

Cálculo de las funciones de transformación

Según Green et al., (2000), en esta etapa las coordenadas de cada píxel se transforman matemáticamente en las coordenadas de la proyección elegida, utilizando funciones de transformación. Normalmente se emplean transformaciones de tipo:

Lineal (polinomio de grado 1).

$$X = Ax + By + C \quad [1]$$

$$Y = Ax + By + C \quad [2]$$

Cuadrático (polinomio de grado 2).

$$X = Ax + By + Cx^2 + Dy^2 + Exy + F \quad [3]$$

$$Y = Ax + By + Cx^2 + Dy^2 + Exy + F \quad [4]$$

Donde:

X, Y: son las coordenadas de los píxeles de la imagen corregida.

x, y: son las coordenadas de los píxeles de la imagen sin corregir.

A, B, C, D, E y F: son los coeficientes obtenidos a través del método de mínimos cuadrados.

Los coeficientes de las ecuaciones anteriormente descritas pueden ser calculados mediante el método de mínimos cuadrados; una vez obtenidos estos coeficientes, ya se puede derivar coordenadas corregidas a partir de cualquier par de coordenadas de la imagen de origen (Green et al., 2000).

Por otro lado, se utiliza polinomios de segundo orden para realzar rectificaciones de imagen más complejas y no lineales. Los cambios no lineales incluyen la transformación de datos de latitud y longitud a una proyección plana como UTM y la corrección de los efectos de la curvatura de la Tierra en áreas extensas. Se recomienda polinomios de segundo grado para usar imágenes de satélite (Green et al., 2000).

En cambio, los polinomios de tercer orden se utilizan para fotografías aéreas e imágenes radar (Green et al., 2000).

Transferencia de los niveles digitales originales a la posición corregida

Chuvieco (2008), muestra que en esta etapa se transfiere la información de los píxeles de la imagen original a los píxeles de la imagen transformada, para posibilitar este proceso comúnmente se emplean los siguientes métodos de interpolación (ver figura 3):

Vecino más cercano. Asigna a cada píxel el valor del ND del píxel más cercano en la imagen original. Este método es el más rápido y el que menos altera a los ND originales (Chuvieco, 2008).

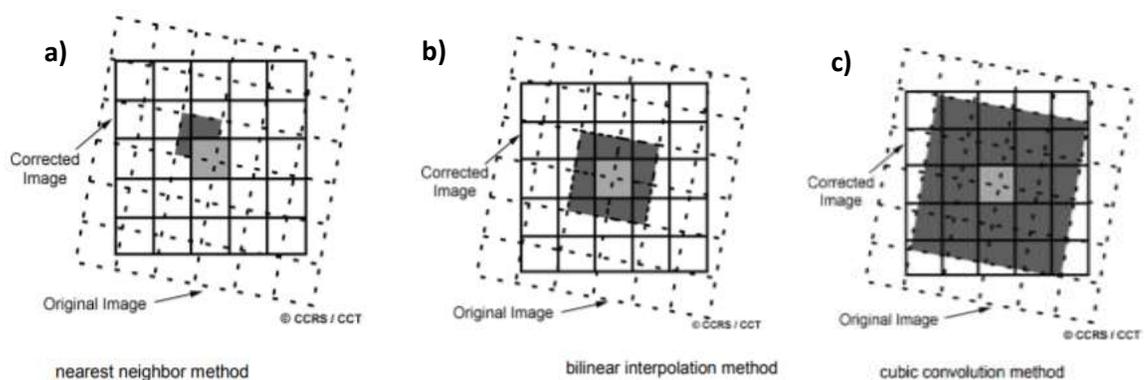
Interpolación Bilineal. Asigna el valor promedio del ND de los 4 píxeles más cercanos en la imagen original (Chuvieco, 2008).

Convolución Cúbica. Promedia el valor de los ND de los 16 píxeles más cercanos de la imagen original (Chuvieco, 2008).

A continuación, en la figura 3 se observan los tres métodos de interpolación radiométrica en la asignación de los niveles digitales.

Figura 3

Métodos de interpolación



Nota. a) Vecino más cercano, b) Interpolación bilineal, c) Convolución cúbica. Recuperado de (Ouattara et al., 2004).

La elección del procedimiento de transferencia de los niveles digitales está en función del objetivo con que se usará la imagen. Para la situación de imágenes clasificadas, la elección lógica es el procedimiento del vecino más cercano, debido a que al no incorporar promedios preserva los valores originales de los ND (Chuvieco, 2008).

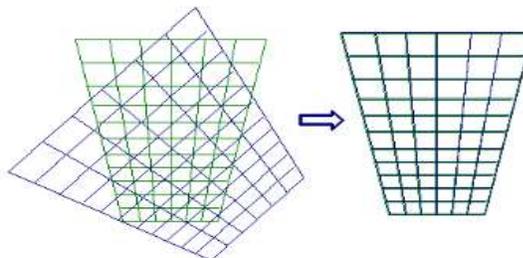
Registro o Corregistro de imágenes

El registro de imágenes alinea geoméricamente dos imágenes con diferente geometría de visualización o diferentes distorsiones del terreno en el mismo sistema de coordenadas para que los píxeles correspondientes representen los mismos objetos. Este proceso se realiza mediante la localización y coincidencia de puntos característicos en las imágenes. Por lo general, esos puntos se denominan puntos de empate (Jin, 2018).

A continuación, en la figura 4 se aprecia el registro de imágenes, donde la imagen esclava está representada de color azul y la imagen de referencia con color verde.

Figura 4

Registro de imágenes



Nota. Recuperado de (ERDAS Inc., 2022).

Un punto de empate es un punto ubicado en una imagen digital o fotografía aérea que representa la misma ubicación en una imagen adyacente o fotografía aérea. Expresados como un par; los puntos de empate se pueden usar para vincular imágenes y crear mosaicos (ESRI, 2022).

Según Bostelmann et al. (2017), la importancia en la generación de los puntos de empate radica en una distribución homogénea de los mismos y la correcta especificación del método de ajuste fotogramétrico, que aumenta la fiabilidad de las ortofotos.

Ocupación del suelo

La ocupación del suelo se refiere al estudio de la superficie terrestre teniendo como objetivo clasificar y describir la cubierta, el uso del suelo y demás características susceptibles en la gestión del territorio; es decir, que la ocupación del suelo engloba dos componentes distintos (cobertura del suelo y uso del suelo) pero relacionados entre sí (IGN, 2014c).

Cobertura del suelo (Land Cover, LC)

Se refiere a la categorización de la superficie terrestre en distintas unidades según sus propiedades biofísicas; por ejemplo, superficie urbana, cultivos, arbolado forestal, etc.

La cubierta del suelo se puede obtener por simple observación sobre ortofotos, satélites, bases topográficas y mediante técnicas automáticas de procesado, fotointerpretación o visita a campo (IGN, 2014c).

Uso de del suelo (Land Use, LU)

Se refiere a la clasificación del territorio según su dimensión funcional o su dedicación socioeconómica actual; por ejemplo, uso residencial, uso industrial, uso recreativo, etc. El uso de suelo no se obtiene sólo por observación, sino que se requiere recurrir a inventarios sociales, planes urbanísticos y fuentes de diversas actividades económicas (IGN, 2014c).

Leyenda temática

Es el conjunto de clases que muestran una guía para ayudar a interpretar los significados de los recursos gráficos usados en el mapa, tanto para variables cuantitativas (altitud) o nominales (vegetación) (Pilar, 2008).

Existen varias leyendas temáticas referentes a los sistemas de ocupación del suelo, las cuales pueden clasificarse en función del territorio que abarcan (IGN, 2014c). A continuación, se mencionan algunos ejemplos:

- Globales o mundiales (GLobCover, Global land cover).
- Continentales (CORINE Land Cover).
- Nacionales (SIOSE de España, LISA de Austria).
- Subnacionales o locales (SIOSE Andalucía).

Leyenda temática del Ecuador

La leyenda temática de uso y cobertura de suelo para el Ecuador ha sido generada por varias instituciones, tiene una jerarquía anidada y está organizada por niveles. El primer nivel cuenta con 6 clases las cuales fueron definidas por el IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) en el 2006, el segundo nivel cuenta con 16 clases que

fueron definidas por varias instituciones encargadas de la generación de información de cobertura de la tierra: Ministerio del Ambiente (MAE), Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos (CLIRSEN), Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca (MAGAP), Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE) (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2012).

A continuación, la tabla 1 indica las clases de cobertura y uso de la tierra del nivel I y II.

Tabla 1

Leyenda temática de cobertura y uso de la tierra, nivel I y nivel II

Nivel I	Nivel II
Bosque	Bosque Nativo
	Plantación Forestal
Vegetación arbustiva y herbácea	Vegetación arbustiva
	Páramo
	Vegetación herbácea
Tierra agropecuaria	Cultivo Anual
	Cultivo semipermanente
	Cultivo permanente
	Pastizal
	Mosaico agropecuario
Cuerpo de agua	Natural
	Artificial
Zona antrópica	Área poblada
	Infraestructura
Otras tierras	Área sin cobertura vegetal
	Glaciar
Sin información	Sin información

Nota. Recuperado de (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2012).

Unidad mínima de mapeo

Es la unidad más pequeña de superficie que puede ser delimitada en un mapa. Varía en función de la escala de presentación del trabajo (nivel de detalle) y del objeto de estudio (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2016). Además, permite indicar que a partir de determinada área espacial, los polígonos y sus correspondientes contenidos deben ser generalizados (Priego et al., 2010).

En el caso de Ecuador, el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) en la Metodología de Valoración de Tierras Rurales emplea la siguiente ecuación de cálculo de la unidad mínima de mapeo (MAGAP, 2008).

$$UMM = UMV * \text{área de acuerdo a la escala} \quad [5]$$

Donde:

UMV: Unidad mínima visible

Según Priego et al. (2010), la unidad mínima visible más usada a nivel mundial es de 5mmx5mm; sin embargo, también se utiliza debido a la experiencia 4mmx4mm con la finalidad de obtener una adecuada lectura del mapa y asegurar la operatividad cartográfica.

Sistema de información de la ocupación del suelo en España (SIOSE)

El SIOSE es un proyecto enmarcado dentro del Plan Nacional de Observación del Territorio en España (PNOT) cuyo objetivo es integrar la información de las bases de datos de coberturas y usos del suelo de las ciudades Autónomas y de la Administración General del Estado (IGN, 2014b).

Actualmente, existen cinco versiones del SIOSE con fechas de referencia: 2005, 2009, 2011, 2014 y 2017 (Plan Nacional de Observación del Territorio, 2021).

Características técnicas del SIOSE

- Sistema geodésico de referencia y proyección: ETRS89 UTM, husos 28,29,30, y 31.
- Escala de referencia geométrica: 1:25 000.
- Precisión geométrica final tendrá un Error Medio Cuadrático: $EMC(x, y) \leq 5m$.
- La unidad geométrica es el polígono.

Modelo de datos SIOSE

SIOSE se diferencia de otros sistemas de ocupación de suelo por su modelo de datos. El modelo de datos SIOSE es orientado a objetos, pues, puede asignar más de una clase por polígono, lo que permite describir de mejor manera el territorio. La asignación de clases se hace mediante su porcentaje de ocupación (IGN, 2014b).

IGN (2014b), indica los beneficios de trabajar con un modelo orientado a objetos los cuales son:

- Se realiza una mejor descripción, las clases son más realistas y útiles.
- La unidad mínima de resolución no es un limitante, pero se aconseja no representar porcentajes de clases menores a 5%.
- Los datos resultantes pueden servir para diferentes estudios.

Por otra parte, (IGN, 2014b), muestra las desventajas de trabajar con un modelo de datos orientado a objetos los cuales son:

- Su producción es más costosa que los sistemas de clasificación tradicionales.
- Manejo y explotación más complicada.

A continuación, se ilustra en la figura 5 los diferentes modelos de datos.

Figura 5

Modelo de datos jerárquico vs. Modelo de datos orientado a objetos



Nota. Recuperado de (IGN, 2014b).

Leyenda SIOSE

El SIOSE se compone de clases simples y compuestas, a continuación, se describe cada una de ellas.

Clases Simples

El SIOSE tiene 40 clases simples, se las denomina simples porque todo polígono SIOSE debe comprenderse siempre por ellas, y la suma de estas ha de ser siempre igual a 100%. Las clases simples dan reflejo a elementos (árbol, roca, agua, edificio) (IGN, 2014b).

A continuación, se describen las clases simples usadas para este estudio:

Arbolado Forestal. Superficie con especies forestales arbóreas como manifestación vegetal de estructura vertical dominante que en condiciones climáticas normales, superan los 5 m de altura (IGN, 2015). En la figura 6, se puede observar un ejemplo de la clase simple arbolado forestal.

Figura 6

Ejemplo de arbolado forestal



Nota. Las flechas indican el objeto; a la izquierda, arbolado forestal en una imagen SPOT 5 bandas 321 y a la derecha, en una ortofotografía color natural. Recuperado de (IGN, 2011).

Cultivos. Superficie cultivada y labrada regularmente, incluye tierras con cultivos en distintas alternativas de rotación, cultivos permanentes, cultivos bajo plástico y cultivos en invernadero (IGN, 2015). La figura 7 ilustra un ejemplo de la clase simple cultivos.

Figura 7

Ejemplo de cultivos



Nota. Las flechas indican el objeto; a la izquierda, cultivos en una imagen SPOT 5 bandas 321 y a la derecha, en una ortofotografía color natural. Recuperado de (IGN, 2011).

Edificaciones. Construcciones fijas, hechas con materiales resistentes, destinadas a alojar personas, animales, vehículos, maquinaria, materiales, etc., con cualquier fin (residencial, comercial, industrial, etc.) (IGN, 2015). En la figura 8, se logra observar un ejemplo de la clase simple edificaciones.

Figura 8

Ejemplo de edificaciones

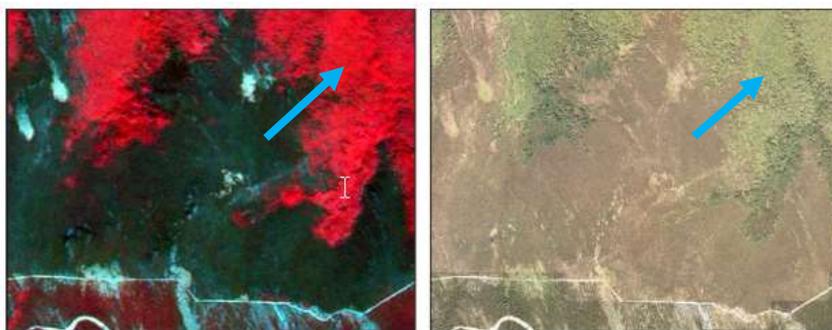


Nota. La flecha indica el objeto; edificaciones en una ortofotografía color natural (Autores).

Matorral. Superficie cubierta por vegetación arbustiva formada por especies leñosas, presentándose en general muy ramificada y pudiendo llegar desde el porte arbustivo hasta el achaparrado y rastrero (IGN, 2015). La figura 9 muestra un ejemplo de la clase simple matorral.

Figura 9

Ejemplo de matorral



Nota. Las flechas indican el objeto; a la izquierda, matorral en una imagen SPOT 5 bandas 321 y 322 y a la derecha, en una ortofotografía color natural. Recuperado de (IGN, 2011).

Páramo. Se ubican en montañas elevadas, fundamentalmente en los pisos bioclimáticos más altos (alpino y crioromediterráneo) y usualmente, estos se cubren de nieve en el invierno (IGN, 2015). Los pastizales no tienen elementos limitantes y tienden a presentar una geometría irregular, por lo que, sus dimensiones son muy variables (IGN, 2011). En la figura 10, se puede ver un ejemplo de la clase simple páramo.

Figura 10

Ejemplo de páramo



Nota. Las flechas indican el objeto; a la izquierda, páramo en una imagen SPOT 5 bandas 321 y a la derecha, en una ortofotografía color natural. Recuperado de (IGN, 2011).

Prado. Es una superficie llana o de pendiente suave, en la cual crece hierba con el propósito de producir pasto para el ganado y forraje para conservar. Por lo general, suelen localizarse próximos a asentamientos agrícolas (IGN, 2015). La figura 11 muestra un ejemplo de la clase simple prado.

Figura 11

Ejemplo de prado



Nota. Las flechas indican el objeto; a la izquierda, prado en una imagen SPOT 5 bandas 321 y a la derecha, en una ortofotografía color natural. Recuperado de (IGN, 2011).

Suelo desnudo. Zonas que debido a las circunstancias extremas de clima, suelo, topografía, erosión, o cualquiera otra, presentan la mayor parte de su superficie desnuda de vegetación, incluso herbácea (IGN, 2015). En la figura 12, se puede observar un ejemplo de la clase simple suelo desnudo.

Figura 12

Ejemplo de suelo desnudo



Nota. Las flechas indican el objeto; a la izquierda, suelo desnudo en una imagen SPOT 5 bandas 321 y a la derecha, en una ortofotografía pancromática. Recuperado de (IGN, 2011).

Suelo no edificado. Superficies sin asfaltar o cementar que pueden existir en zonas urbanas. Pueden tener o no vegetación natural. Se incluyen solares, parcelas sin edificar, pero ya urbanizadas dentro de las urbanizaciones que tendrán la vegetación original de la zona (IGN, 2015). La figura 13 indica un ejemplo de la clase simple suelo no edificado.

Figura 13

Ejemplo de suelo no edificado



Nota. La flecha indica el objeto; suelo no edificado en una ortofotografía color natural (Autores).

Vial, aparcamiento o zona peatonal sin vegetación. Superficies asfaltadas o cementadas por las que circulan o aparcan vehículos o transitan los peatones. Se incluyen carreteras (autopistas, autovías: nacionales, autonómicas y provinciales), aparcamientos al aire libre, superficie de la calle por las que circulan los vehículos, aceras, superficies cementadas de parques y jardines, etc. (IGN, 2015). La figura 14 ilustra un ejemplo de la clase simple vial.

Figura 14

Ejemplo de vial, aparcamiento o zona peatonal sin vegetación



Nota. La flecha indica el objeto; vial, aparcamiento o zona peatonal sin vegetación en una ortofotografía color natural.

Zona de extracción. Terrenos severamente alterados por actividades antrópicas (minería, obras públicas) incluyendo canteras, escombreras, cortas de mina, movimientos de tierra, etc. (IGN, 2015). La figura 15 indica un ejemplo de la clase simple zona de extracción.

Figura 15

Ejemplo de zona de extracción

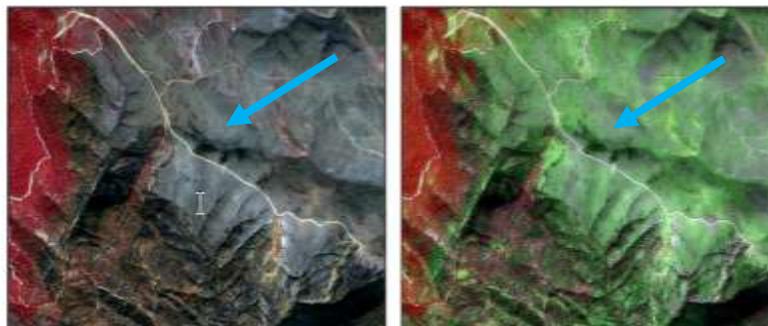


Nota. Las flechas indican el objeto; a la izquierda, zona de extracción en una imagen SPOT 5 color natural y a la derecha, en una ortofotografía color natural. Recuperado de (IGN, 2011).

Zonas Quemadas. Superficies afectadas por incendios forestales recientes y que son todavía visibles en las imágenes de satélite (IGN, 2015), tal como se observa en la figura 16.

Figura 16

Ejemplo de zonas quemadas



Nota. Las flechas indican el objeto; a la izquierda, zona quemada en una imagen SPOT 5 bandas 321 y a la derecha, en una imagen SPOT 5 bandas 342. Recuperado de (IGN, 2011).

Clases Compuestas

El SIOSE tiene 45 clases compuestas, se las denomina compuestas, pues, se forman por el agrupamiento de clases simples SIOSE. Las clases compuestas dan reflejo a elementos más complejos de coberturas y usos (polígono industrial, casco urbano, planta de tratamiento). La suma de clases compuestas no tiene por qué sumar 100% dentro del polígono, pero no puede haber clases compuestas sin clases simples dentro (IGN, 2014b).

A continuación, se describen las clases compuestas más relevantes para este estudio:

Asentamiento agrícola residencial. Zonas donde hay un claro y principal uso residencial del suelo, caracterizado por un poblamiento disperso de edificaciones o bien concentraciones de pequeños núcleos de casas. Alrededor de estos asentamientos coexisten parcelas cultivadas con hortalizas y cultivos leñosos, constituyendo una ocupación secundaria del suelo destinada al autoconsumo (IGN, 2015).

Los asentamientos agrícolas residenciales son coberturas compuestas con nombre propio, que deben identificarse con el porcentaje (%) de las coberturas simples que la componen. Deben contener obligatoriamente porcentajes de las coberturas simples: cultivos y edificación; además, pueden contener porcentajes de coberturas como: vial, aparcamiento o zona peatonal sin vegetación, suelo no edificado, lámina de agua artificial (IGN, 2015).

En la figura 17, se observa un ejemplo de la clase compuesta zona agrícola residencial.

Figura 17

Ejemplo de zona agrícola residencial



Nota. Las flechas indican el objeto; a la izquierda, zona agrícola residencial en una imagen SPOT 5 bandas 321 y a la derecha, en una ortofotografía color natural. Recuperado de (IGN, 2011).

Casco. Zona urbana mixta consolidada caracterizada por tener una trama irregular, en ocasiones con parcelación “gótica” (parcelas muy estrechas y con mucho fondo), viales muy estrechos y pocas zonas verdes. Generalmente, responde a la topografía del terreno con crecimientos sobre las vías preexistentes y limitados por los sucesivos perímetros defensivos. La tipología de las edificaciones que lo forman, suelen ser de edificios compuestos normalmente de manzanas compactas (IGN, 2015).

Esta cobertura se forma de una o varias coberturas simples como: edificación, lámina de agua artificial, vial, aparcamiento o zona peatonal sin edificación, suelo no edificado y otras construcciones (IGN, 2015). La figura 18 ilustra un ejemplo de la clase compuesta casco.

Figura 18*Ejemplo de casco*

Nota. Las flechas indican el objeto; a la izquierda, casco en una imagen SPOT 5 color natural y a la derecha, en una ortofotografía color natural. Recuperado de (IGN, 2011).

Ensanche. Zona urbana mixta, que puede estar o no, ya consolidada, producida en base a un planeamiento urbano definido, que generalmente se desarrolla ordenando áreas en torno al casco existente. Se caracteriza por tener trama más regular, viales más anchos y mayor superficie de zonas verdes que el Casco y normalmente no tendrán por qué formar manzanas compactas (IGN, 2015).

Al igual que el casco, esta cobertura se forma de una o varias coberturas simples como: edificación, lámina de agua artificial, vial, aparcamiento o zona peatonal sin edificación, suelo no edificado y otras construcciones (IGN, 2015). La figura 19 muestra un ejemplo de la clase compuesta ensanche.

Figura 19*Ejemplo de ensanche*

Nota. Las flechas indican el objeto; a la izquierda, ensanche en una imagen SPOT 5 color natural y a la derecha, en una ortofotografía color natural. Recuperado de (IGN, 2011).

A continuación, en la figura 20 se ilustran las clases simples y compuestas del SIOSE, con su respectiva abreviatura.

Figura 20

Clases simples y compuestas del SIOSE

Nº	SIMPLES	Abr.	Nº	COMPUESTAS PREDEFINIDAS	Abr.
101	Edificación	EDF	701	Dehesa	DHS
102	Zona Verde Artificial y Arbolado Urbano	ZAU	702	Olivar-Viñedo	OVD
103	Lámina de Agua Artificial	LAA	703	Asentamiento Agrícola Residencial	AAR
104	Vial, Aparcamiento o Peatonal sin Vegetación	VAP	704	Huerta Familiar	UER
111	Otras Construcciones	OCT	811	Casco	UCS
121	Suelo No Edificado	SNE	812	Ensanche	UEN
131	Zonas de Extracción o Vertido	ZEV	813	Discontinuo	UDS
211	Arroz	CHA	821	Polígono Industrial Ordenado	IPO
212	Cultivos Herbáceos distintos de Arroz	CHL	822	Polígono Industrial sin Ordenar	IPS
222	Frutales Cítricos	LFC	823	Industrial Aislada	IAS
223	Frutales No Cítricos	LFN	831	Agrícola, Ganadero	PAG
231	Viñedo	LVI	832	Forestal Primario	PFT
232	Olivar	LOL	833	Minero Extractivo	PMX
241	Otros Leñosos	LOC	834	Piscifactoría	PPS
290	Prados	PRD	841	Comercial y Oficinas	TCO
300	Pastizal	PST	842	Complejo Hotelero	TCH
312	Frondosas Caducifolias	FDC	843	Parque Recreativo	TPR
313	Frondosas Perennifolias	FDP	844	Camping	TCG
316	Coníferas	CNF	851	Administrativo Institucional	EAI
320	Matorral	MTR	852	Sanitario	ESN
331	Playas, dunas y arenales	PDA	853	Cementerio	ECM
333	Suelo Desnudo	SDN	854	Educación	EDU
334	Zonas Quemadas	ZQM	855	Penitenciario	EPN
335	Glaciares y Nieves permanentes	GNP	856	Religioso	ERG
336	Ramblas	RMB	857	Cultural	ECL
351	Acantilados Marinos	ACM	858	Deportivo	EDP
352	Afloramientos Rocosos y Roquedos	ARR	859	Campo de Golf	ECG
353	Canchales	CCH	860	Parque Urbano	EPU
354	Coladas Lávicas	CLC	881	Red Viaria	NRV
411	Zonas Pantanosas	HPA	882	Red Ferroviaria	NRF
412	Turberas	HTU	883	Portuario	NPO
413	Salinas Continentales	HSA	884	Aeroportuario	NAP
421	Marismas	HMA	891	Eólica	NEO
422	Salinas Marinas	HSM	892	Solar	NSL
511	Cursos de Agua	ACU	893	Nuclear	NCL
513	Lagos y Lagunas	ALG	894	Eléctrica	NEL
514	Embalses	AEM	895	Térmica	NTM
521	Lagunas Costeras	ALC	896	Hidroeléctrica	NHD
522	Estuarios	AES	897	Gaseoducto Oleoducto	NGO
523	Mares y Océanos	AMO	900	Telecomunicaciones	NTC
			911	Depuradoras y Potabilizadoras	NDP
			912	Conducciones y Canales	NCC
			913	Desalinizadora	NDS
			921	Vertederos y Escombreras	NVE
			922	Plantas de Tratamiento	NPT

Nota. Recuperado de (IGN, 2014b).

Clasificación del suelo

El suelo se categoriza según su aprovechamiento en urbano y rural, a continuación se detalla cada uno de ellos (Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda, 2021).

Suelo urbano

Suelo dotado total o parcialmente de infraestructura básica y servicios públicos, ocupado por asentamientos urbanos concéntricos (Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda, 2021).

El suelo urbano se subclasifica en:

- **Suelo Urbano Consolidado.** Es aquel suelo urbano que se encuentra mayoritariamente ocupado por la edificación, cuenta con la totalidad de los servicios básicos, infraestructuras y equipamientos necesarios (Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda, 2021).
- **Suelo Urbano No Consolidado.** Es aquel suelo urbano que necesita de un proceso para mejorar la edificación, no cuenta con la totalidad de los servicios básicos, infraestructuras y equipamientos necesarios (Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda, 2021).
- **Suelo Urbano de Protección.** Es aquel suelo urbano que por presentar importantes cualidades biofísicas, culturales, sociales o paisajísticas, se prohíbe la ocupación según la legislación nacional y local correspondiente (Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda, 2021).

Suelo rural

Suelo cuya finalidad está ligada a actividades agroproductivas y forestales, ya que, por su condición natural, su interés paisajístico, histórico, cultural, o que, por sus especiales características biofísicas o geográficas debe ser protegido para futuros usos urbanos (Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda, 2021).

El suelo rural se categoriza en:

- **Suelo rural de producción.** Es aquel suelo rural que se encuentra prohibido la construcción y fraccionamiento, debido a que este suelo tiene la finalidad de actividades agroproductivas, acuícolas, ganaderas, forestales y de aprovechamiento turístico, respetuosas del ambiente (Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda, 2021).
- **Suelo rural para aprovechamiento extractivo.** Suelo destinado para actividades extractivas de recursos naturales no renovables, donde se asegura los derechos de la naturaleza de conformidad a lo previsto por la normativa vigente (Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda, 2021).
- **Suelo rural de expansión urbana.** Suelo que tiene la capacidad de ser habilitado para el uso urbano. No se asumirá este suelo si es identificado con un alto valor agropecuario por parte de la autoridad agraria nacional (Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda, 2021).
- **Suelo rural de protección.** Este suelo no es apto para recibir actividades que modifiquen su condición de suelo de protección, por lo que presenta capacidades especiales ambientales, biofísicas, paisajísticas, socioculturales, o por presentar factores de riesgo (Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda, 2021).

Clasificación de los usos de suelo en el Distrito Metropolitano de Quito

El uso del suelo, según la Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda (2021), se clasifica en:

- **Residencial (R).** Son aquellos polígonos de intervención rurales o urbanos que tienen como finalidad la vivienda permanente (Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda, 2021).
- **Agrícola residencial (AR).** Son zonas con baja densidad poblacional, localizados próximos a las áreas urbanas consolidadas, donde existen viviendas dispersas, actividades agrícolas, pecuarias y pesca (Plan de Uso y Ocupación del Suelo, 2016).

- **Suelo de expansión (SE).** Son aquellos polígonos de intervención territorial, los cuales pertenecen únicamente a la subcategorización de suelo rural de expansión urbana, donde su finalidad dependerá de las decisiones de planeamiento para su incorporación a suelo urbano y la situación del territorio circundante (Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda, 2021).
- **Área promoción (ZC).** Son áreas destinadas al desarrollo de proyectos urbanísticos y económicos (Plan de Uso y Ocupación del Suelo, 2016).
- **Múltiple (M).** Son aquellos polígonos de intervención territorial, donde puede existir comercio, residencia, industrias de bajo impacto, servicios y equipamientos compatibles según las disposiciones del Plan de Uso y Gestión del Suelo (PUGS) (Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda, 2021).
- **Patrimonio Cultural (PC).** Son aquellos polígonos de intervención territorial rurales o urbanos, que constituyan bienes patrimoniales de orden cultural, natural, tangibles e intangibles, que son de vital importancia para el proceso de desarrollo de los asentamientos humanos (Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda, 2021).
- **Industria (I).** Son aquellos polígonos de intervención territorial urbanos o rurales, cuya finalidad es la elaboración, transformación, tratamiento y manipulación de materias primas para producir bienes (Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda, 2021).
- **Equipamiento (E).** Son aquellos polígonos de intervención territorial rurales o urbanos; los cuales, están, destinados a actividades que generen bienes y servicios para satisfacer las necesidades de la población (Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda, 2021).
- **Protección Ecológica (PE).** Son aquellos polígonos de intervención territorial rurales o urbanos, cuya finalidad es la conservación del patrimonio natural, donde el objetivo

principal es aquel de proteger y restaurar la diversidad ecológica (Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda, 2021).

- **Recurso natural renovable (RNR).** Son aquellos polígonos de intervención territorial en suelo rural, cuya finalidad es el manejo, producción sostenible, uso racional y eficiente de los recursos naturales renovables, debido a las condiciones agroclimáticas, biofísicas y a la aptitud del suelo (Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda, 2021).
- **Recurso natural no renovable (RNNR).** Son aquellos polígonos de intervención territorial en suelo rural, cuya finalidad está ligada a la explotación, exploración, extracción racional, manejo y beneficio de recursos naturales no renovables, de conformidad a la normativa nacional vigente (Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda, 2021).

De acuerdo a la Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda (2021), la asignación de lote mínimo en suelo rural será:

- En suelos con uso de Recurso Natural Renovable, el lote mínimo no podrá tener un área menor 5 000 m² para ayudar a la producción agrícola (Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda, 2021).
- En suelos con uso Residencial, el lote mínimo no podrá ser menor a 1 000 m², ni mayor a 5 000 m², cuya finalidad es permitir la vivienda y la producción agrícola de consumo local y autoconsumo (Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda, 2021).
- En suelos con uso Protección Ecológica, el lote mínimo no podrá ser menor 25 000 m², cuya finalidad es frenar el fraccionamiento del suelo de alta biodiversidad; cabe mencionar que, en los usos de protección ecológica con quebradas según los códigos de edificabilidad, no se permite la subdivisión de lotes (Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda, 2021).

Por otra parte, la asignación de lote mínimo en suelo urbano será:

- En suelos con uso Residencial, el lote mínimo no podrá ser menor a 200 m² (Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda, 2021).
- Según la Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda (2021), las divisiones mínimas permitidas de acuerdo con los usos de suelos serán:

Industriales 600 m², comercios y servicios especializados 300 m², múltiple 200 m², residencial urbano 200 m², protección ecológica 25 000 m², protección arqueológica 600 m², protección urbana patrimonial 200 m² (Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda, 2021).

Clasificación de los usos de suelo en el cantón Mejía

La Dirección de Planificación Territorial (2021) del cantón Mejía, clasifica a los usos de suelo en los siguientes:

- **Residencial (R).** Es aquel cuya actividad primordial es la vivienda, desarrollo de equipamientos y servicios básicos (Dirección de Planificación Territorial, 2021).
- **Múltiple (M).** Es aquel uso donde destaca la combinación de usos de suelo (Dirección de Planificación Territorial, 2021).
- **Industrial (I).** Uso de suelo en el cual se desarrolla actividades de elaboración, transformación, tratamiento y manipulación de materias primas con la finalidad de producir bienes (Dirección de Planificación Territorial, 2021).
- **Equipamiento (EQ).** Es el uso destinado a actividades que originen bienes y servicios para cubrir las necesidades de la población (Dirección de Planificación Territorial, 2021).
- **Protección.** Es aquel uso que garantiza la calidad ambiental, el equilibrio ecológico y el desarrollo sustentable. En estos usos se prohíben, y controlan la vivienda y/o los asentamientos humanos (Dirección de Planificación Territorial, 2021).

Según la Dirección de Planificación Territorial (2021), los usos de protección se categorizan en:

Protección ecológica (PEC). Son suelos no urbanizables, que conservan los remanentes naturales de vegetación nativa y endémica de la zona (Dirección de Planificación Territorial, 2021).

Conservación del patrimonio natural (CPN). Son zonas destinadas específicamente a la conservación del patrimonio natural bajo un enfoque de gestión ecosistemática, que asegura la calidad ambiental y el desarrollo sustentable (Dirección de Planificación Territorial, 2021).

Producción, protección, conservación y uso sostenible (PPCUS). Son zonas de amortiguamiento entre lo rural de producción y las áreas de conservación del patrimonio natural, estas zonas deberán adherirse a planes de manejo zonal con la finalidad de proteger y conservar los remanentes naturales existentes (Dirección de Planificación Territorial, 2021).

- **Actividad logística (AL).** Estas zonas se encuentran en suelo rural de protección y suelo urbano no consolidado, son áreas especializadas en actividades de distribución y logística (Dirección de Planificación Territorial, 2021).
- **Uso de actividad Recurso Natural de Producción Sostenible (RNPS).** Son áreas de usos productivos formados por predios irregulares que presentan condiciones ambientales y biofísicas para ser empleadas en actividades recreativas, producción pecuaria, agrícola, forestal, acuícola, de conservación agraria, etc. (Dirección de Planificación Territorial, 2021).

- **Actividad minera (AM).** Se encuentran en suelo rural de aprovechamiento extractivo, son zonas enfocadas a la explotación del subsuelo para la extracción de materiales (Dirección de Planificación Territorial, 2021).

Clasificación de imágenes

Los métodos para clasificar imágenes se dividen en dos subgrupos: el primer grupo, se refiere a la clasificación de imágenes basada en la fotointerpretación y digitalización, y el segundo grupo, tiene que ver con la clasificación de imágenes basada en el tratamiento automático o semiautomático por parte del ordenador. A continuación, se describen cada uno de ellos.

Clasificación de imágenes basadas en la interpretación y digitalización

Interpretación

La interpretación es el proceso de extraer información de la superficie terrestre mediante la observación de una imagen, esto se lo hace a través de las formas, texturas, sombras y combinaciones de bandas con el fin de reconocer las características del terreno (IGN, 2014a).

Hay que tomar en cuenta que no existen reglas fijas para interpretar, es decir que existe un componente de subjetividad; tan solo la práctica, la imaginación sumado a un amplio conocimiento del territorio, permiten conseguir una identificación satisfactoria (IGN, 2014a).

Criterios visuales para interpretación de imágenes

De acuerdo con Chuvieco (1990), las imágenes tienen algunas características básicas, las cuales ayudan a la fotointerpretación como: el tono, color, textura, situación espacial, sombras, patrón espacial, contorno y formas. A continuación, se describen cada una de ellas:

Tono. Hace referencia a la intensidad de energía recibida por el sensor para una determinada banda del espectro. En una imagen los tonos oscuros y claros varían su significado

de acuerdo a la banda del espectro en la que se encuentra la respuesta espectral. Para distinguir algunos rasgos espaciales en función del tono se recomienda usar ciertas bandas, por ejemplo: para identificar el trazado urbano se usa la banda verde y rojo; para la vegetación las bandas más usadas son el rojo y el infrarrojo, y para identificar la turbidez en el agua la banda azul (Chuvieco, 1990).

Color. El ojo humano percibe las longitudes de ondas entre 400 y 700 nm, separando la energía recibida en tres componentes conocidos como colores primarios (rojo, verde, azul) con los cuales se puede componer cualquier otro color. Además, de acuerdo a las bandas que recoja información el sensor se pueden realizar varias composiciones en falso color, las cuales pueden ayudar a la interpretación de las imágenes (Chuvieco, 1990).

Textura. Esta característica se refiere a la aparente rigurosidad o suavidad de una región de la imagen y hace referencia al contraste tonal entre los píxeles que componen las diferentes cubiertas. La textura procede de la relación entre el tamaño de los objetos y la resolución del sensor. El criterio de textura permite discriminar determinadas cubiertas que pueden ofrecer un comportamiento espectral uniforme (Chuvieco, 1990).

Situación espacial. Se refiere a la ubicación del área de interés y su relación con los elementos vecinos de la imagen (Chuvieco, 1990).

Sombras. Característica que permite obtener información de formas y tamaños que no son percibidas desde la vista nadiral; además que permiten la interpretación de ciertos rasgos geomorfológicos y de textura (Chuvieco, 1990).

Patrón espacial. Se refiere a la organización espacial de los objetos en un conjunto (Chuvieco, 1990).

Contorno. Característica que facilita el reconocimiento de ciertos rasgos; por ejemplo: sirve para diferenciar vías de ferrocarril y carreteras o diferenciar ríos y canales (Chuvieco, 1990).

Formas. Esta característica permite diferenciar elementos individuales, por ejemplo: aeropuertos, complejos, estadios, volcanes, etc (Chuvieco, 1990).

Digitalización

La digitalización hace referencia al trazado y registro en formato vectorial de los objetos de la superficie mediante puntos, líneas o polígonos, cabe recalcar que, este proceso depende del operador y la experiencia del mismo (IGN, 2014a). A continuación, se detallan algunas pautas:

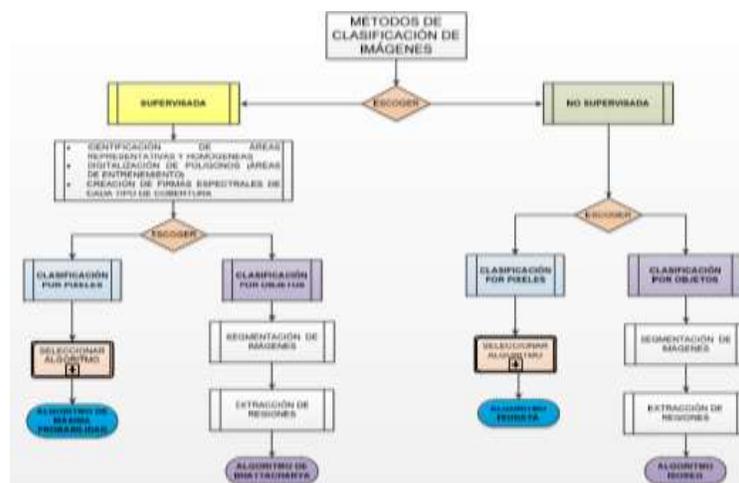
- Dividir toda el área a digitalizar en áreas de trabajo manejables, tomando en cuenta los límites viales, hidrográficos o municipales (IGN, 2014a).
- Trazar ordenadamente los polígonos de grupos en grupos o en forma de espiral, tomando en cuenta que no se debe dejar áreas sin trazar (IGN, 2014a).
- Se recomienda iniciar trazando áreas artificiales o la hidrografía ya que son más distinguibles (IGN, 2014a).
- Se considera oportuno realizar una visita a campo para reconocer el área de trabajo y para resolver dudas (IGN, 2014a).
- Es obligatorio el mantenimiento de una topología, con el fin de evitar huecos, solapes, etc (IGN, 2014a).

Clasificación automatizada de imágenes

Existen dos métodos de clasificación automatizada de imágenes, la clasificación supervisada y la no supervisada, de las cuales se resumen en la figura 21.

Figura 21

Métodos de clasificación de imágenes



Nota. Recuperado de (Mejía & Moncayo, 2012)

Clasificación Supervisada.

El intérprete está en constante interacción con las muestras de entrenamientos, las cuales deben ser representativas de las clases que serán mapeadas (Chuvieco, 2008).

Según Lillesand et al. (2004), dicha clasificación se detalla en tres pasos esenciales:

Fase de entrenamiento. Consiste en brindar al sistema un conjunto de píxeles representativos de cada clase de uso del suelo, en la imagen a ser clasificada (Lillesand et al., 2004).

Fase de clasificación. Los píxeles elegidos en esta fase, son clasificados dentro de una forma de uso del suelo, de acuerdo con parámetros estadísticos (Lillesand et al., 2004)..

Fase de presentación de los datos. Se cuantifica y resume la forma como serán detallados los resultados de la clasificación (T Lillesand et al., 2004).

Clasificación No Supervisada

No utiliza datos de entrenamiento como base para la categorización, de tal manera que los algoritmos examinen los píxeles desconocidos en la imagen, agrupándolos para

determinadas clases, basándose en los asociamientos naturales presentes en los valores numéricos de la imagen (Lillesand y Kiefer, 1979).

Método de clasificación basado en píxeles

En la clasificación píxel a píxel, el algoritmo clasificador trata de agrupar un determinado píxel de la imagen a una de las clases contenidas en el paquete de entrenamiento (Moreira, 2005). A continuación, se detallan algunos de los algoritmos empleados:

- Máxima Probabilidad. - algoritmo de clasificación supervisada basada en píxeles.
- Isodata. - algoritmo de clasificación no supervisada basada en píxeles.

Métodos de clasificación basados en objetos

Aprovecha como criterio de decisión el nivel digital de cada píxel y su relación espacial con sus píxeles vecinos dentro de la imagen; estas categorías procuran simular el comportamiento de un fotointérprete, para examinar áreas homogéneas en la imagen (Moreira, 2005). Este método tiene por ejemplo los siguientes algoritmos:

- La segmentación de imágenes. - algoritmo de clasificación supervisada orientada a objetos.
- Isoseg. - algoritmo de clasificación no supervisada orientado a objetos.

Detección de cambios

El análisis de detección de cambios abarca una amplia gama de métodos utilizados para identificar, describir y cuantificar las diferencias entre imágenes de la misma escena en diferentes momentos o en diferentes condiciones (Harris Geospatial Solutions, 2020).

Las herramientas usadas para medir los cambios entre un par de imágenes que representan un estado inicial y un estado final son: *el mapa de diferencias de detección* de cambios usado para imágenes en escala de grises (banda única) y las *estadísticas de detección*

de cambios usado para imágenes de clasificación. A continuación, se detallan cada una de estas herramientas (Harris Geoespatial Solutions, 2020).

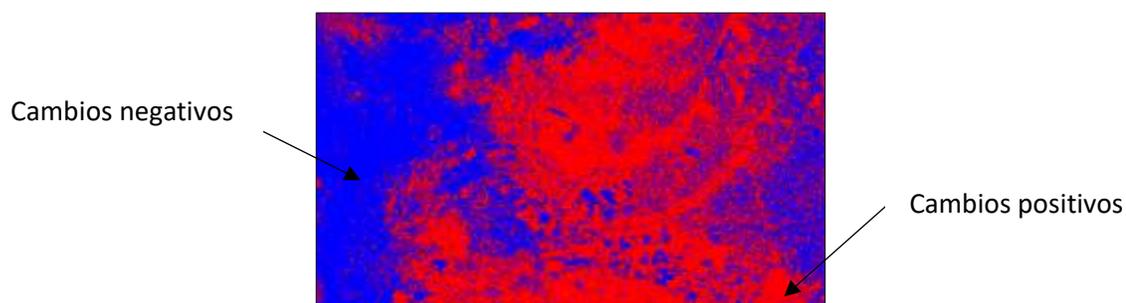
Mapa de diferencias de detección de cambios

Las imágenes de entrada pueden ser imágenes de banda única de cualquier tipo de datos. La diferencia se calcula restando la imagen del estado inicial de la imagen del estado final (es decir, final - inicial); y las clases se definen mediante umbrales de cambio. Un cambio positivo identifica los píxeles que se volvieron más brillantes (el brillo del estado final fue mayor que el brillo del estado inicial); mientras que, un cambio negativo identifica los píxeles que se volvieron más tenues (el brillo del estado final fue menor que el brillo del estado inicial). Las imágenes de entrada deben estar corregistradas o georreferenciadas para obtener resultados más precisos (Harris Geoespatial Solutions, 2020).

En el caso de uso del programa ENVI en la detección de cambios, la imagen de clasificación resultante está codificada por colores con el fin de indicar la magnitud del cambio entre dos imágenes. Los cambios positivos se muestran en tonos de rojo, pasando del gris para que no haya cambios al rojo brillante en el mayor cambio positivo. Los cambios negativos se observan en tonos de azul, pasando del gris para que no haya cambios al azul brillante con el cambio negativo más significativo, tal como se muestra en la figura 22 (Harris Geoespatial Solutions, 2020).

Figura 22

Imagen clasificada mediante detección de cambios en ENVI



Estadísticas de detección de cambios

En este proceso, se compila una tabulación detallada de los cambios entre dos imágenes de clasificación. Los cambios detectados difieren significativamente de una simple diferenciación de las dos imágenes. Si bien el informe de estadísticas incluye una diferencia de imagen de clase por clase, el análisis se centra principalmente en los cambios de clasificación del estado inicial; es decir, para cada clase de estado inicial, el análisis identifica las clases en las que esos píxeles cambiaron en la imagen de estado final. Las imágenes de entrada deben estar corregistradas o georreferenciadas para obtener resultados más precisos (Harris Geospatial Solutions, 2020).

El resultado de los cambios se informa como recuento de píxeles, porcentajes o áreas, además, de una imagen de la máscara de clasificación, que es una imagen multibanda, con una máscara para cada clase emparejada, la cual, ayuda a identificar la clase en la que cambió un píxel. Las máscaras se almacenan como imágenes clasificadas con las asignaciones de (nombre, color y valor) que coinciden con el estado final (Harris Geospatial Solutions, 2020).

Geodatabase

Es una estructura de almacenamiento de datos para sistemas de información geográfica, donde se guardan sistemas de archivos de carpeta, base de datos de sistema de gestión relacional multiusuario. Además, brinda relaciones entre distintas entidades, asegura la entidad de datos y genera entidades inteligentes (Granda, 2012).

Según Granda (2012), la geodatabase es una estructura nativa de almacenamiento de datos para ArcGIS, donde sus componentes son los siguientes: Features Datasets, Feature Classes, Relationships Classes, Geometric networks, Topology, Network Dataset, Tables, Raster Datasets, Raster Catálogos, Comportamientos, Toolboxes, etc.

Modelación

Según García (2008), un modelo es “una representación conceptual, numérica o gráfica de un objeto, sistema, proceso, actividad o pensamiento que destaca las características que el modelador considera más importantes del fenómeno en cuestión, por lo que se emplea para analizar exhaustivamente cada una de sus relaciones e interacciones, y con base en su análisis, predecir posibles escenarios futuros para dicho fenómeno”.

Por otro lado, Veldkamp y Lambin (2001) mencionan que, la modelación es considerada una técnica importante para la proyección y la exploración de escenarios prospectivos alternativos, para llevar a cabo experimentos que ponen a prueba la comprensión de los procesos clave, y para describirlos en términos cuantitativos.

El procedimiento de modelación tiene cinco pasos esenciales: (1) cálculo de las áreas de transición, (2) determinación de la probabilidad de cambio, (3) asignación de la ubicación de los cambios, (4) simulación de los patrones especiales de cambios y (5) validación (Kolb et al., 2014).

En los últimos tiempos se han desarrollado varios modelos para realizar la predicción del cambio de uso del suelo y las expectativas de crecimiento urbano, incluidos, otros. Algunos modelos son: los autómatas celulares, las cadenas de Markov, la regresión logística, redes neuronales artificiales, etc. Varios estudios mencionan que algunos de estos modelos pueden integrarse generando modelos híbridos que logran obtener mejores resultados (Gharaibeh et al., 2020). A continuación, se describe con más detalle los modelos empleados.

Cadenas de Markov

Las cadenas de Markov son procesos estocásticos, que carecen de "memoria". Es decir, la probabilidad del siguiente estado del sistema solo depende del estado actual del sistema y no de ningún estado anterior (Wang et al., 2021). El análisis de una cadena de Markov se representa como:

$$S_{(t,t+1)} = P_{ij}(t) * S(t) \quad [6]$$

Donde:

$S(t)$: es el estado del sistema en un momento t .

$P_{ij}(t)$: es la matriz de probabilidad de transición en un estado.

$S(t+1)$: es el estado del sistema en el momento $t+1$.

La matriz de transición $P_{ij}(t)$ representa la probabilidad de convertir el estado actual i a otro estado j en el próximo periodo de tiempo (Wang et al., 2021).

La ecuación 7 ilustra la matriz P . Una matriz de áreas de transición expresa el área total (en celdas) que se espera cambiar en el próximo período de tiempo.

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix}, (0 \leq P_{ij} \leq 1) \quad [7]$$

Autómatas celulares

Un autómata celular (AC), es una técnica de modelado espacial que ha sido ampliamente utilizada en la simulación de sistemas urbanos. La popularidad de los autómatas celulares proviene de su capacidad para modelar la proximidad, que se considera un elemento espacial esencial que refleja la dinámica de los cambios en el uso del suelo. Un autómata asume que una región tiene una mayor tendencia a cambiar a una categoría de uso de suelo si las regiones vecinas pertenecen a esa categoría (S. Fernández & Rangel, 2014).

Formalmente un autómata celular se describe de la siguiente manera:

$$Q = (S, N, T) \quad [8]$$

Donde Q es el estado global del sistema, S el subconjunto de todos los estados posibles del autómata, N la vecindad de todas las celdas que proporcionan valores de entrada para la

función de transición y T la función de transición que define el cambio de estado del autómata celular de su estado actual al estado en el siguiente paso de tiempo (Leao et al., 2004)

Inicialmente el área se divide en una cuadrícula de celdas. Cada celda equivale a un píxel en el mapa del área. El estado celular representa una de las categorías de uso del suelo. El estado de la celda en el siguiente paso depende del estado actual de la celda, así como de los estados actuales de las celdas circundantes (la vecindad de la celda) de acuerdo con un conjunto de reglas de transición (S. Fernández & Rangel, 2014).

Según Reyes (2011), los elementos básicos de los autómatas celulares son los siguientes:

Arreglo Regular. Ya sea un plano de 2 dimensiones o un espacio n-dimensional, este es el espacio de evoluciones, y cada división homogénea de arreglo es llamada célula.

Conjunto de Estados. Es finito y cada elemento o célula del arreglo toma un valor de este conjunto de estados. También se denomina alfabeto. Puede ser expresado en valores o colores.

Configuración Inicial. Consiste en asignar un estado a cada una de las células del espacio de evolución inicial del sistema.

Vecindades. Define el conjunto contiguo de células y posición relativa respecto a cada una de ellas. A cada vecindad diferente corresponde un elemento del conjunto de estados.

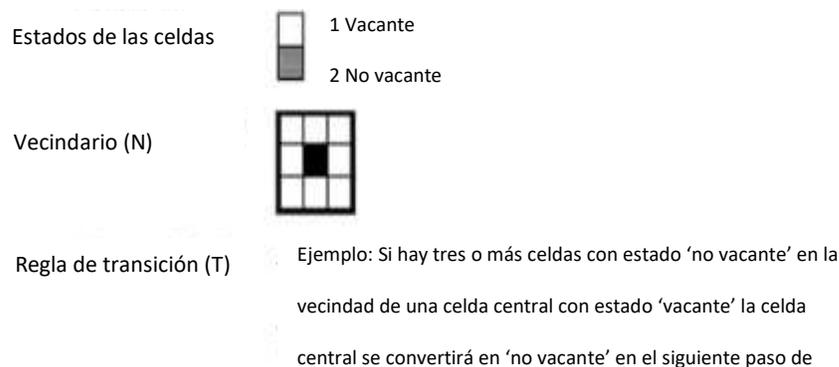
Función Local. Es la regla de evolución que determina el comportamiento del AC. Se conforma de una célula central y sus vecindades. Define como debe cambiar de estado cada célula dependiendo de los estados anteriores de sus vecindades.

La figura 23 indica los principales componentes de un autómata celular usando un ejemplo: el estado de las celdas puede ser vacante o no vacante; el vecindario consta de 8 celdas adyacentes alrededor de una celda central; y la regla de transición dicta como cambian

los estados de las celdas con el tiempo en función de los estados de las celdas vecinas (S. Fernández & Rangel, 2014).

Figura 23

Elementos principales de un autómata celular.

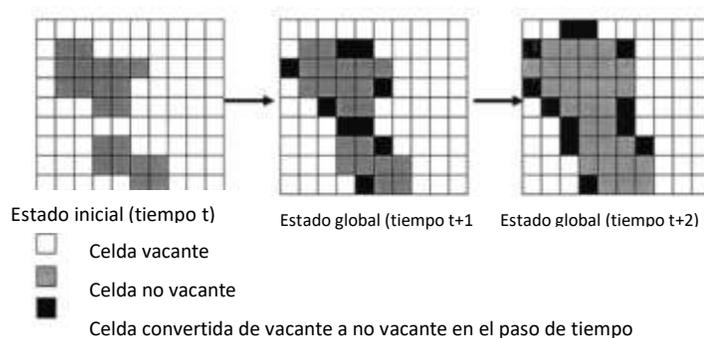


Nota. Recuperado de (Leao et al., 2004) y modificado por (Autores).

La figura 24 ilustra el proceso de transición realizado por el autómata celular descrito en la figura 23. Primero se presenta el estado inicial sobre un espacio celular en el primer paso del tiempo, luego se presentan los estados globales para dos pasos de tiempo subsiguientes. Aquí el autómata celular analiza la vecindad de cada celda vacante de acuerdo con la regla de transición de la figura 23. Una sola ejecución (para un paso de tiempo) finaliza cuando se analizaron todas las celdas vacías y se realizaron las conversiones apropiadas. Luego, este nuevo estado global se convierte en base para la otra ejecución.

Figura 24

Ejemplo del proceso de transición de un autómata celular



Nota. Recuperado de (Leao et al., 2004) y modificado por (Autores).

Estadísticos

Media

La media “es un valor que se obtiene mediante la suma de los valores de la muestra, dividido para el número total de valores de la muestra” (Lind et al., 2014) . La ecuación para obtener la media es:

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{n} \quad [9]$$

Donde:

\bar{X} : Es la media de la muestra.

n: es el número de observaciones realizadas.

X: representa cualquier valor particular.

$\sum X$: es la suma de X valores de la muestra.

Desviación estándar

La desviación estándar es “una medida de dispersión, se obtiene mediante la raíz cuadrada de la media aritmética de las desviaciones de la media elevadas al cuadrado” (Lind et al., 2014). La ecuación para obtener la desviación estándar es:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad [10]$$

Donde:

S: es la desviación estándar.

X: es el valor de cada observación de la muestra.

\bar{X} : Es la media de la muestra.

n: es el número de observaciones realizadas.

Exactitud Posicional

La exactitud posicional se refiere a la proximidad que tienen los valores de las coordenadas recopiladas con respecto a los valores de las coordenadas aceptadas como verdaderas de un objeto geográfico en un determinado sistema de referencia espacial (Ariza et al., 2019).

Evaluar la exactitud posicional de los productos cartográficos se ha convertido en un aspecto fundamental para asegurar la calidad de la información geoespacial. A nivel mundial existen varios estándares para evaluar la exactitud posicional de datos geoespaciales, los más conocidos son: NMAS (National Map Accuracy Standard, 1947); EMAS (Engineering Map Accuracy Standard, 1983); NSSDA (National Standard for Spatial Data Accuracy, 1998), el cual, es la base del nuevo y más actual estándar "ASPRS Accuracy Standards for digital Geospatial Data", publicado en el 2015 por la Sociedad estadounidense de Fotogrametría y Sensores Remotos (Ariza et al., 2019).

Exactitud posicional de acuerdo al Estándar Nacional de Precisión de Datos Espaciales (NSSDA)

El Estándar Nacional de Precisión de Datos Espaciales (NSSDA), fue publicado por el Comité Federal de Datos Geográficos (FDCG) en el año de 1998 y actualmente es de obligado cumplimiento para todas las agencias nacionales de los Estados Unidos (Ariza et al., 2019). Este

estándar utiliza una metodología estadística para estimar la precisión posicional de puntos en mapas y datos geoespaciales, con relación a posiciones terrestres georreferenciadas de mayor precisión (Comité Federal de Datos Geográficos, 1998).

El NSSDA puede ser empleado en mapas georreferenciados y datos geoespaciales, tanto en formato ráster o vectorial; además, de datos obtenidos mediante fotografías aéreas, imágenes satelitales o estudios terrestres (Comité Federal de Datos Geográficos, 1998).

Es importante destacar que, esta norma no define valores de precisión de umbral, por lo que, se promueve a las agencias a establecer umbrales de las especificaciones y aplicaciones en sus productos y con fines de contratación. Los productores de datos y mapas deben determinar qué precisión existe o se puede lograr en sus datos, además de informar de acuerdo con la NSSDA (Comité Federal de Datos Geográficos, 1998).

Error Cuadrático Medio (RMS)

El NSSDA utiliza el error cuadrático medio (RMSE) para estimar la precisión posicional. El RMSE es la raíz cuadrada del promedio del conjunto de diferencias cuadradas entre los valores de coordenadas del conjunto de datos y los valores de coordenadas de una fuente independiente de mayor precisión para puntos idénticos. De acuerdo a ésta normativa se debe probar un mínimo de 20 puntos de control distribuidos en toda el área geográfica de interés, dependiendo de la extensión (FGDC, 1998).

El RMSE horizontal se puede calcular mediante la ecuación 11 descrita a continuación.

$$RMSE_r = \sqrt{\frac{\sum((X_{dato,i} - X_{control,i})^2 + (Y_{dato,i} - Y_{control,i})^2)}{n}} = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2} \quad [11]$$

El RMSE horizontal también puede calcularse a partir de sus componentes X e Y mediante las ecuaciones 12 y 13

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum (X_{dato,i} - X_{control,i})^2}{n}} \quad [12]$$

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum (Y_{dato,i} - Y_{control,i})^2}{n}} \quad [13]$$

Donde:

$X_{dato,i}$, $Y_{dato,i}$: Son las coordenadas del i-ésimo punto de control en el conjunto de datos.

$X_{control,i}$, $Y_{control,i}$: Son las coordenadas del i-ésimo punto de control en la fuente independiente de mayor precisión.

n: es el número de puntos de control probados.

i: es el número entero que va de 1 a n.

Cálculo de la precisión horizontal

Según Greenwalt & Shultz (1968), para calcular la precisión horizontal existen dos casos: el primer, caso cuando el $RMSE_x = RMSE_y$ y el segundo, cuando el $RMSE_x \neq RMSE_y$. A continuación, se describe cada uno de ellos:

- **Caso 1.** Cálculo de la precisión de acuerdo a la NSSDA cuando $RMSE_x = RMSE_y$.

Se supone que los errores sistemáticos se han eliminado de la mejor manera posible. Si el error se distribuye normalmente y es independiente en cada componente X e Y, se usa el factor 2.4477 para calcular la precisión horizontal al nivel de confianza del 95% (Greenwalt & Shultz, 1968). Cuando se apliquen las condiciones anteriores, el valor de precisión de acuerdo a la NSSDA, se calculará mediante la ecuación 14.

$$Precisión_r = 2.4477 * RMSE_x = 2.4477 * RMSE_y$$

$$Precisión_r = \frac{2.4477}{\sqrt{2}} * RMSE_r$$

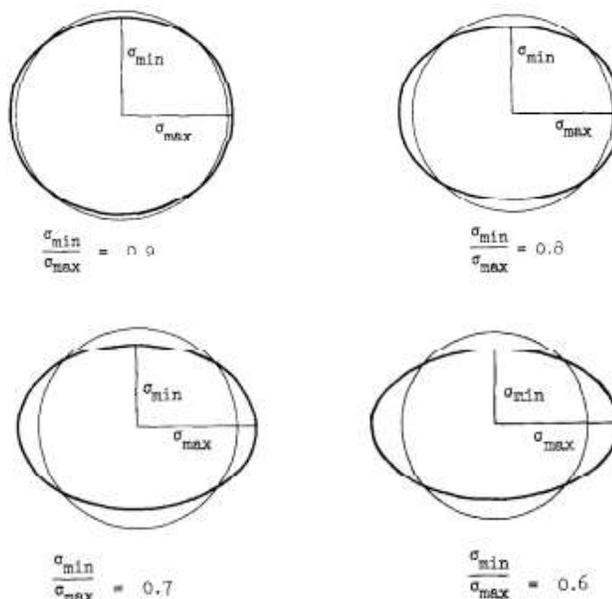
$$Precisión_r = 1.7308 * RMSE_r \quad [14]$$

- **Caso 2.** Aproximación del error estándar circular cuando $RMSE_x \neq RMSE_y$.

Cuando el $RMSE_x$ y el $RMSE_y$ no son iguales se puede sustituir la distribución elíptica por una distribución de error circular normal, tal como se muestra en la figura 25 (Greenwalt & Shultz, 1968).

Figura 25

Distribución de error circular normal



Nota. Recuperado de (Greenwalt & Shultz, 1968).

Si el $\frac{RMSE_{min}}{RMSE_{max}}$ está entre 0.6 y 1.0 (donde el $RMSE_{min}$ es el valor más pequeño entre el $RMSE_x$ y $RMSE_y$ y el $RMSE_{max}$ es el valor mayor), el error estándar circular (σ_c) (al 39.35% de confianza) puede aproximarse a:

$$\sigma_c \approx 0.5(RMSE_x + RMSE_y) \quad [15]$$

Si el error se distribuye normalmente y es independiente en cada componente X e Y, el valor de la precisión de acuerdo a la NSSDA puede aproximarse de acuerdo a la ecuación 16.

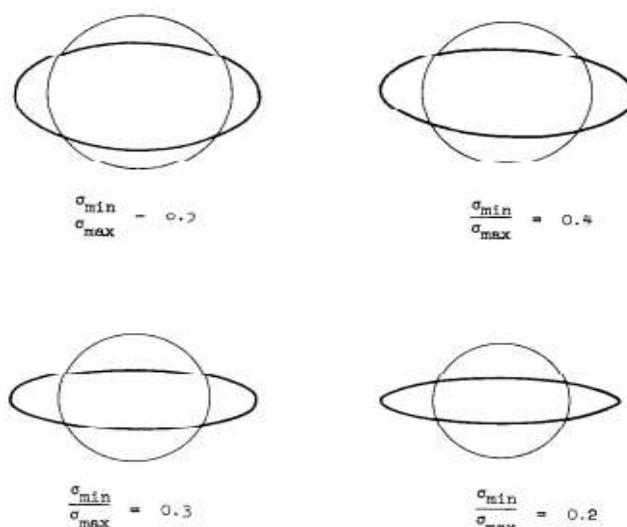
$$Precisión_r = 2.4477 * 0.5 * (RMSE_x + RMSE_y) \quad [16]$$

Si el $\frac{RMSE_{min}}{RMSE_{max}}$ es menor a 0.6 la curva no representa un error estándar circular, sin embargo, se puede convertir en otros índices de precisión circular mediante factores de conversión circular constantes para relaciones entre 0.2 y 1 mediante una aproximación conocida como error circular probable (CPE) (ver figura 26) (Greenwalt & Shultz, 1968).

$$CPE \approx 0.5887 * (RMSE_x + RMSE) \quad [17]$$

Figura 26

Distribución de error circular probable



Nota. Recuperado de (Greenwalt & Shultz, 1968).

De acuerdo a Greenwalt y Shultz (1968), el CPE calculado con la ecuación 17 es compatible con el error estándar circular calculado por la ecuación 15, por lo tanto, ambas ecuaciones pueden ser usadas para relaciones de $\frac{RMSE_{min}}{RMSE_{max}}$ mayores a 0.2.

No se recomienda usar el concepto de error circular para relaciones de $\frac{RMSE_{min}}{RMSE_{max}}$ menores que 0.2; sin embargo, se puede calcular un error de probabilidad casi lineal del 50% para representar un CPE para razones más bajas mediante las siguientes ecuaciones:

$$CPE \approx (0.2141 * RMSE_{min} + 0.6621 * RMSE_{max}) \quad \text{cuando } 0.1 \leq \frac{RMSE_{min}}{RMSE_{max}} \leq 0.2 \quad [18]$$

$$CPE \approx (0.0900 * RMSE_{min} + 0.6745 * RMSE_{max}) \text{ cuando } 0.0 \leq \frac{RMSE_{min}}{RMSE_{max}} \leq 0.1 \quad [19]$$

Exactitud Posicional de acuerdo al Instituto Geográfico Militar (IGM)

La normativa utilizada por el Instituto Geográfico Militar (2008a), menciona que, para realizar la evaluación posicional de los detalles cartografiados, primero se debe delimitar el área y dividirla en hojas, ajustadas en lo posible a un formato de carta nacional, es decir, 15' de longitud por 10' de latitud.

Por cada hoja seleccionada, se deberán escoger como mínimo 20 puntos para evaluar la precisión posicional (horizontal y vertical) y verificando que cumple con una conformación Gausiana para que esta sea aplicada, caso contrario, se deberá aplicar la t de Student. Es decir, se utilizará como ejemplo la norma estadounidense NSSDA (1998), la misma que, identifica al estimador usual de la desviación estándar como el estadístico a utilizar en la cuantificación de la exactitud. Estos puntos deben tener una distribución homogénea en el área cartografiada.

Determinación de la precisión horizontal del mapa

Para cálculo del coeficiente de exactitud posicional horizontal a un 90% de confianza, se deberán tomar dos consideraciones posibles.

Si el $RMSE_x = RMSE_y$, la precisión posicional se calculará de la siguiente manera:

$$Precisión_r = 1.5175 * RMSE_r \quad [20]$$

Por otro lado, si el $RMSE_x \neq RMSE_y$, la precisión posicional se calculará de la siguiente manera:

$$Precisión_r = 2.1460 * 0.5(RMSE_x + RMSE_y) \quad [21]$$

Validación de la cartografía temática

Una clasificación tiene como producto final un mapa temático el cual se ajusta a la realidad del territorio, pero con cierto margen de error; por tal motivo, es necesario aplicar un

proceso de verificación que permita cuantificar dicho error y valorar la calidad final del mapa (Chuvieco, 1990).

El procedimiento para realizar la validación de la información generada debe seguir una teoría estadística, la misma consiste en que después de generar la clasificación, se realiza un muestreo escogiendo una serie de puntos test, los cuales permiten construir una tabla o matriz de confusión, en la que se resumen los acuerdos y desacuerdos entre las clases del mapa clasificado y la verdad en el terreno para posteriormente ser analizadas estadísticamente (Chuvieco, 1990).

Tipos de muestreo en la validación de la cartografía temática

Existen diferentes tipos de muestreo, Chuvieco, (1990), pueden ser los siguientes:

Aleatorio simple. Es un muestreo al azar, donde todos los elementos tienen la posibilidad de ser seleccionados y la elección de uno no interviene en la elección del siguiente (Chuvieco, 1990).

Sistemático. La muestra se distribuye regularmente en intervalos fijos, a partir de un punto de origen señalado al azar (Chuvieco, 1990).

Estratificado. El muestreo se realiza dividiendo a la población en estratos y en cada una de ellos se puede realizar un muestreo aleatorio o sistemático (Chuvieco, 1990).

Por conglomerados. En este muestreo se escoge una unidad de muestra (conglomerado) la cual está compuesta de un grupo de observaciones, es decir, que en cada punto se escogen varias muestras aleatorias en lugares cercanos al elegido. Este tipo de muestreo reduce costes, pero es más complejo y menos preciso que los anteriores (Chuvieco, 1990).

Tamaño de la muestra

De acuerdo a lo mencionado por el Instituto Geográfico Nacional (2014c), para la determinación del número de puntos de muestreo se utiliza la siguientes fórmulas:

$$n_o = \frac{z^2 p(1-p)}{d^2} \quad [22]$$

$$n = \frac{n_o}{1 + \frac{n_o - 1}{N}} \quad [23]$$

Donde:

n_o : es el tamaño para una población infinita.

n : es el número de puntos del muestreo.

N : es el número total de polígonos.

z : es el nivel de confianza del 95% ($z=1.96$).

p : es la probabilidad a priori del 90% ($p=0.9$).

d : es el intervalo de error del 5% ($d=0.05$).

Matriz de confusión

La matriz de confusión representa los conflictos que se muestran entre las distintas categorías de uso y cobertura del suelo; las columnas representan la información de referencia (verdad sobre el terreno) y las filas indican el resultado de una categorización de uso y cobertura del suelo. Para la preparación de la matriz de confusión, se toma como referencia la verdad en el suelo y esta información es comparada con el producto resultante de la categorización. Esta matriz es cuadrada ($n \times n$), donde n sugiere el número de categorías. El interés de estas matrices de confusión procede de su capacidad para plasmar los conflictos entre categorías; así, se sabe la exactitud conseguida para todas las clases, así como los primordiales conflictos entre ellas (Mejía & Moncayo, 2012).

A continuación, en la tabla 2 se indica la estructura de una matriz de confusión.

Tabla 2

Estructura de una matriz de confusión

	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase n	Total
Clase 1	X_{11}				X_{1+}
Clase 2		X_{22}			X_{2+}
Clase 3			X_{33}		X_{3+}
Clase n				X_{nn}	X_{n+}
Total	X_{+1}	X_{+2}	X_{+3}	X_{+n}	$\sum X_{ij}$

Nota. Recuperado de (Chuvieco, 2008)

La diagonal de esta matriz expresa el número de puntos de verificación en donde se crea consenso en medio de las 2 fuentes (mapa y realidad), a medida que los marginales suponen errores de asignación, la interacción entre el número de puntos correctamente designados y el total expresa la confiabilidad universal del mapa. Los residuales en columna indican tipos de cubierta real que no se incluyeron en el mapa (errores de comisión), a medida que los residuales en filas involucran cubiertas del mapa que no se ajustan a la verdad (errores de omisión) (Chuvieco, 1990).

Según Chuvieco (1990), a partir de la matriz de confusión se pueden realizar varios análisis estadísticos, los cuales permiten saber el nivel de fiabilidad del producto generado. A continuación, se detallan cada uno de ellos:

Fiabilidad global del mapa. La manera más simple de concluir con el proceso de validación, es calcular la fiabilidad global del mapa, relacionando los elementos de la diagonal con el total de puntos muestreados (Chuvieco, 1990).

$$F = \frac{\sum X_{ii}}{\sum \sum X_{ij}} * 100 \quad [24]$$

Fiabilidad del usuario. Está ligado a las filas de la matriz, la diagonal indica el número de píxeles que pertenece a una detallada clasificación, y en el caso de las filas, los marginales indican el número de píxeles que, perteneciendo a una determinada categorización, no fueron incluidas en ella, estos se denominan errores de omisión (Chuvienco, 1990).

$$F_U = \frac{X_{ii}}{X_{i+}} * 100 \quad [25]$$

Fiabilidad del productor. Está ligado a las columnas de la matriz, la diagonal indica el número de píxeles que pertenece a una detallada categorización y las celdillas no diagonales de las columnas indican los errores de comisión, es decir píxeles que se incluyeron en una determinada clasificación cuando realmente pertenecían a otra (Chuvienco, 1990).

$$F_P = \frac{X_{ii}}{X_{+j}} * 100 \quad [26]$$

Índice Kappa. Es un estadístico que mide la diferencia entre el mapa y la realidad, el cual sirve para verificar la fiabilidad de la clasificación (Chuvienco, 1990).

Según Lillesand et al. (2004), a partir de los datos existentes en la matriz de confusión se calcula el índice kappa, el cual está dado por la siguiente ecuación:

$$\hat{k} = \frac{N \sum X_{ii} - \sum X_{i+} X_{+j}}{N^2 - \sum X_{i+} X_{+j}} \quad [27]$$

Donde:

N: es el número total de observaciones de la matriz.

Landis y Koch (1977), proponen una clasificación del índice kappa organizada según intervalos de aceptación, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3*Valores de aceptación del Índice Kappa*

Valor de Kappa	Calidad
≤0	Pésima
0.0 – 0.2	Mala
0.2 – 0.4	Razonable
0.4 – 0.6	Buena
0.6 – 0.8	Muy buena
0.8 – 1.0	Excelente

Nota. Recuperado de (Landis & Koch ,1977)

Prueba de Cramer

La prueba de Cramer es un análisis estadístico no paramétrico, que se usa para medir la fuerza de la asociación entre variables y comprender la importancia de que tiene una variable en particular para influir en un cambio (Liebetrau, 1983). Esta prueba se obtiene con la siguiente ecuación:

$$V = \sqrt{\frac{X^2}{n(q-1)}} \quad [28]$$

Donde:

V: es el índice de Cramer.

X^2 : es el coeficiente de chi-cuadrado.

n: el tamaño de la muestra.

q: el valor más pequeño en las filas y columnas de la imagen de cobertura terrestre.

O: frecuencia observada por una categoría.

E: frecuencia esperada en la categoría correspondiente.

La prueba de Cramer utiliza valores entre 0 y 1, de modo que cuanto más cercano a 1 sea el valor, mayor será la asociación entre la variable explicativa y las clases de transición definidas (Liebetrau, 1983).

Áreas de protección y conservación ambiental

Las áreas de protección, son áreas de patrimonio natural que se ubican dentro de los sistemas de conservación de áreas protegidas, su objetivo es preservar la biodiversidad, los ecosistemas, y los servicios ecosistémicos ambientales (Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda, 2021).

Las áreas de protección municipal del Distrito Metropolitano son las siguientes:

Áreas de Conservación y Uso Sustentable (ACUS):

- ACUS Mashpi – Guaycuyacu – Saguangal.
- ACUS Sistema Hídrico y Arqueológico Pachijal.
- ACUS Mojanda – Cambugán.
- Bosques del Valle de Lloa.

Áreas de Protección de Humedales:

- Humedales Cerro Las Puntas.
- Páramos de Píntag.

Áreas de Intervención Especial y Recuperación (AIER):

- AIER Pichincha Atacazo.
- Corredor Ecológico.
- AIER Ilaló.
- Corredor Ecológico del Oso Andino.

Dentro del cantón Mejía existen cuatro áreas protegidas, de acuerdo a la Dirección de Planificación Territorial (2021), son las siguientes:

- Parque Nacional Cotopaxi.
- Reserva Ecológica Los Ilinizas.
- Área Nacional de Recreación el Boliche.
- Refugio de Vida Silvestre Pasochoa.

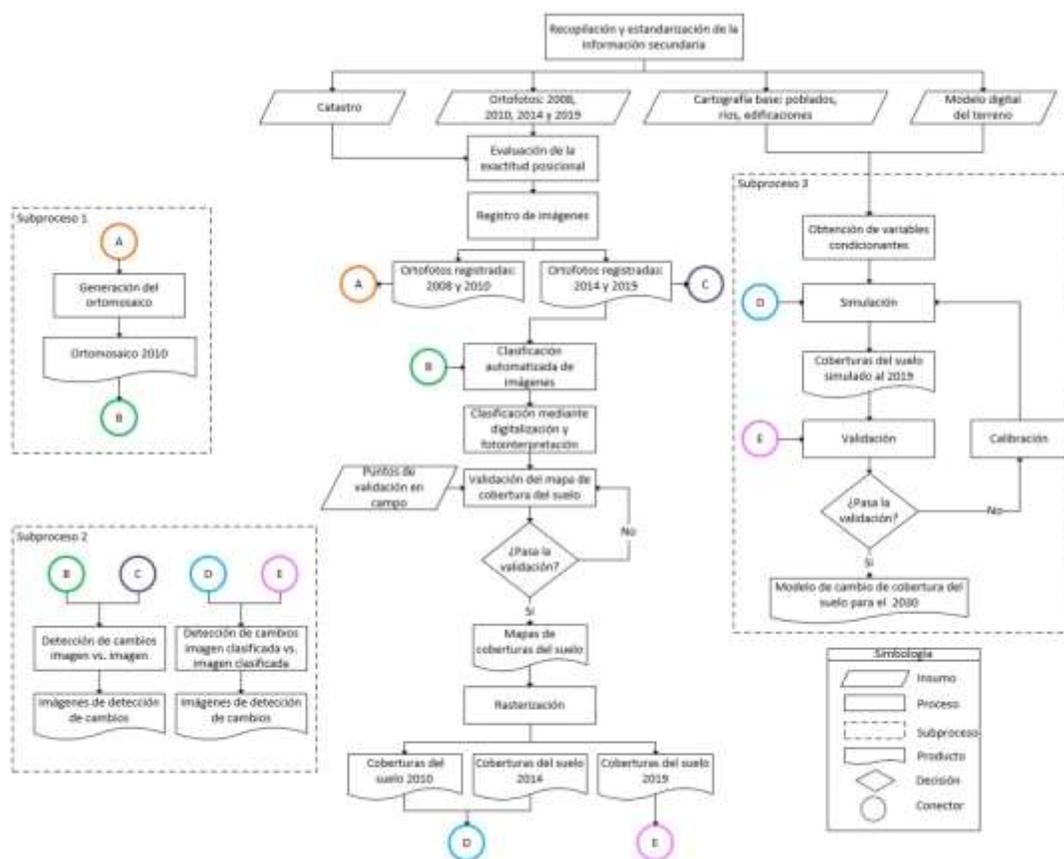
CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

En el siguiente capítulo, se utilizaron procesos metodológicos como comparativos: en cuanto, al análisis de geolocalización, clasificación, detección de cambios, matriz de confusión, etc; experimental, en la detección de cambios y autómatas celulares y el método inductivo en todo el procesamiento. Se detallarán de manera secuencial los procesos ejecutados en esta investigación, que incluyen anexos ampliados en los principales procedimientos; de forma general en la figura 27, se visualiza la metodología empleada, a continuación:

Figura 27

Esquema general de la metodología empleada



Recopilación y estandarización de la información secundaria

Mediante el convenio existente entre la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” y el Instituto Geográfico Militar, se obtuvieron: cuatro ortofotos y un modelo digital del terreno (MDT). En la tabla 4, se detallan las características de estos insumos y en la figura 28, se visualizan cada uno de ellos.

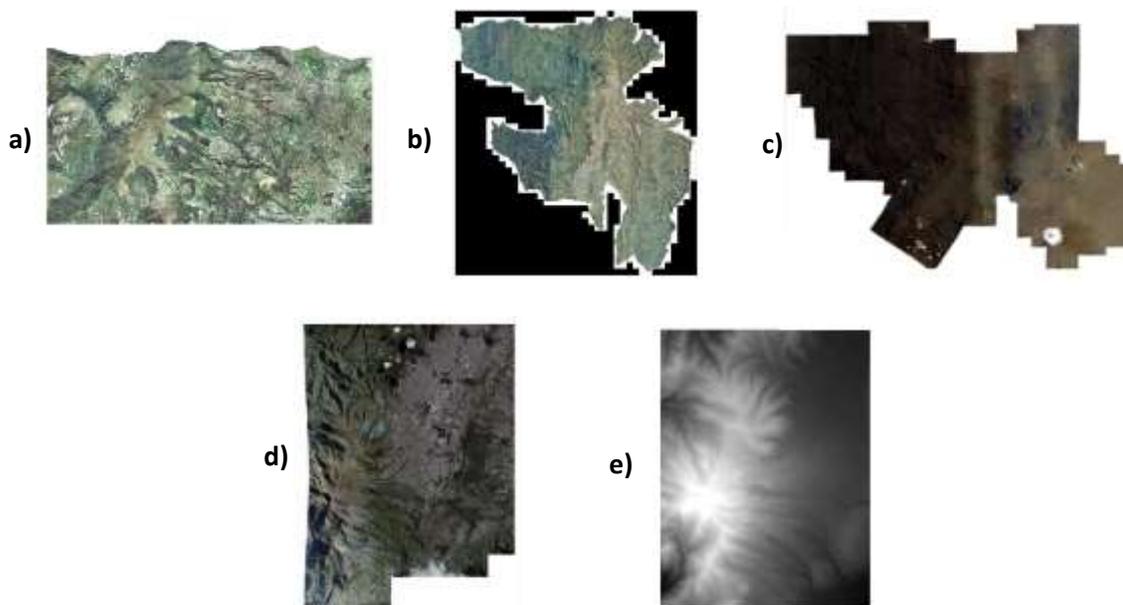
Tabla 4

Características de las ortofotos y el modelo digital del terreno (MDT)

Nombre	Tipo	Tamaño de pixel [m]	Año
OTF_ATACAZO_MEJIA_2008.tif	Ortofoto	0.3	2008
QUITO_2010.tif	Ortofoto	0.3	2010
MEJIA_RUMIÑAHUI_2014.tif	Ortofoto	0.3	2014
TAMBILLO_2019.tif	Ortofoto	0.3	2019
DTM_TAMBILLO_CORTE_2019.tif	MDT	3	2019

Figura 28

Ortofotos y modelo digital del terreno



Nota. Ortofotos de los años: a) 2008, b) 2010, c) 2014, d) 2019 y e) modelo digital del terreno.

Primero, verificar el sistema de referencia en los metadatos de cada uno de los insumos, con la finalidad de, corroborar que tengan un sistema de referencia WGS84 y proyección UTM 17S.

Posteriormente, utilizar el software ERDAS IMAGINE, con el fin de recortar el área de estudio; en este proceso, delimitar el área mediante la creación de un AOI y con la herramienta “Subset”, recortar las ortofotos y el modelo digital del terreno; los insumos recortados fueron exportados con extensión **.img**, formato ráster nativo del software, y a su vez compatible con el software ENVI.

Por otra parte, se obtuvo información en formato shapefile del catastro urbano y rural, los usos del suelo vigentes y la cartografía base de: vías, ríos, edificaciones y poblados de los cantones Quito y Mejía; dichos insumos tienen sistema de referencia WGS84 y proyección UTM 17 Sur. La tabla 5 muestra todos los archivos recopilados.

Tabla 5

Archivos recopilados

Nombre	Escala	Fuente	Año
CATASTRO_QUITO.shp	1: 1 000	GAD DMQ	2021
CATASTRO_URBANO_MEJIA.shp	1: 1 000	GAD Mejía	2020
CATASTRO_RURAL_MEJIA.shp	1: 5 000	GAD Mejía	2020
USOS_DE_SUELO_QUITO.shp	1: 50 0000	GAD DMQ	2021
USOS_DE_SUELO_MEJIA.shp	1: 50 000	GAD Mejía	2021
POBLADOS.shp	1: 50 000	IGM	2020
RIOS.shp	1: 50 000	IGM	2020
EDIFICACIONES.shp	1: 50 000	IGM	2020

Finalmente, con la información estandarizada, crear una geodatabase con todos los archivos ráster y shapefile recopilados, y se incluirán los productos resultantes del estudio. Los resultados de esta etapa se aprecian en el capítulo IV.

Evaluación de la exactitud posicional

En esta etapa, se realiza una evaluación de la exactitud posicional de las ortofotos vs. la cartografía escala 1: 1 000, de acuerdo al Estándar Nacional de Precisión de Datos Espaciales (NSSDA) y la normativa del Instituto Geográfico Militar (IGM).

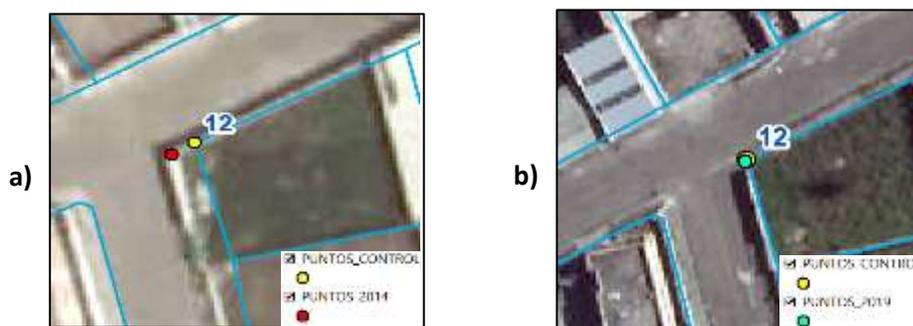
Se colocaron, 36 puntos de control distribuidos en toda el área de estudio sobre el catastro urbano y rural de Quito y Mejía; para realizar este procedimiento, se utilizó el software ArcGIS, donde se creó un archivo shapefile denominado “PUNTOS_CONTROL” de tipo vectorial con el sistema de referencia WGS84 UTM, Zona 17 Sur y, con la herramienta “*Calculate Geometry*”, se obtuvieron las coordenadas Este y Norte de estos puntos.

Después, tomando en cuenta la ubicación de los 36 puntos de control, se realizó lo siguiente: pinchar los homólogos sobre las ortofotos de los años 2014 y 2019, crear archivos shapefile de tipo vectorial denominados “PUNTOS_2014” y “PUNTOS_2019” con el sistema de referencia WGS84 UTM, Zona 17 Sur y con la herramienta “*Calculate Geometry*”, obtener las coordenadas Este y Norte de estos puntos.

En la figura 29, se ilustra un ejemplo de los puntos de control colocados sobre el catastro y sus homólogos sobre las ortofotos de cada año.

Figura 29

Ejemplo de puntos de control vs. puntos colocados sobre las ortofotos de los años 2014 y 2019



Nota. a) punto de control vs. punto colocado en la ortofoto del año 2014, b) punto de control vs. punto colocado en la ortofoto del año 2019.

Posteriormente, se obtuvo la distancia entre los puntos de control y los puntos pinchados en cada ortofoto, se realizó un análisis estadístico mediante el cálculo de los valores mínimos, máximos, media y desviación estándar utilizando las ecuaciones 9 y 10 del capítulo II.

Luego, se calculó el error cuadrático medio horizontal (RMSEr) y sus componentes RMSE_x y RMSE_y con las ecuaciones 11, 12 y 13 del capítulo II.

Asimismo, se realizó la evaluación de la exactitud posicional con las ortofotos de los años 2008 y 2010, con la diferencia que se pincharon 12 y 24 puntos respectivamente; debido a que, cada ortofoto contiene solo la mitad del área de estudio.

Finalmente, se obtuvo la precisión horizontal de acuerdo a la NSSDA y a la normativa IGM con las ecuaciones 16 y 21 del capítulo II. Al respecto, en el Anexo A está detallado el proceso y cuyos resultados se presentan en el capítulo IV.

Registro o corrección de imágenes

En ese sentido, se utiliza la ortofoto del año 2019 como imagen base, con el fin de registrar cada una de las ortofotos de los años posteriores (2008, 2010 y 2014) puesto que, esta imagen fue la que tuvo una mejor precisión.

El proceso de registro de imágenes se realizó pinchando 7, 15 y 21 puntos en cada una de las ortofotos; además, se utilizó la transformación afín y polinómica de primer grado con el fin de obtener la mejor configuración de puntos para el registro de imágenes; el procedimiento seguido se encuentra detallado en el Anexo B. A continuación, se describe de manera general el proceso de registro de imágenes realizado en dos programas: ENVI y ERDAS IMAGINE.

Registro de imágenes, en ENVI

ENVI cuenta con la herramienta “*Image Registration Workflow*”, en la cual primero, seleccionar la imagen base y la imagen de deformación, luego en la configuración principal, elegir el método de coincidencia, el modelo geométrico y el tipo de transformación; pinchar los

puntos y finalmente, escoger el método de interpolación. El proceso descrito y las opciones de configuración se encuentran más detalladas en el Anexo B.

Los resultados del registro de imágenes, en ENVI se encuentran en el apartado “Resultados del registro de imágenes, en ENVI” del capítulo IV. En la figura 30, se ilustra la ventana con la configuración principal de la herramienta de generación de puntos tie.

Figura 30

Configuración principal para el registro de imágenes, en ENVI



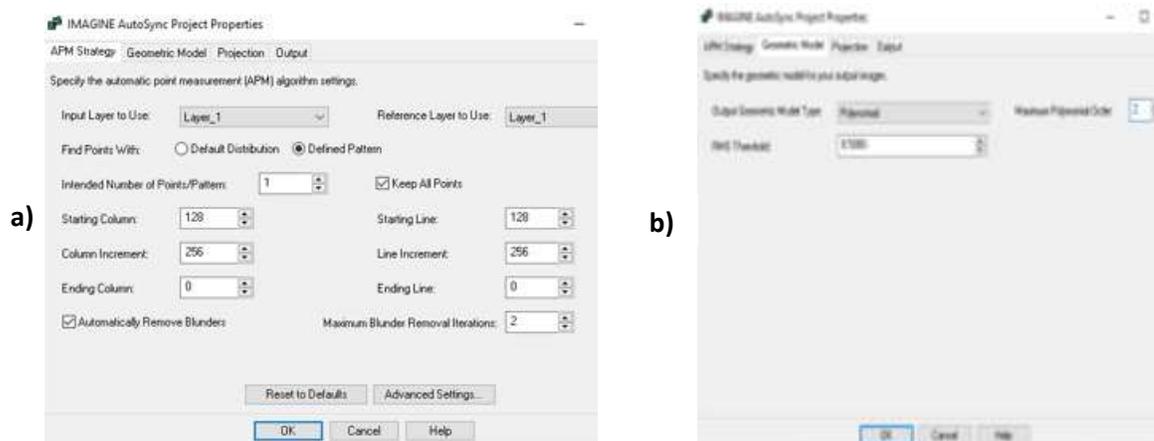
Registro de imágenes, en ERDAS IMAGINE

ERDAS IMAGINE cuenta con la herramienta “AutoSync Workstation”, que permite alinear conjuntos de datos georreferenciados. En este proceso, se debe especificar que se trata de un proyecto de ajuste o coincidencia de imágenes y no de unión de bordes, ya que se requiere coincidan espacialmente la imagen base con otras imágenes de deformación. Para el registro de las ortofotos, ver el Anexo B, cuyos resultados están en el capítulo IV.

A continuación, la figura 31 indica la configuración principal para el registro de imágenes, en ERDAS IMAGINE.

Figura 31

Configuración principal para el registro de imágenes, en ERDAS IMAGINE



Nota. a) Configuración pestaña APM, b) Configuración del modelo geométrico

Cabe señalar, que para los procesos posteriores se trabajó con las ortofotos registradas en el software ENVI dado que se obtuvo mejores resultados.

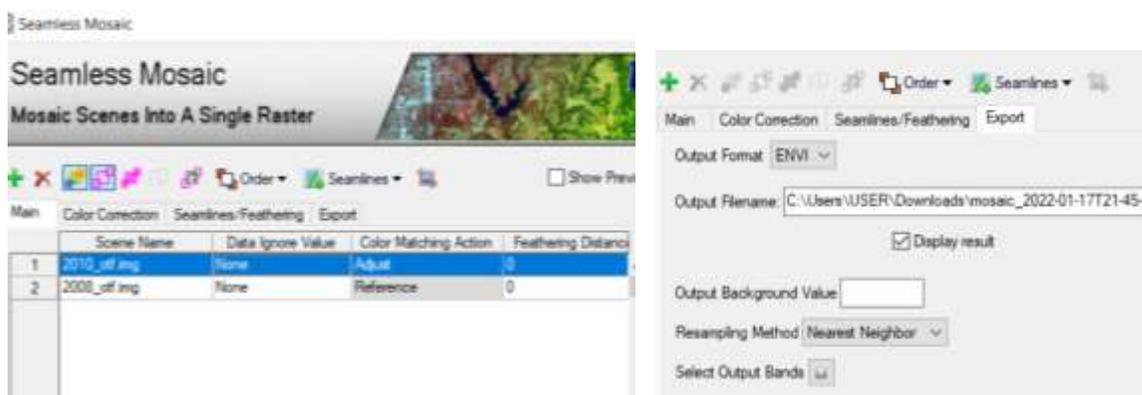
Generación del ortomosaico

Debido a que, la ortofoto del 2008 abarca la zona sur y la ortofoto del 2010 ocupa la zona norte del área de estudio, se generó un ortomosaico con el fin de unificar estas dos ortofotos en una sola.

En la generación del ortomosaico utilizar la herramienta *“Seamless Mosaic”*, del software ENVI, importar las ortofotos registradas de los años 2008 y 2010 con el fin de empatarlas y escoger como método de muestreo *“vecino más cercano”*. El proceso mencionado anteriormente se ilustra en la figura 32.

Figura 32

Generación del ortomosaico con la herramienta Seamless Mosaic



El resultado obtenido de este procedimiento se indica en el apartado “Resultados de la generación del ortomosaico” del capítulo IV.

Definición de la leyenda temática

En este apartado, se realizó una revisión bibliográfica de las leyendas temáticas que se usan a nivel mundial y nacional. En el presente estudio, se escogió la leyenda temática SIOSE, debido a que ésta se diferencia de otras por su modelo de datos orientado a objetos; es decir, puede asignar más de una clase por polígono, lo que permite detallar de mejor forma el territorio, sin pérdida de información, ya que la unidad mínima de mapeo no es una limitante total y se puede trabajar a escala 1: 25 000 (IGN, 2014b).

A continuación, se realizó una inspección visual de las ortofotos y una visita inicial a campo para conocer las coberturas existentes en el terreno y posteriormente, definir la leyenda temática usada en este proyecto.

En este caso, utilizar las clases simples: arbolado forestal, cultivos, edificaciones, matorral, páramo, prado, suelo desnudo, suelo no edificado, vial, zona de extracción, zonas quemadas; y las coberturas compuestas: asentamiento agrícola residencial, casco o urbano mixto consolidado y ensanche o urbano mixto no consolidado.

Es importante señalar que, las coberturas compuestas están formadas por coberturas simples; por ejemplo, en el caso de asentamiento agrícola residencial y urbano mixto no consolidado, están formados por las coberturas de: edificaciones, cultivos, vías y suelo no edificado, mayor detalle conceptual se encuentra en el capítulo II. En la figura 33, se observa la leyenda temática empleada para este proyecto.

Figura 33

Leyenda temática usada para el estudio

- ARBOLADO FORESTAL
- CULTIVOS
- EDIFICACIONES
- MATORRAL
- PARAMO
- PRADO
- SUELO DESNUDO
- SUELO NO EDIFICADO
- URBANO MIXTO CONSOLIDADO
- VIAL
- ZONA DE EXTRACCIÓN
- ZONAS QUEMADAS

Unidad mínima de mapeo

En el cálculo de la unidad mínima de mapeo se tomó en cuenta la recomendación de Priego et al., (2010) y se empleó como unidad mínima visible (UMV) 4mmx4mm; además, se consideró que, para el área de acuerdo a la escala 1 mm en el mapa equivale a 25 m en el terreno, como es área (25m x 25m), reemplazando estos datos en la ecuación 5 del capítulo II se obtiene:

$$UMM = \frac{(4 \text{ mm} * 4\text{mm}) * (25\text{m} * 25\text{m})}{(1\text{mm} * 1\text{mm})}$$

$$UMM = 10\ 000 \text{ m}^2 = \mathbf{1 \text{ ha}}$$

Clasificación de imágenes

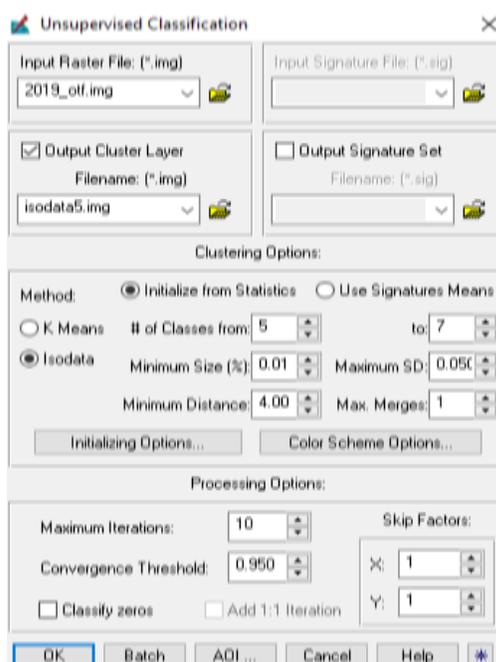
En este apartado, se corrobora cual método es el mejor para clasificar imágenes, tanto en el software ENVI como en ERDAS IMAGINE.

Clasificación automatizada no supervisada por píxeles, en ERDAS IMAGINE

En esta clasificación, utilizar la herramienta “*Unsupervised Classification*”, del software ERDAS IMAGINE; importar la ortofoto del 2019, usar el algoritmo de Isodata y especificar un número desde 7 hasta 9 clases (ver figura 34). El procedimiento se detalla en el Anexo C y los resultados se visualizan en el apartado “Resultados de la clasificación no supervisada por píxeles” del capítulo IV.

Figura 34

Configuración para la clasificación automatizada no supervisada por píxeles



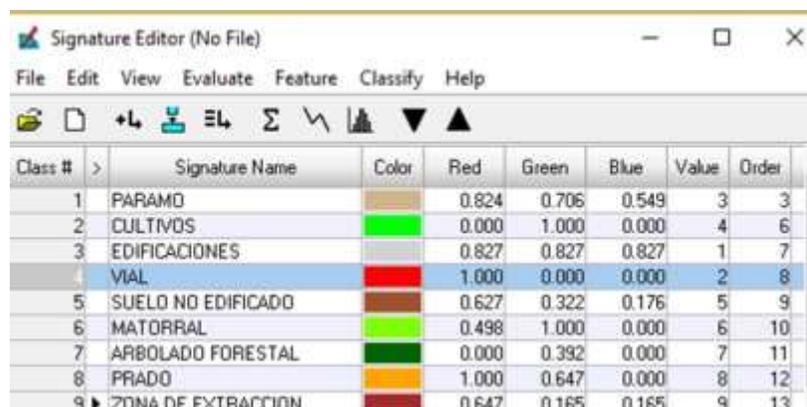
Clasificación automatizada supervisada por píxeles, en ERDAS IMAGINE

En esta clasificación, usar la herramienta “*Signature Editor*”, del software ERDAS IMAGINE, importar la ortofoto del 2019, crear las áreas de entrenamiento (observar figura 35)

en base a, la leyenda temática predefinida y usar el algoritmo de máxima probabilidad; el procedimiento se detalla en el Anexo C y los resultados se visualizan en el apartado “Resultados de la clasificación supervisada por píxeles” del capítulo IV.

Figura 35

Áreas de entrenamiento de la clasificación automatizada supervisada por píxeles



Class #	Signature Name	Color	Red	Green	Blue	Value	Order
1	PARAMO		0.824	0.706	0.549	3	3
2	CULTIVOS		0.000	1.000	0.000	4	6
3	EDIFICACIONES		0.827	0.827	0.827	1	7
4	VIAL		1.000	0.000	0.000	2	8
5	SUELO NO EDIFICADO		0.627	0.322	0.176	5	9
6	MATORRAL		0.498	1.000	0.000	6	10
7	ARBOLADO FORESTAL		0.000	0.392	0.000	7	11
8	PRADO		1.000	0.647	0.000	8	12
9	ZONA DE EXTRACCION		0.647	0.165	0.165	9	13

Clasificación automatizada supervisada basada en objetos, en ENVI

Utilizar la herramienta “*Example Based Feature Extraction Workflow*”, del software ENVI. Inicialmente, se realizó pruebas usando la ortofoto del año 2019; sin embargo, no se pudo completar el proceso de clasificación debido a que, la capacidad de las computadoras utilizadas no fueron las suficientes; por tal motivo, se optó por realizar pruebas de clasificación usando solo una parte del área de estudio.

En base a lo mencionado, se hizo lo siguiente: importar la ortofoto cortada del 2019, configurar las opciones de segmentación y combinación escogiendo una escala de 50 y 95 respectivamente; crear las áreas de entrenamiento en base a la leyenda temática predefinida (ver figura 36).

Figura 36

Selección de muestras de entrenamiento de la clasificación automatizada supervisada basada en objetos



Luego, elegir el algoritmo de clasificación KNN (K Nearest Neighbor) con la finalidad de clasificar los segmentos en función a la proximidad de sus regiones vecinas y activar la opción que, no se permitan segmentos sin clasificar. El procedimiento detallado se encuentra en el Anexo C y los resultados obtenidos se detallan en el capítulo IV.

Clasificación de las coberturas mediante interpretación y digitalización

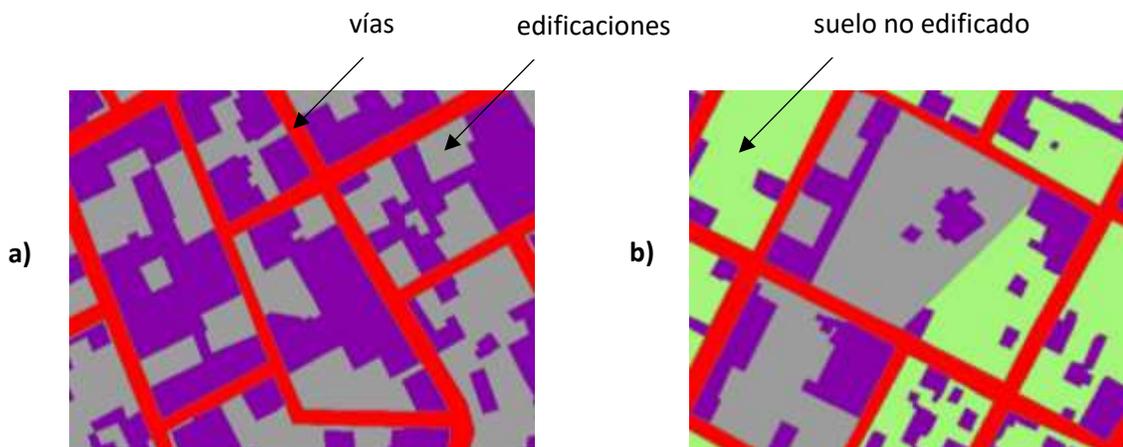
Siguiendo las recomendaciones de Chuvieco (1990) señaladas en el capítulo II, se inicia el proceso de fotointerpretación y digitalización de las coberturas simples: arbolado forestal, cultivos, matorral, páramo, prado, suelo desnudo, zona de extracción y zonas quemadas. Luego, se digitalizó las coberturas compuestas: asentamiento agrícola residencial, urbano mixto consolidado y urbano mixto no consolidado; estas dos últimas definidas de acuerdo a la subclasificación del suelo urbano de Quito.

Las coberturas compuestas, se forman del agrupamiento de las coberturas simples; por lo tanto, la cobertura asentamiento agrícola residencial se compone de las coberturas simples: cultivos, edificaciones, vial y suelo no edificado; la cobertura urbano mixto no consolidado se

compone de las coberturas simples: edificaciones, vías y suelo no edificado. En base a lo mencionado, se procede a digitalizar todas estas coberturas simples, tal como se muestra en la siguiente figura 37.

Figura 37

Coberturas simples



Nota. a) Edificaciones, vías y suelo no edificado digitalizado dentro de la cobertura urbano mixto no consolidado y b) cultivos, edificaciones, vías y suelo no edificado digitalizado dentro de la cobertura asentamiento agrícola residencial.

En este apartado, es importante señalar que, la cobertura denominada “urbano mixto consolidado”, no se tomó en cuenta para este estudio, ya que esta zona se encuentra ocupada mayormente por edificaciones y no presenta cambios significativos que afecten al área de protección del cerro Atacazo.

Una vez digitalizadas todas las coberturas, tanto simples como compuestas, se procede a realizar una revisión topológica de los shapes generados, en el software ArcGIS con el fin de eliminar huecos o solapamientos que se pudieron generar al momento de digitalizar.

Posteriormente, se revisa que ningún polígono sea menor a la unidad mínima de mapeo (1 ha); ya que en el caso de ser, estos polígonos deben ser generalizados; a excepción de los

polígonos que pertenecen a las coberturas simples: cultivos, edificaciones, vías y suelo no edificado que forman parte de las coberturas compuestas urbano mixto no consolidado y asentamiento agrícola residencial, ya que, en estos casos, la unidad mínima de mapeo no es un limitante (IGN, 2014b).

El proceso anteriormente mencionado, se realiza en cada una de las ortofotos (2008, 2010 y 2014), con el fin de obtener los mapas de cobertura del suelo; estos resultados se encuentran en el capítulo IV.

Clasificación de los usos del suelo mediante la interpretación y digitalización

Se realizan los siguientes pasos para la generación de los usos del suelo: recopilar información acerca de los usos del suelo (usos del suelo de Quito 2014 y usos del suelo de Quito y Mejía 2019); sin embargo, con respecto a los años 2014 (Mejía) y 2010 (Quito y Mejía) no se obtuvo información, debido a que, en años anteriores no existían entidades que exijan la clasificación de los usos del suelo; por lo tanto, solamente se interpretó y digitalizó los usos en las áreas que no se tenía información, cuyo resultado se encuentra en el capítulo IV.

Validación de la clasificación

La calidad de los productos cartográficos obtenidos, se calculan por medio del índice Kappa, a través de la matriz de confusión con una serie de puntos test, recolectados en el territorio, aplicando un muestreo aleatorio estratificado.

Considerando lo propuesto por el IGN (2014b), mediante los polígonos de las coberturas simples y compuestas clasificadas (115 polígonos), calcular el tamaño de la muestra con las ecuaciones 22 y 23 del capítulo II, que a continuación se muestra:

$$n_o = \frac{(1.96)^2(0.9)(1 - 0.9)}{(0.05)^2} = 138.30$$

$$n = \frac{138.30}{1 + \frac{138.30 - 1}{115}} = 63.04 \approx 63 \text{ muestras}$$

En base al cálculo del muestreo, los 63 puntos fueron distribuidos por estratos (coberturas) en toda el área de estudio (ver figura 38), tomando en cuenta el tamaño de cada cobertura, por medio del análisis espacial en ArcGIS, a través del comando "Create *Random Points*", en el *ArcToolBox / Data Management Tools / Sampling*; además, con ayuda del GPS navegador, se obtuvo las coordenadas y fotografías para validar las observaciones, las cuales se encuentran en el Anexo D.

Figura 38

Distribución aleatoria de los puntos muestreados



Matriz de confusión

Con los resultados del muestreo de campo, se elaboró la matriz de confusión, mediante la comparación de las coberturas obtenidas en la clasificación con las resultantes en el terreno, donde, según la clasificación se verificó la verdad en el terreno; posteriormente, se llenó la matriz de acuerdo al conteo; por ejemplo: 16 muestras clasificadas como cultivos pertenecen efectivamente a esta cobertura; sin embargo, 1 muestra clasificada como cultivo en realidad es páramo; otro ejemplo es: 4 muestras clasificadas como arbolado forestal pertenecen a dicha cobertura ; sin embargo, 1 muestra clasificada como arbolado forestal en realidad es matorral.

Los residuales en columna indican los tipos de cubierta real y los residuales en filas involucran la clasificación de las coberturas que no se ajustan a la verdad ; por ende, la suma total de las filas son la sumatoria de las categorizaciones y la sumatoria de las columnas son la suma de la realidad en el terreno; cabe mencionar, que una forma de verificar que la matriz de confusión este realizada correctamente es sumando el total de sus filas y columnas , el resultado debe ser el número del muestreo, tal como se visualiza en la tabla 6.

Tabla 6

Matriz de confusión para la clasificación de la cobertura del año 2019

		Realidad									Total	
		Clases	1	2	3	4	5	6	8	10		11
Clasificación	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
	2	0	16	0	0	0	1	0	0	0	0	17
	3	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	6
	4	1	0	0	10	0	0	0	0	0	0	11
	5	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	10
	6	0	0	0	0	0	0	4	1	0	0	5
	8	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	5
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	4
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	Total	5	16	6	10	11	4	6	4	1	63	

Nota. Los números del 1 al 11 representan las coberturas codificadas. (1) Arbolado forestal, (2) cultivos, (3) edificaciones, (4) matorral, (5) páramo, (6) prado, (8) suelo no edificado, (10) vial y (11) zona de extracción.

Cálculo de la fiabilidad global e índice Kappa

Finalmente, a partir de la matriz de confusión se pueden calcular la fiabilidad global del mapa (F) con la ecuación 24 y el índice kappa (\hat{k}) con la ecuación 27 del capítulo II; donde, la fiabilidad global se obtiene al sumar la diagonal principal sobre el número de muestras; y el

índice capa resulta de la multiplicación del número de muestras por la suma total de la diagonal principal menos la sumatoria de la multiplicación de las filas por las columnas totales, sobre el número de muestras al cuadrado menos lo mencionado anteriormente.

$$F = \frac{60}{63} * 100 = 95.24\%$$

$$\hat{k} = \frac{(63)(60) - 615}{63^2 - 615} = 0.94$$

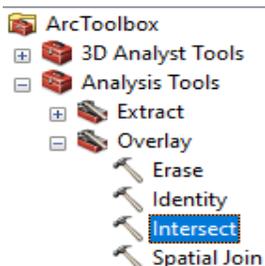
Con los valores obtenidos, en el capítulo IV, se observa el análisis de esta validación.

Cálculo de la diferencia de las coberturas del suelo obtenidas por la herramienta Intersect de los años 2010, 2014 y 2019

Mediante el análisis espacial en ArcGIS a través del comando “*Intersect*” que se encuentra en el *ArcToolBox / Analysis Tools / Overlay*, se evaluó los cambios de coberturas correspondientes a los períodos 2010 - 2014 y 2014 - 2019, tal como se ilustra en la figura 39.

Figura 39

Herramienta de análisis espacial, Intersect



Cálculo de la diferencia de usos del suelo obtenidos por la herramienta Intersect de los años 2010, 2014 y 2019

Igualmente, en este apartado se realizó el mismo procedimiento mencionado anteriormente en el caso de los usos del suelo correspondientes a los años 2010, 2014 y 2019.

Detección de cambios de las coberturas del suelo a partir del método de change detection

La detección de cambios se puede hacer de dos maneras: entre un par de imágenes (imagen vs. imagen) o con un par de imágenes clasificadas (imagen clasificada vs. imagen

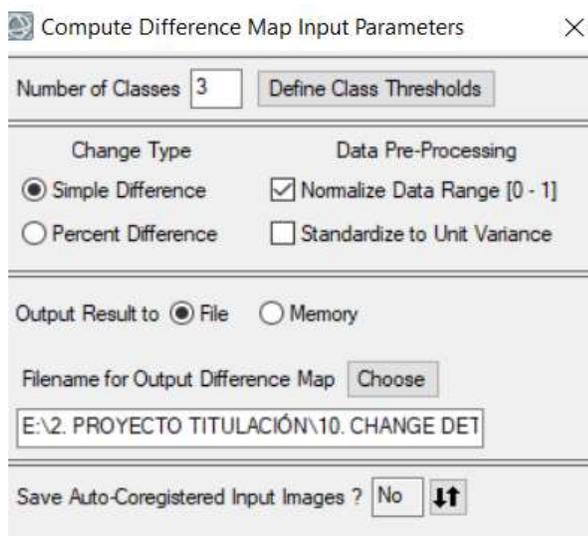
clasificada); en este estudio, la detección de cambio se realizó utilizando los programas: ENVI y ERDAS IMAGINE, cuyo procedimiento se encuentra en el Anexo E.

Detección de cambios en ENVI, imagen vs imagen

En la detección de cambios entre imágenes se usó la herramienta “*Change Detection Difference Map*”; en la cual, se escoge la banda de la imagen de “*estado inicial*” (imagen 2010), y la banda de imagen de “*estado final*” (imagen 2014), en ambos casos se elige la banda 1 (roja) y luego se configuran los parámetros de entrada, tal como se indica en la figura 40.

Figura 40

Configuración para la detección de cambios, en ENVI



Finalmente, se obtiene la clasificación resultante codificada por colores con la finalidad de indicar la magnitud de cambio entre las dos imágenes. Los cambios positivos se muestran de color rojo y los negativos de color azul, como se observa en el capítulo IV.

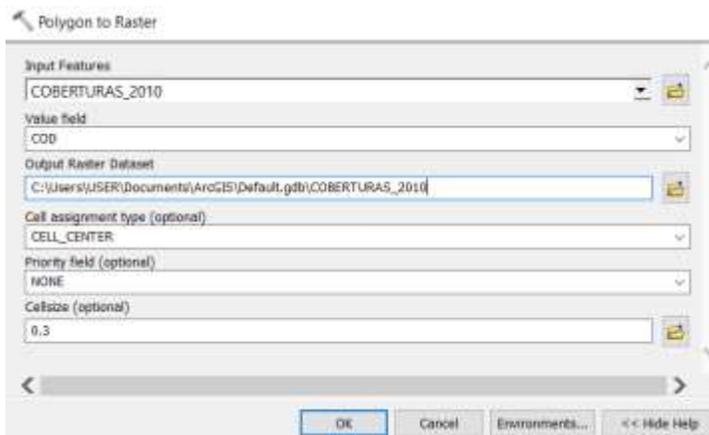
Del mismo modo, se realiza el proceso con las imágenes del 2014 y 2019. Los resultados de este proceso se indican en el capítulo IV.

Detección de cambios en ENVI, imagen clasificada vs imagen clasificada

Primeramente, rasterizar los archivos shapefile de cobertura del 2010, 2014 y 2019 mediante la herramienta “*Polygon to Raster*”, del software ArcGIS (ver figura 41).

Figura 41

Herramienta Polygon to Raster



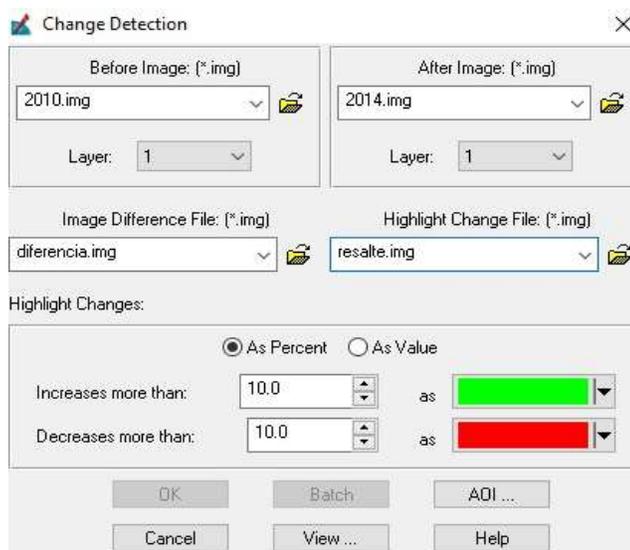
Después, exportar los archivos ráster con la herramienta “*Export Data*” del software ArgGIS con el formato de salida **.img** (formato compatible con ENVI). Una vez obtenidas las imágenes clasificadas del 2010, 2014 y 2019, realizar el procedimiento mencionado anteriormente en “*Detección de cambios en ENVI, imagen vs. imagen*” y los resultados de este proceso se indican en el capítulo IV.

Detección de cambios en ERDAS IMAGINE, imagen vs. imagen

En este proceso, utilizar la herramienta “*Image Difference*”, del software ERDAS IMAGINE, importar las ortofotos de los años 2010 y 2014 como imagen inicial y final, especificar el porcentaje del 10% de incremento y decremento (ver figura 42). El procedimiento se encuentra en el Anexo E y los resultados se visualizan en capítulo IV.

Figura 42

Configuración para la detección de cambios, en ERDAS IMAGINE



Detección de cambios en ERDAS IMAGINE, imagen clasificada vs. imagen clasificada

Se repiten los pasos mencionados anteriormente, pero con la diferencia que la imagen inicial y final deben ser imágenes clasificadas en formato **.img**. El procedimiento se detalla en el Anexo E y los resultados se visualizan en el capítulo IV.

Detección de cambios de los usos del suelo a partir del método change detection, en ENVI

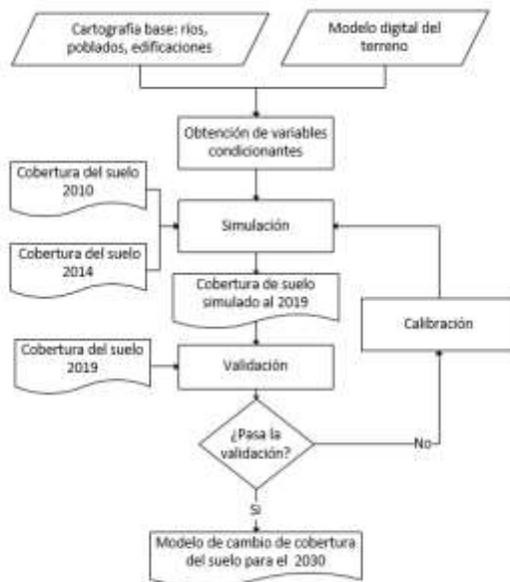
Este proceso, en el caso de los usos del suelo, es el mismo que se realizó con las coberturas vegetales empleando imagen clasificada vs. imagen clasificada en el software de ENVI. Los resultados de detección de cambios 2010 - 2014 y 2014 - 2019, se encuentran en el capítulo IV.

Generación del modelo predictivo de cambio de cobertura del suelo para el año 2030

El proceso de modelación, con Autómatas Celulares se realizó en el software TerrSet. En la figura 43, se visualiza el flujo de trabajo realizado, y en el Anexo F se detalla paso a paso la modelación.

Figura 43

Flujograma del proceso de modelación con Autómatas Celulares



Obtención de las variables condicionantes

En este proyecto se consideraron las siguientes variables condicionantes: distancia a ríos, distancia a poblados, distancia a edificaciones, altura y pendiente. Las variables relacionadas con la distancia fueron obtenidas con la herramienta “*Euclidean Distance*” del software ArcGIS, a partir a la cartografía base de ríos, poblados y edificaciones; la variable pendiente fue generada con la herramienta “*Slope*” y para la altura se usó el modelo digital de elevación.

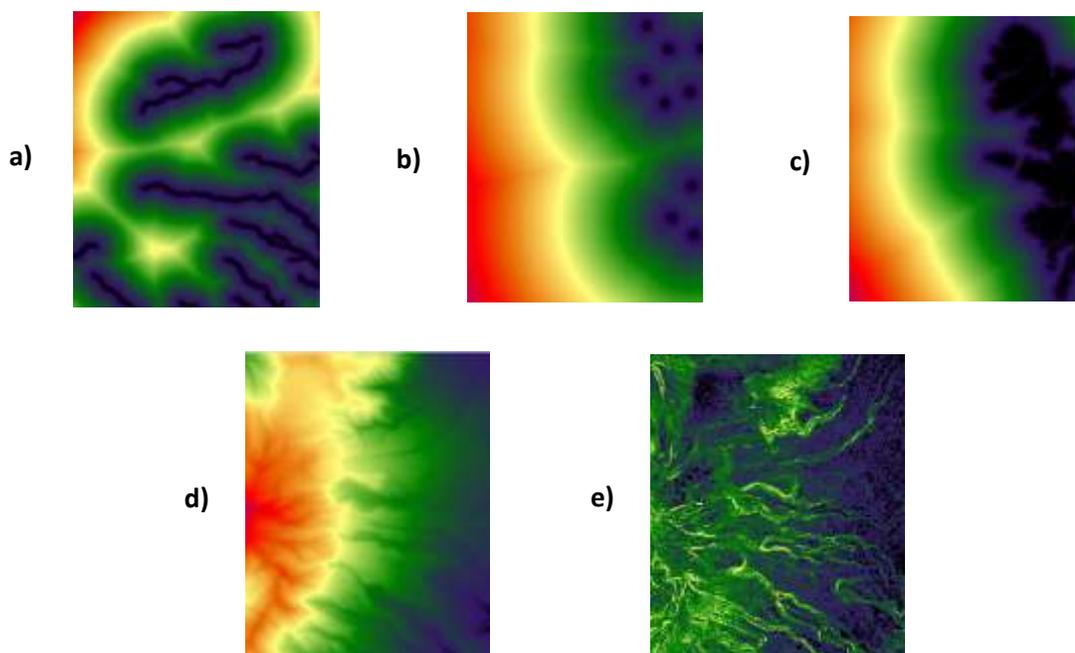
Es importante señalar que, en el proceso de modelación es necesario que todos los archivos ráster tengan el mismo tamaño de píxel; en este caso, se utilizó un tamaño de píxel de 3 m que corresponde a la resolución del modelo digital del terreno.

Posteriormente, se convirtieron todos los ráster en archivos de texto ASCII con la herramienta “*Raster to ASCII*”, puesto que, este formato es compatible para ser importado en el

software TerrSet que trabaja con la extensión .rst. En la figura 44, se ilustran todos los rásters de entrada de las variables mencionadas.

Figura 44

Variables condicionantes



Nota. a) distancia a ríos, b) distancia a poblados, c) distancia a edificaciones, d) altura y e) pendiente.

Simulación de la cobertura de suelo proyectada al 2019

Inicialmente, se rasterizaron los archivos shapefile de cobertura de los diferentes años (2010, 2014 y 2019) mediante la herramienta *“Polygon to Raster”* del software ArcGIS, con un tamaño de píxel de 3 m y convertidos a formato ASCII con la herramienta *“Raster to ASCII”*.

Además, antes de iniciar el proceso, es importante tener en cuenta lo siguiente: las leyendas de todos los mapas deben ser las mismas, las categorías tienen que ser iguales y secuenciales comenzando con 1, los valores de fondo de ambos mapas deben ser iguales y

asignarles un valor de cero, todas las imágenes deben tener la misma resolución y sistema de referencia.

En base a lo expuesto, las leyendas de todos los mapas de coberturas fueron homogeneizadas mediante la herramienta “Reclass” del software TerrSet, de tal manera que, las coberturas de suelo desnudo (cobertura presente solo en al año 2010) y zonas quemadas (cobertura presente solo en el año 2014) se generalizaron a la cobertura más próxima; es decir a matorral y páramo respectivamente; además, a la cobertura de urbano consolidado se asignó un valor de cero; puesto que, esta cobertura se mantuvo constante en todos los años e incluir en la modelación, podría ocasionar alteraciones. Las clases homogeneizadas se indican en la figura 45.

Figura 45

Leyenda homogeneizada para todos los mapas de cobertura del suelo



Posteriormente, se ejecutó el módulo de “Land Change Modeler” ingresando las coberturas de los años 2010 y 2014, las variables impulsoras de cambio (altura, pendiente; distancia a: ríos, poblados y edificaciones). Aquí de debe escoger las transiciones más significativas que en este caso son las siguientes:

- Arbolado forestal a cultivo
- Arbolado forestal a matorral
- Arbolado forestal a prado
- Cultivo a suelo no edificado
- Páramo a cultivo
- Suelo no edificado a edificación
- Cultivo a edificaciones

Luego, hay que evaluar todas las variables mediante la prueba de Cramer usando la ecuación 28 del capítulo II, con el fin añadir al modelo las variables más significativas, estos resultados se indican en el capítulo IV. En la figura 46 se ilustra un ejemplo del valor de Cramer obtenido para la variable pendiente.

Figura 46

Ejemplo del valor de Cramer obtenido para la variable pendiente

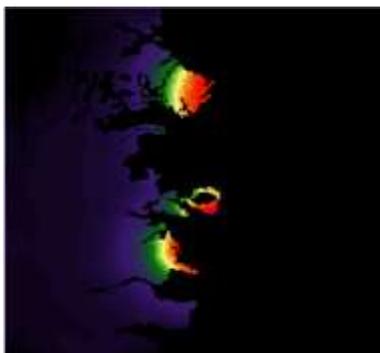
Test and Selection of Site and Driver Variables		
Evaluate:	pendiente	
Test Explanatory Power	Cover Class:	Cramer's V:
	Overall V	0.2176
		PV
		0.0

Usando la Herramienta "MLP" se modelan cada una de las transiciones, en función a las variables impulsoras ingresadas, obteniendo de esta manera una colección de imágenes de potencial de transición, las cuales se presentan en el capítulo IV.

En la figura 47, se observa un ejemplo de una imagen con el potencial de transición de páramo a cultivo, donde: las zonas en rojo indican los lugares que tienen un alto potencial de convertirse en cultivo, mientras que, las zonas azules presentan bajo potencial de llegar a ser cultivos.

Figura 47

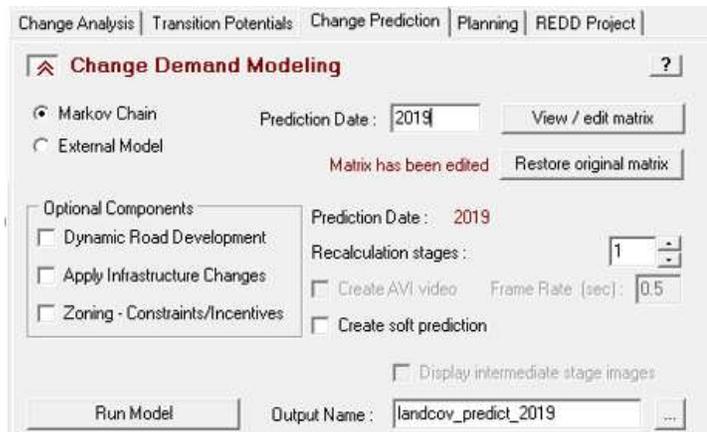
Ejemplo de una imagen de potencial de transición de páramo a cultivo



Se realizó la simulación, obteniendo la imagen de cobertura proyectada para el año 2019, esta imagen se muestra en el capítulo IV. En la figura 48, se ilustra la pestaña de simulación.

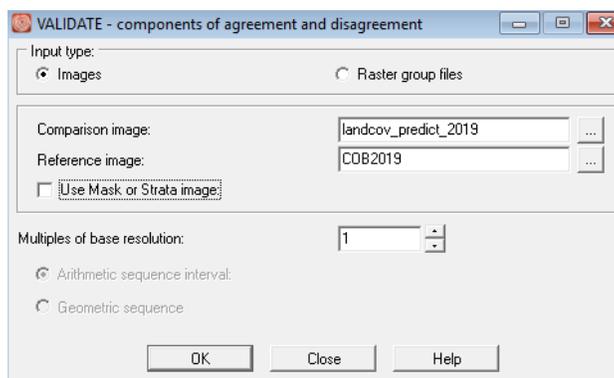
Figura 48

Pestaña de simulación del módulo Land Change Modeler



Validación del modelo predictivo de coberturas del suelo 2019

Mediante la herramienta "Validate", se ingresa la imagen del 2019 obtenida en la simulación (imagen proyectada) y la imagen clasificada (imagen de referencia), ambas imágenes son comparadas y en función de esto se obtiene el índice Kappa con la ecuación 27 del capítulo II. Los resultados de este proceso se analizan en el capítulo IV. En la figura 49, se indica la configuración de la herramienta de validación.

Figura 49*Configuración de la herramienta Validate*

Finalmente, una vez validado el modelo, se realiza la proyección para el año 2030, cuyo resultado y análisis están en el capítulo IV.

Generación del modelo predictivo de cambio de uso del suelo para el año 2030

En el caso del uso del suelo, se realizó el mismo proceso que para la cobertura, solamente se cambian los archivos de entrada por los usos de suelo de los años 2010 y 2014. De la misma forma, hay que analizar cada una de las variables para verificar si son o no significativas para el modelo; luego, realizar la simulación al 2019 y validar el modelo con la imagen de los usos de referencia del año 2019 y finalmente, se obtiene el modelo de cambio de uso de suelo proyectado para el 2030; los resultados de la simulación, validación y modelación se detallan en el capítulo IV.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

En este capítulo se detallan los resultados obtenidos durante el desarrollo del presente proyecto de investigación; además, se realizó un análisis de los resultados, con la finalidad de detallar y entender lo obtenido.

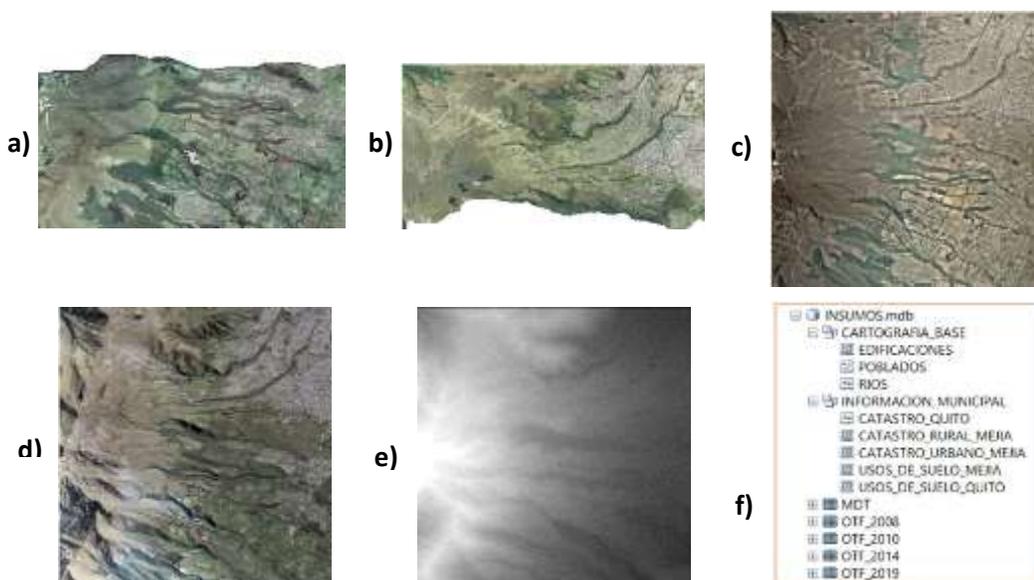
Resultados de la recopilación y estandarización de la información

Se obtuvieron los siguientes resultados: cuatro ortofotos recortadas del área de estudio de los diferentes años (2008, 2010, 2014 y 2019), un modelo digital del terreno (MDT) y una geodatabase que contiene los catastros y usos de suelo de los cantones Quito y Mejía.

En la figura 50, se observan todos los insumos recopilados y estandarizados, además de la estructura de la geodatabase generada.

Figura 50

Resultado de la recopilación y estandarización de la información



Nota. Ortofotos de los años: a) 2008, b) 2010, c) 2014, d) 2019, e) modelo digital del terreno y f) geodatabase.

Resultados de la evaluación de la exactitud posicional

En la tabla 7, se especifican los estadísticos obtenidos de acuerdo al Estándar Nacional de Precisión de Datos Espaciales (NSSDA) y la normativa IGM en las ortofotos de los años 2014 y 2019.

Tabla 7

Resultados de la evaluación de la exactitud posicional

Parámetros	2008	2010	2014	2019
N° de puntos	12	24	36	36
Distancia mínima [m]	0.40	0.13	0.53	0.16
Distancia máxima [m]	2.71	2.27	2.84	2.18
Distancia promedio [m]	1.44	0.65	1.74	0.86
Desviación estándar [m]	0.78	0.47	0.62	0.59
RMSE _x [m]	1.24	0.51	1.68	0.74
RMSE _y [m]	1.05	0.61	0.77	0.73
RMSE _r [m]	1.52	0.80	1.85	1.04
Precisión NSSDA [m] (95%)	2.51	1.20	3.00	1.80
Precisión IGM [m] (90%)	2.20	1.38	2.63	1.57

Considerando la normal del IGM, en cuanto a la precisión horizontal máxima permitida para ortofotos a escala 1: 5 000 es 1.5 m; sin embargo, la precisión obtenida mediante la normativa NSSDA al 95% de confianza es de: 2.51 m, 1.20 m, 3.00 m y 1.80 m para los años 2008, 2010, 2014 y 2019 respectivamente; en cambio, la precisión de acuerdo al estándar IGM al 90% de confianza es de: 2.20 m, 1.38 m, 2.63 m y 1.57 m para los mismos años; por lo tanto, la única ortofoto que cumple con la precisión horizontal permitida es la ortofoto del año 2010; mientras que, las demás ortofotos no cumplen con la normativa del error máximo permitido en horizontal establecido por el Instituto.

En cuanto a los resultados obtenidos, a pesar de que, la ortofoto del año 2010 cumple con la precisión horizontal, no se utilizó para realizar el proceso de registro, debido a que, solo contiene la parte norte del área de estudio; por tal motivo, se tomó la decisión de usar la ortofoto del año 2019, que tiene 1.57 m de precisión; ya que, la escala de trabajo 1:25 000 admite un error de hasta 7.5 m; por lo tanto, sí se cumple en esta imagen con la normativa.

Resultados del registro de imágenes, en ENVI

En la tabla 8, se ilustran los errores cuadráticos medios (RMS), obtenidos del proceso de registro de las ortofotos (2008, 2010 y 2014) utilizando 7, 15 y 21 puntos de enlace con las transformaciones de primer grado y afín en el software ENVI.

Tabla 8

Resultados de los RMS obtenidos en el registro de las ortofotos, en ENVI

Año	Parámetro	7		15		21	
		Afín	1° grado	Afín	1° grado	Afín	1° grado
2008	N° de tie points	22	18	29	28	32	32
	RMS [m]	2.32	3.01	3.00	2.95	2.67	2.85
2010	N° de tie points	67	68	70	72	78	79
	RMS [m]	2.60	2.68	2.78	2.70	2.62	2.64
2014	N° de tie points	148	149	150	152	162	157
	RMS [m]	2.84	2.84	2.73	2.70	2.72	2.83

Analizando los resultados: para el año 2008, el RMS más bajo es 2.32 m, usando 7 puntos y una transformación afín; sin embargo, al realizar la inspección visual se verifica que el mejor ajuste es el obtenido con 15 puntos, con transformación afín y un RMS de 3.00 m como se observa en la figura 51.

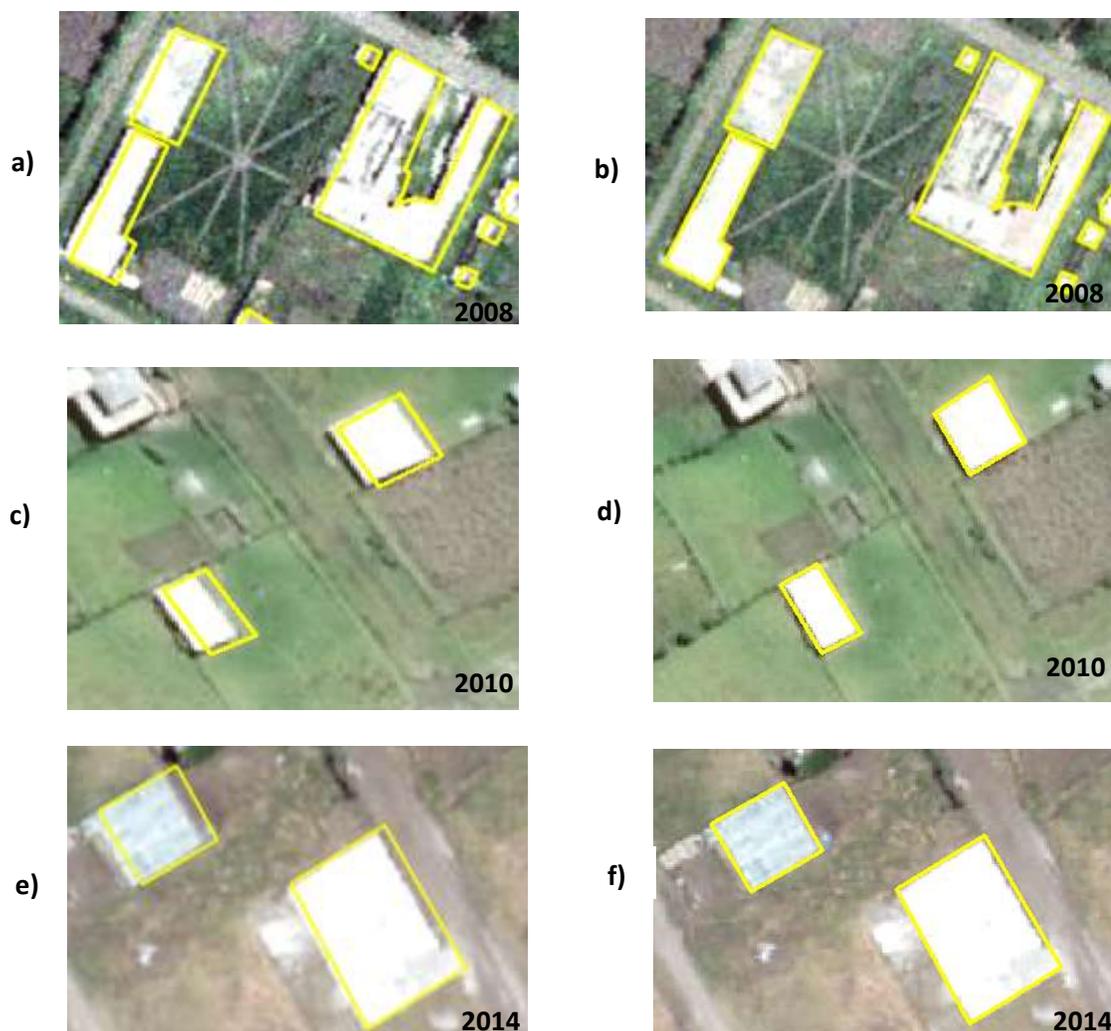
Para el año 2010, el RMS más bajo es 2.60 m, usando 7 puntos y una transformación afín; sin embargo, al realizar la inspección visual se verifica que, el mejor ajuste es el obtenido con 15 puntos, con transformación afín y un RMS de 2.78 m como se observa en la figura 51.

De la misma manera, para el año 2014 el RMS más bajo es 2.70 m, usando 15 puntos y con transformación de primer grado; sin embargo, al realizar la inspección visual se verifica que, el mejor ajuste es el obtenido con 21 puntos, con transformación afín y un RMS de 2.72 m como se observa en la figura 51.

En la figura 51, se observan las ortofotos originales vs. las ortofotos que tuvieron un mejor registro y un vector dibujado de color amarillo con la finalidad de visualizar correctamente los cambios.

Figura 51

Comparación de ortofotos originales vs. registradas, en ENVI



Nota. a), c), e) ortofotos originales de los años 2008, 2010 y 2014; b), d), f) ortofotos mejor registradas de los años 2008, 2010 y 2014.

Resultados del registro de imágenes, en ERDAS IMAGINE

Los resultados obtenidos del registro de las ortofotos (2008, 2010 y 2014), en el software ERDAS IMAGINE se detallan en la tabla 9, donde se ilustran los errores cuadráticos medios (RMS) utilizando 7, 15 y 21 puntos de enlace respectivamente, con las transformaciones de primer grado y afín.

Tabla 9

Resultados de los RMS obtenidos en el registro de las ortofotos, en ERDAS IMAGINE

Año	Parámetro	7		15		21	
		Afín	1° grado	Afín	1° grado	Afín	1° grado
2008	N° de tie points	1380	1349	1329	1347	1382	1405
	RMS	9.35	9.32	9.21	9.28	9.37	9.90
2010	N° de tie points	2189	2158	2173	2157	2188	2381
	RMS	7.27	7.17	7.24	7.10	7.30	7.20
2014	N° de tie points	4543	4491	4522	4492	4551	4585
	RMS	7.06	6.72	6.96	6.89	7.13	7.20

Examinando los resultados: en el año 2008, el RMS más bajo es 9.21 m, usando 15 puntos y una transformación afín y al realizar la inspección visual, se corrobora que esta configuración es la mejor, tal como se observará en la figura 52.

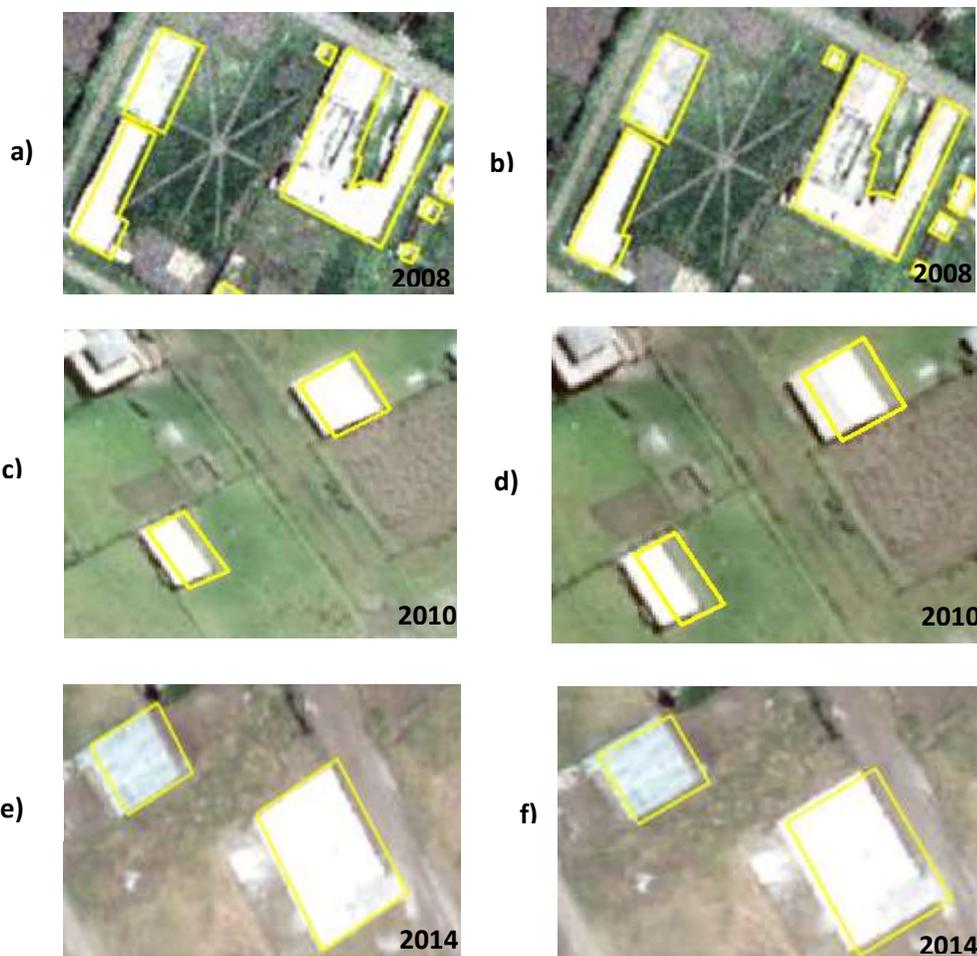
En el año 2010, el RMS más bajo es 7.10 m, usando 15 puntos y una transformación polinomial de primer orden; sin embargo, al realizar la inspección visual se verifica que, el mejor ajuste es el obtenido con 21 puntos, con transformación de primer grado y un RMS de 7.20 m, tal como se visualizará en la figura 52.

Igualmente, para el año 2014, el RMS más bajo es 6.72 m, usando 7 puntos y una transformación polinómica de primer grado; sin embargo, al realizar la inspección visual se verifica que, el mejor ajuste es el obtenido con 21 puntos, con transformación polinomial de primer orden y un RMS de 7.20 m (observar figura 52).

A continuación, la figura 52 ilustra las ortofotos originales vs. las registradas y un vector dibujado de color amarillo, el cual, tiene la finalidad de que se pueda apreciar de mejor forma los cambios.

Figura 52

Comparación de ortofotos originales vs. registradas en ERDAS IMAGINE



Nota. a), c), e) ortofotos originales de los años 2008, 2010 y 2014; b), d), f) ortofotos mejor registradas de los años 2008, 2010 y 2014.

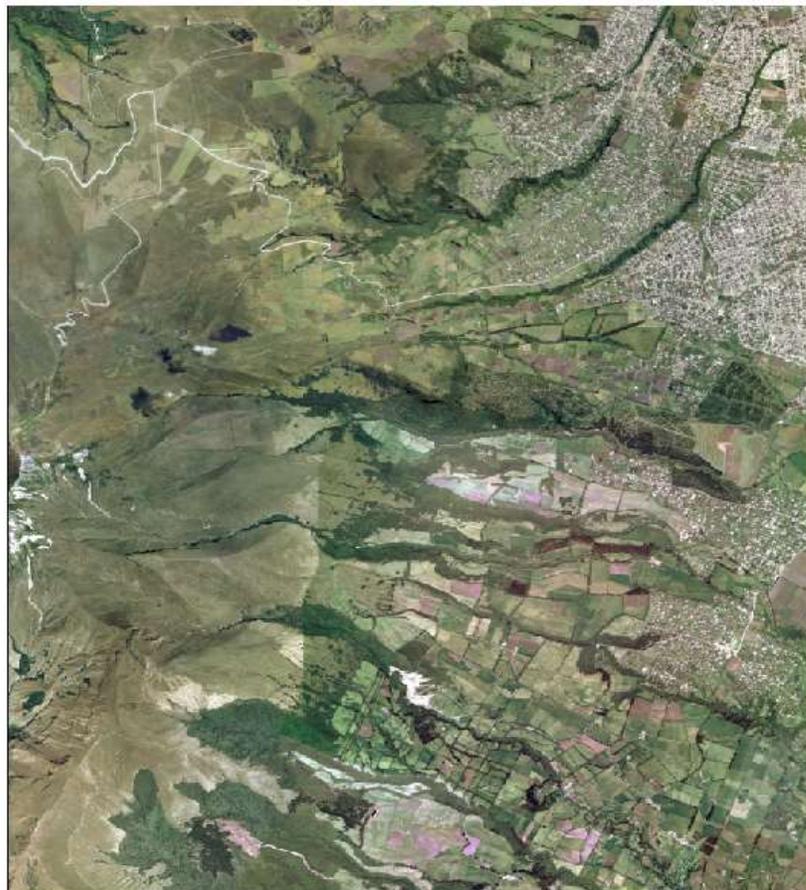
En base a la inspección visual entre las ortofotos registradas con los dos programas, se consideran para los siguientes procedimientos las ortofotos registradas en el software ENVI, ya que son las que mejor se ajustan a la ortofoto base del año 2019.

Resultado de la generación del ortomosaico

Se obtiene un ortomosaico de la unión de las ortofotos de los años 2008 y 2010, el cual, se visualiza en la figura 53.

Figura 53

Ortomosaico generado

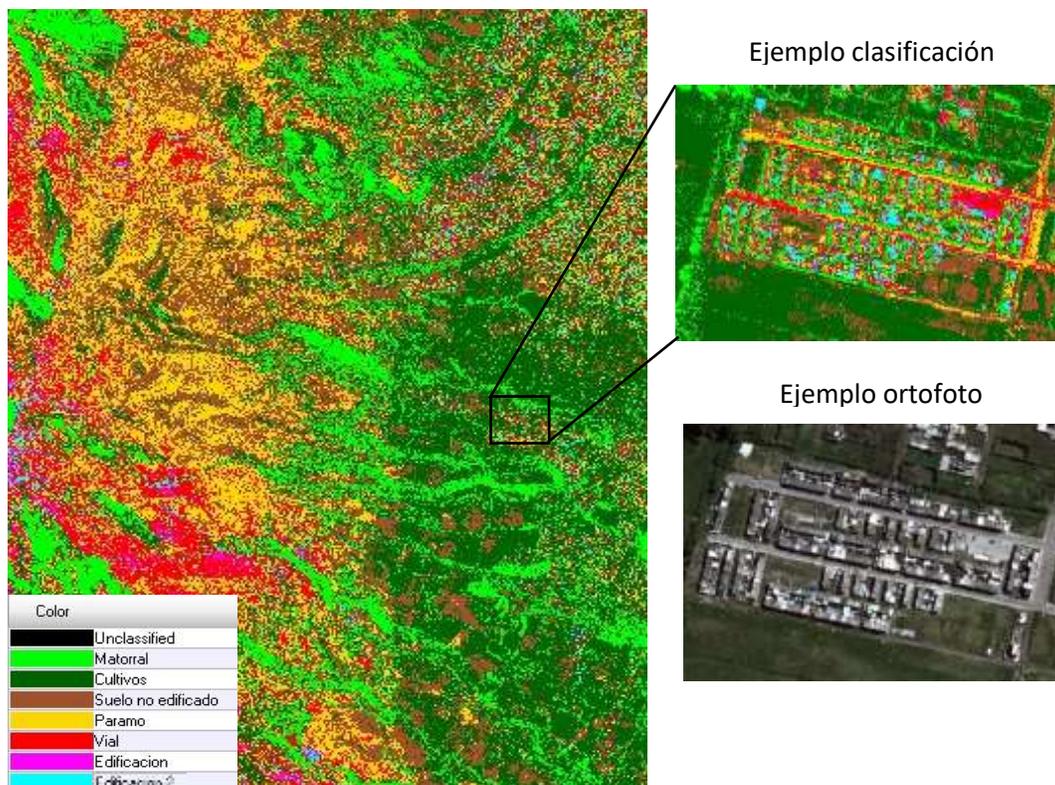


Resultado de la clasificación automatizada no supervisada por píxeles, en ERDAS IMAGINE

En la figura 54, se observa el resultado de la clasificación automatizada no supervisada por píxeles, donde se indica empleadamente el ejemplo de clasificación vs. la ortofoto.

Figura 54

Resultado de la clasificación automatizada no supervisada por píxeles, en ERDAS IMAGINE



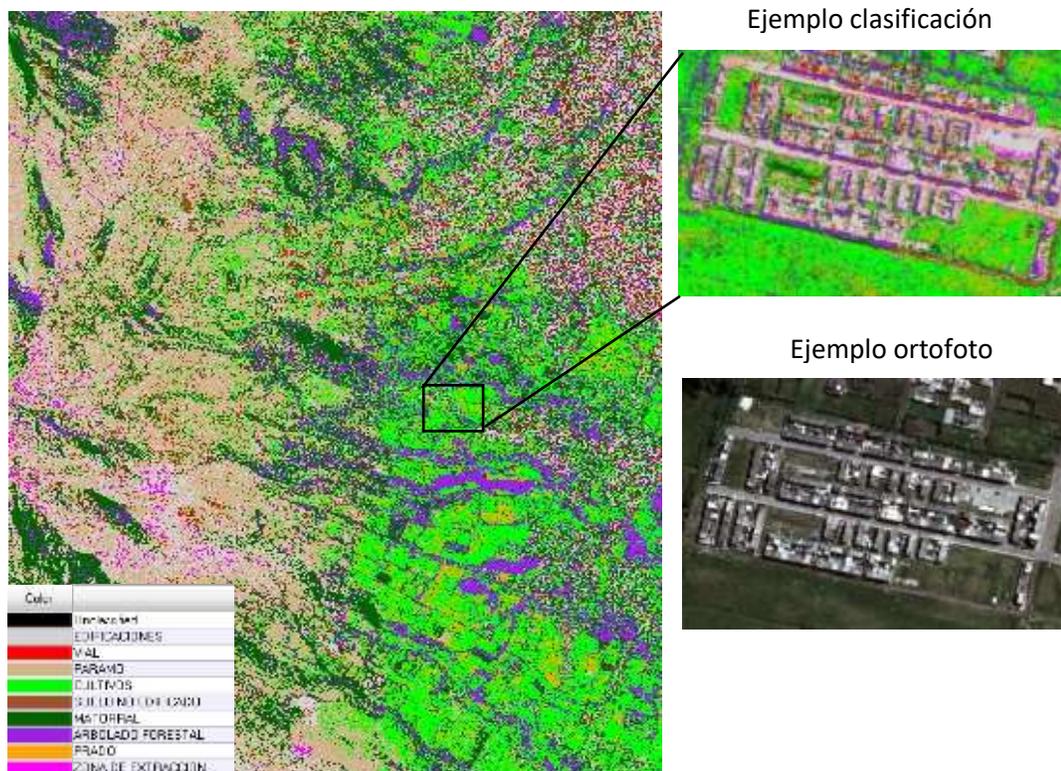
En base al análisis visual de la clasificación, se observa que existen zonas que no están correctamente clasificadas; por ejemplo: algunas zonas de páramo son clasificadas erróneamente como vías, edificaciones y matorral; por otra parte, la cobertura de matorral en algunas zonas coincide, pero en otras no; además, existen píxeles dispersos de todas las coberturas en toda el área de estudio. Por lo tanto, el método de clasificación automatizada no supervisada no es el adecuado para el presente estudio.

Resultado de la clasificación automatizada supervisada por píxeles, en el ERDAS IMAGINE

En la figura 55, se ilustra el resultado de la clasificación automatizada supervisada por píxeles, donde se aprecia empleadamente el ejemplo de clasificación vs. la ortofoto.

Figura 55

Resultado de la clasificación automatizada supervisada por píxeles, en ERDAS IMAGINE



En base al análisis visual de la clasificación automatizada supervisada, observar que existen zonas que no están correctamente clasificadas; por ejemplo: en algunos lugares la cobertura de vías es confundida con la cobertura de edificaciones; por otra parte, la cobertura de arbolado forestal es confundida con las sombras de la ortofoto; además, existen píxeles dispersos de las coberturas de zona de extracción y prados.

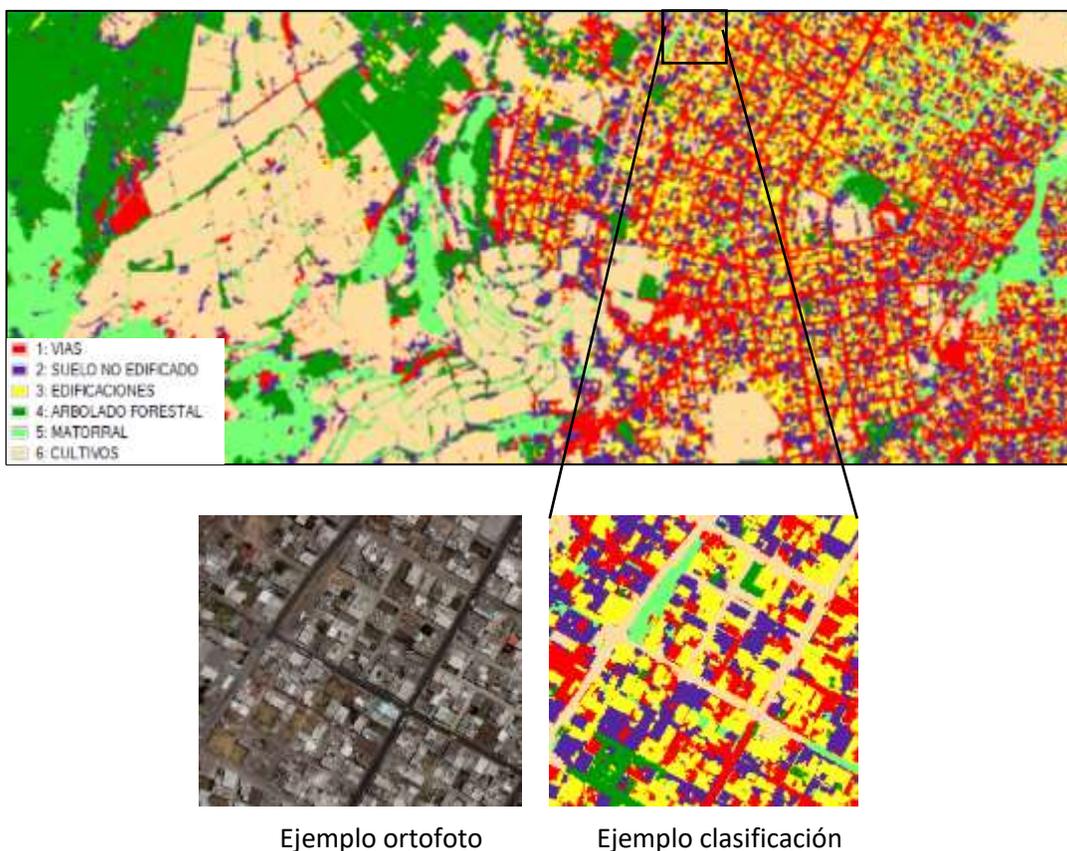
Por lo expuesto anteriormente, se evidencia que este método de clasificación no es el más adecuado para este estudio, ya que existen zonas que no se clasifican adecuadamente.

Resultado de la clasificación supervisada basada en objetos, en ENVI

En la figura 56, se observa los resultados obtenidos de la clasificación automatizada supervisada basada en objetos; cabe recalcar que, se aprecia empleadamente el ejemplo de clasificación vs. la ortofoto.

Figura 56

Resultado de la clasificación automatizada supervisada basada en objetos, en ENVI



De acuerdo, al análisis visual de la clasificación, se observa que, la mayoría de vías se encuentran bien clasificadas; sin embargo, algunas zonas se clasifican erróneamente, confundiendo esta cobertura con cultivos o matorrales. Las edificaciones en su mayoría se logran distinguir, pero los bordes no están bien definidos. Por otro lado, las coberturas como: arbolado forestal y matorral coinciden, pero no en su totalidad.

A pesar de que, este tipo de clasificación distingue mejor los elementos como: edificaciones, vías, suelo no edificado y las coberturas de arbolado forestal y matorral, el nivel de detalle no se ajusta a los requerimientos del proyecto; sin embargo, en cuanto a: cultivos, páramo y prados, no es adecuado utilizar este tipo de clasificación para este estudio.

Resultado de la interpretación/digitalización de las coberturas del suelo

Como resultado de la interpretación/digitalización de las ortofotos, se obtienen las coberturas del suelo para los años 2010, 2014 y 2019. A continuación, la figura 57 muestra el resultado de la interpretación y digitalización de las coberturas del suelo del año 2010; mientras que, la figura 58 indica la distribución porcentual de las coberturas.

Figura 57

Coberturas del suelo, año 2010

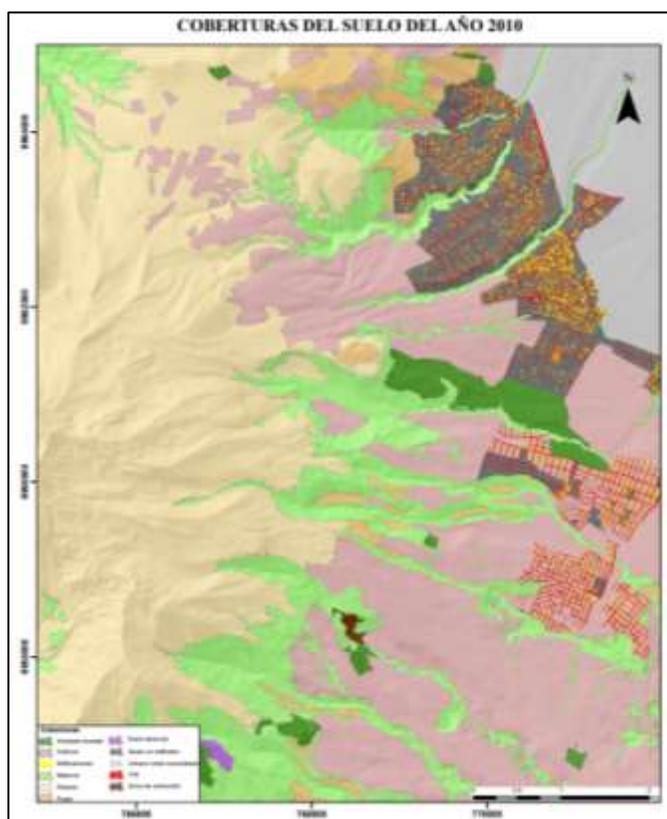
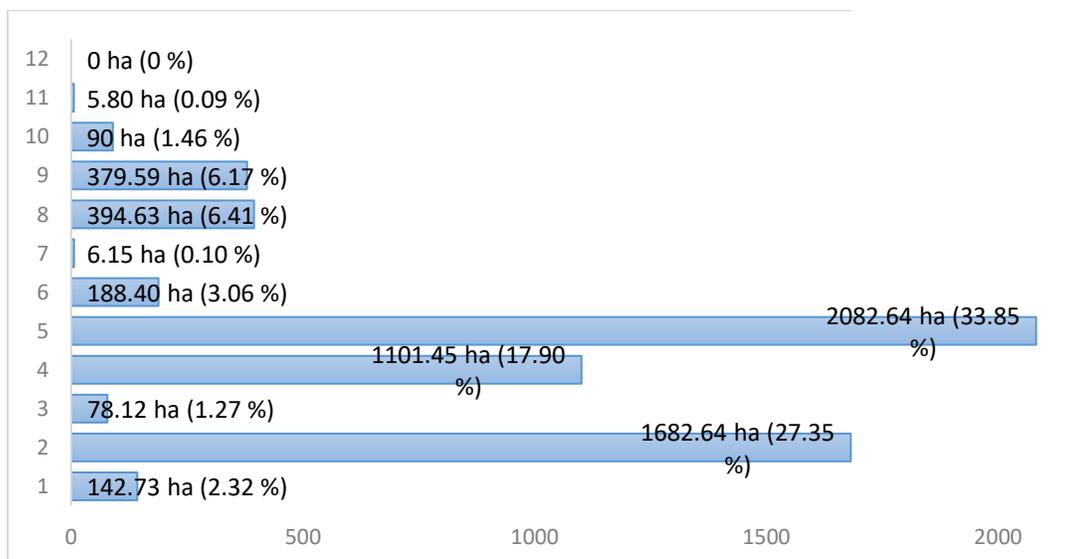


Figura 58

Distribución porcentual de las coberturas del suelo, año 2010



Nota. Los números del 1 al 12 representan las coberturas codificadas. (1) Arbolado forestal, (2) cultivos, (3) edificaciones, (4) matorral, (5) páramo, (6) prado, (7) suelo desnudo, (8) suelo no edificado, (9) urbano mixto consolidado, (10) vial, (11) zona de extracción y (12) zonas quemadas.

Las coberturas del suelo en el año 2010 muestran lo siguiente: la cobertura con mayor presencia es páramo, con 2082.64 ha (33.85%); a continuación, los cultivos, con 1682.64 ha (27.35 %); matorrales, con 1101.45 ha (17.90); suelo no edificado, con 394.63 ha (6.41%); urbano mixto consolidado, con 379.59 ha (6.17%); prado, con 188.40 ha (3.06%); arbolado forestal, con 142.73 ha (2.32%); vial, con 90 ha (1.46%); edificaciones, con 78.12 ha (1.27%); zona de extracción, con 5.80 ha (0.09%); y finalmente, suelo desnudo, con 6.15 ha (0.10%).

De la misma forma, en la figura 59 se aprecia el resultado de la interpretación y digitalización de las coberturas del suelo del año 2014; por otro lado, la figura 60 detalla la distribución porcentual de las coberturas.

Figura 59

Coberturas del suelo, año 2014

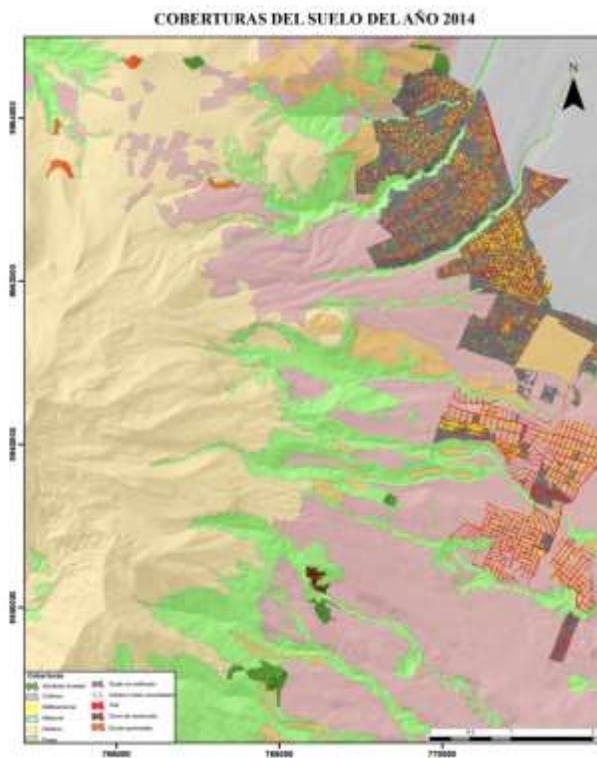
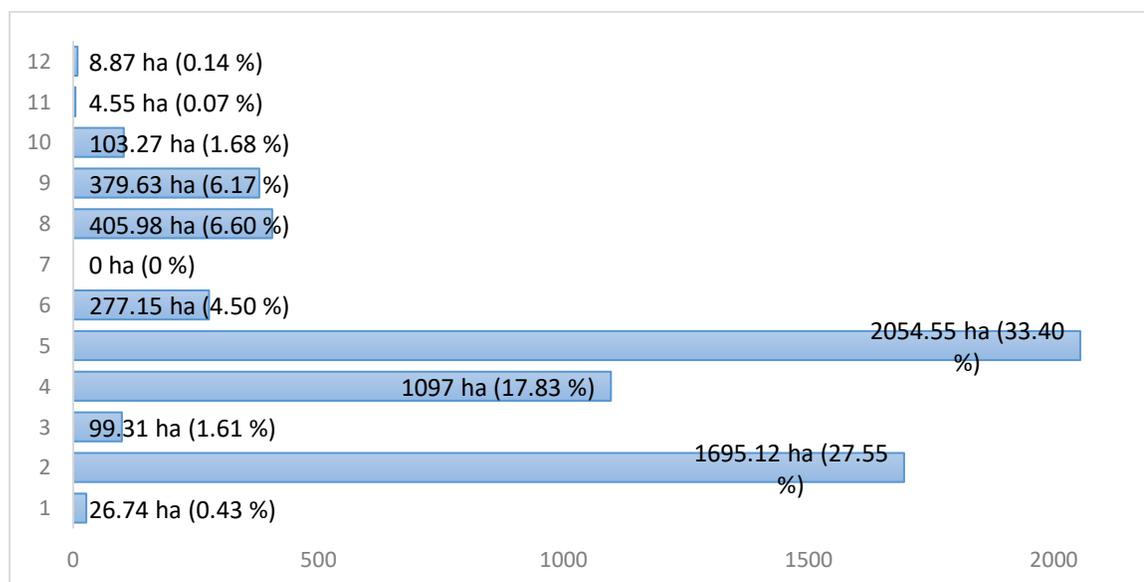


Figura 60

Distribución porcentual de las coberturas del suelo, año 2014



Nota. Los números del 1 al 12 representan las coberturas codificadas. (1) Arbolado forestal, (2) cultivos, (3) edificaciones, (4) matorral, (5) páramo, (6) prado, (7) suelo desnudo, (8) suelo no edificado, (9) urbano mixto consolidado, (10) vial, (11) zona de extracción y (12) zonas quemadas.

Las coberturas del suelo en el año 2014 indican que, la cobertura con mayor presencia es páramo, con 2054.55 ha (33.40%); a continuación, los cultivos, con 1695.12 ha (27.55 %); igualmente, matorrales, con 1097 ha (17.83); suelo no edificado, con 405.98 ha (6.60%); urbano mixto consolidado, con 379.63 ha (6.17%); prado, con 277.15 ha (4.50%); vial, con 103.27 ha (1.68%); edificaciones, con 99.31 ha (1.61%); arbolado forestal, con 26.74 ha (0.43%); zonas quemadas, con 8.87 ha (0.14 %); finalmente, zona de extracción con 4.55 ha (0.07%).

Asimismo, en la figura 61 se visualiza el resultado de la interpretación y digitalización de las coberturas del suelo del año 2019; mientras que, la figura 62 muestra la distribución porcentual de las coberturas.

Figura 61

Coberturas del suelo, año 2019

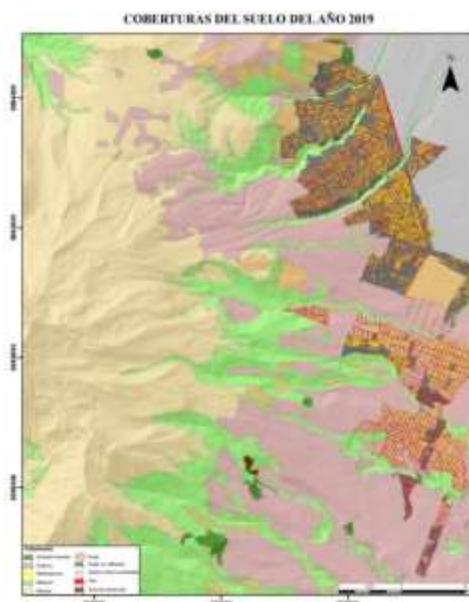
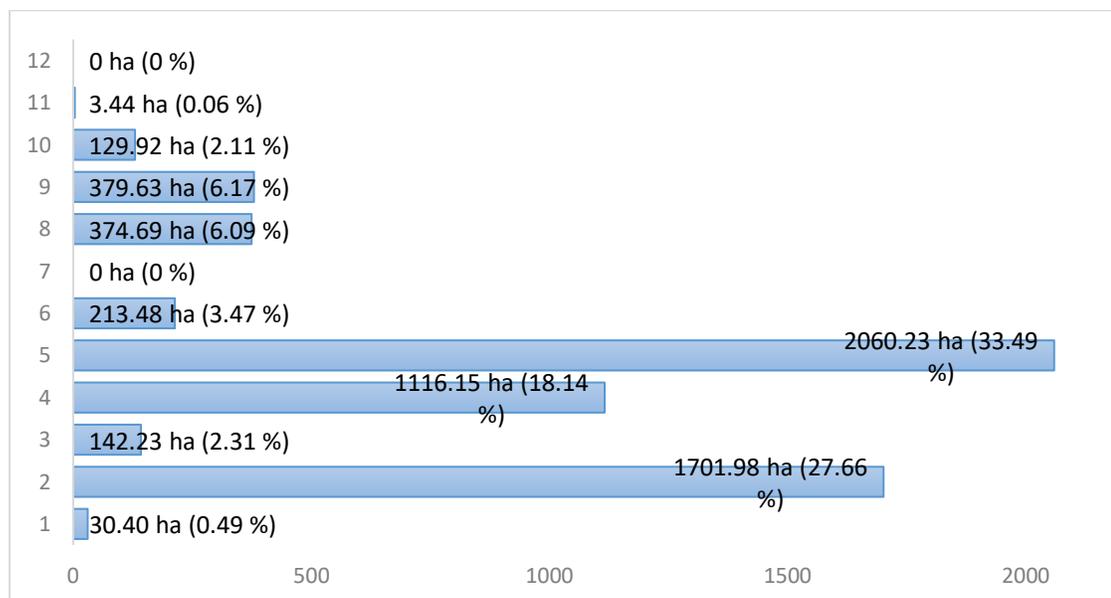


Figura 62

Distribución porcentual de la cobertura del suelo, año 2019



Nota. Los números del 1 al 12 representan las coberturas codificadas. (1) Arbolado forestal, (2) cultivos, (3) edificaciones, (4) matorral, (5) páramo, (6) prado, (7) suelo desnudo, (8) suelo no edificado, (9) urbano mixto consolidado, (10) vial, (11) zona de extracción y (12) zonas quemadas.

Las coberturas del suelo en el año 2019 indica que, la cobertura con mayor presencia es páramo, con 2060.23 ha (33.49%); a continuación, los cultivos con 1701.98 ha (27.66 %); luego, matorrales, con 1116.15 ha (18.14); urbano mixto consolidado, con 379.63 ha (6.17%); suelo no edificado, con 374.69 ha (6.09%); prado, con 213.48 ha (3.47%); edificaciones, con 142.23 Ha. (2.31%); vial, con 129.92 ha (2.11%); arbolado forestal, con 30.40 Ha. (0.49%); finalmente, zona de extracción 3.44 ha (0.06%).

Resultado de la interpretación / digitalización de los usos del suelo

Se obtuvieron los usos del suelo para los años 2010 (Quito y Mejía) y 2014 (Mejía), a través de la interpretación / digitalización; cabe recalcar que, solo son una aproximación de los oficiales (2019 y 2014).

A continuación, la figura 63, ilustra el resultado de la interpretación y digitalización aproximada de los usos del suelo del año 2010; mientras que, la figura 64, indica la distribución porcentual de los usos.

Figura 63

Usos del suelo, año 2010

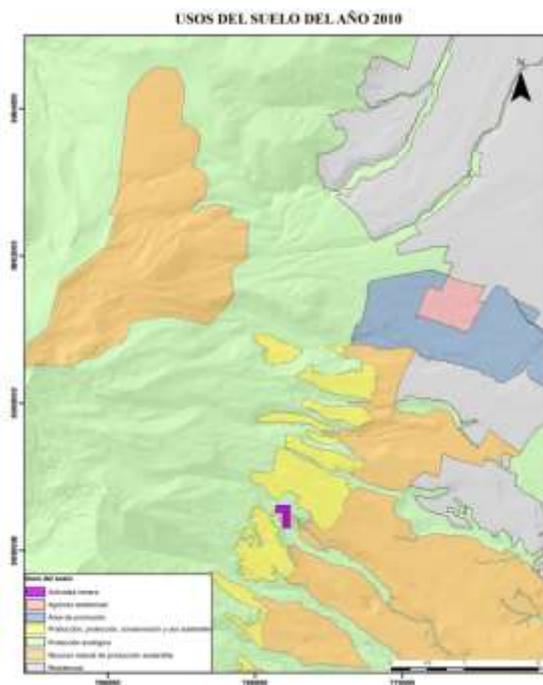
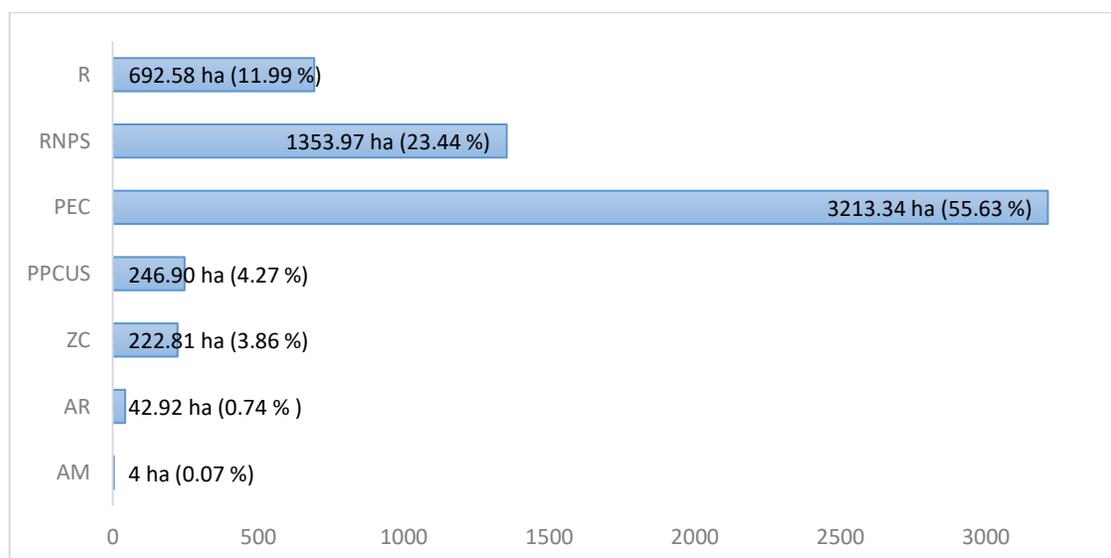


Figura 64

Distribución porcentual de los usos del suelo, año 2010



Nota. Las siglas representan los usos codificados. (AM) actividad minera, (AR) agrícola residencial, (ZC) Área promoción, (PPCUS) producción, protección, conservación y uso sostenible, (PEC) protección ecológica, (RNPS) recurso natural producción sostenible y (R) residencial.

EL uso del suelo en el año 2010 indica que, el uso con mayor presencia es protección ecológica, con 3213.34 ha (55.63 %); a continuación, los recursos naturales de producción sostenible, con 1353.97 ha (23.44 %); residencial, con 692.58 ha (11.99%); producción, protección, conservación y uso sostenible, con 246.90 ha (4.27%); áreas de promoción, con 222.81 ha (3.86%); agrícola residencial, con 42.92 ha (0.74%); y finalmente, actividad minera, con 4 ha (0.07%).

Igualmente, la figura 65, muestra la unión resultante de la interpretación y digitalización aproximada de los usos del suelo del año 2014, en el sector de Mejía y Quito, como el resultado de la recopilación oficial; mientras que, la figura 66, detalla la distribución porcentual de los usos.

Figura 65

Usos del suelo, año 2014

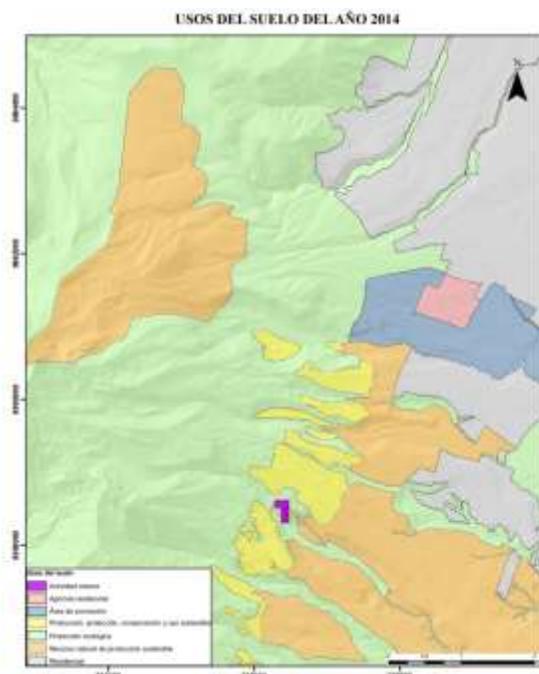
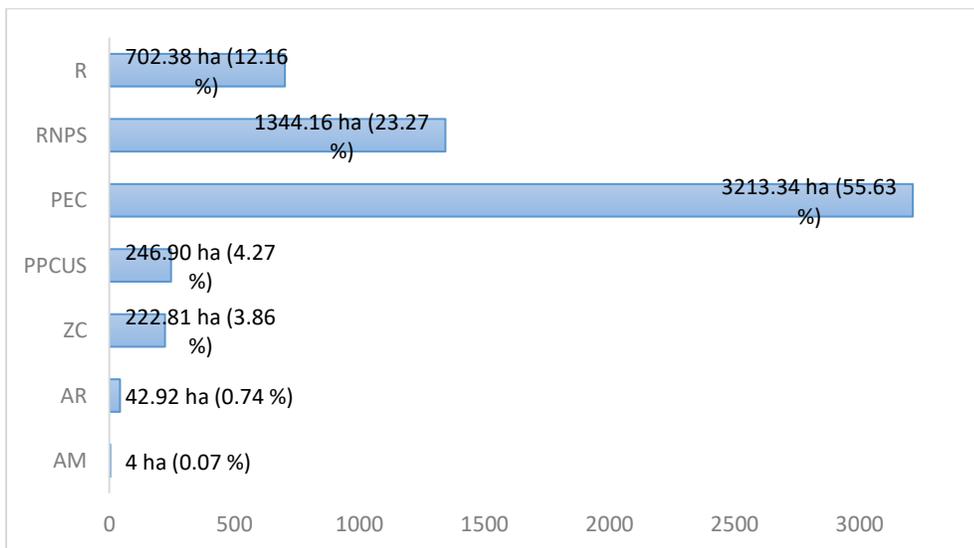


Figura 66

Distribución porcentual de los usos del suelo, año 2014



Nota. Las siglas representan los usos codificados. (AM) actividad minera, (AR) agrícola residencial, (ZC) Área promoción, (PPCUS) producción, protección, conservación y uso

sostenible, (PEC) protección ecológica, (RNPS) recurso natural producción sostenible y (R) residencial.

El uso del suelo en el año 2014 ilustra que, el uso con mayor presencia es protección ecológica, con 3213.34 ha (55.63); a continuación, los recursos naturales de producción sostenible, con 1344.16 ha (23.27 %); residencial, con 702.38 ha (12.16%); producción, protección, conservación y uso sostenible, con 246.90 ha (4.27%); áreas de promoción, con 222.81 ha (3.86%); agrícola residencial, con 42.92 ha (0.74%); y finalmente, actividad minera, con 4 ha (0.07%).

A continuación, la figura 67, ilustra el resultado de la recopilación de información de los usos del suelo del año 2019; mientras que, la figura 68, indica la distribución porcentual de los usos.

Figura 67

Usos del suelo, año 2019

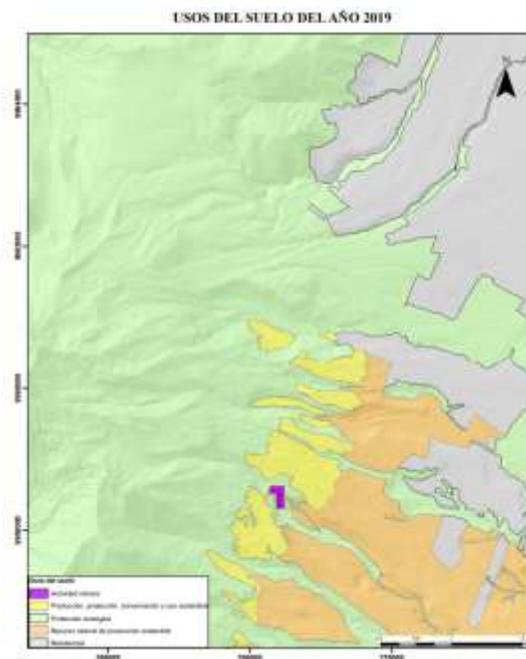
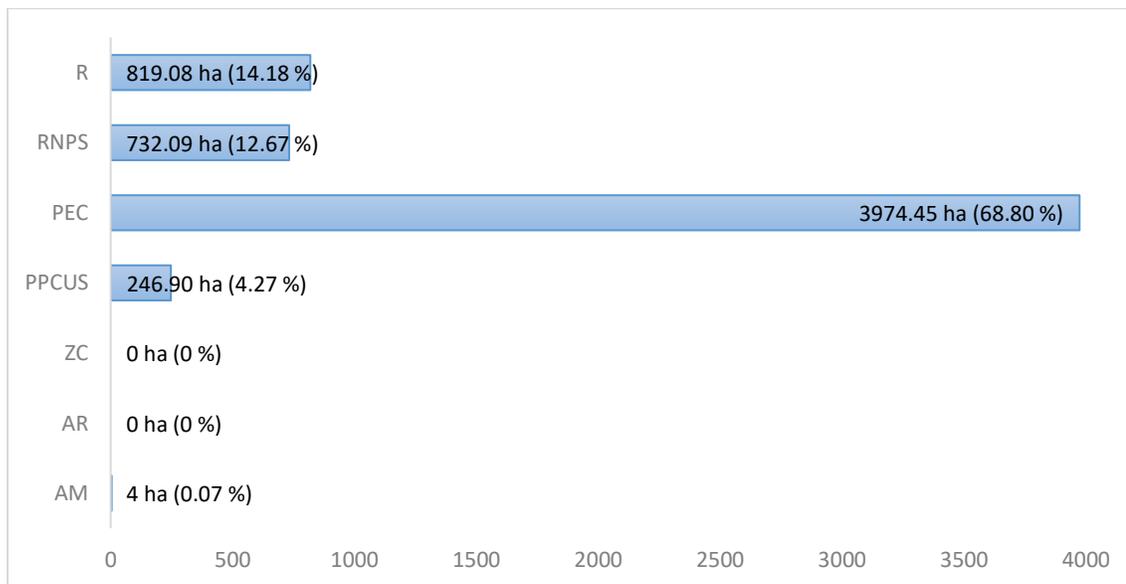


Figura 68

Distribución porcentual de los usos del suelo, año 2019



Nota. Las siglas representan los usos codificados. (AM) actividad minera, (AR) agrícola residencial, (ZC) Área promoción, (PPCUS) producción, protección, conservación y uso sostenible, (PEC) protección ecológica, (RNPS) recurso natural producción sostenible y (R) residencial.

El uso del suelo en el año 2019 detalla que, el uso con mayor presencia es protección ecológica, con 3974.45 ha (68.80); a continuación, residencial, con 819.08 ha (14.18 %); recurso natural producción sostenible, con 732.09 ha (12.67%); producción, protección, conservación y uso sostenible, con 246.90 ha (4.27%); desaparecen las áreas de promoción y el uso agrícola residencial; y finalmente, actividad minera, con 4 ha (0.07%).

Resultado de la validación de la clasificación

Revisando la tabla 3 del capítulo II, comparando con el resultado del valor obtenido del índice kappa de 0.94, se determina que la clasificación es de excelente calidad.

Análisis de los resultados de las diferencias de coberturas del suelo en el período 2010-2014

A continuación, la tabla 10 detalla los cambios de coberturas del suelo entre el año 2010 al 2014.

Tabla 10

Cambios de las coberturas entre el período 2010 - 2014

		Año 2014											
		1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12	Total
Año 2010	1 [ha]	25.1	38.3	0.6	18.5	0	58.6	0	0	1.2	0	0	142.7
	%	17.6	26.9	0	13	0	41.1	0	0	0.8	0	0	100
	2 [ha]	0	1588.5	8.9	8.4	1.6	43.7	25.5	0	5.9	0	0	1682.6
	%	0	94.4	0.5	0.5	0	2.6	1.5	0	0	0	0	100
	3 [ha]	0	0	77.5	0	0	0	0.5	0	0	0	0	78.1
	%	0	0	99.2	0	0	0	0.6	0	0	0	0	100
	4 [ha]	1.6	34.1	0	1059.6	0	1	3.6	0	1.1	0	0	1101.5
	%	0	3.1	0	96.2	0	0	0	0	0	0	0	100
	5 [ha]	0	18.8	0	2.3	2052.8	0	0	0	0	0	8.8	2082.6
	%	0	0.9	0	0	98.6	0	0	0	0	0	0	100
	6 [ha]	0	13.7	0	0.7	0	173.9	0	0	0	0	0	188.4
	%	0	7.3	0	0	0	92.3	0	0	0	0	0	100
7 [ha]	0	0	0	6.2	0	0	0	0	0	0	0	6.2	
%	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	100	
8 [ha]	0	1.5	12.2	0	0	0	375.8	0	5	0	0	394.6	
%	0	0	3.1	0	0	0	95.2	0	1	0	0	100	
9 [ha]	0	0	0	0	0	0	0	379.6	0	0	0	379.6	
%	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	100	
10 [ha]	0	0	0	0	0	0	0	0	89.9	0	0	90	
%	0	0	0	0	0	0	0	0	99.9	0	0	100	
11 [ha]	0	0	0	1.4	0	0	0	0	0	4.3	0	5.8	
%	0	1.4	0	24.5	0	0	0	0	0	74.1	0	100	
Total		26.7	1695.1	99.3	1097	2054.6	277.2	406	379.6	103.3	4.6	8.9	6152.2

Nota. Los números del 1 al 12 representan las coberturas codificadas. (1) Arbolado forestal, (2) cultivos, (3) edificaciones, (4) matorral, (5) páramo, (6) prado, (7) suelo desnudo, (8) suelo no edificado, (9) urbano mixto consolidado, (10) vial, (11) zona de extracción y (12) zonas quemadas.

Las coberturas del suelo, en el año 2014 con respecto al año 2010, se diferenciaron en: la cobertura arbolado forestal cambio a prado, con 58.6 ha y a cultivos, con 38.3 ha; en el caso, cultivos cambio a la cobertura de prado, con 43.7 ha; asimismo, edificaciones cambio a la

cobertura de suelo no edificado, con 0.5 ha; de igual manera, matorral cambio a la cobertura de cultivos, con 34.1 ha; para el caso, páramo cambia a zonas quemadas, con 8.8 ha; igualmente, prados cambia, con 13.7 ha a cultivos; suelo desnudo cambia totalmente a la cobertura de matorral; de igual forma, suelo no edificado cambia a edificaciones, con 12.2 ha; urbano mixto consolidado no cambia para el año 2014; asimismo, vías cambia a suelo no edificado, con 89.9 ha; y finalmente, zona de extracción cambia a matorral, con 1.4 ha.

En el año 2014, se evidencia un notable decrecimiento en la cobertura de arbolado forestal, ya que de 142.73 ha que se tenía en el año 2010, se pierden 115.99 ha para el año 2014, debido a la construcción de nuevas urbanizaciones; también, cabe recalcar que, se perdió totalmente la cobertura de suelo desnudo, por la regeneración de esta zona a matorral; además, emergió la cobertura de zonas quemadas, debido a la quema de cultivos en estos sitios, sin control.

Análisis de los resultados de las diferencias de las coberturas del suelo en el período 2014-2019

A continuación, la tabla 11 muestra los cambios de coberturas del suelo entre el período 2014 - 2019.

Tabla 11*Cambios de las coberturas entre el período 2014 – 2019*

		Año 2019											Total	
		1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12		
Año 2014	1	[ha]	26.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26.7
		%	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
	2	[ha]	2.1	1597.6	12.5	15.9	21.2	7.2	27.8	0	11	0	0	1695.1
		%	0.1	94.3	0.7	0.9	1.3	0.4	1.6	0	0.7	0	0	100
	3	[ha]	0	0.4	97.8	0	0	0	1.1	0	0	0	0	99.3
		%	0	0	98.5	0	0	0	1.1	0	0	0	0	100
	4	[ha]	0.7	5.6	0	1090.3	0	0	0.4	0	0	0	0	1097
		%	0.1	0.5	0	99.4	0	0	0.	0	0	0	0	100
	5	[ha]	0	24.3	0	0	2030.2	0	0	0	0	0	0	2054.6
		%	0	1.2	0	0	98.8	0	0	0	0	0	0	100
	6	[ha]	0.9	63.3	0	6.7	0	206.3	0	0	0	0	0	277.2
		%	0.3	22.8	0	2.4	0	74.4	0	0	0	0	0	100
8	[ha]	0	10.6	31.9	2.3	0	0	344.4	0	16.8	0	0	406	
	%	0	2.6	7.9	0.6	0	0	84.8	0	4.1	0	0	100	
9	[ha]	0	0	0	0	0	0	0	379.6	0	0	0	379.6	
	%	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	100	
10	[ha]	0	0.1	0	0.1	0	0	1		102.1	0	0	103.3	
	%	0	0.1	0	0.1	0	0	1	0	98.9	0	0	100	
11	[ha]	0	0.1	0	1.0	0	0	0	0	0	3.4	0	4.6	
	%	0	2.7	0	21.9	0	0	0	0	0	75.4	0	100	
12	[ha]	0	0	0	0	8.9	0	0	0	0	0	0	8.9	
	%	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	100	
Total			30.4	1702	142.2	1116.2	2060.2	213.5	374.7	379.6	129.9	3.4	0	6152.2

Nota. Los números del 1 al 12 representan las coberturas codificadas. (1) Arbolado forestal, (2) cultivos, (3) edificaciones, (4) matorral, (5) páramo, (6) prado, (7) suelo desnudo, (8) suelo no edificado, (9) urbano mixto consolidado, (10) vial, (11) zona de extracción y (12) zonas quemadas.

Las coberturas del suelo, en el año 2019 con respecto al año 2014, difieren en: la cobertura de edificaciones cambia a suelo no edificado, con 1.1 ha; de igual manera, matorral cambia a cultivos, con 5.6 ha; en el caso, páramo cambia a cultivos, con 24.3 ha; igualmente, prados cambia a cultivos, con 63.3 ha; de igual forma, suelo no edificado cambia a edificaciones, con 31,9 ha y finalmente, zonas quemadas se regenera totalmente a la cobertura de páramos.

En el año 2019, se evidencia un notable crecimiento en la cobertura de edificaciones, ya que de 99.31 ha; aumentan a 142.92 ha en este periodo, este aumento se debe a la construcción de nuevas urbanizaciones; además, cabe mencionar que, la cobertura de zonas quemadas se regenera y desaparece.

Análisis de los resultados de las diferencias de usos del suelo en el período 2010 - 2014

A continuación, la tabla 12 muestra los cambios de los usos del suelo entre el año 2010 al 2014.

Tabla 12

Cambios de usos del suelo entre el período 2010 - 2014

		Año 2014							TOTAL	
		AM	AG	AP	PPCUS	PEC	RNPS	R		
Nao 2010	AM	[ha]	4.00	0	0	0	0	0	0	4.00
		%	100	0	0	0	0	0	0	100
	AG	[ha]	0	42.92	0	0	0	0	0	42.92
		%	0	100	0	0	0	0	0	100
	AP	[ha]	0	0	222.81	0	0	0	0	222.81
		%	0	0	100	0	0	0	0	100
	PPCUS	[ha]	0	0	0	246.90	0	0	0	246.90
		%	0	0	0	100	0	0	0	100
	PEC	[ha]	0	0	0	0	3213.34	0	0	3213.34
		%	0	0	0	0	100	0	0	100
	RNPS	[ha]	0	0	0	0	0	1344.16	9.81	1353.97
		%	0	0	0	0	0	99.28	0.72	100
	R	[ha]	0	0	0	0	0	0	692.58	692.58
		%	0	0	0	0	0	0	100	100
TOTAL		4	42.92	222.81	246.90	3213.34	1344.16	702.38	5776.52	

Nota. Las siglas representan los usos codificados. (AM) actividad minera, (AR) agrícola residencial, (ZC) Área promoción, (PPCUS) producción, protección, conservación y uso sostenible, (PEC) protección ecológica, (RNPS) recurso natural producción sostenible y (R) residencial.

Los usos del suelo, en el año 2014 con respecto al año 2010, se mantuvieron en: actividad minera; agrícola residencial; área de promoción; producción, protección, conservación y uso sostenible; protección ecológica; residencial; sin embargo, el uso del suelo de recurso natural producción sostenible cambia a uso residencial, con 9.81 ha (0.72%).

Análisis de los resultados de las diferencias de usos del suelo en el período 2014-2019

De igual manera, la tabla 13 ilustra las diferencias de los usos del suelo en el período 2014 - 2019

Tabla 13

Cambios de usos del suelo entre el período 2014-2019

		Año 2019						
		AM	PPCUS	PEC	RNPS	R	TOTAL	
Año 2014	AM	[ha]	4.00	0	0	0	0	4.00
		%	100	0	0	0	0	100
	AG	[ha]	0	0	0	0	42.92	42.92
		%	0	0	0	0	100	100
	AP	[ha]	0	0	222.81	0	0	222.81
		%	0	0	100	0	0	100
	PPCUS	[ha]	0	246.90	0	0	0	246.90
		%	0	100	0	0	0	100
	PEC	[ha]	0	0	3198.94	0	14.40	3213.34
		%	0	0	99.55	0	0.45	100
	RNPS	[ha]	0	0	552.69	732.09	59.38	1344.16
		%	0	0	41.12	54.46	4.42	100
	R	[ha]	0	0	0	0	702.38	702.38
		%	0	0	0	0	100	100
TOTAL		4.00	246.90	3974.45	732.09	819.08	5776.52	

Nota. Las siglas representan los usos codificados. (AM) actividad minera, (AR) agrícola residencial, (ZC) Área promoción, (PPCUS) producción, protección, conservación y uso sostenible, (PEC) protección ecológica, (RNPS) recurso natural producción sostenible y (R) residencial.

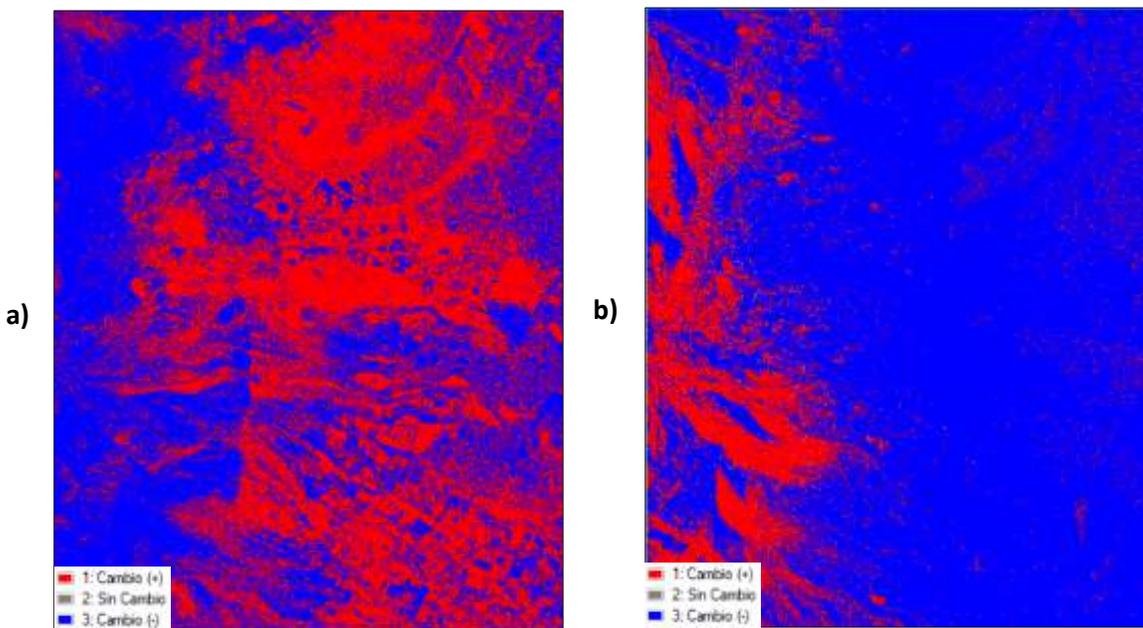
Los usos del suelo en el año 2019 con respecto al año 2014, se conservan en: actividad minera; producción; protección, conservación y uso sostenible y residencial; mientras que, cambian los usos de: agrícola residencial a residencial, con 42.92 ha (100%); áreas de promoción a protección ecológica, con 222.81 ha (100%); protección ecológica a residencial, con 14.40 ha (0.45%); y finalmente, el uso de recurso natural producción sostenible cambia a protección ecológica, con 552.69 ha (41.12%) y residencial, con 59.38 ha (4.42%).

Resultados de la detección de cambios de las coberturas del suelo en ENVI, imagen vs. imagen

En la figura 69, se ilustran los resultados obtenidos entre los diferentes años.

Figura 69

Imágenes resultantes de la detección de cambio de las coberturas en ENVI, imagen vs. imagen



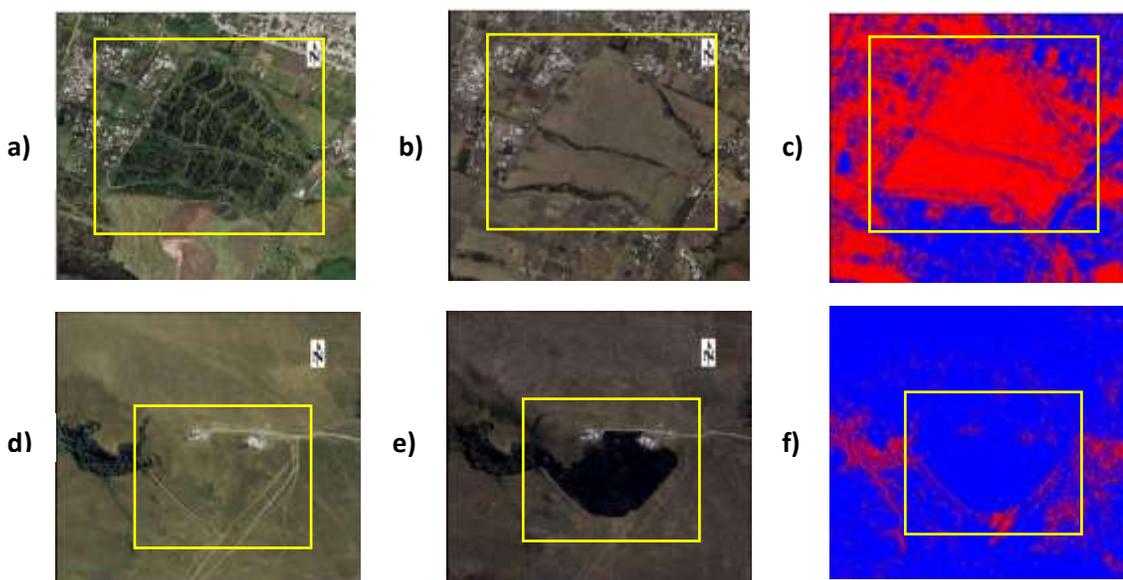
Nota. a) Detección de cambios 2010-2014, b) detección de cambios 2014-2019.

Las imágenes resultantes de la detección de cambios están codificadas por colores, donde, el color rojo representa los cambios positivos (aparición de una nueva cobertura); mientras que, el color azul representa los cambios negativos (perdida de una cobertura

existente). De acuerdo al análisis visual realizado en ambas imágenes de detección de cambios se puede observar que, en ciertas zonas se identifican correctamente los cambios; sin embargo, en otras no, tal como se muestra en las figuras 70 y 71.

Figura 70

Comparación de las ortofotos 2010 y 2014 vs. imagen de detección de cambios de las coberturas, en ENVI

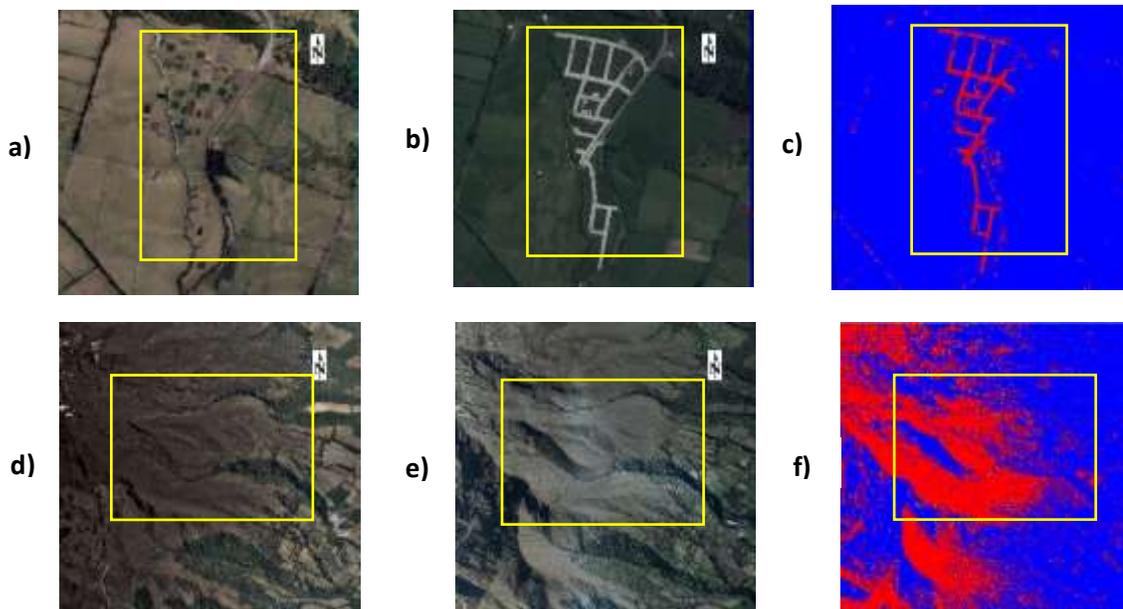


Nota. a) y d) Ortofoto 2010, b) y e) ortofoto 2014, c) correcta detección de cambios y f) incorrecta detección de cambios.

En la imagen b) , se visualiza como aparece la cobertura de suelo sin edificar con respecto, a la imagen a), que tiene la cobertura de cultivo; por ende, el software detecta el cambio de color rojo debido a que emerge una nueva cobertura; sin embargo, en la imagen d), se observa lo que en un inicio era páramo , en la imagen e) , representa la cobertura de zonas quemadas; por tal motivo, la imagen f) tiene el cambio de color de azul, ya que, desaparece dicha cobertura.

Figura 71

Comparación de las ortofotos 2014 y 2019 vs. imagen de detección de cambios de las coberturas, en ENVI



Nota. a) y d) Ortofoto 2014, b) y e) ortofoto 2019, c) correcta detección de cambios y f) incorrecta detección de cambios.

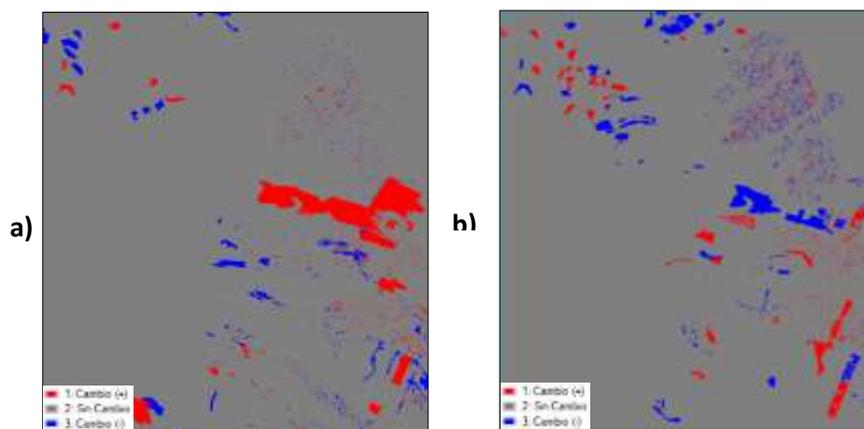
En la imagen a), con respecto a la imagen b), se observa como desaparece la cobertura de cultivos por la cobertura vial; por ende, la detección del cambio debería ser de color azul, debido a que desaparece la cobertura; sin embargo, el software detecta el cambio como si fuese una aparición de cobertura; del mismo modo, sucede con la la imagen d), en la cual, se mantiene la cobertura de páramos, en la imagen e); sin embargo, se detecta erróneamente la cobertura de color rojo, como si hubiera aparecido una nueva cobertura.

Resultados de la detección de cambios de las coberturas del suelo en ENVI, imagen clasificada vs. imagen clasificada

A continuación, se observa en la figura 72 los resultados obtenidos mediante detección de cambios usando imágenes clasificadas.

Figura 72

Resultados de la detección de cambios de las coberturas del suelo en ENVI, imagen clasificada vs. imagen clasificada

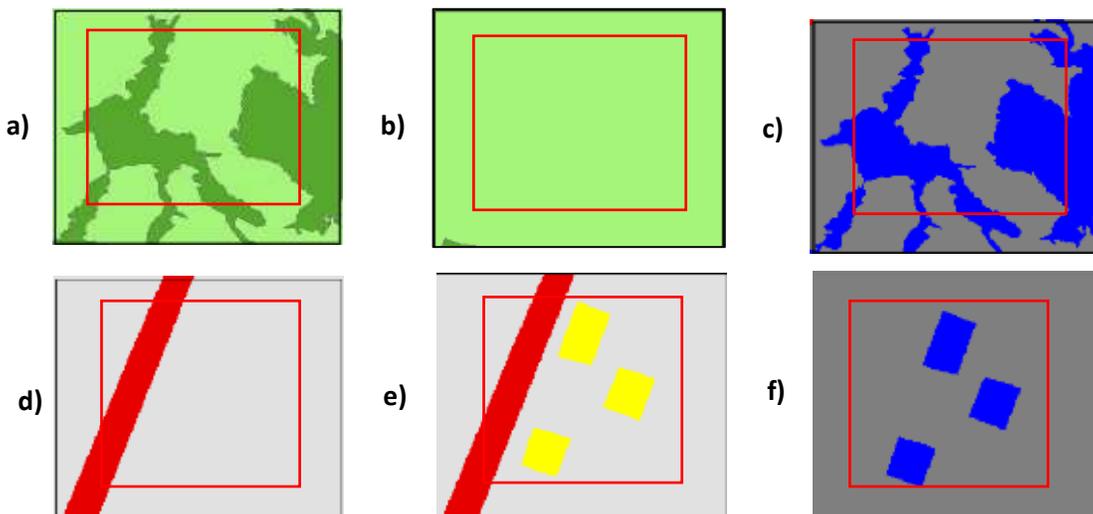


Nota. a) Detección de cambios 2010-2014, b) detección de cambios 2014-2019.

En base al análisis visual en ambas imágenes, se observa que, usando una imagen clasificada, se puede detectar los cambios mejor; sin embargo, no se diferencian adecuadamente las apariciones o pérdidas de coberturas, como se ilustra en las figuras 73 y 74.

Figura 73

Comparación de las imágenes clasificadas 2010 y 2014 vs. imagen de detección de cambios de las coberturas, en ENVI

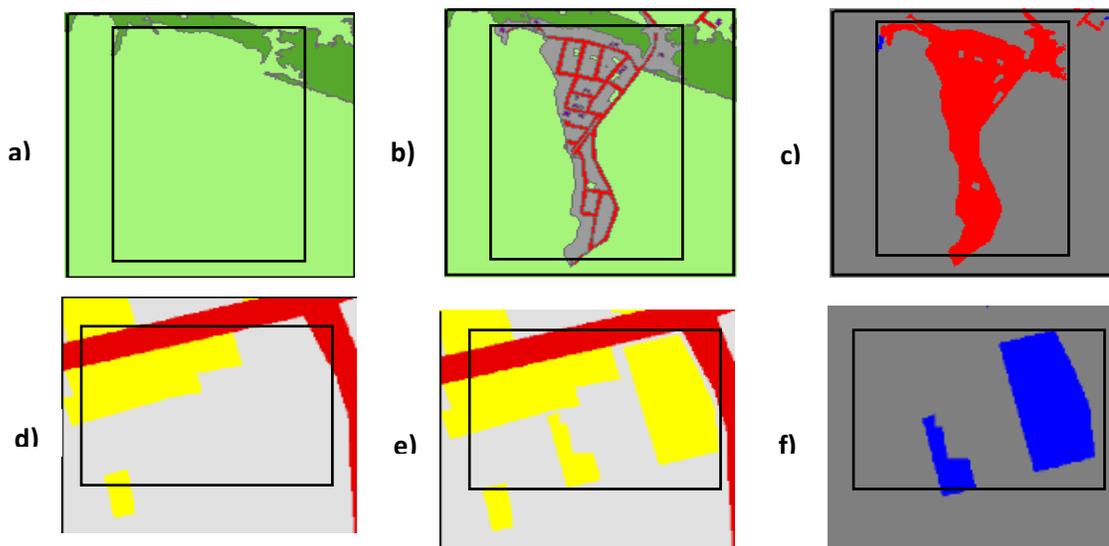


Nota. a) y d) Clasificación 2010, b) y e) clasificación 2014, c) correcta detección de cambios y f) incorrecta detección de cambios.

En la imagen a) , se visualiza la cobertura de matorral con respecto, a la imagen b), en la cual se pierde dicha cobertura por cultivos; por ende, el software detecta el cambio de color azul debido a que desaparece la cobertura; de la misma forma, sucede en la imagen d), donde se observa el suelo no edificado y en la imagen e) se puede ver como desaparece esta cobertura ya que hay presencia de edificaciones; por tal motivo, la imagen f) tiene el cambio de color de azul debido a que aumenta la cobertura.

Figura 74

Comparación de las imágenes clasificadas 2014 y 2019 vs. imagen de detección de cambios de las coberturas, en ENVI



Nota. a) y d) Clasificación 2014, b) y e) clasificación 2019, c) correcta detección de cambios y f) incorrecta detección de cambios.

En la imagen a), se observa la cobertura de cultivos, la cual, en la imagen b), cambia por la aparición de la cobertura vial; por tal motivo, la detección de cambios debería ser de color

azul en la imagen c); del mismo modo sucede con la la imagen d), que muestra la cobertura de suelo no edificado; pero, en la imagen e), se visualiza que esta desaparece por la presencia de edificaciones; por ende, el cambio debería ser de color rojo, debido a que emerge una nueva cobertura, pero no lo es.

A continuación, la tabla 14 indica los cambios obtenidos en hectáreas mediante los dos métodos de clasificación.

Tabla 14

Comparación de los resultados obtenidos mediante detección de cambios, en ENVI

Tipo	Imagen vs. imagen		Imagen clasificada vs. imagen clasificada	
	2010-2014 Área [ha]	2014-2019 Área [ha]	2010-2014 Área [ha]	2014-2019 Área [ha]
Cambio (+)	2990.50	1167.51	232.36	113.76
Sin cambio	0.67	37.54	5827.73	5879.28
Cambio (-)	3162.04	4948.41	92.90	159.95
Cambio total [ha]	6152.54	6115.92	325.26	273.71

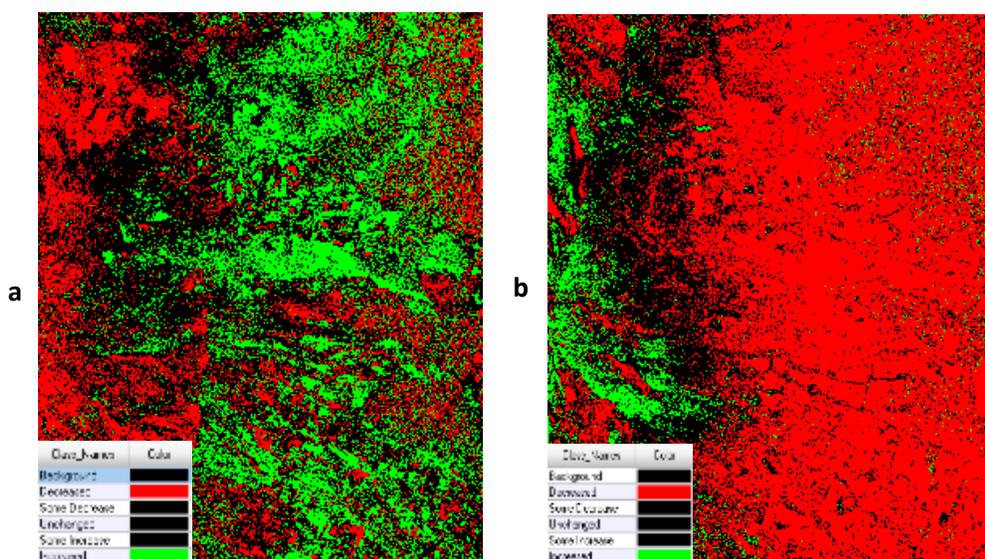
En base a los cambios totales obtenidos, en la tabla 14, se detectó que: usando la técnica de detección de cambios con imágenes no se consiguen resultados apropiados; mientras que, empleando imágenes clasificadas se consiguen mejores resultados, ya que, se evidencian las áreas que cambian; sin embargo, no se logra precisar de manera adecuada los cambios positivos y negativos, solamente se logra detectar los cambios de forma general.

Resultados de la detección de cambios de las coberturas del suelo en ERDAS IMAGINE, imagen vs. imagen

A continuación, la figura 75 muestra los cambios efectuados al procesar imagen vs. imagen, en ERDAS IMAGINE.

Figura 75

Resultados de la detección de cambios (imagen vs imagen) de las coberturas, en ERDAS IMAGINE

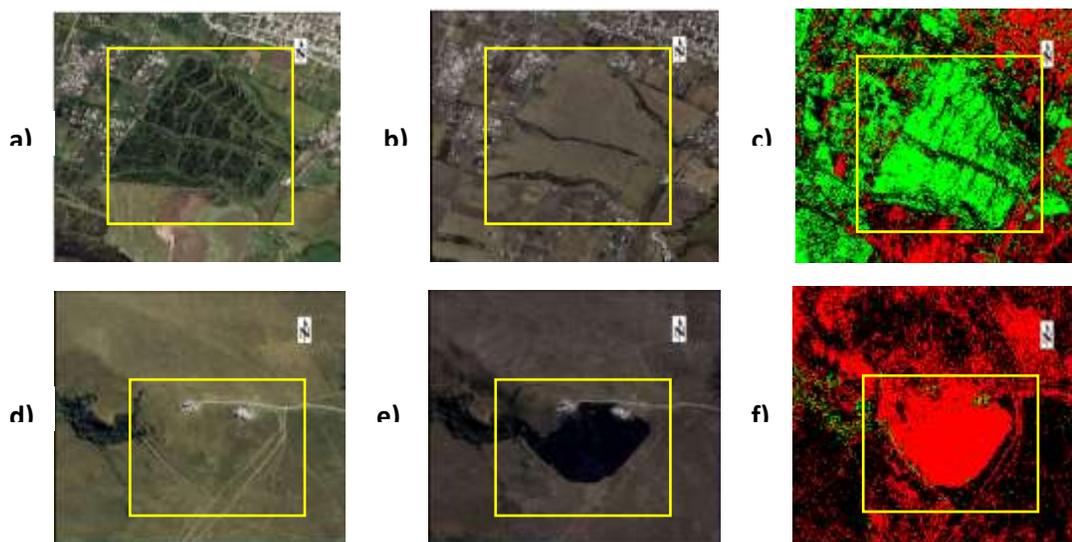


Nota. a) Detección de cambios 2010-2014, b) detección de cambios 2014-2019.

Las imágenes resultantes de la detección de cambios están codificadas por colores, donde, el color verde representa aparición de una nueva cobertura; sin embargo, el color rojo representa las pérdidas de coberturas existentes. Según el análisis visual realizado en ambas imágenes de detección de cambios, en ciertas zonas se identifican correctamente las diferencias; sin embargo, en otras no, tal como se muestran en la figura 76 y 77.

Figura 76

Comparación de las ortofotos 2010 y 2014 vs. imagen de detección de cambios (imagen vs. imagen) de las coberturas, en ERDAS IMAGINE

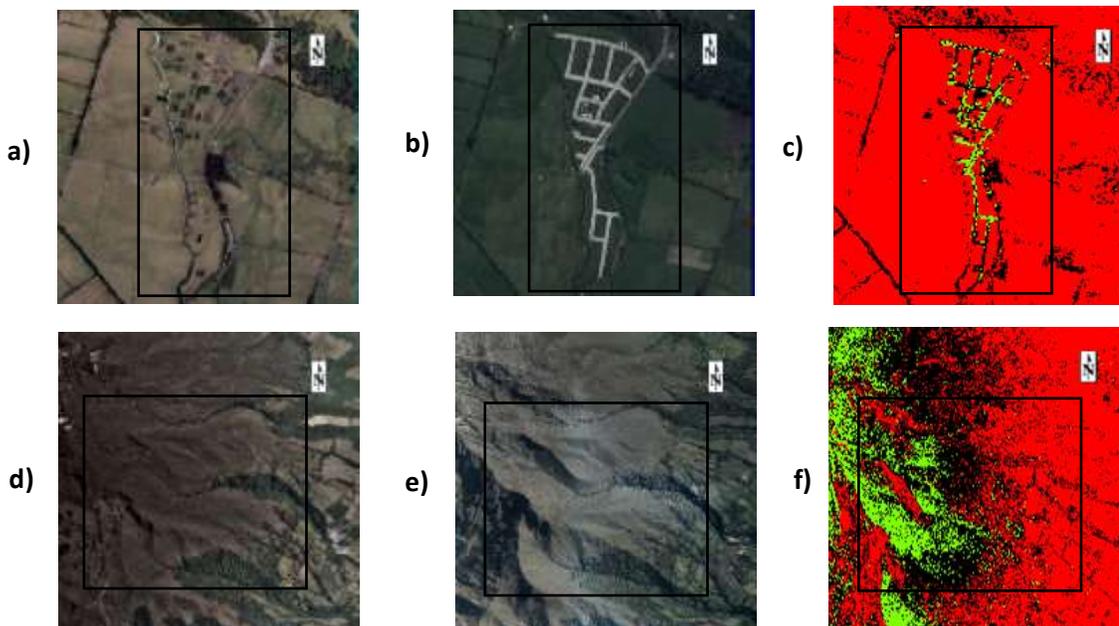


Nota. a) y d) Ortofoto 2010, b) y e) ortofoto 2014, c) correcta detección de cambios y f) imagen incorrecta detección de cambios.

En la imagen b) , se visualiza como aparece la cobertura de suelo sin edificar con respecto, a la imagen a), que tiene la cobertura de cultivo; por ende, el software detecta el cambio de color verde debido a que emerge una nueva cobertura; sin embargo, en la imagen d), se observa lo que en un inicio era páramo , en la imagen e) , representa la cobertura de zonas quemadas; por tal motivo, la imagen f) tiene el cambio de color de rojo, debido a que desaparece dicha cobertura.

Figura 77

Comparación de las ortofotos 2014 y 2019 vs. imagen de detección de cambios (imagen vs. imagen) de las coberturas, en ERDAS IMAGINE



Nota. a) y d) Ortofotografía 2014, b) y e) ortofotografía 2019, c) correcta detección de cambios y f) imagen incorrecta detección de cambios.

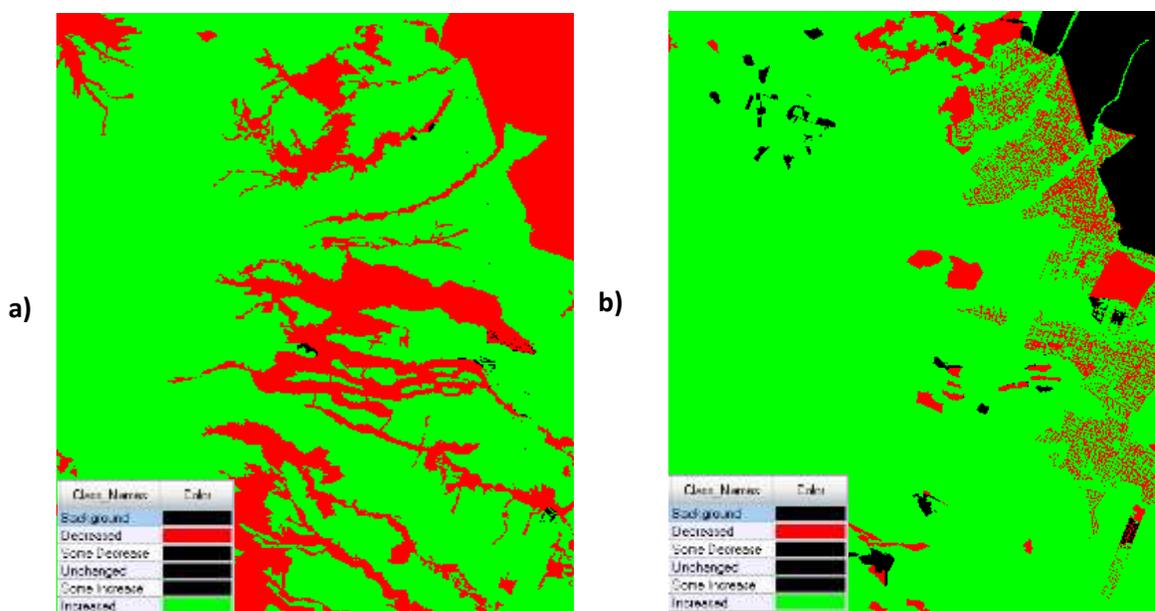
En la imagen a), con respecto a la imagen b), se observa como desaparece la cobertura de cultivos por la cobertura vial; por ende, la detección del cambio debería ser de color rojo en la imagen c), debido a que desaparece la cobertura; sin embargo, el software detecta el cambio como si fuese una aparición de cobertura; del mismo modo, sucede con la imagen d) y e), en las cuales, se mantiene la cobertura de páramo; sin embargo, en la imagen f) se detecta erróneamente la cobertura de color verde, como si hubiera aparecido una nueva cobertura.

Resultados de la detección de cambios de las coberturas del suelo en ERDAS IMAGINE, imagen clasificada vs. imagen clasificada

Del mismo modo, se aprecia en la figura 78 los resultados obtenidos; mediante detección de cambios utilizando imágenes clasificadas.

Figura 78

Resultados de la detección de cambios (imagen clasificada vs. imagen clasificada) de las coberturas, en ERDAS IMAGINE



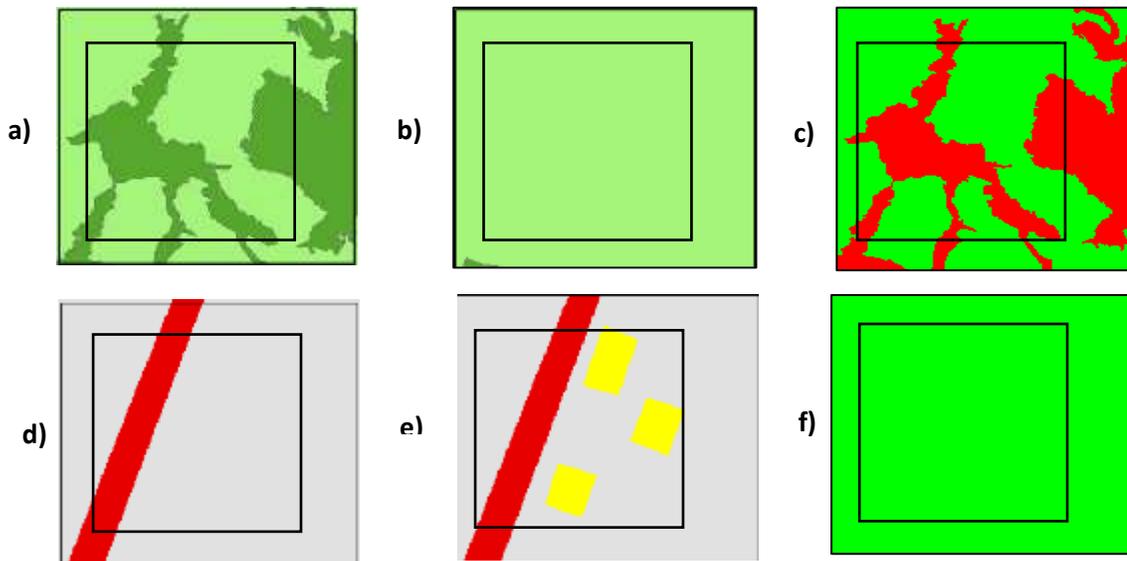
Nota. a) Detección de cambios 2010-2014, b) detección de cambios 2014-2019.

Con respecto, al análisis visual realizado en ambas imágenes, se aprecia que, utilizando una imagen clasificada, no se puede detectar en su totalidad los cambios correctamente; sin embargo, existen zonas, donde, sí se logra visualizar los cambios, tal como se muestra en las figuras 79 y 80.

Figura 79

Comparación de las imágenes clasificadas 2010 y 2014 vs. imagen de detección de cambios

(imagen clasificada vs. imagen clasificada) de las coberturas, en ERDAS IMAGINE

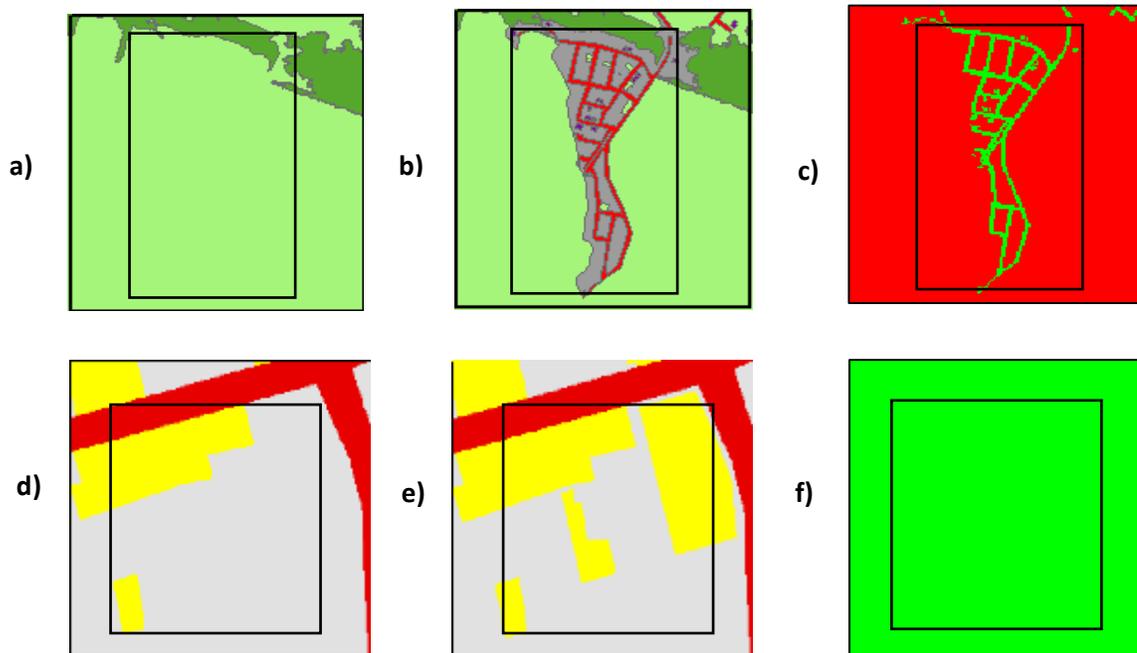


Nota. a) y d) Clasificación 2010, b) y e) clasificación 2014, c) correcta detección de cambios y f) incorrecta detección de cambios.

En la imagen a) , se visualiza la cobertura de matorral con respecto, a la imagen b), en la cual se pierde dicha cobertura por cultivos; por ende, el software detecta el cambio de color rojo, debido a que desaparece la cobertura en la imagen c); de la misma manera, pasa en la imagen d), donde se observa el suelo no edificado y en la imagen e), se puerder ver como desaparece esta cobertura , ya que hay presencia de edificaciones; por tal motivo, la imagen f) tiene el cambio de color de verde debido a que aumenta la cobertura; cabe recalcar, que en este caso, el software marca las coberturas vecinas como si tambien hubiesen cambiado.

Figura 80

Comparación de las imágenes clasificadas 2014 y 2019 vs. imagen de detección de cambios (imagen clasificada vs. imagen clasificada) de las coberturas, en ERDAS IMAGINE



Nota. a) y d) Clasificación 2014, b) y e) clasificación 2019, c) correcta detección de cambios y f) incorrecta detección de cambios.

En la imagen a), se observa la cobertura de cultivos, la cual, en la imagen b), cambia por la aparición de la cobertura vial; por tal motivo, la detección de cambios debería ser de color roja en la imagen c), pero no lo es; de la igual forma, pasa en la imagen d), donde se observa el suelo no edificado y en la imagen e), se puede ver como desaparece esta cobertura, ya que hay presencia de edificaciones; por tal motivo, la imagen f) tiene el cambio de color de verde debido a que aumenta la cobertura; cabe recalcar, que en este caso, el software marca las coberturas vecinas como si también hubiesen cambiado.

A continuación, la tabla 15 detalla los cambios obtenidos en hectáreas mediante los dos métodos de clasificación.

Tabla 15

Comparación de los resultados obtenidos mediante detección de cambios, en ERDAS IMAGINE

Tipo	Imagen vs. Imagen		Imagen clasificada vs. Imagen clasificada	
	2010-2014	2014-2019	2010-2014	2014-2019
	Área [ha]	Área [ha]	Área [ha]	Área [ha]
Decremento	1627.91	3775.93	1625.72	493.14
Algún decremento	1546.20	1149.42	10.35	0.00
Sin cambio	65.43	36.81	6.22	446.70
Algún incremento	1460.97	669.39	0.00	0.00
Incremento	1451.75	520.77	4510.70	5213.14
Cambio total [ha]	6086.83	6115.51	6146.77	5706.28

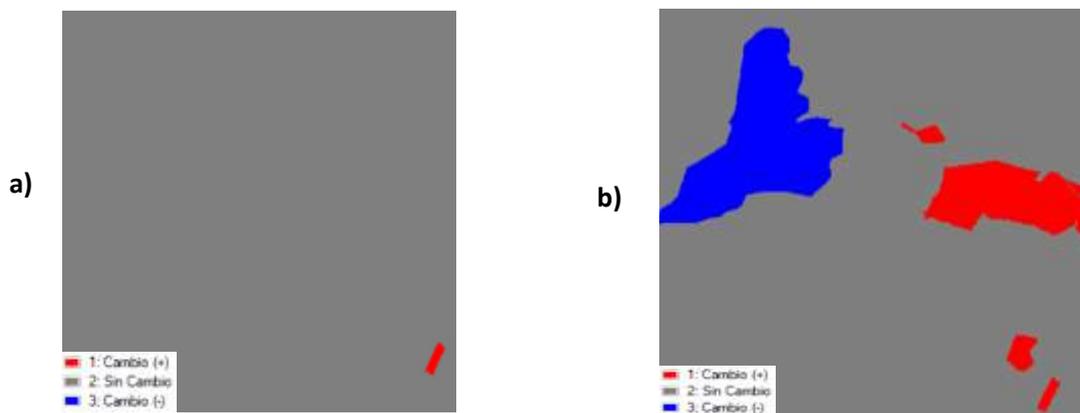
Al analizar los cambios obtenidos en la tabla 15, se pudo constatar que: usando la técnica de detección de cambios con imágenes e imágenes clasificadas no se consiguen resultados apropiados de los cambios.

Resultados de la detección de cambios de los usos del suelo en ENVI, imagen clasificada vs. imagen clasificada

Las imágenes resultantes de los usos del suelo, se aprecian en la figura 81.

Figura 81

Resultados de la detección de cambios de los usos del suelo entre el período 2010 - 2014 y 2014 – 2019, en ENVI



Nota. a) Detección de cambios 2010-2014, b) detección de cambios 2014-2019.

La detección de cambios esta codificada por colores, donde: el color rojo representa los cambios positivos (aparición de un nuevo uso); mientras que, el color azul indica los cambios negativos (perdida de un uso existente).

De igual forma, la tabla 16 muestra los cambios positivos y negativos de la detección de cambios.

Tabla 16

Resultados obtenidos de la detección de cambios de los usos del suelo, en ENVI

Tipo	2010-2014	2014-2019
Cambios (+) [ha]	9.81	339.43
Sin cambios [ha]	6141.76	5259.34
Cambios (-) [ha]	0	552.80
Total:	6151.57	6151.57

Al analizar los cambios obtenidos de la tabla 16, a través de la detección de cambios en ENVI, se deduce que la detección de cambios totales es correcta; sin embargo, los cambios positivos y negativos no se diferencian adecuadamente.

Resultados de la simulación de la cobertura del suelo proyectada al 2019

En la tabla 17 se indican los valores de Cramer obtenidos en la etapa de simulación.

Tabla 17

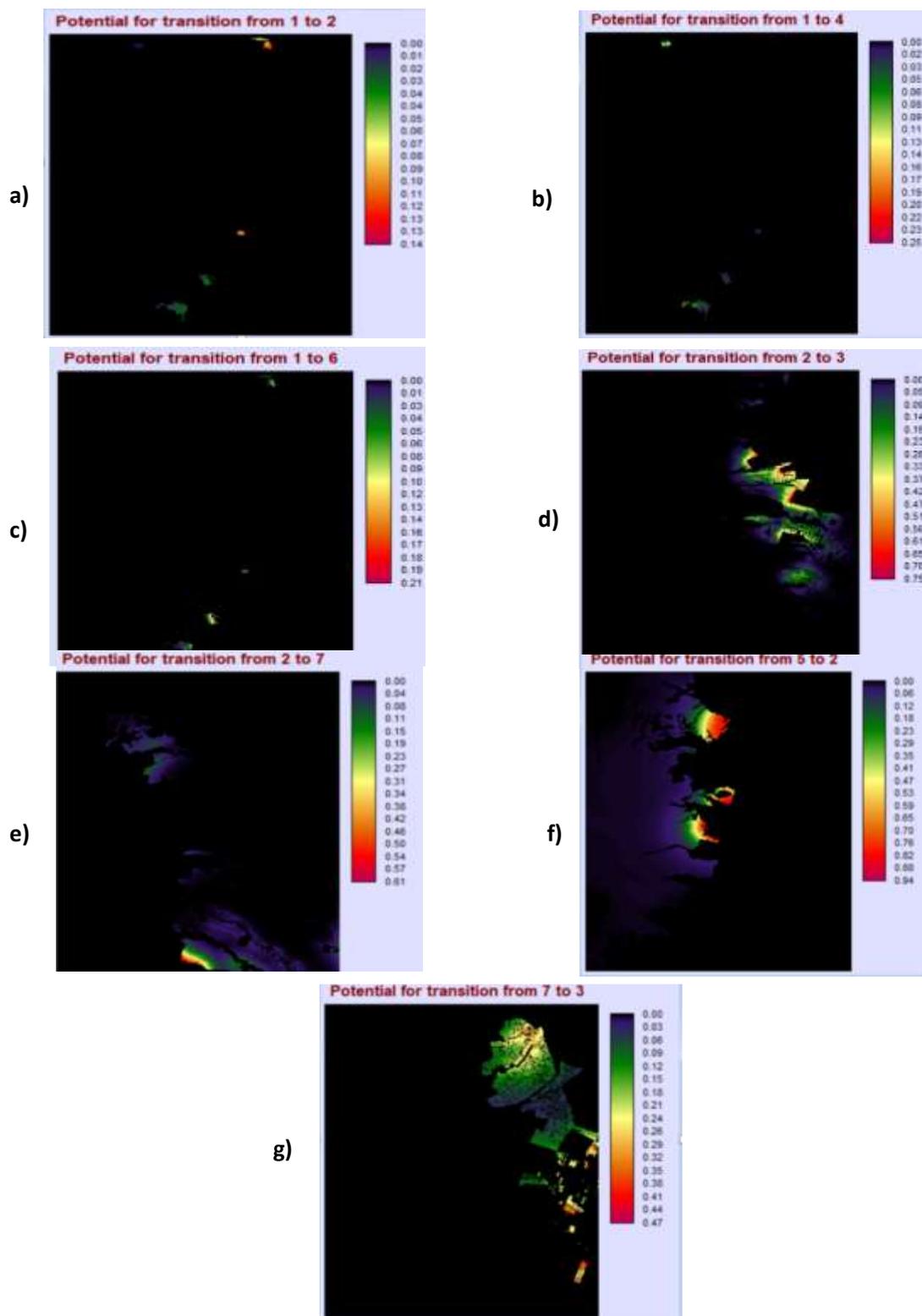
Valores de Cramer por cada variable para la modelación de la cobertura

Variables	Valor de Cramer
Distancia a ríos	0.17
Distancia a centros poblados	0.34
Distancia a edificaciones	0.31
Altura	0.35
Pendiente	0.22

Como se observa, el valor mínimo es 0.17, que corresponde a la distancia a ríos; es decir que, esta variable es la menos influyente en el modelo; por otra parte, el valor más alto es 0.35 m que corresponde a la variable altura, es decir que es la variable más influyente. Además, como todos los valores se encuentran en el rango de 0.17 y 0.35 se considera que todas las variables usadas son significativas para la modelación.

Por otro lado, también se obtuvo una colección de imágenes que indican el potencial de transición de las coberturas analizadas, donde: las zonas rojas son los lugares que tienen más posibilidad de cambiar de una a otra cobertura; mientras que, las zonas azules indican los lugares que tienen menor posibilidad de cambiar (ver figura 82).

Figura 82

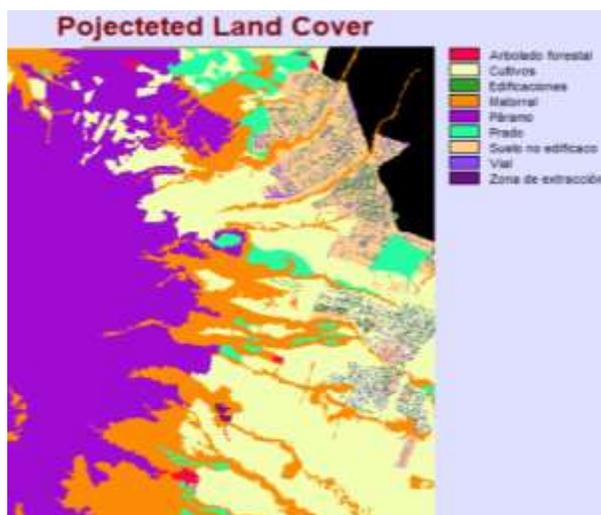
Imágenes de potencial de transición

Nota. Potenciales de transición entre las coberturas: a) arbolado forestal y edificaciones, arbolado forestal y matorral, c) arbolado forestal y prado, d) cultivos y edificaciones, e) cultivos y suelo no edificado, f) páramo y cultivos y g) suelo no edificado y edificaciones.

En esta etapa, se generó como resultado una imagen con el cambio de cobertura del suelo simulado al año 2019, la misma que se presenta en la figura 83.

Figura 83

Imagen de cambio de cobertura del suelo simulado al año 2019

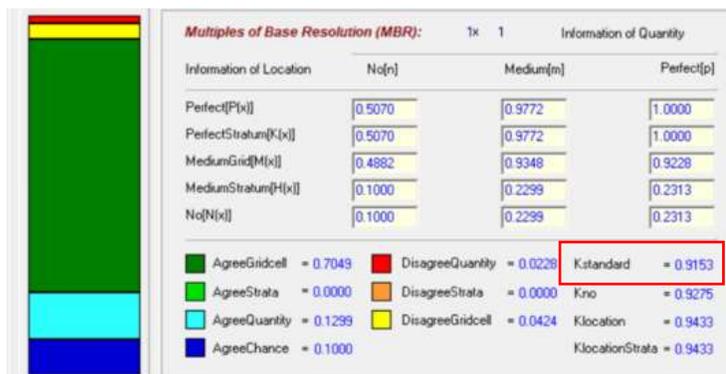


Resultados de la validación del modelo predictivo de coberturas del suelo 2019

Se obtuvo un índice de Kappa de 0.9153 (ver figura 84), que de acuerdo a la tabla 3 presentada en el capítulo 2 indica que el modelo simulado al 2019 es de muy buena calidad.

Figura 84

Resultado de la validación de la simulación de las coberturas al 2019



Resultados de la modelación de la cobertura del suelo para el año 2030

A continuación, la figura 85, ilustra el resultado de la modelación de la cobertura del suelo para el año 2030; mientras que, la figura 86, indica el área ocupada por cada cobertura.

Figura 85

Coberturas del suelo para el año 2030

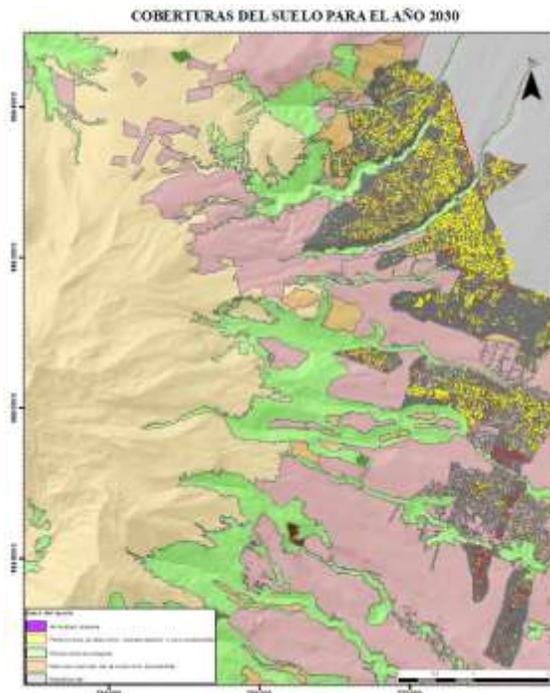
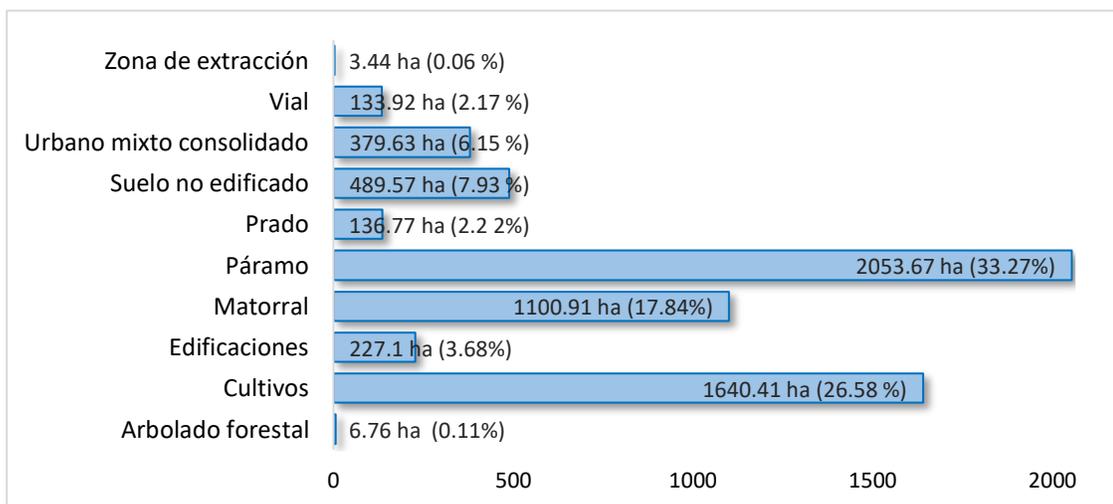


Figura 86

Área ocupada por cada cobertura del suelo para el 2030



Analizando la figura 86, se destaca lo siguiente: la cobertura páramo sigue siendo la más dominante, con 2053.67 ha; seguida de los cultivos, con 1640.41 ha y los matorrales con 1100.91 ha. Así mismo, al comparar los valores obtenidos con los años anteriores, se evidencia una sería reducción del arbolado forestal, puesto que, para el 2030 se espera que en la zona de estudio solamente exista 6.76 ha de bosque. Por otro lado, se aprecia un incremento en las coberturas suelo no edificado y edificaciones, puesto que, para el año modelado se espera tener 489.57 ha y 227.1 ha respectivamente.

Resultados de la simulación del uso del suelo proyectado al 2019

En la tabla 18 se indican los valores de Cramer obtenidos en la etapa de simulación de los usos de suelo.

Tabla 18

Valores de Cramer por cada variable para la modelación del uso del suelo

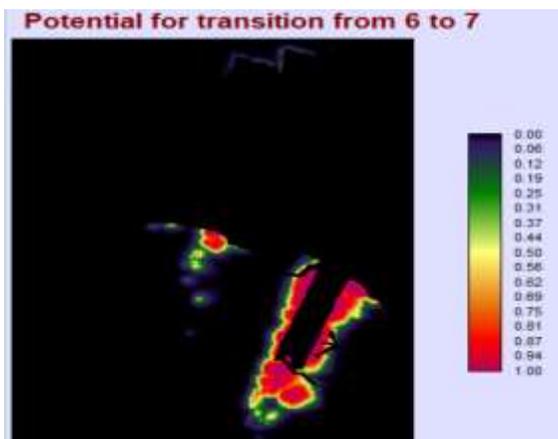
Variables	Valor de Cramer
Distancia a ríos	0.16
Distancia a centros poblados	0.37
Distancia a edificaciones	0.34
Altura	0.34
Pendiente	0.23

De acuerdo a los valores obtenidos, se aprecia que: la variable distancia a ríos es la menos influyente, ya que tiene el valor más bajo de Cramer (0.16); por otra parte, el valor más alto (0.34), corresponde a las variables altura y distancia a edificaciones; es decir, que son las variables más influyentes en la modelación. Además, como todos los valores se encuentran en el rango de 0.16 y 0.34 se considera que todas las variables usadas son significativas para la modelación.

Por otra parte, también se obtuvo una imagen del potencial de transición entre los usos de Recurso Natural de Producción Sostenible y Residencial; donde: las zonas rojas son los lugares que tienen más posibilidad de cambiar al uso residencial; mientras que, los lugares azules indican las zonas que tienen menor posibilidad de cambiar (ver figura 87).

Figura 87

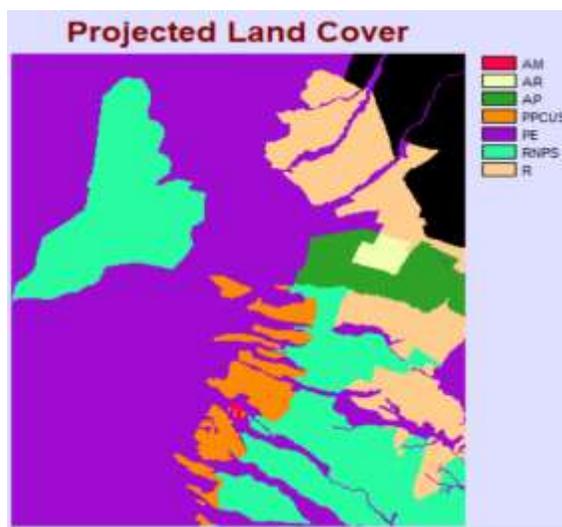
Imagen del potencial de transición entre los usos Recurso Natural de Producción Sostenible y Residencial



En esta etapa, también se generó como resultado una imagen del uso del suelo simulado al año 2019, el cual se ilustra en la figura 88.

Figura 88

Imagen de los usos del suelo simulado al año 2019



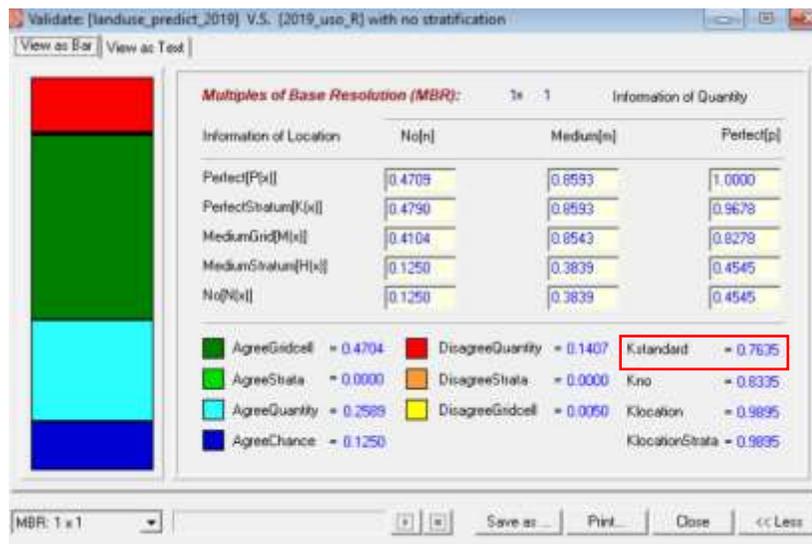
Nota. (AM) Actividad minera, (AR) agrícola residencial, (AP) área de promoción, (PPCUS) producción, protección, conservación y uso sostenible, (PE) protección ecológica, (RNPS) recurso natural de producción sostenible y (R) residencial.

Resultados de la validación del modelo predictivo de usos del suelo del 2019

En los resultados de la validación, se obtuvo un índice de Kappa de 0.76 (ver figura 89), que de acuerdo a la tabla 3 presentada en el capítulo 2 indica que, el modelo simulado al 2019 es de muy buena calidad; sin embargo al tener solo una transición en el modelo, no se asegura que la predicción futura esté muy apegada a la realidad.

Figura 89

Resultado de la validación de la simulación de los usos del suelo al 2019

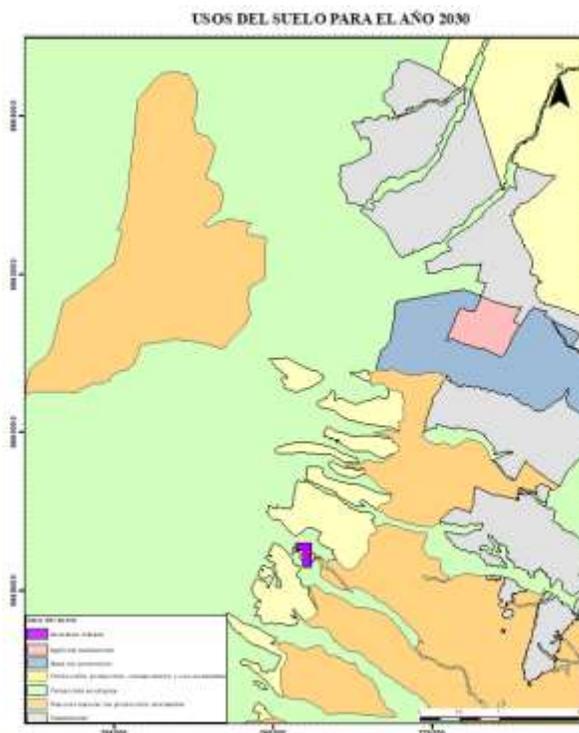


Resultados de la modelación del uso de suelo para el año 2030

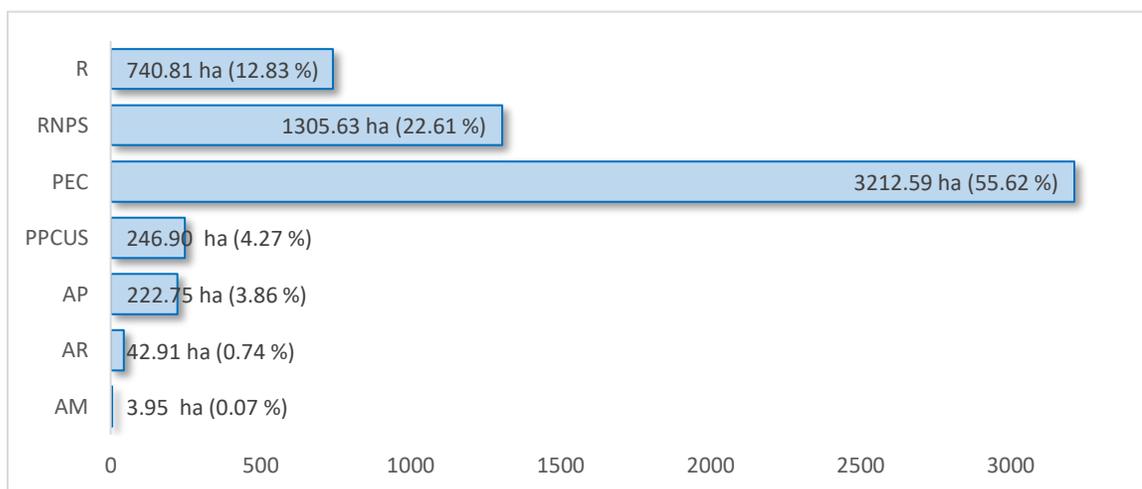
A continuación, la figura 90, ilustra el resultado de la modelación de los usos suelo para el año 2030; mientras que, la figura 91, indica el área ocupada por cada uso.

Figura 90

Usos del suelo para el año 2030

**Figura 91**

Área ocupada por cada uso del suelo para el 2030



Nota. (AM) Actividad minera, (AR) agrícola residencial, (AP) área de promoción, (PPCUS) producción, protección, conservación y uso sostenible, (PE) protección ecológica, (RNPS) recurso natural de producción sostenible y (R) residencial.

Analizando la figura 91, se puede destacar los siguiente: el uso más dominante es el de protección ecológica, con 3 212 ha; seguido del uso recurso natural de protección sostenible, con 1 305.63 y el uso residencial, con 740.81 ha. Sin embargo, al comparar los valores obtenidos con los otros años se evidencia que solo existe un ligero incremento del uso residencial el cual pasa de 702.38 ha en el 2014 a 740.81 ha para el año 2030 y el uso recurso natural de producción sostenible se reduce, puesto que, pasa de 1 344 .16 ha en el 2014 a 1305.63 ha para el 2030; en cambio, las otros usos como: actividad minera, agrícola residencial, área de promoción, producción, protección, conservación y usos sostenible y protección ecológica, se mantienen.

En general, se evidencia que no existen cambios muy relevantes de los usos del suelo para el 2030; eso es debido a que, entre los años 2008 y 2014 solo existe una transición entre el uso recurso natural de producción sostenible (RNPS) y residencial (R); y a pesar que el índice kappa arroja un resultado aceptable, para obtener un buen modelo, es necesario que existan más transiciones entre los diferentes usos. Por lo tanto, la proyección de usos de suelo para el 2030 tiene una escasa confiabilidad.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

En base al desarrollo de este proyecto, se han cumplido con todos los objetivos y metas propuestas, recopilando y generando una cantidad de información que va a servir a futuros profesionales de la Carrera, así como a personas externas vinculadas a las áreas geoespaciales, ordenamiento territorial, recursos naturales y otras.

En cuanto a las metodologías implementadas en este estudio, se concluye lo siguiente: para realizar todos estos análisis es indispensable que, las imágenes estén corregistradas y estandarizadas; del mismo modo, definir e implementar la leyenda temática modificada del SIOSE, es un factor importante, pues con el uso de las clases simples y compuestas se obtienen resultados más detallados y apegados a la realidad; en cuanto, a los procesos de clasificación, por la resolución de las ortofotos, el método que mejor clasificó fue la interpretación/digitalización, los otros métodos automáticos por píxeles u orientados a objetos no brindaron buenos resultados; por otro lado, en la validación de los mapas de las coberturas y usos del suelo es obligatorio realizar la verdad terrestre y la matriz de confusión; de igual forma, al analizar los cambios en ocupación del suelo, la técnica de intersección en el geoprocesamiento SIG, brindó mejores estadísticos y resultados que, las técnicas de change detection en imagen vs. imagen o clasificación vs. clasificación, tanto en los programas ENVI y ERDAS IMAGINE

Mediante el análisis de la información generada de las coberturas del suelo para los años 2010, 2014 y 2019 a escala 1: 25 000 del área de estudio, se logró evidenciar que: la cobertura con mayor predominio en todas las épocas, es el páramo, con 33.85 %, 33.40 % y 33.49 %, respectivamente, en cada uno de los años analizados; la cobertura que más área ha

perdido fue el arbolado forestal, con 112 ha en total desde el año 2010 hasta el 2019. Por otro lado, la cobertura que más ha incrementado, es edificaciones ya que, ha aumentado 64.11 ha entre este periodo.

En los usos del suelo se evidenció que, del periodo 2014 al 2019; el uso agrícola residencial se reemplaza por el uso residencial, con 42.92 ha; asimismo, sucede en el uso del área de promoción, el cual, fue sustituido por el uso de protección ecológica, con 222.81 ha. Por otra parte, en el caso, del uso de recurso natural de producción sostenible, se pierde 612.07 ha, las cuales son reemplazadas por protección ecológica.

El modelo de coberturas del suelo proyectado al año 2030, presenta un buen nivel de confiabilidad con una índice kappa de 0.91, permitiendo asegurar que, las técnicas y consideraciones aplicadas al presente estudio han sido adecuadas para simular la evolución de las coberturas del suelo para el año 2030, y puede ser usado como una herramienta en la toma de decisiones a favor de la conservación del área de protección del cerro Atacazo. En ese sentido, se prevé que para el año 2030, se pierda una gran cantidad de arbolado forestal, quedando solamente 6.76 ha y, además, en el caso de las edificaciones, se estima que aumenten a 226.99 ha, y que el suelo no edificado llegue a tener un área de 489.57 ha.

El modelo de usos del suelo proyectado al año 2030, presenta un buen nivel de confiabilidad con un índice kappa de 0.76; sin embargo, los datos proyectados tienen una escasa confiabilidad puesto que, no existen suficientes transiciones de los usos del suelo entre los años 2010 y 2014.

Recomendaciones

Se recomienda realizar la detección de cambios usando imágenes que estén corregidas radiométricamente para obtener resultados más precisos.

Al realizar la clasificación basada en objetos con imágenes de alta resolución y en áreas muy extensas, se debe tomar en cuenta la capacidad del procesador, tarjeta gráfica y memoria RAM del computador puesto que, realizar este tipo de procesamientos consume una gran cantidad de recursos informáticos.

Generar y actualizar periódicamente información sobre la ocupación del suelo, usando la metodología propuesta por el SIOSE, puesto que, permite obtener indicadores claves para el análisis de eventos pasados, presentes y futuros, y con ello, generar herramientas que permitan tomar decisiones encaminadas a generación de espacios planificados y sobre todo sostenibles.

Se sugiere que, los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD), implementen el análisis de modelos prospectivos en los Planes de Ordenamiento Territorial (PDOT), con la finalidad de evitar la pérdida de coberturas naturales; además, de realizar previamente estudios técnicos antes de cambiar los usos del suelo.

BIBLIOGRAFÍA

- Ariza, F., García, J., Robledo, J., Rodríguez, J., & Casanova, R. (2019). *Guía para la evaluación de la exactitud posicional de datos espaciales*. <https://doi.org/10.35424/rcarto.v0i100.647>
- Bostelmann, J., Breitkopf, U., & Heipke, C. (2017). Optimizing the distribution of tie points for the bundle adjustment of hrsc image mosaics. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(3W1), 15–22. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W1-15-2017>
- Carrera, M., Bustamante, M., & Sáenz, M. (2016). *Las áreas protegidas del Distrito Metropolitano de Quito*. 45–46.

- Chacon, H. (2014). *Reducción de áreas con cobertura vegetal natural en Las laderas orientales del volcan Pichincha, ubicado en el cantón Quito, como efecto de la presion antrópica durante el periodo 1987 - 2010* [Pontificada Universidad Católica del Ecuador].
<http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/7107/6.H07.001585.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Chuvienco, E. (1990). *Fundamentos de teledeteccion espacial* (2da ed.). Rialp.
- Chuvienco, E. (2008). *Teledeteccion ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio*. Editorial Ariel, S.A.
- Comité Federal de Datos Geográficos. (1998). *Estándares de precisión de posicionamiento geoespacial Parte 3 : Estándar nacional para la precisión de los datos espaciales*.
- Dirección de Planificación Territorial. (2021). *Plan de Uso y Gestión del Suelo-PUGS*. Alcaldía Mejía.
- ERDAS Inc. (2022). *ERDAS Field Guide. 5° Edition*. Publicado: 21 de noviembre del 2021
- ESRI. (2022). *Diccionario GIS*. Publicado: 05 de enero del 2022
- Fernández, D., Cerna, M., & Villacrés, P. (2000). Diversidad Vegetal del volcán Atacazo, Quito-Ecuador. In *LA BOTÁNICA EN EL NUEVO MILENIO, Resúmenes del TERCER CONGRESO ECUATORIANO DE BOTÁNICA* (Vol. 1, pp. 1–133).
https://www.researchgate.net/publication/304230746_Diversidad_Vegetal_del_volcan_Atacazo_Quito-Ecuador
- Fernández, S., & Rangel, J. (2014). Autómatas Celulares y su Aplicación en Computación. *VIII Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, 1*, 14–21.
<https://doi.org/10.13140/2.1.2167.2964>
- FONAG. (2017). *Señalamiento en campo y adquisición de los materiales para la implementación de 2150 metros de cercado en los predios de la comuna Espejo sector "Atacazo."*

- FONAG. (2020). *El sistema de agua potable más antiguo de Quito se recupera - FONAG*.
<http://www.fonag.org.ec/web/el-sistema-de-agua-potable-mas-antiguo-de-quito-se-recupera/>
- García, J. (2008). Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas. *Ciencia y Tecnología*, 1(1).
- Gharaibeh, A., Shaamala, A., Obeidat, R., & Al-Kofahi, S. (2020). Improving land-use change modeling by integrating ANN with Cellular Automata-Markov Chain model. *Heliyon*, 6(9), e05092. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05092>
- Granda, E. (2012). *Creación de una geodatabase bajo un modelo de datos eléctricos Multispeak para la Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A.* [San Francisco].
<https://www3.epa.gov/region1/npdes/merrimackstation/pdfs/ar/AR-1165.pdf>
- Green, E. P., Mumby, P. J., Edwards, A. J., & Clark, C. D. (2000). Remote sensing handbook for tropical coastal Management. *Coastal Management Sourcebooks 3*.
- Greenwalt, C., & Shultz, M. (1968). *Principles of error theory and cartographic applications*.
<https://doi.org/10.1201/b11498-2>
- Harris Geospatial Solutions. (2020). *Análisis de detección de cambios*.
- Heinrichs, D., Nuissl, H., & Rodríguez Seeger, C. (2009). Dispersión urbana y nuevos desafíos para la gobernanza (metropolitana) en América Latina: El caso de Santiago de Chile. *Eure*, 35(104), 29–46. <https://doi.org/10.4067/s0250-71612009000100002>
- IGN. (2011). *Fichas de fotointerpretación*. España.
- IGN. (2014a). *Fotointerpretación de la ocupación del suelo. Curso de teledetección, fotogrametría, Lidar y ocupación del suelo*. España.
- IGN. (2014b). *SIOSE. Curso de teledetección, fotogrametría, Lidar y ocupación del suelo*. España.
- IGN. (2014c). *Teoría de la ocupación del suelo. Curso de teledetección, fotogrametría, Lidar y*

ocupación del suelo. España.

IGN. (2015). *Manual de Fotointerpretación SIOSE*. España.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2016). *Etapa de poscampo para los levantamientos de suelos*.

Instituto Geográfico Militar. (2008a). *Control de la exactitud posicional en cartografía (Primer borrador)*.

Instituto Geográfico Militar. (2008b). *Especificaciones Técnicas para Ortofotos Digitales (Primer Borrador)*.

Instituto Metropolitano de Planificación Urbana. (2018). Municipio presenta la exposición, “Visión de Quito 2040 y su Nuevo Modelo de Ciudad.” *Visión de Quito 2040 y Su Nuevo Modelo de Ciudad*. <http://www.quitoinforma.gob.ec/2018/05/18/exposicion-vision-de-quito-al-2040/>

Jin, X. (2018). *ENVI Automated Image Registration Solutions*. 1–26.

https://www.harrisgeospatial.com/portals/0/pdfs/ENVI_Image_Registration_Whitepaper.pdf

Kolb, M., Houet, T., Paegelow, M., Kolb, M., Houet, T., Paegelow, M., & Olmedo, M. C. (2014). Una comparación de diferentes enfoques de modelación de cambios de cobertura / uso del suelo Camacho Olmedo To cite this version : *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil*.

Landis, J., & Koch, G. (1977). *The measurement of observer agreement for categorical data*. *Biometrics*.

Leao, S., Bishop, I., & Evans, D. (2004). Simulating Urban Growth in a Developing Nation’s Region Using a Cellular Automata-Based Model. *Journal of Urban Planning and Development*, 130(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9488\(2004\)130:3\(145\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9488(2004)130:3(145))

- León, P. (2015). *Generación de un modelo predictivo de crecimiento urbano mediante la técnica de autómatas celulares. Aplicación a la zona conformada por las parroquias de Conocoto, Guangopolo, Alangasí, la Merced y San Rafael* [Universidad de las Fuerzas Armadas Espe]. <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/10905/1/T-ESPE-049257.pdf>
- Liebetrau, A. (1983). *Measures of association* (Vol. 32). Sage.
- Lillesand, T. M., & Kiefer, R. W. (1979). Remote sensing and image interpretation. In *Remote sensing and image interpretation*. (p. 763). <https://doi.org/10.2307/634969>
- Lillesand, T, Kiefer, R., & Chipman, J. (2004). *Remote sensing and image interpretation* (p. 763).
- Lillesand, Thomas, Kiefer, R., & Chipman, J. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation* (7th ed., Vol. 81, Issue 8). Wiley. <https://doi.org/10.14358/pers.81.8.615>
- Lind, D., Marchal, W., & Wathen, S. (2014). *Estadística aplicada a los negocios y la economía* (15va ed., Vol. 16). Mc Graw Hill.
- MAGAP. (2008). *Metodología de Valoración de Tierras Rurales. Propuesta*.
- Mejean, R., Paegelow, M., Saqalli, M., & Kaced, D. (2020). Mejora de los escenarios comerciales habituales en el cambio de tierras modelando extendiendo el periodo de calibración e integración de datos demográficos. *Notas Geoinformación Cartográfica*, 243–260. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14745-7_14
- Mejía, X., & Moncayo, P. (2012). *Evaluación de métodos de clasificación de imágenes satelitales de moderada y alta resolución para la obtención de mapas de uso y cobertura del suelo basados en píxeles y orientados a objetos: Estudio de caso en sub escena de la parroquia Shushufindi, prov. 1–204*.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2012). *Línea base de deforestación del Ecuador Continental*.
- Moreira, M. (2005). “ *Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologia de Aplicação* ”

(pp. 1–64).

Ouattara, T., Couture, R., Bobrowsky, P. T., & Moore, A. (2004). *Remote Sensing: Theory and Principles*.

Padilla, O., Pérez, P., Cruz, M., Huilcamaigua, S., & Astudillo, S. (2015). Utilización de autómatas celulares como técnica de modelamiento espacial para determinación el cambio de uso de suelo y cobertura vegetal. *Ciencias Espaciales*, 8(1), 310–326.

<https://doi.org/10.5377/ce.v8i1.2055>

Pilar, A. (2008). Capítulo 14: Introducción a la cartografía. In *Evaluación y prevención de riesgos Ambientales en Centroamérica*. Documenta Universitaria.

Plan de Uso y Ocupación del Suelo. (2016). *Ordenanza Metropolitana N°.127* (p. 5).

<https://doi.org/10.1145/3132847.3132886>

Plan Nacional de Observación del Territorio. (2021). Geoportal SIOSE. *Instituto Geografico Nacional España*. <https://www.siose.es/web/guest/inicio>. Publicado: 21 de diciembre del 2021

Priego, Á., Bocco, G., Mendoza, M., & Garrido, A. (2010). *Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisaje* (1ra ed.).

Quirós, E. (2014). *Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil* (1ra ed.). Universidad de Extremadura.

Sabins, F., & Ellis, J. (1997). *Remote Sensing. Principles, Interpretation, and Applications* (4th ed.). W.H. Freeman and Co.

Salazar, E., Henríquez, C., Sliuzas, R., & Qüense, J. (2020). Evaluación de escenarios espaciales para el desarrollo sostenible en Quito. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(3), 1–20. <https://doi.org/10.3390/ijgi9030141>

Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda. (2021). Plan de Uso y Gestión del Suelo 2020-2030.

Formulación Del Instrumento de Planificación Para El Distrito Metropolitano de Quito.

SIGTIERRAS. (2022). *Fotografía Aérea y Ortofotos | Sistema Nacional de Informacion de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica* (p. 6). <http://www.sigtierras.gob.ec/fotografia-aerea-y-ortofotos/>Recuperado: 05 de noviembre del 2021

Star, J., & Estes, J. (1990). *Geographic information systems: An introduction*. Prentice Hall.
<https://doi.org/10.1080/10106049109354297>

Valdez, J. R., González, M. de J., & de los Santos, H. M. (2006). Estimación de cobertura arbórea mediante imágenes satelitales multiespectrales de alta resolución. *Agrociencia*, 40(3), 383–394.

Vega, M. (2010). Elaboración de un plan estratégico de desarrollo turístico para la parroquia de Cutuglagua, Cantón Mejía, que contribuya al mejoramiento de la zona. In *International Institute for Environment and Development: Vol. 07/80* (Issue 2).
<https://arxiv.org/pdf/1707.06526.pdf><https://www.yrpri.org><http://weekly.cnbnews.com/news/article.html?no=124000><https://www.fordfoundation.org/>http://bibliotecavirtual.clacso.org.ar/Republica_Dominicana/ccp/20120731051903/prep<http://webpc.cia>

Veldkamp, A., & Lambin, E. F. (2001). Predicting land-use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85(1–3), 1–6. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00199-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00199-2)

Verburg, P. H., Soepboer, W., Veldkamp, A., Limpiada, R., Espaldon, V., & Mastura, S. S. A. (2002). Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model. *Environmental Management*, 30(3), 391–405. <https://doi.org/10.1007/s00267-002-2630-x>

Vojkovic, E. (1996). *La ortofoto en CIREN*.

Wang, S. W., Munkhnasan, L., & Lee, W. K. (2021). Land use and land cover change detection and prediction in Bhutan’s high altitude city of Thimphu, using cellular automata and

Markov chain. *Environmental Challenges*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2020.100017>

Yáñez, M. (2010). *Gobernanza del suelo en el Cantón Mejía* [Universidad Técnica Particular de Loja]. <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/10184/1/Binder1.pdf>