



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO
AMBIENTE**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO GEÓGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE**

AUTOR: VALERO VALENZUELA, JEFFERSON LEONEL

**TEMA: ESTUDIO MULTITEMPORAL Y ANÁLISIS PROSPECTIVO DEL
CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL EN LA
MICROCUENCA DEL RÍO CRISTAL MEDIANTE EL USO DE
AUTÓMATAS CELULARES**

DIRECTOR: ING. CRUZ, MARIO

CODIRECTOR: PADILLA, OSWALDO PhD (Cand.)

SANGOLQUÍ, ENERO, 2015

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo titulado **“ESTUDIO MULTITEMPORAL Y ANÁLISIS PROSPECTIVO DEL CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL EN LA MICROCUENCA DEL RÍO CRISTAL MEDIANTE EL USO DE AUTÓMATAS CELULARES ”** fue realizado en su totalidad por el Sr. Jefferson Leonel Valero Valenzuela y que ha cumplido con los requerimientos establecidos para un Proyecto de Tesis como documento previo a la obtención del Título de Ingeniero Geógrafo y del Medio Ambiente. El Trabajo en mención consta de dos empastados y dos discos compactos el cual contiene el documento en formato portátil Acrobat (pdf).

Sangolquí, Enero de 2015

Ing. Mario Cruz

DIRECTOR

Ing. Oswaldo Padilla

CODIRECTOR

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Jefferson Leonel Valero Valenzuela declaro que el proyecto de grado titulado "**ESTUDIO MULTITEMPORAL Y ANÁLISIS PROSPECTIVO DEL CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL EN LA MICROCUENCA DEL RÍO CRISTAL MEDIANTE EL USO DE AUTÓMATAS CELULARES** ", ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mí autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, Enero de 2015

Jefferson Leonel Valero Valenzuela

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Jefferson Leonel Valero Valenzuela

Autorizo la publicación de este Proyecto de Tesis llamado **“ESTUDIO MULTITEMPORAL Y ANÁLISIS PROSPECTIVO DEL CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL EN LA MICROCUENCA DEL RÍO CRISTAL MEDIANTE EL USO DE AUTÓMATAS CELULARES ”**, en la biblioteca virtual de la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE; que es de mi autoría y responsabilidad.

Jefferson Leonel Valero Valenzuela

DEDICATORIA

A Dios, mi padre celestial, que ha sido la fuente de fortaleza a lo largo de mi vida, levantándome en cada tropiezo y haciéndome saber que nunca estaré solo.

A mis padres, por apoyarme en todo sentido, esforzándose al máximo por inculcarme valores y darme lo necesario para que pueda cumplir mis sueños.

A mi hermana, Soraya, por enseñarme que siempre nos podemos tener el uno al otro aún en las peores circunstancias.

A Lady, por estar siempre presente y ser capaz de alegrarme todo el tiempo.

A mis amigos Alejandro, Mónica, Darwin y Kary quienes me brindaron momentos de felicidad, cariño, apoyo y alegría, convirtiendo los años de universidad en una experiencia inolvidable.

Leonel Valero

AGRADECIMIENTO

A Dios por llenarme de sabiduría y bendición durante todas las etapas de mi existencia.

A mi familia por ser el motor que me impulsa a querer alcanzar nuevos objetivos, cada día, por confiar siempre en mí y animarme a ser alguien mejor.

A mis amigos, por su apoyo incondicional y compañía en los momentos difíciles de mi vida.

A Lady por escucharme, animarme y quererme sin importar las circunstancias.

A todos mis profesores de la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente principalmente a mi director Ing. Mario Cruz, a mi Codirector Ing. Oswaldo Padilla, por guiarme y transmitirme sus conocimientos durante la elaboración del presente proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. GENERALIDADES	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación.....	2
1.4. Objetivos	3
1.5. Metas	4
1.6. Localización geográfica.....	4
1.7. Datos generales y características de la microcuenca del río Cristal	5
2. MARCO CONCEPTUAL.....	7
2.1. Fotogrametría.....	7
2.2. Teledetección.....	20
2.3. Unidad mínima de mapeo (UMM)	23
2.4. Cobertura y uso del suelo	24
2.6. Clasificación y leyenda temática	25
2.7. Interpretación de coberturas de suelo.....	29
2.8. Modelamiento espacial.....	29
2.9. Modelo Digital de Elevación (DEM).....	30
2.10. Geosimulación	30
2.11. Autómatas celulares.....	30
2.12. Cadenas de Markov	37
2.13. Correlación de Spearman	39
2.14. Regresión Logística.....	40
2.15. Validación de modelos	43
2.16. Tasa de cambio.....	44
3. METODOLOGÍA	45

3.1. Escala de trabajo	45
3.2. Recopilación de información	46
3.3. Ortorectificación de fotografías aéreas.....	49
3.4. Procesamiento de imágenes satelitales	59
3.5. Observación en campo de coberturas de suelo	62
3.6. Establecimiento de leyenda temática	63
3.7. Interpretación de coberturas temáticas	63
3.8. Depuración de Cartografía temática	66
3.9. Variables explicativas del cambio de cobertura de suelo	69
3.10. Modelamiento de autómatas celulares.....	79
4. RESULTADOS	104
4.1. Mapas de cobertura y uso del suelo.....	104
4.2. Codificación uso/coberturas de suelo y variables explicativas	106
4.3. Análisis de los cambios de uso/cobertura de suelo período 1983- 2000	106
4.4. Análisis de los cambios de uso/cobertura de suelo período 2000- 2010	114
4.5. Análisis de los factores que condicionan la evolución de las coberturas de suelo.....	120
4.6. Validación de modelo de autómatas celulares	130
4.7. Análisis de los cambios de uso/cobertura de suelo período 2010- 2020	135
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	142
5.1. Conclusiones.....	142
5.2. Recomendaciones.....	145
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	146
ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Relación entre el tamaño de pixel en micrones y la resolución óptica de escaneo.....	10
Tabla 2 Valores mínimos de exactitud para generación de ortofotos digitales.....	14
Tabla 3 Error máximo en los procesos de orientación	15
Tabla 4 Características técnicas del sensor ASTER.....	21
Tabla 5 Definiciones operativas Nivel I	27
Tabla 6 Definiciones operativas Nivel II	28
Tabla 7 Fotografías aéreas utilizadas	47
Tabla 8 Fotografías aéreas utilizadas	51
Tabla 9 Información general de la cámara.....	52
Tabla 10 Información general de la cámara.....	53
Tabla 11 Error medio cuadrático de la orientación interior cámara RC10	54
Tabla 12 Error medio cuadrático de la orientación interior cámara RC30	54
Tabla 13 Codificación de la cobertura del suelo	69
Tabla 14 Superficie de acuerdo a la altitud	71
Tabla 15 Superficie de terreno por pendiente	72
Tabla 16 Precipitación Media Anual de estaciones cercanas a la Microcuenca del Rio Cristal	78
Tabla 17 Matriz de correlación entre variables	90
Tabla 18 Datos presentes en la variable arbustiva	92
Tabla 19 Valores después de la asignación.....	93
Tabla 20 Superficie y porcentaje por tipo de uso y cobertura de suelo periodo 1983-2000.....	107
Tabla 21 Matriz de áreas de transición entre usos de suelo 1983 - 2000.....	108
Tabla 22 Tasa de cambio de cobertura de suelo entre 1983 y 2020	112

Tabla 23 Superficie y porcentaje por tipo de uso y cobertura de suelo periodo 2000-2010.....	115
Tabla 24 Matriz de áreas de transición entre usos de suelo 2000 - 2010.....	116
Tabla 25 Grado de explicación de la probabilidad de transición a cada uno de las coberturas de suelo, correspondiente a cada variable	121
Tabla 26 Coeficientes que determinan el grado de contribución de cada variable a la probabilidad de cambio a las coberturas de suelo	122
Tabla 27 Calidad del ajuste de acuerdo a índice Kappa	131
Tabla 28 Áreas de coberturas de suelo simulada vs observada	132
Tabla 29 Superficie y porcentaje por tipo de uso y cobertura de suelo periodo 2010-2020.....	136
Tabla 30 Matriz de áreas de transición entre usos de suelo 2010-2020.....	137

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1 Características de los polinomios de transformación	23
Cuadro 2 Leyenda temática de uso y cobertura de suelo Niveles I y II ..	26
Cuadro 3 Leyenda temática	63
Cuadro 4 Variables empleadas en la regresión logística	70
Cuadro 5 Uso de suelo y sus coberturas de suelo.....	105
Cuadro 6 Codificación de coberturas de suelo y variables explicativas utilizadas en el modelamiento.....	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Área de estudio.....	5
Figura 2 Clasificación de la fotogrametría.....	8
Figura 3 Tamaño de pixel en micrones versus resolución de escaneo en ppp.....	11
Figura 4 Ortorectificación.....	12
Figura 5 Geometría interna de la cámara.....	16
Figura 6 Elementos que definen a orientación exterior.....	17
Figura 7 Distribución de puntos de amarre en un bloque fotogramétrico.....	19
Figura 8 Configuración de GCP en una faja de imágenes.....	20
Figura 9 Relación entre distancia en el mapa y su correspondencia en el terreno.....	24
Figura 10 Espacio Euclidiano.....	32
Figura 11 Conjunto de estados.....	32
Figura 12 Vecindad de Von Neumann.....	33
Figura 13 Vecindad de Moore.....	33
Figura 14 Tesal i, j	34
Figura 15 Cobertura con fotografía aérea año 1978, cámara RC-10.....	47
Figura 16 Cobertura fotografía aérea año 1983, cámara RC-10.....	47
Figura 17 Cobertura fotografía aérea año 2000, cámara RC-30.....	48
Figura 18 Proceso de ortorectificación.....	50
Figura 19 Archivo de imágenes.....	52
Figura 20 Referencia horizontal y vertical para ortorectificación fotografías.....	55
Figura 21 Pinchado de puntos de control sobre imagen de referencia ...	56
Figura 22 Resumen de aerotriangulación bloque cámara RC 10.....	57
Figura 23 Resumen de aerotriangulación bloque cámara RC 30.....	57
Figura 24 Cobertura de ortoimágenes primera época de estudio (años 1978-1983).....	58

Figura 25 Cobertura de ortoimágenes segunda época de estudio (año 2000).....	59
Figura 26 Cobertura del área de estudio con imágenes satelitales ASTER.....	59
Figura 27 Proceso de corrección geométrica.....	60
Figura 28 Corrección geométrica de imagen ASTER	61
Figura 29 Proceso de obtención de imagen enmascarada	62
Figura 30 Ejemplos de digitalización de coberturas del suelo.....	65
Figura 31 Zonas sin información año 1983	66
Figura 32 Zonas sin información año 2000	67
Figura 33 Información año 2010	67
Figura 34 Área de análisis modelamiento.	68
Figura 35 Modelo Digital del Terreno	71
Figura 36 Modelo cartográfico generación variable pendiente.....	72
Figura 37 Mapa de pendientes de la Microcuenca del Río Cristal	73
Figura 38 Mapa cartográfico obtención de variables distancia	74
Figura 39 Mapa de distancia a ríos.....	75
Figura 40 Distancia a vías principales.....	76
Figura 41 Distancia a vías secundarias	76
Figura 42 Mapa de Distancia a Centros Poblados.....	77
Figura 43 Modelo cartográfico obtención de variable precipitación	78
Figura 44 Mapa de Precipitación media anual	79
Figura 45 Procedimiento general para simular la cobertura de suelo. ...	80
Figura 46 Fase de calibración.....	81
Figura 47 Herramienta Breakout.....	82
Figura 48 Clases de cobertura de suelo separadas año 2000.....	83
Figura 49 Tabulación cruzada cobertura de suelo años (1983-2000).....	84
Figura 50 Áreas de transición solo a Pastizal	85
Figura 51 Variable altitud en formato ASCII.....	86
Figura 52 Nuevo archivo en formato ASCII (variables).....	87
Figura 53 Ventana de comandos R	88
Figura 54 Correlación en R	89

Figura 55 Datos cargados a R	92
Figura 56 Muestreo estratificado simple en R.....	94
Figura 57 Resultados de la regresión logística	95
Figura 58 Resumen de segunda regresión logística	96
Figura 59 Generación de imágenes de probabilidad en Image calculator	97
Figura 60 Probabilidad de cambio a cultivo anual.....	97
Figura 61 Creación de raster group de variables explicativas.....	98
Figura 62 Módulo Markov de Idrisi.....	99
Figura 63 Simulación con autómatas celulares.....	100
Figura 64 Módulo CA_MARKOV de Idrisi	101
Figura 65 Proceso de validación de la cobertura simulada vs cobertura observada	102
Figura 66 Modulo VALIDATION en Idrisi	103
Figura 67 Variaciones en los usos de suelo periodo 1983-2000.....	108
Figura 68 Porcentaje de coberturas de suelo 1983	110
Figura 69 Cobertura de suelo año 1983.....	110
Figura 70 Cobertura de suelo año 2000.....	111
Figura 71 Variaciones en las coberturas de suelo periodo 1983 - 2000.....	113
Figura 72 Tasas de cambio de coberturas de suelo periodo 1983 - 2000.....	114
Figura 73 Variaciones en los usos de suelo periodo 2000-2010.....	116
Figura 74 Variaciones en las coberturas de suelo periodo 2000-2010 .	117
Figura 75 Porcentaje de coberturas de suelo año 2000	117
Figura 76 Porcentaje de coberturas de suelo año 2010	118
Figura 77 Tasa de cambio de coberturas de suelo periodo 2000 - 2010.....	118
Figura 78 Probabilidad de cambio Área sin cobertura vegetal.....	123
Figura 79 Probabilidad de cambio a bosque.....	124
Figura 80 Probabilidad de cambio a cultivo anual.....	125
Figura 81 Probabilidad de cambio a cultivo permanente	126

Figura 82 Probabilidad de cambio a pastizales.....	127
Figura 83 Probabilidad de cambio a Vegetación arbustiva	128
Figura 84 Probabilidad de cambio a vegetación herbácea	129
Figura 85 Probabilidad de cambio a cobertura área poblada.....	130
Figura 86 Validación de modelo de autómatas celulares.....	131
Figura 87 Superficie de cobertura de suelo interpretada vs simulada ..	133
Figura 88 Cobertura de suelo año 2010.....	134
Figura 89 Cobertura de suelo simulada año 2010	135
Figura 90 Variaciones en los usos de suelo periodo 2010-2020.....	137
Figura 91 Cobertura de suelo simulada año 2020	138
Figura 92 Porcentaje de coberturas de suelo simuladas año 2020	139
Figura 93 Tasa de cambio de coberturas de suelo periodo 2010 - 2020.....	140
Figura 94 Variaciones en las coberturas de suelo periodo 2010 - 2020.....	141

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Relación entre resolución de fotografía digital en ppp y la resolución de escaneo en micrones.	10
Ecuación 2 Precisión Horizontal (PH)	13
Ecuación 3 Precisión Vertical (PV)	14
Ecuación 4 Unidad mínima de mapeo	24
Ecuación 5 Regla de transición de un autómata celular	34
Ecuación 6 Modelo Logit de regresión logística	40
Ecuación 7 Función logística	41
Ecuación 8 Tasa de cambio anual	44

RESUMEN

La actividad antrópica en la microcuenca del río Cristal se ha incrementado en los últimos años provocando daños irreparables a los ecosistemas naturales, acelerando así los procesos de erosión por el mal manejo de los suelos y el crecimiento de la frontera agrícola, con lo que surge la necesidad de proveer a las autoridades de insumos para la elaboración de planes relacionados al manejo de cuencas. En el presente proyecto se desarrolla un modelo prospectivo del uso y cobertura de suelo para el año 2020 basado en la técnica combinada de autómatas celulares y cadenas de Markov. Para ello, se han realizado procesos de ortorectificación de fotografías aéreas de donde se extrajeron las coberturas de suelo para el periodo 1983-2000. Además, se ajustaron modelos de regresión logística, para relacionar las variables biofísicas que condicionan la evolución en los usos de suelo y las zonas de cambio, se efectuó la simulación al año 2010 y se comparó mediante el índice Kappa para determinar el grado de ajuste a la realidad y finalmente se simuló al año 2020. El estudio evidencia la pérdida de vegetación natural, disminución de áreas agrícolas e incremento de zonas de uso pecuario.

PALABRAS CLAVE

AUTÓMATAS CELULARES

MODELOS PROSPECTIVOS

USO DE SUELO

REGRESIÓN LOGÍSTICA

SUMMARY

Anthropic activities in the Cristal River watershed have increased in recent years causing irreparable damage to natural ecosystems, accelerating erosion processes as a result of incorrect soil management and agricultural frontier expansion; in response, emerges the need of providing inputs to authorities for the development of plans related to watershed management. In this project, it develops a prospective land use model for 2020, based on the combined technique of cellular automata and Markov chain analysis. To this end, orthorectification of aerial image process were carried to interpret land cover for the period 1983-2000. Next, it was adjusted logistic regression models to relate biophysical variables and land cover change. The following steps consist in performing a simulation to 2010 and a validation process using the Kappa index to determine the level of adjustment with reality, and finally a 2020 simulation was performed. The results show the loss of natural vegetation, reduction of agricultural zones and increment of livestock areas.

KEY WORDS

CELLULAR AUTOMATA
PROSPECTIVE MODELS
LAND USE
LOGISTIC REGRESSION

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Aerotriangulación.- Constituye el soporte con el que se obtendrán las ortofotos para efectuar el levantamiento geomorfológico. Tiene por objeto el obtener las coordenadas de los puntos necesarios para el ajuste de todos los modelos en base de los cuales se generará el modelo digital del terreno.

Cobertura de suelo.- Hace referencia al aspecto morfológico y tangible del suelo, comprende todos los aspectos que hacen parte del recubrimiento de la superficie terrestre, de origen natural o cultural, que sean observados y permitan ser medidos con fotografías aéreas, imágenes de satélite u otros sensores remotos.

Interpolación.- La interpolación consiste en hallar un dato dentro de un intervalo en el que conocemos los valores en los extremos.

Leyenda.- Leyenda es aplicar una clasificación en un área específica utilizando una escala definida y un juego de datos específico. Por lo tanto una leyenda es: dependiente de la escala y representación cartográfica, y dependiente de los datos y la metodología de mapeo.

Modelo digital de elevaciones.- El término modelo digital de elevaciones (Digital Elevation Model: DEM), es la representación numérica de una serie de mediciones de elevación sobre sitios distribuidos sobre la superficie terrestre, con el que se define la variación continua del relieve sobre el espacio

Ortofoto.- Es una imagen de una fotografía aérea, que se ha procesado para corregir los errores provocados por la inclinación de la cámara y el relieve del terreno, por lo tanto adquiere una proyección ortográfica

Ortorectificación.- Es un proceso que permite remover los errores geométricos inherentes dentro de las fotografías aéreas, producidos por variables como: la orientación interna de la cámara, desplazamientos debido al relieve, curvatura de la tierra y errores sistemáticos asociados con la cámara y el sensor

Píxel.- Este nombre proviene de la expresión que se obtiene al unir las palabras inglesas picture y element. Los píxeles son las unidades de color que componen la imagen. Un píxel no tiene una medida concreta, no se puede decir, simplemente es la medida de división de una retícula en celdillas

Probabilidad.- Es un valor comprendido entre 0 y 1, incluidos estos dos valores, que describe la posibilidad de ocurrencia de un evento.

Raster.- El modelo raster utiliza una representación del mundo real no discreta, como sucede en el vector (interrumpida por puntos y líneas), sino continua, mediante una superficie dividida en celdas regulares organizadas en una cuadrícula de filas y columnas.

Regresión.- Consiste en emplear métodos que permitan determinar la mejor relación funcional entre dos o más variables concomitantes.

Resolución.- La resolución se define como la habilidad para discriminar información de detalle

Topología.- Son relaciones espaciales matemáticas entre los diferentes elementos gráficos, punto, línea, polígono y su posición en el mapa

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

En este capítulo se desarrolla una descripción general de las características del territorio de análisis, la problemática y la justificación que motivó la realización de la presente investigación.

1.1. Antecedentes

La microcuenca del río Cristal está caracterizada por la presencia de extensas áreas agrícolas, vegetación espontánea y bosques primarios; en la cuenca alta la población habita de forma dispersa, mientras que en la cuenca baja se ubica el área urbana de la ciudad de Montalvo; asimismo, el 100% del área que comprenden las parroquias Balsapamba y Bilovan es rural, siendo la actividad agropecuaria la más representativa del sector (SNGR, PNUD, & UEB, 2013).

El 83,9% de la superficie del cantón San Miguel y el 95,3 % de la superficie del cantón Montalvo es destinada para producción (CISMIL, 2006a). Como resultado Bolívar es una de las provincias con menor porcentaje de cobertura vegetal remanente de la región sierra. Dentro del área perteneciente a la microcuenca del río Cristal, el cantón San Miguel cuenta un 16,1% de cobertura vegetal natural, en tanto que el cantón Montalvo cuenta con un 4,6% de cobertura vegetal remanente (CISMIL, 2006a, 2006b). Como consecuencia del mal manejo de los suelos, el crecimiento de la frontera agrícola, y la erosión; se han producido una serie de eventos naturales que han afectado a los habitantes de la microcuenca del río Cristal. Cada año la población de Montalvo asentada en la cuenca baja sufre graves inundaciones. El 29 de enero del año 2014 el desbordamiento del río Cristal ocasionado por las fuertes lluvias destruyó 790 hectáreas de cultivos, hecho que afectó fuertemente la economía local

(Diario El comercio, 2014). Por otra parte en la cuenca alta son comunes los movimientos de remoción en masa que ponen en peligro la seguridad de la población, y además ocasionan obstrucciones en las vías de comunicación.

1.2. Justificación

Actualmente gran parte del territorio de la microcuenca del río Cristal es destinada a la producción agrícola, asimismo muchas áreas de pastizales se han incrementado con el paso de los años, todo esto ha reducido substancialmente su área de cobertura vegetal, la misma que cuenta con una gran importancia en el ámbito social, económico, ambiental y para el correcto funcionamiento de los sistemas ambientales locales (CISMIL, 2006b). En efecto, se han producido grandes cambios durante los últimos años, sin embargo el área de estudio carece de análisis espacio temporales detallados que permitan estimar los niveles de alteración de las coberturas naturales en los que se determinen las áreas de pérdidas y la evolución del uso del suelo para los años transcurridos.

Se ha demostrado que el inadecuado uso del suelo puede ser causante de un gran número de desastres. En épocas de mayor intensidad de lluvias, la eliminación de los bosques naturales incrementa la escorrentía superficial y degrada los suelos, lo que genera acumulación de materiales en las laderas y a lo largo de los drenajes, alterando la dinámica fluvial como son los procesos de erosión, transporte y sedimentación, los cuales inciden directamente en el flujo de las aguas, aumentando el volumen de los sedimentos en el cauce de los cursos de agua, lo que incrementa el riesgo a desbordamientos e inundaciones en la cuenca baja (IEE, 2012; Medina, 2007).

Por lo tanto como respuesta se ha encaminado la presente investigación al diseño de un modelo que proporcionará información de los próximos 10 años acerca de las dinámicas del cambio de uso y cobertura de suelo. De

esta forma se proveerá a las autoridades de información precisa que servirá como base para la elaboración de planes relacionados al manejo de cuencas, políticas de protección del territorio, reducción de vulnerabilidades, planes de reforestación y una óptima gestión de uso y extracción de recursos naturales.

1.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En los últimos años se ha producido una agresiva deforestación en la zona debido al avance de la frontera agrícola, y hasta el momento no se han realizado estudios que permitan proyectar los daños futuros que puedan comprometer también a la cuenca baja.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Realizar el estudio multitemporal y análisis prospectivo del cambio de uso de suelo y cobertura vegetal en la microcuenca del río Cristal mediante el uso de autómatas celulares (AC).

1.4.2. Objetivos específicos

- Recopilar y analizar información bibliográfica, cartográfica y temática.
- Preparar y corregir las imágenes satelitales para su clasificación.
- Ortorectificar las fotografías aéreas para su interpretación.
- Efectuar los procesos de clasificación e interpretación de imágenes satelitales y fotografías aéreas para asociar los elementos en distintos usos de suelo.
- Generar las clases de coberturas de suelo.
- Aplicar el método de cadenas de Markov para determinar las áreas de transición entre usos (AC).

- Elaborar una regresión logística en el software estadístico R para generar mapas de probabilidad de cambio de cobertura de suelo.
- Efectuar mapas de cambio de uso de suelo y cobertura vegetal para los años 2010 y 2020 utilizando la técnica combinada de autómata celular y predicción de cambios de Markov (AC).
- Validar el modelo predictivo del cambio de uso de suelo y cobertura vegetal para determinar el grado de ajuste utilizando el índice Kappa (AC).

1.5. Metas

- 1 Mapa base a escala 1:25000 del área de estudio.
- 3 Mapas de uso de suelo y cobertura vegetal (años 1983, 2000 y 2010) a escala 1:25000.
- 8 Mapas temáticos de cada una de las variables a utilizarse en el modelamiento a escala 1:25000
- 8 Mapas de probabilidad de cambio de cada clase de cobertura de suelo a escala 1:25000
- 1 Modelo prospectivo de del cambio de uso de suelo y cobertura vegetal para el año 2020 a escala 1:25000.
- 2 Mapas de uso de suelo y cobertura vegetal para los años 2010 y 2020 a escala 1: 25000.

1.6. Localización geográfica

El área de estudio comprende la microcuenca hidrográfica del río Cristal. Cuenta con una superficie de 199 Km² y corresponde a los grandes paisajes: montaña, piedemonte y llanura costera, localizada en territorios pertenecientes a los cantones: Montalvo (Provincia de los Ríos), y San Miguel (Provincia de Bolívar) (Ver Figura 1).

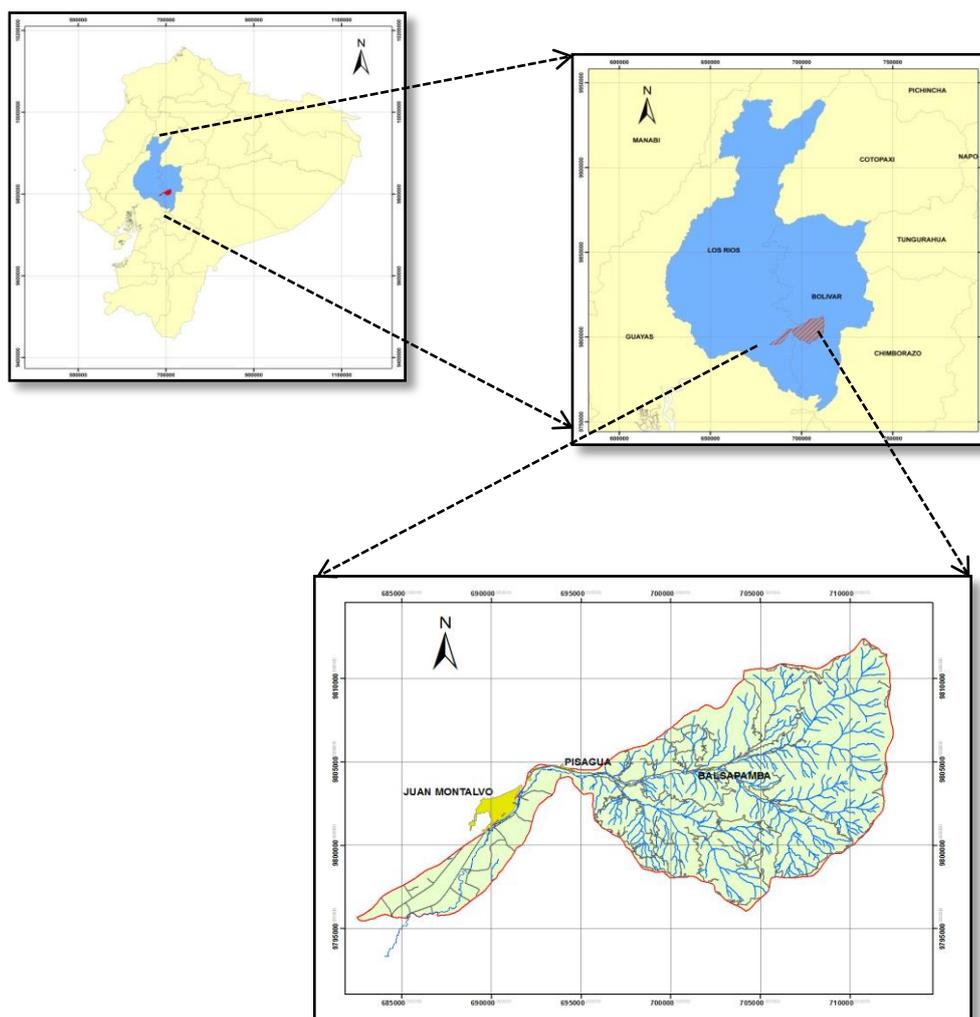


Figura 1 Área de estudio

1.7. Datos generales y características de la microcuenca del río Cristal

La microcuenca del río Cristal drena las aguas de las vertientes externas de la cordillera Occidental del cantón San Miguel. Tiene una morfología irregular con grandes elevaciones y fuertes pendientes que han limitado el desarrollo antrópico en la cuenca alta. Presenta una fuerte variación altitudinal por estar localizada en una zona de transición entre los paisajes piedemonte y llanura aluvial, es así que su rango altitudinal varía entre 3172,45 m.s.n.m. y 23,37 m.s.n.m.

El 70% del área de estudio se estima como plana la misma que corresponde a la cuenca baja, sectores Montalvo y Pisagua; sin embargo, en la cuenca media y alta se registran pendientes mayores. Se determinó que el 28% del área de análisis se encuentra entre pendientes comprendidas entre 50 y 100% de inclinación y pequeñas áreas con pendientes fuertes mayores a 100%. El uso de suelo predominante es pecuario con una cobertura del 35% de la microcuenca, seguida del uso agrícola con un 21% y en menor proporción la cobertura natural, lo que hace a la actividad agropecuaria la más representativa del sector (IEE, 2012).

La temperatura promedio oscila entre 14 y 24°C, la precipitación media anual es de 1690 mm y la humedad atmosférica varía entre el 70% y 90% según la época (mayo-octubre) y lluviosa (noviembre-abril) (Ballesteros, 2011).

CAPÍTULO II

2. MARCO CONCEPTUAL

En el presente capítulo se tratan los conceptos y definiciones de las diferentes técnicas y procedimientos relacionados a la obtención de productos cartográficos, tratamiento, análisis de información y generación de insumos para la obtención de modelos prospectivos utilizando autómatas celulares.

2.1. Fotogrametría

Fotogrametría es el arte, ciencia y tecnología de obtener información confiable sobre los objetos físicos y el medio a través de procesos de captura, medición e interpretación de imágenes fotográficas, patrones de imágenes de radiancia electromagnética y otros fenómenos (Morris, 1966).

Por otra parte, la fotogrametría se define como el arte de crear modelos 3D a partir de imágenes bidimensionales, con el fin de obtener información de los objetos en la corteza terrestre, usando principios de geometría proyectiva y visión estereoscópica (Bernis, 2010).

2.1.1. Clasificación de la fotogrametría

Zapata (2003) clasifica la fotogrametría de acuerdo al tipo de tratamiento y al tipo de fotografía (ver Figura 2):

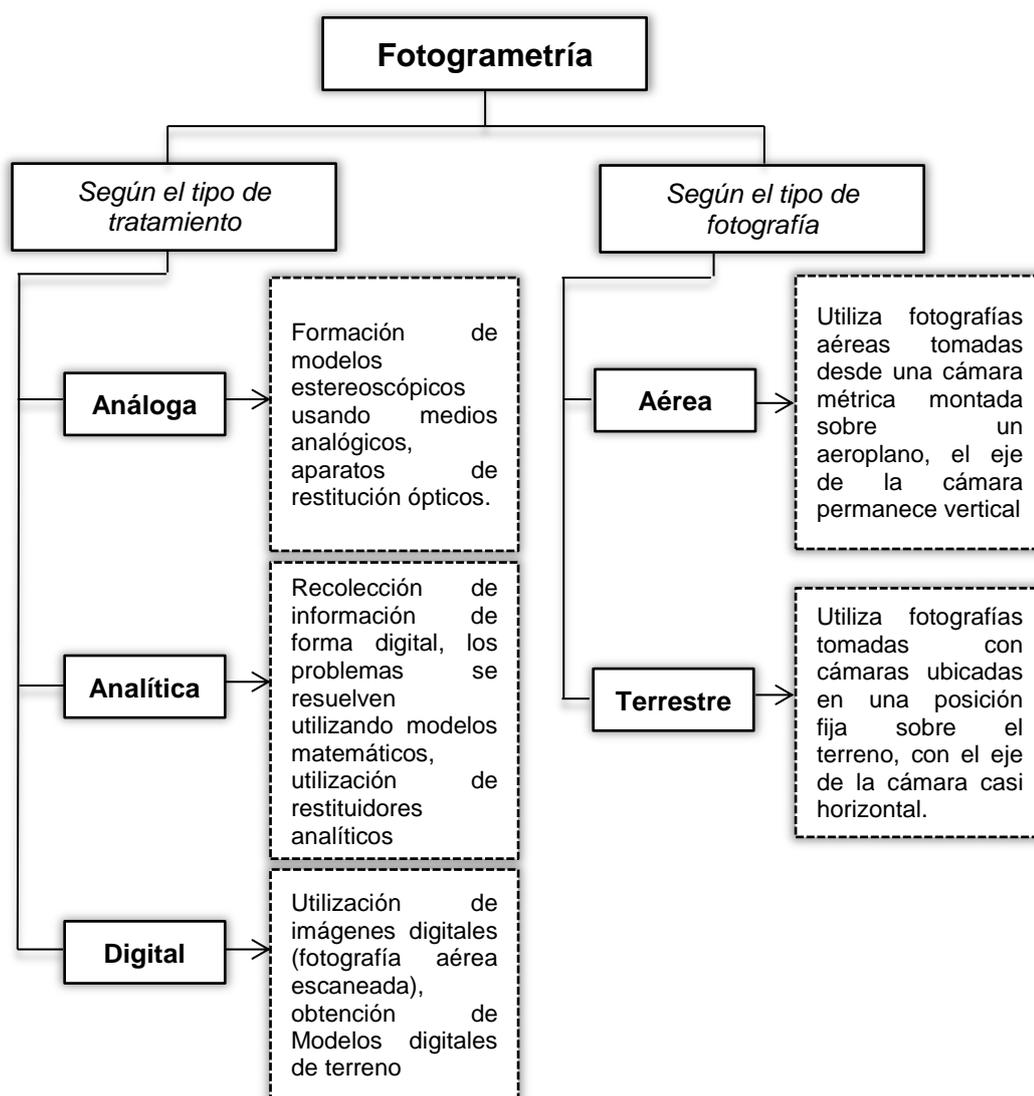


Figura 2 Clasificación de la fotogrametría.

Fuente: (Zapata, 2003)

2.1.2. Cámara aérea

La cámara aérea se define como un instrumento dentro de los sensores remotos (no presenta contacto entre el sensor y la superficie), el cual capta propiedades físicas de los objetos; es decir, las longitudes de onda definidas dentro del campo electromagnético (ultravioleta hasta infrarrojo) por medio de absorción, refracción o reflexión de la energía emitida por el sol. Además puede ser definida como un pequeño cuarto oscuro que tiene una lente

frente al obturador, el mismo que actúa como ventana a través del cual pasa la luz que llega al fondo del cuarto oscuro donde se halla colocada la película sensibilizada que reacciona al producirse el contacto (Zapata, 2003).

2.1.3. Fotografía aérea

Fotografía aérea es una proyección cónica central en la que la energía electromagnética reflejada por los objetos de la superficie terrestre al atravesar un objetivo, afecta con mayor o menor intensidad la película emulsionada sensible a la energía, formando de esta forma la imagen fotográfica (Braulio, 2005; Zapata, 2003).

2.1.4. Escaneado de fotografías aéreas

Las fotografías aéreas adquiridas en formato analógico deben convertirse a un formato raster, para que puedan ser utilizadas en programas diseñados para el análisis digital de imágenes, este proceso se denomina escaneo o digitalización (Fallas, 2001).

El proceso de escaneo determina en gran medida la cantidad de información extraíble de una fotografía, su exactitud planimétrica y el tamaño del archivo a ser creado; por lo tanto debe realizarse con escáneres fotogramétricos, que son dispositivos con la capacidad de almacenar imágenes de gran calidad y excelente exactitud posicional; es decir, que aseguren la exactitud radiométrica y geométrica de la imagen (Astudillo & Huilcamaigua, 2011; ERDAS, 2001; Fallas, 2001).

A continuación se presentan los valores de la resolución de escaneo (expresado en puntos por pulgada, ppp) y el tamaño de pixel en micrones en la imagen escaneada (Fallas, 2001). En el Ecuador, el Instituto Geográfico Militar proporciona con fines de investigación, fotografías aéreas en formato

digital con una resolución de 1814 ppp¹, que a su vez mediante la Ecuación 1 presenta una resolución de escaneo de 13,78 micrones (ver Tabla 1 y Figura 3).

Ecuación 1 *Relación entre resolución de fotografía digital en ppp y la resolución de escaneo en micrones.*

$$\mathbf{Micrones} = 25535 * (PPP)^{-1.0028}$$

Fuente: (Fallas, 2001)

Tabla 1 Relación entre el tamaño de pixel en micrones y la resolución óptica de escaneo.

Tamaño de pixel (micrones)	Resolución (píxeles por pulgada- ppp)
5	5000
10	2500
13	2000
13,78	1814
14	1800
22	1132
25	1000
28	900
64	400
84	300
250	100

Fuente : (Fallas, 2001)

¹ **ppp (Puntos por pulgada):** Chuvieco (2008), define que es una medida del número de píxeles detectados del documento durante el proceso de escaneo.

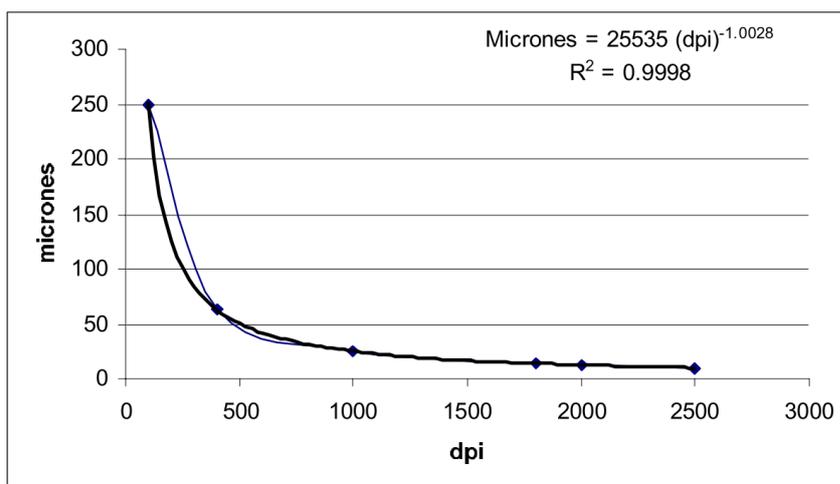


Figura 3 Tamaño de pixel en micrones versus resolución de escaneo en ppp.

Fuente: (Fallas, 2001)

2.1.5. Ortorectificación

Es un proceso que permite remover los errores geométricos inherentes dentro de las fotografías aéreas, producidos por variables como: la orientación interna de la cámara, desplazamientos debido al relieve, curvatura de la tierra y errores sistemáticos asociados con la cámara y el sensor (ERDAS, 2001). Asimismo, IGM (2008), detalla que es un proceso mediante el cual se asegura que cada elemento de la imagen o pixel, se encuentre en su posición correcta; entonces, corresponde en esencia transformar el sistema de coordenadas de proyección central de la fotografía a una proyección ortogonal.

El proceso de ortorectificación se basa en tomar las imágenes digitales crudas, aplicarles un DEM y los resultados de la triangulación para de esta manera crear una imagen ortorectificada; que al ser creada, cada píxel dentro de la imagen adquiere fidelidad geométrica (ERDAS, 2001) (ver Figura 4).

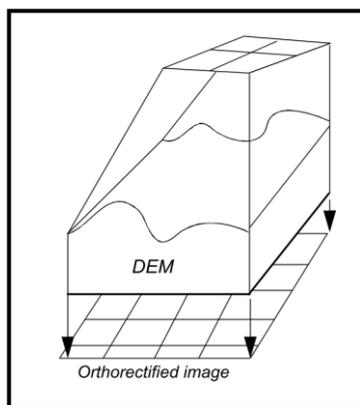


Figura 4 Ortorectificación

Fuente: (ERDAS, 2001)

Especificaciones Técnicas para generación de ortofotografías

El Instituto Geográfico Militar ha desarrollado especificaciones técnicas para la generación de cartografía topográfica a cualquier escala y ortofotos digitales; normando de esta forma desde los procedimientos de digitalización de fotografías aéreas hasta las precisiones finales de los productos Cartográficos. Las especificaciones aplicables al presente análisis son las siguientes:

- **Digitalización de fotografías aéreas**

Se menciona: “La digitalización de las fotografías aéreas debe realizarse mediante el uso de un scanner fotogramétrico que asegure la exactitud geométrica y radiométrica de la imagen” (IGM, 2008, p.6). Lo que garantiza una alta calidad de imagen y una gran precisión posicional; necesaria para aplicaciones fotogramétricas que tienen una gran demanda en precisión.

- **Precisiones**

Mediante las normas técnicas del IGM se han definido los requerimientos mínimos de exactitud para la obtención de productos de calidad. La exactitud

horizontal de las ortofotos digitales depende de las características de la cámara, el escáner fotogramétrico, de la escala de la imagen fuente y la exactitud de los puntos de control (IGM, 2008). La norma establece que las precisiones tanto planimétrica como altimétrica deben estar de acuerdo a los siguientes parámetros:

- **Planimétrica**

“ La posición en el mapa digital del 95% de los puntos bien definidos, no diferirá de la verdadera en más de 0,3 mm por el denominador de escala” (IGM, 2006, p.5) (ver Ecuación 2).

Ecuación 2 *Precisión Horizontal (PH)*

$$PH(m) = 0.0003 \text{ mm} * FE$$

Fuente: (IGM, 2006)

Dónde:

FE= Factor de escala

0,0003 m = Valor establecido por el IPGH²

- **Altimétrica**

“ La elevación del 90% de los puntos acotados en el mapa digital, no diferirá de la verdadera en más de ¼ del intervalo de curva” (IGM, 2006,p.5) (ver Ecuación 3).

² **IPGH:** Instituto Panamericano de Geografía e Historia, es un organismo internacional, científico y técnico de la Organización de los Estados Americanos, dedicado a la generación y transferencia de conocimiento especializado en las áreas de cartografía, geografía, historia y geofísica

Ecuación 3 Precisión Vertical (PV)

$$PV(m) = \frac{1}{4} * IC$$

Fuente: (IGM, 2006)

Dónde:

IC= Intervalo de curva. Para escala 25000 la norma establece 20 metros.

De acuerdo a los cálculos anteriores se han establecido en la norma los valores mínimos de exactitud que deberían garantizar las ortofotos digitales (ver Tabla 2).

Tabla 2 Valores mínimos de exactitud para generación de ortofotos digitales

ESCALA DE LA FOTOGRAFÍA	TAMAÑO DEL PIXEL (EN METROS)	ESCALA DE ORTOFOTOS	TAMAÑO DEL PIXEL (EN METROS)	PRECISIÓN HORIZONTAL (EN METROS)	PRECISIÓN VERTICAL (EN METROS)
1:5 000	0.07	1:1 000	0.10	0.30	0.25
1:10 000	0.14	1:2 000	0.20	0.60	0.50
1:20 000	0.28	1:2 500	0.25	0.80	0.60
1:30 000	0.42	1:5 000	0.50	1.50	1.25
1:60 000	0.84	1:10 000	1.00	3.00	2.50
1:60 000	0.84	1:20 000	1.00	6.00	2.50
1:60 000	0.84	1:25 000	1.00	7.50	5.00
1:60 000	0.84	1:50 000	2.00	15.00	10.00

Fuente: (IGM, 2006)

Además la norma establece valores de error en función del pixel para los procesos previos a la obtención de las ortofotos (ver Tabla 3) (IGM, 2008):

Tabla 3 Error máximo en los procesos de orientación

<i>Descripción</i>	<i>Valor</i>
<i>Error para la orientación interna</i>	0.6 de pixel
<i>Error para el ajuste absoluto</i>	2 pixeles

Fuente: (IGM, 2008)

- **Ortofotografía**

Es una imagen de una fotografía aérea, que se ha procesado para corregir los errores provocados por la inclinación de la cámara y el relieve del terreno, por lo tanto adquiere una proyección ortográfica; es decir, cada punto de la imagen luce como si un observador estuviera mirando directamente en línea recta a través de ella a lo largo de una línea de vista que es perpendicular a la tierra. Esta referida a una proyección cartográfica; por ende, posee las características geométricas de un mapa. Las mediciones que se realicen sobre una imagen ortorectificada representan las posiciones de los objetos como si fueran realizadas directamente sobre la superficie terrestre (ERDAS, 2001; Fallas, 2001; IGM, 2008).

- **Orientación**

La orientación de una fotografía es reconstruir de manera exacta el modelo estereoscópico al momento de la exposición de la fotografía, para esto se establece la relación entre: la cámara o sensor, la imagen y el terreno, por lo cual es necesario que cada elemento se encuentre muy bien definido respecto al espacio y a los sistemas de coordenadas descritos anteriormente (Astudillo & Huilcamaigua, 2011).

Orientación interna

La orientación interna define la geometría interna de la cámara tal como existía al momento de la captura de la información; en otras palabras, consiste en la reconstrucción del haz de rayos al momento de la exposición. Para esto, se requiere transformar las coordenadas 2D medidas en la imagen digital (sistema de coordenadas de imagen) a un sistema 3D de la cámara (sistema de coordenadas espacial de imagen) (Braulio, 2005; ERDAS, 2001; Ormeño, 2006)

Las variables asociadas con la geometría interna de la cámara son (ver Figura 5):

- Punto principal
- Distancia focal
- Marcas fiduciales
- Distorsión del lente

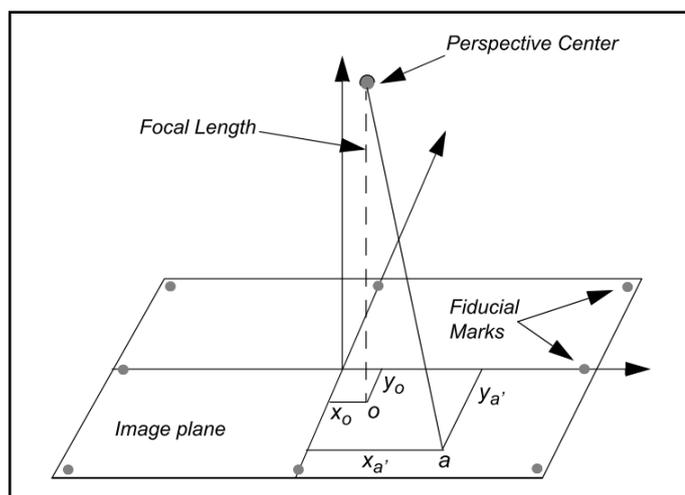


Figura 5 Geometría interna de la cámara

Fuente: (ERDAS, 2001)

Orientación exterior

Es la reconstrucción de las características externas de la cámara al momento de la toma de la fotografía, define la posición y la orientación angular asociada con una imagen. Los elementos que definen la orientación exterior son:

Elementos posicionales (X_o , Y_o , Z_o): definen el centro de perspectiva "O", respecto al sistema de coordenadas espaciales del terreno (X, Y, Z).

Elementos angulares o rotacionales (ω), ϕ , y κ): establecen la relación entre el sistema de coordenadas espaciales de terreno (X, Y, Z) y el sistema de coordenadas de la imagen (x, y, z) (ver Figura 6).

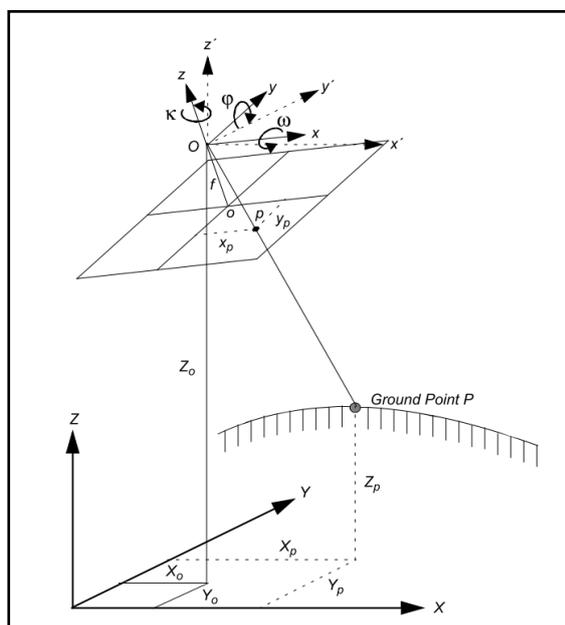


Figura 6 Elementos que definen a orientación exterior

Fuente: (ERDAS, 2001)

En la fase de orientación exterior se necesita conocer las coordenadas de por lo menos cuatro puntos de control terrestre por modelo

estereoscópico que puedan ser fotoidentificables, tales como: intersecciones de vías, esquinas de construcciones; en suma, puntos que no hayan sufrido alteraciones en el transcurso del tiempo. Adicionalmente para obtener mejores ajustes, los puntos deben estar muy bien distribuidos y presentes en dos o más imágenes.

Orientación relativa

Consiste en reconstruir a una escala menor el modelo estereoscópico del terreno; en otras palabras, dar a los proyectores del instrumento la misma posición relativa que hubo en la cámara al momento de las dos exposiciones consecutivas. Cuando se realiza con éxito se logra una visión estereoscópica del modelo; caso contrario los objetos se observaran por separado y se obtienen los paralajes "X" y "Y", que es la desviación angular de la posición aparente de un objeto (Astudillo & Huilcamaigua, 2011; Bernis, 2010; Braulio, 2005).

Puntos de enlace

Son los puntos comunes entre imágenes, cuyas coordenadas de terreno son desconocidas, pero que visualmente son reconocibles en el área de traslapo de dos o más imágenes. Es necesario que se encuentre muy bien definidos visualmente, deben estar muy bien distribuidos sobre toda el área del bloque (ver Figura 7). Actualmente los sistemas digitales ofrecen opciones para la recolección automática de los puntos de amarre a través de técnicas de correlación (Benitez, 2002; ERDAS, 2001).

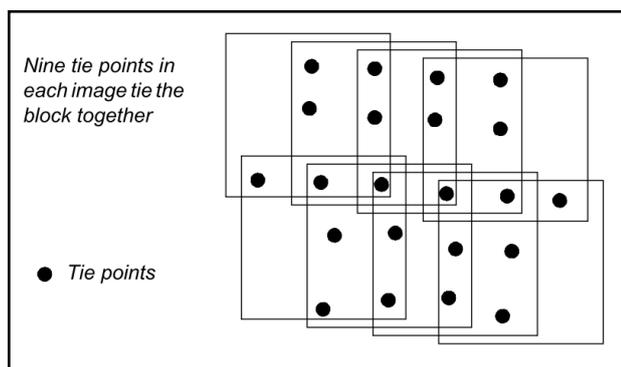


Figura 7 Distribución de puntos de amarre en un bloque fotogramétrico

Fuente: (ERDAS, 2001)

Orientación absoluta

La orientación absoluta le da al modelo la verdadera posición en el espacio, para esto se requiere la utilización de puntos de control terrestre identificables en las fotografías, una base cartográfica o a su vez una Ortofotografía; siempre y cuando cumplan con la precisión necesaria para la extracción de puntos referenciados. En primer lugar se ejecuta el nivelado del modelo referenciándolo a un sistema de coordenadas y el escalado del modelo que se realiza por medio del cambio de distancia entre los proyectores (Astudillo & Huilcamaigua, 2011; Braulio, 2005; ERDAS, 2001).

Puntos de control

Los puntos de control son el componente esencial para se realice una correcta relación entre las imágenes de un proyecto, el sensor y el terreno. Son objetos con coordenadas conocidas (X, Y, Z) fácilmente identificables sobre la superficie terrestre y en las fotografías. Pueden ser extraídos de las siguientes fuentes: levantamientos con estación total, puntos GPS terrestre con gran exactitud, mapas topográficos y planimétricos, imágenes ortorectificadas digitales y DEMs para la colección de GCPs³ verticales (coordenadas z). Si se procesa una faja de imágenes adyacentes se

³ **GCP:** Puntos de control terrestre

recomienda que se coloque dos puntos de control por cada tres imágenes, preferiblemente en las esquinas de una faja o bloque (ver Figura 8) (ERDAS, 2001).

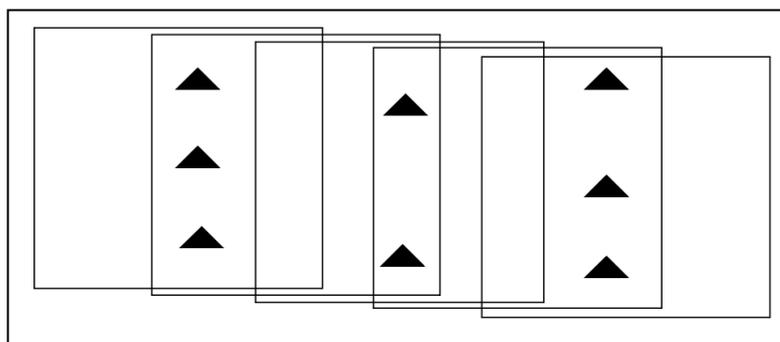


Figura 8 Configuración de GCP en una faja de imágenes

Fuente: (ERDAS, 2001)

2.2. Teledetección

La palabra teledetección, proviene de la traducción francesa <<téledétection>> dada en 1967 al termino anglosajón <<remote sensing>> y se puede definir como la adquisición de información de un objeto a distancia sin que haya contacto material entre el objeto y observador (López & Caselles, 1991). Asimismo Chuvieco (2008), define teledetección como “aquella técnica que permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre” (p.45). En este sentido la teledetección no engloba solo los procesos que permiten obtener una imagen, sino que además incluye su posterior tratamiento e interpretación; en suma, se basa en tres hechos bien diferenciados: la captura de los datos, la transmisión de éstos y, finalmente, el análisis de los mismos.

2.2.1. Resolución de un sistema sensor

La resolución se define como la habilidad para discriminar información de detalle, el concepto de resolución implica al menos cuatro manifestaciones : espacial, espectral, temporal y radiométrica (Chuvieco, 2008).

2.2.2. Sensor ASTER

El sensor multiespectral ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), es un sensor de imágenes ópticas de alta resolución geométrica y radiométrica, transportado por el satélite TERRA de la NASA. Construido por el Ministerio de Economía, Transporte e Industria de Japón (METI) y puesto en órbita el 18 de Diciembre de 1999. El sistema cuenta con 14 bandas desde el visible e infrarrojo termal, esta amplia región espectral es cubierta por tres telescopios para los subsistemas VNIR, SWIR, TIR (Ines, 2007; Mejía & Moncayo, 2012; Mendez, Aguero, & Pérez, 2005). En la Tabla 4 se describen las características del sensor ASTER:

Tabla 4 Características técnicas del sensor ASTER

Altitud	705 km				
Tipo de órbita	Sincrónica con el sol				
Capacidad de adquisición de imágenes	Franjas de 60 x 60 km				
Subsistema	Banda N°.	Longitud de onda (μm)	Resolución espacial (m x m)	Rango Dinámico	Período de Revisita
VNIR (Visible e infrarrojo cercano)	1	0.52-0.60	15	8 bits	16 días
	2	0.63-0.69			
	3N	0.78-0.86			
	3B	0.78-0.86			
SWIR (Infrarrojo de onda corta)	4	1.60-1.70	30	8 bits	
	5	2.145-2.185			
	6	2.185-2.225			
	7	2.235-2.285			
	8	2.295-2.365			
TIR (Infrarrojo Termal)	9	2.360-2.430	90	12 bits	
	10	8.125-8.475			
	11	8.475-8.825			
	12	8.925-9.275			
	13	10.25-10.95			
	14	10.95-11.65			

Fuente: (LPDAAC, 2014 citado en Mejía & Moncayo, 2012)

Las imágenes ASTER pueden ser adquiridas a través de la plataforma EROS data center⁴ o en el buscador GLOVIS. Este último ofrece la posibilidad de descargar con fines académicos imágenes ASTER de la colección TerraLook, color natural simulado, georreferenciadas y comprimidas en formato JPEG.

2.2.3. Corrección geométrica de imágenes satelitales

Usualmente la información obtenida de sensores remotos presenta errores geométricos de origen sistemático, los mismos que pueden corregirse utilizando la información desde la plataforma y conociendo la distorsión interna del sensor, y errores no sistemáticos, que son los que no pueden corregirse con una precisión aceptable sin un número suficiente de puntos de control terrestre (Bernstein, 1983 citado en Jensen, 1996).

Los errores en las posiciones relativas de los píxeles se producen por: la geometría de visión del sensor, variaciones del terreno, curvatura terrestre y el movimiento relativo de la plataforma; para corregirlos se realiza un proceso de corrección que consiste en la transformación matemática de coordenadas partiendo desde un sistema de imagen (número de fila y columna) a un sistema de coordenadas de terreno (Arias, Alvarez, Palacios, Medina, & Pinos, 2010). La corrección geométrica se realiza en tres fases:

Identificación de puntos de referencia: se trata de puntos en los que se conoce tanto la fila y la columna como las coordenadas reales (Bedon & Pinto, 2012; Chuvieco, 2008).

Cálculo de las funciones de transformación: son ecuaciones matemáticas que relacionan las coordenadas de la imagen digital (fila y columna) con las coordenadas de referencia cartográficas (X, Y) en un sistema de coordenadas geográficas. El orden del polinomio de la ecuación

⁴ URL EROS: <http://glovis.usgs.gov/>

determina la flexibilidad del ajuste y de la transformación (ver Cuadro 1) (Arozarena & Otero, 2001; Bedon & Pinto, 2012).

Cuadro 1 Características de los polinomios de transformación

ORDEN DEL POLINOMIO	CARACTERÍSTICAS
Primer Orden	Las transformaciones de primer orden se pueden usar para proyectar imágenes crudas en una proyección cartográfica, convertir una proyección cartográfica a otra proyección cartográfica y en la rectificación de imágenes de áreas relativamente pequeñas.
Segundo Orden	Pueden usarse para convertir datos de longitud y latitud a una proyección plana, para datos que cubran un área grande (Para tener en cuenta la curvatura de la Tierra).
Tercer Orden	Se utilizan con fotografías aéreas distorsionadas, en escaneo de mapas deformados y con imágenes de radar.
Cuarto Orden	Pueden usarse en fotografías aéreas muy distorsionadas.

Fuente: (Erdas Imagine, 2005 citado en Mejía & Moncayo, 2012)

La bondad del grado de ajuste se mide por lo la importancia de los residuales. El residual de la regresión es diferencia entre el valor estimado y el real, para cada uno de los puntos empleados en el proceso. El indicador más utilizado es el error cuadrático medio (RMS) (Chuvieco, 2008).

2.3. Unidad mínima de mapeo (UMM)

La unidad mínima de mapeo, se define como la representación más pequeña en el mapa que puede ser legiblemente delineada. La UMM busca lograr coherencia en la representación espacial, eficiencia en la lectura y utilidad del mapa en formato impreso; es decir, a partir de determinada área espacial, los objetos y sus contenidos deben ser generalizados; caso contrario, dificultarían la distinción por parte del usuario al momento de la lectura en formato analógico (ver Figura 9) (Stalichev, 1979 citado en Mejía & Moncayo, 2012; Rosstier, 2000 citado en Mejía & Moncayo, 2012)

Stalichev (1979), establece que a nivel internacional la UMM más utilizada es de 5 x 5 mm, pero él recomienda emplear un cuadrado de 4 x 4 mm, debido a que es un área mínima que garantiza operatividad cartográfica y una buena lectura del mapa. En el año 2008, el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP), a través de PRAT⁵ utilizó una metodología para realizar el cálculo de la UMM utilizando la Ecuación 4 (Mejía & Moncayo, 2012):

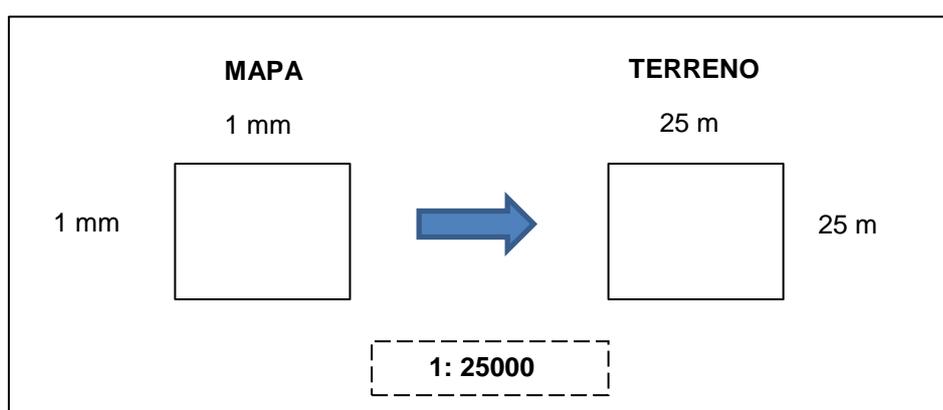


Figura 9 Relación entre distancia en el mapa y su correspondencia en el terreno

Ecuación 4 *Unidad mínima de mapeo*

$$UMM = UMV * Escala\ de\ trabajo$$

Fuente: (Ministerio del Ambiente, 2012)

Dónde:

UMV = Unidad mínima visible

2.4. Cobertura y uso del suelo

Cobertura del suelo es la cobertura biofísica tal como se observa directamente o a través de los sensores remotos, incluye la vegetación

⁵ PRAT: Programa de Regulación y Administración de Tierras Rurales.

natural o cultivada, la infraestructura de origen antrópica y otros como agua, hielo, afloramientos rocosos, depósitos de arena, entre otros (Superintendencia agraria, 2001 citado en Guerra, 2006). Por otra parte, Di Gregorio & Jansen (2005), definen a la cobertura del suelo como “ la cobertura biofísica que se observa sobre la superficie de la tierra.

Guerra (2006), establece que “el uso de la tierra está caracterizado por arreglos, actividades e insumos que el hombre emprende en un cierto tipo de cobertura de la tierra para producir, cambiarla o mantenerla” (p.9).

2.5. Uso actual de la tierra

“Se refiere a la actividad humana presente al momento de hacer la observación y/o a la descripción de sus características en una época determinada sin tomar en consideración su potencial o uso futuro” (SI-A citado en Guerra, 2006, p.10).

2.6. Clasificación y leyenda temática

La clasificación es una representación de la situación real en campo utilizando criterios de diagnóstico bien definidos. Por otra parte, es el arreglo de objetos en grupos o conjuntos sobre la base de sus relaciones. La clasificación describe el esquema sistemático con los nombres de cada una de las clases y los criterios que se han utilizado para distinguirlos, y la relación entre las clases; por lo tanto, una clasificación debe ser: independiente de la escala e independiente de su fuente (Butler et al., 1990; Sokal, 1974 citado en Puentes, Navarro, & Pezzola, 2009).

Leyenda es aplicar una clasificación en un área específica utilizando una escala definida y un juego de datos específico. Por lo tanto una leyenda es: dependiente de la escala y representación cartográfica, y dependiente de los datos y la metodología de mapeo; es decir, los detalles observados en una

fotografía aérea son diversos a los de una imagen satelital (Puentes et al., 2009).

El Ministerio del Ambiente del Ecuador - MAE (2012), en la Línea base de Deforestación del Ecuador Continental, desarrolló una propuesta de leyenda temática de tipos de uso y cobertura del suelo, construida de forma jerárquica (anidada), en donde el nivel superior corresponde a las seis clases de uso y cobertura del suelo definidas por IPCC⁶ en el año 2006, los niveles inferiores representan clases de uso y cobertura más detalladas definidos de acuerdo a la factibilidad de su detección dependiendo de las fuentes de información (ver Cuadro 2) (Mejía & Moncayo, 2012; Ministerio del Ambiente, 2012).

Cuadro 2 Leyenda temática de uso y cobertura de suelo Niveles I y II

NIVEL I (IPCC)	NIVEL II
<i>Bosque</i>	Bosque Nativo
	Plantación Forestal
<i>Tierra agropecuaria</i>	Cultivo Anual
	Cultivo Semipermanente
	Cultivo Permanente
	Pastizal
	Mosaico Agropecuario
<i>Vegetación Arbustiva y Herbácea</i>	Vegetación Arbustiva
	Vegetación Herbácea
<i>Cuerpo de Agua</i>	Páramo
	Natural
<i>Zona Antrópica</i>	Artificial
	Área Poblada
<i>Otras Tierras</i>	Infraestructura
	Glaciar
<i>Sin Información</i>	Área Sin Cobertura
	Vegetal
	Sin Información

Fuente: (Ministerio del Ambiente, 2012)

⁶ IPCC: Panel Intergubernamental de Cambio Climático

Las definiciones operativas de las 16 clases del nivel 2 (ver fueron convenidas en talleres por las entidades encargadas de la generación de información de cobertura y uso del suelo en el Ecuador: MAE, IEE (CLIRSEN), SINAGAP⁷ (ver Tabla 5 y Tabla 6) (Ministerio del Ambiente, 2012).

Tabla 5 Definiciones operativas Nivel I

Nivel I	Definición operativa	Fuente
Bosque	Comunidad vegetal de por lo menos una hectárea, con árboles de 5 m de altura y con un mínimo de 30% de cobertura del dosel o capa aérea vegetal. - Incluye: las áreas cubiertas de bambú y palmas nativas, siempre que éstas alcancen el límite mínimo establecido en cuanto a altura y cubierta de copas - Excluye: las formaciones de árboles utilizadas en sistemas de producción agrícola, por ejemplo plantaciones frutales, plantaciones de palma africana y sistemas agroforestales. Excluye también los árboles que crecen en parques y jardines urbanos.	MAE (2011)
Vegetación arbustiva y Herbácea	Áreas cubiertas por arbustos y vegetación herbácea producto de un proceso biológico natural, que no incluye áreas agropecuarias.	MAE, SINAGAP, CLIRSEN (2012)
Tierras Agropecuarias	Área bajo cultivo agrícola y pastos plantados, o que se encuentran dentro de una rotación entre éstos	SINAGAP, CLIRSEN (2012)
Cuerpo de Agua	Área que se encuentra cubierta o saturada de agua estática o en movimiento, natural o artificial que reposa sobre la superficie terrestre por todo o una parte del año	MAE, SINAGAP, CLIRSEN (2012)
Zona Antrópica	Asentamiento humano y la infraestructura que lo complementa	MAE, SINAGAP, CLIRSEN (2012)
Otras Tierras	Áreas con poca o ninguna vegetación, afloramientos rocosos, glaciares y otras clases que no estén incluidas en ninguna de las otras categorías	MAE, SINAGAP, CLIRSEN (2012)
Sin Información	Corresponde a áreas que no han podido ser mapeadas	

Fuente: (Ministerio del Ambiente, 2012)

⁷ **SINAGAP:** Sistema de Información Nacional de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca

Tabla 6 Definiciones operativas Nivel II

Nivel II	Definición operativa	Fuente
Bosque Nativo	Comunidad vegetal que se caracteriza por la dominancia de árboles de diferentes especies nativas, edades y portes variados, con uno o más estratos.	<i>MAE (2011)</i>
Vegetación Arbustiva	Áreas con un componente substancial de especies leñosas nativas no arbóreas. Incluye áreas degradadas en transición a una cobertura densa del dosel.	<i>MAE (2011)</i>
Vegetación Herbácea	Áreas constituidas por especies herbáceas nativas con un crecimiento espontáneo, que no reciben cuidados especiales, utilizados con fines de pastoreo esporádico, vida silvestre o protección.	<i>SINAGAP, CLIRSEN (2012)</i>
Cultivo Anual	Comprende aquellas tierras dedicadas a cultivos agrícolas, cuyo ciclo vegetativo es estacional, pudiendo ser cosechados una o más veces al año.	<i>SINAGAP, CLIRSEN (2012)</i>
Cultivo Permanente	Comprenden aquellas tierras dedicadas a cultivos agrícolas cuyo ciclo vegetativo es mayor a tres años, y ofrece durante éste periodo varias cosechas.	<i>SINAGAP, CLIRSEN (2012)</i>
Pastizal	Vegetación herbácea dominada por especies de gramíneas y leguminosas introducidas, utilizadas con fines pecuarios, que para su establecimiento y conservación, requieren de labores de cultivo y manejo.	<i>SINAGAP, CLIRSEN (2012)</i>
Cuerpo de Agua Natural	Superficie y volumen asociado de agua estática o en movimiento.	<i>MAE, SINAGAP, CLIRSEN (2012)</i>
Área Poblada	Áreas principalmente ocupadas por viviendas y edificios destinados a colectividades o servicios público	<i>MAE, SINAGAP, CLIRSEN (2012)</i>
Área sin cobertura vegetal	Áreas generalmente desprovistas de vegetación, que por sus limitaciones edáficas, climáticas, topográficas o antrópicas, no son aprovechadas para uso agropecuario o forestal, sin embargo pueden tener otros usos.	<i>MAE, SINAGAP, CLIRSEN (2012)</i>
Sin información	Corresponde a áreas que no han podido ser mapeadas.	

Fuente: (Ministerio del Ambiente, 2012)

2.7. Interpretación de coberturas de suelo

Interpretar es examinar imágenes con el propósito de identificar objetos, definir su categoría, su naturaleza, sus límites y las relaciones que tienen con el medio (Serra, 2002 citado en Gonzales & Marey, 2004). Por otra parte, Zapata (2003) define a la interpretación como el estudio de imágenes obtenidas por sensores remotos a partir de las cuales se obtiene información cualitativa, identificación de coberturas y caracterización del terreno de acuerdo con la leyenda de investigación.

La interpretación se apoya en criterios como: forma, tamaño, textura, tonalidad, asociación contextual, entre otras de los objetos diferenciados en la imagen. El resultado es la delimitación de polígonos de información homogénea, a los que se les atribuye un código que se relaciona con las clases de la leyenda temática (Peña, 2007).

2.8. Modelamiento espacial

Urquía (2004), define a modelo como “ una representación de un sistema desarrollado para un propósito específico” (p.3), por otra parte, Meza (2010) lo describe como “ un conjunto de relaciones o informaciones que busca seguir el mundo real, que simula y posibilita predecir el comportamiento del fenómeno de interés” (p.31). El propósito de generar modelos es permitir al analista predecir el efecto producido al realizar cambios en un determinado sistema. La construcción de un modelo, implica la selección y cuantificación de las variables que intervienen para representar el sistema con el nivel de detalle que se requiere (Sarria, 2004).

El modelamiento espacial son un conjunto de operaciones analíticas que pretenden identificar la magnitud y distribución en el espacio de los cambios, proyectarlos y representar cartográficamente la probabilidad de ocurrencia en un futuro cercano; en suma, se basa en técnicas cartográficas, que

juntamente a los Sistemas de información Geográfica, busca resolver problemas complejos y proveer de información a los tomadores de decisión. Sus características principales son: la presencia de secuencias lógicas de las operaciones, desarrolladas a través de mapas cartográficos, el uso de lenguajes de comando y la aplicaciones de las herramientas SIG (Astudillo & Huilcamaigua, 2011).

2.9. Modelo Digital de Elevación (DEM)

El término modelo digital de elevaciones (Digital Elevation Model: DEM), es la representación numérica de una serie de mediciones de elevación sobre sitios distribuidos sobre la superficie terrestre, con el que se define la variación continua del relieve sobre el espacio. El término más utilizado es DEM, aunque el término DTM (Digital Terrain Model) se usa frecuentemente por varios autores, que sostienen que el término “terreno” involucra otros atributos del paisaje a más de la altitud de la superficie de la tierra (Pérez, 1997).

2.10. Geosimulación

La simulación de un sistema sencillamente es la operación del modelo de dicho sistema, se describe como una herramienta para evaluar el comportamiento de un sistema existente bajo diversas configuraciones de interés y sobre largos periodos reales de tiempo (Anu, 1997). La Geosimulación es diseñar un modelo espacial georreferenciado de un sistema real, que sea susceptible a ser reconfigurado y experimentado, utilizando variables geoespaciales (Astudillo & Huilcamaigua, 2011).

2.11. Autómatas celulares

La teoría de Autómata Celular surge en la década de 1940, con su precursor John Von Neumann con su libro “Theory of self – reproducing”,

que intentaba de alguna manera modelar una máquina que fuera capaz de auto-replicarse; en otras palabras, una máquina que construya otras a partir de sí misma, llegado de esta manera a un modelo matemático de dicha máquina con reglas complejas sobre una red rectangular. En un inicio fueron interpretados como un conjunto de células que crecían, se reproducían y morían con el paso del tiempo, a esta similitud con el crecimiento de las celdas se debe su nombre (Alejandro & Gómez, 2011; León & Flores, 2008).

2.11.1. Definición

Alejandro & Gómez (2011) define a un autómata celular como "un modelo matemático para un sistema dinámico, compuesto por un conjunto de celdas o células que adquieren distintos estados o valores. Estos estados son alterados de un instante a otro en unidades de tiempo discreto" (p.4).

Los Autómatas Celulares se consideran sistemas dinámicos extendidos que consisten de un número considerable de componentes simples idénticos con conectividad local, y son definidos como un sistemas que evoluciona en tiempo y espacio discretos, compuesto de una colección de celdas discretas y deterministas, ordenadas en fila, en forma de matriz o en tres dimensiones, que actualizan sus estados a lo largo del tiempo en base a los estados que tenían las celdas vecinas en el momento inmediato anterior en otras palabras, el estado siguiente de una celda es determinado por el estado actual de ella y de sus celdas vecinas, donde cada celda se comporta como un autómata de estado finito (Lopez, 2011)

2.11.2. Elementos básicos de un autómata celular

Alejandro & Gómez (2011) establecen que un autómata está compuesto de los siguientes elementos:

Arreglo Regular. Puede ser un plano de 2 dimensiones o un espacio n-dimensional finito, este es el espacio de evoluciones, y cada división homogénea de arreglo es llamada célula o tesal (ver Figura 10).

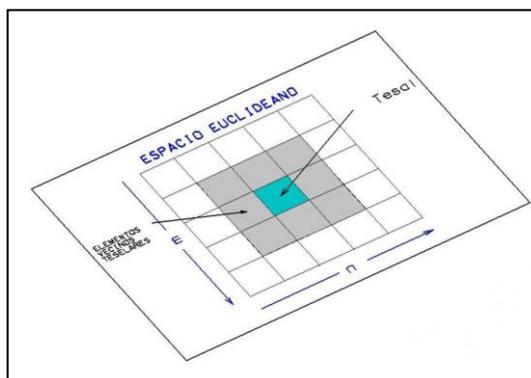


Figura 10 Espacio Euclidiano

Fuente: (Padilla, 2005)

Conjunto de Estados. Es finito y cada elemento o célula del arreglo toma un valor de este conjunto de estados. Puede ser expresado en valores o colores (ver Figura 11).

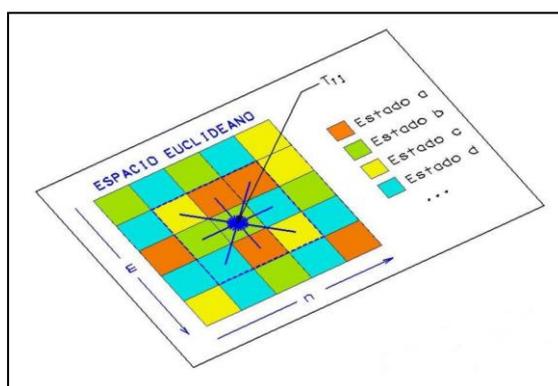


Figura 11 Conjunto de estados

Fuente: (Padilla, 2005)

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

Existen varias definiciones de vecindad de una celda: la vecindad de Von Neumann en una matriz unidimensional que incluye sólo las celdas vecinas en sentido vertical y horizontal más no a las diagonales; en efecto, cada celda central cuenta con 4 vecinos (ver Figura 12), mientras que la vecindad de Moore, involucra a todas las celdas circundantes, ya sean inmediatas conexas o las que ocupan zonas de vecindad de tamaño arbitrario, cada celda central cuenta con 8 celdas vecinas (ver Figura 13) (Padilla, 2005).

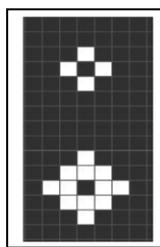


Figura 12 Vecindad de Von Neumann

Fuente: (Lopez, 2011)

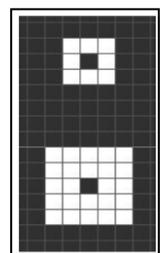


Figura 13 Vecindad de Moore

Fuente: (Lopez, 2011)

Regla de transición. El conjunto de células de un autómata, evoluciona de acuerdo a una determinada expresión matemática, que es sensible a los estados de las celdas vecinas, esta regla se conoce como regla de transición (Lopez, 2011).

Por lo tanto, el estado de un AC en un tiempo $t+1$ ($E_{p+1}T_{ij}$) está en función de su propio estado precedente (E_pT_{ij}) en el tiempo t y de todos los

estados de los elementos localizados en su vecindad (ver Ecuación 5) (Padilla, 2005)

Ecuación 5 Regla de transición de un autómata celular

$$E_{p+1}T_{ij} = f(E_pT_{ij}, E_pT_{i-1,j-1}, E_pT_{i-1,j}, E_1T_{i-1,j+1}, E_1T_{i,j-1}, E_1T_{i,j+1}, E_1T_{i+1,j-1}, E_1T_{i+1,j}, E_1T_{i+1,j+1})$$

Fuente: (Padilla, 2005)

Dónde:

T_{ij} = representa el tesal de la posición i, j en el espacio euclidiano (ver Figura 14)

E_p = representa el conjunto (a, b, c, d, \dots, n) de estados que podría tomar el AC en el tiempo p (ver Figura 11)

$E_{p+1}T_{ij}$ = representa el estado particular de un AC en función del estado de su vecindad y de las reglas de transición.

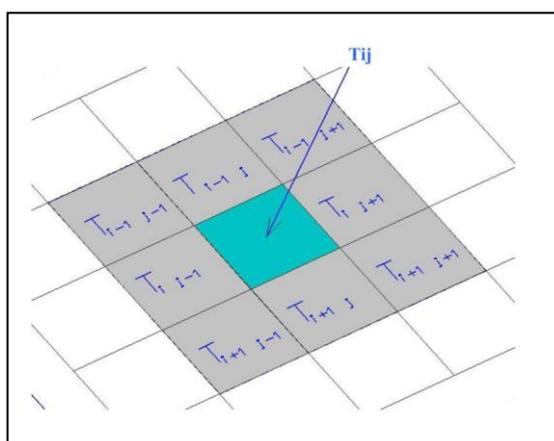


Figura 14 Tesal i, j

Fuente: (Padilla, 2005)

2.11.3. Juego de la vida de Conway

En 1970, el matemático John Conway propuso el juego de la vida, un autómata bidimensional como un tablero de ajedrez, donde cada célula puede estar en uno de los dos estados (0= muerto o 1= vivo). Partiendo de un estado inicial el autómata va a evolucionar en base a reglas de transición, además una célula estará en un estado concreto dependiendo solo por el estado anterior de las células vecinas y el de la célula central (Padilla, 2005).

La regla es la siguiente:

- Una célula muerta puede volver a la vida, si tiene 3 células vivas a su alrededor.
- *Sobrepoblación*: si una célula viva tiene más de tres de 3 vecinos muere
- *Aislamiento*: Si una célula viva está sola o tiene un solo vecino muere
- Una célula viva permanecerá así si tiene dos o 3 células vivas como vecinos. El contorno de la células corresponde a las 4 células localizadas a su alrededor más diagonales.

2.11.4. Autómatas celulares en Idrisi

Uno de los elementos espaciales que motivan la dinámica de muchos eventos de cambio en las coberturas de suelo es la proximidad; es decir, las áreas tienen una mayor probabilidad a cambiar de una clase determinada cuando hay áreas existentes cercanas de la misma clase (expansión). Estas dinámicas pueden ser modeladas en forma muy efectiva utilizando autómatas celulares, que es una entidad celular que varía independientemente su estado basándose en su estado previo y en el de las celdas vecinas según una regla de transición (Eastman, 2003).

El modelamiento basado en autómatas celulares requiere la integración de varias herramientas que faciliten y garanticen la correcta ejecución de procedimientos para el tratamiento de información espacial. El software IDRISI Selva 17.0 (versión de prueba), proporciona una gran funcionalidad analítica raster, y cubre una gama de requerimientos para SIG y Sensores Remotos desde el modelamiento espacial hasta el mejoramiento y clasificación de imágenes (Guerra, 2006).

Idrisi mediante el módulo CA_MARKOV permite modelar los cambios de las coberturas terrestres a lo largo de un periodo de tiempo determinado. CA_MARKOV es un procedimiento que combina autómatas celulares y predicción de cambios de Markov. La diferencia esencial con Markov es que la regla de transición a más de su estado previo depende también de las celdas vecinas. Todo esto para proveer al modelo de una contigüidad espacial con el fin de obtener proximidad; es decir, las áreas más cercanas a una determinada categoría son más propensas a cambiar a dicha categoría (Eastman, 2003). CA_MARKOV, toma como datos de entrada, en primer lugar el mapa de cobertura de suelo desde donde se va a realizar la proyección de los cambios, luego requiere el ingreso del archivo que contiene las áreas de transición que genera el módulo Markov, el cual contiene los pixeles que se esperan que cambien en el próximo periodo de tiempo. La colección de imágenes de adecuación que expresan la probabilidad de que cada pixel pertenezca a la clase designada en el próximo periodo de tiempo deben ser ingresadas. En este punto el modelo puede ser calibrado utilizando varios productos en los que se puede tomar en cuenta las variables biofísicas que determinan la dirección de los cambios, mapas que expresan la probabilidad de un área de cambiar a una clase determinada o simplemente los archivos generados por el módulo Markov. Se ingresa el número de iteraciones que se desea que el sistema realice a partir de la imagen base de referencia; en otras palabras, se debe ingresar el número de pasos de tiempo en años, al que se desea hacer la proyección. Finalmente se selecciona el filtro a ser utilizado, por defecto el

sistema ofrece un filtro de media de 5x5 para lograr una restricción de contigüidad

La lógica utilizada por CA_MARKOV es la siguiente (Eastman, 2003):

- Dentro de cada iteración, cada clase de cobertura de suelo cede parte de su terreno a una o más de las clases circundantes, además puede ganar terreno de otras. Debido a que existe competencia por parcelas de terreno, este proceso de asignación se lleva a cabo por medio de un procedimiento de asignación multiobjetiva.

- La simulación con autómatas se origina en parte en el proceso iterativo de asignación de terreno y por otra parte en un paso de filtrado con cada iteración ejecutada. Por defecto el modulo utiliza un filtro de media 5x5 para lograr una restricción de contigüidad. Cuando se realiza un filtrado con una máscara booleana de la clase consideradas, el filtro produce un valor de 1 cuando se encuentra por completo dentro la clase existente y un valor de 0 cuando está completamente fuera de la misma. Este resultado es multiplicado por la imagen de probabilidad de transición para esa clase, y de esta forma pondera en forma negativa las adecuaciones a medida que se aleja de las instancias de esa clase.

- En conclusión el resultado de este proceso iterativo es que los cambios de las coberturas se desarrollan como un proceso de crecimiento en las áreas de probabilidad alta próximas a las áreas existentes.

2.12. Cadenas de Markov

Una cadena de Markov es una serie de eventos, en la que la probabilidad de ocurrencia de un evento depende del evento anterior, son cadenas con memoria que condicionan las probabilidades de eventos futuros (León & Flores, 2008; Lopez, 2011). Por otra parte, son un proceso

estocástico que consiste en una serie de sucesos que cambian a lo largo del tiempo de forma secuencial y dependiendo de ciertas probabilidades; en otras palabras, los sucesos no suelen ser independientes, lo que suceda en el tiempo t , depende de lo sucedido en el tiempo $t-1$, $t-2$; por lo tanto, cuando la probabilidad de ocurrencia de un suceso depende solamente de su estado anterior, a este proceso se lo denomina cadena de Markov (Montoya & Arrobo, 2014)

Las cadenas de Markov son utilizadas para estimar las probabilidades de transición de las distintas coberturas de suelo y simular los cambios futuros en un área determinada; dicho de otro modo, la distribución espacial de los usos de suelo analizados en el tiempo t es resultado de la situación en un momento anterior $t-1$. (Eastman, 2003). El estado en un tiempo dos se puede predecir por el estado del sistema en tiempo uno con una matriz de probabilidades de transición de cada clase de cobertura a cada una de las otras clases de cobertura (Buzai, 2007; Von Thaden, 2012).

IDRISI genera los siguientes productos (Eastman, 2003):

- *Matriz de probabilidad de transición*: Expresan la probabilidad de que un pixel de cierta clase cambie a otra clase o permanezca en la misma en el próximo periodo de tiempo.

- *Matriz de áreas de transición*: Expresa el área total (en celdas) que se espera que cambie en el próximo periodo en tiempo.

- *Imágenes de probabilidad condicional*: Una para cada clase de cobertura terrestre, expresan la probabilidad de cada pixel pertenezca a la clase designada en el próximo periodo de tiempo. Estas imágenes son utilizadas como insumo para la generación de modelos de autómatas celulares.

Sin embargo no fueron consideradas en el presente estudio debido a que no toman en cuenta las interacciones de los cambios con las variables biofísicas, por lo que se decidió ajustar modelos de regresión logística para obtener información que represente la realidad del entorno.

2.13. Correlación de Spearman

La correlación es un análisis estadístico necesario antes de realizar cualquier tipo de regresión para determinar el grado de asociación entre variables explicativas. El coeficiente de Spearman es una técnica de correlación no paramétrica utilizada ampliamente por la comunidad científica para determinar la correlación entre dos variables con una distribución no normal; en suma, cuando dos variables bajo estudio de correlación no tienen una distribución normal se procede con los rangos de mediciones para cada variable (Montoya & Arrobo, 2014). Cuando las variables independientes se encuentran muy correlacionadas, el modelo no puede distinguir que parte de la variable dependiente es explicada por una u otra variable, esto se denomina multicolinealidad (Villagarcía, 2004 citado en Del Hoyo, 2007).

2.13.1. Correlación R Statistics

R es un software de procesamiento estadístico con muchas bondades en lo referente a calidad, cantidad de técnicas y funciones implementadas, además es libre y gran parte de la comunidad científica lo usa como estándar para sus análisis, dicha comunidad ha desarrollado más de 800 paquetes de análisis que permiten dar solución a una gran variedad de problemas estadísticos. El software ofrece varios métodos de análisis de correlación, entre ellos: Pearson, Kendall y Spearman (Del Hoyo, 2007).

2.14. Regresión Logística

La regresión logística es una herramienta estadística que tiene la capacidad de modelar cómo influye uno o diversos factores sobre la probabilidad de ocurrencia de un determinado suceso; es decir, describe las relaciones existentes entre una variable dependiente nominal u ordinal con un conjunto de variables independientes continuas o categóricas, así como cuantifica las relaciones presentes entre ellas. En los análisis de regresión la variable Y (dependiente), por lo general, solo presenta dos valores: si la variable respuesta es 0 representa la ausencia de un suceso y 1 cuando si está presente (Molinero, 2001 citado en Guillen, Serrato, & Garnica, 2014; Mas, Kolb, Houet, Paegelow, & Camacho, 2010; Rutherford, Bebi, Edwards, & Zimmermann, 2008)

Las variables que intervienen en una regresión logística pueden ser cuantitativas o cualitativas, mientras que la variable dependiente es una variable continua cuantitativa; sin embargo, existen ocasiones en las que la variable de respuesta es cualitativa y se denota de forma dicotómica, ausencia o presencia de un fenómeno (uso de suelo agrícola o no agrícola) (Lozano, 2007, citado en Jaime & Rodríguez, 2008)

La relación entre las variables independientes y la variable binomial dependiente se establece mediante la Ecuación 6.

Ecuación 6 *Modelo Logit de regresión logística*

$$\text{logit}(Py = 1) = \ln\left(\frac{P}{1-P}\right) = b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + \dots + b_k * x_k + k$$

Fuente: (Arias et al., 2010)

Dónde:

P = Probabilidad de que la variable dependiente sea 1 (ejemplo: cobertura de suelo antrópica).

X₀, X₁, X₃, ...= Variables independientes

B₀, b₁, b₂, ...= Parámetros de la regresión

Para estimar los valores de probabilidad de ocurrencia de un suceso con valores comprendidos entre 0 y 1 se utiliza la función logística (Ecuación 7).

Ecuación 7 *Función logística*

$$P = \frac{e^{(b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + \dots + b_k * x_k)}}{1 + e^{(b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + \dots + b_k * x_k)}}$$

Fuente: (Gomez, 2009)

En resumen la regresión logística se utiliza para modelar como influye en la probabilidad de ocurrencia de un suceso, la presencia o no de diversas variables y su valor, la regresión logística busca modelar la probabilidad de que la variable de respuesta tome el valor de alguno de ellos (Hosmer y Lemeshow, 2000 citado en Gomez, 2009).

2.14.1. Regresión logística en R Statistics

Existen varias herramientas informáticas disponibles para efectuar análisis de regresión. R Statistics ofrece la posibilidad de desarrollar modelos lineales generalizados (GLM). Estos permiten análisis de regresión en el que los residuos se distribuyen con distribuciones diferentes a la normal. Los GLM tienen 3 componentes: aleatorio (distribución de la variable de respuesta), predictor lineal (función lineal de las variables explicativas) y la función de vínculo o link (relaciona la esperanza condicionada y el

predictor lineal) (García, 2010) . El software ofrece dentro del desarrollo de los modelos lineales generalizados la opción de seleccionar entre varias familias de distribución de la variable predictiva: Binomial, Gaussiana, Gamma, Poisson, entre otras, y sus respectivos vínculos o link: logit, identidad, inversa, log, entre otras; para este caso, la familia seleccionada de acuerdo a la variable dependiente es binomial (presencia o ausencia) y el link (logit).

Bondades de la regresión logística

No todas las variables independientes que ingresan en un análisis de regresión aportan positivamente en el ajuste del modelo. Es necesario determinar cuáles son las variables que más contribuyen en la explicación del fenómeno analizado, para esto se pueden utilizar varios criterios estadísticos; uno de estos indicadores es la probabilidad de que el cambio se pueda producir por casualidad, ($\Pr (>|z|)$), de manera que cuanto menor sea dicha probabilidad, mayor será el nivel de significancia de la variable a la hora de predecir el cambio. Este indicador se genera finalizada la regresión logística y permite determinar cuáles variables serán excluidas (García, 2010).

En consecuencia el sistema genera una prueba estadística z para cada uno de los coeficientes B de las variables que fueron introducidas en el modelo y el intercepto. Se prueba la hipótesis nula $H_0: \beta = 0$; es decir que el coeficiente para cada variable es 0, además utiliza el valor z para obtener el p -valor. En resumen, indica que para cada variable, si el valor del coeficiente es significativamente diferente de 0 o no; si las ($\Pr (>|z|)$) son menores que el nivel de significancia, se rechaza la hipótesis nula de que los coeficientes de las variables son nulos y por tanto el factor es altamente significativo en la predicción del cambio.

2.15. Validación de modelos

Un procedimiento importante en el desarrollo de cualquier tipo de modelo, es la fase de validación, la misma que sirve para verificar el grado de ajuste de una predicción con la realidad. El propósito del modelado es la obtención de predicciones exactas y buenas medidas de exactitud espacial. Usualmente se mide el entendimiento que se tiene del proceso y del poder del modelo haciendo que este prevea algún periodo de tiempo del cual ya se conocen las condiciones de la cobertura terrestre, luego esto es utilizado como prueba de validación; es decir, la validación se basa en la comparación entre el mapa simulado y un observado (Pontius, 2000 citado en Gomez, 2009).

2.15.1. Índice Kappa

Existen varias formas para medir la exactitud de una predicción: primero, la tasa de clasificación correcta (CCR), que utiliza una matriz de confusión de 2 x 2 para calcular la proporción de los valores predichos por el modelo y clasificados correctamente, otra opción es el índice de acuerdo kappa, que es esencialmente una declaración de exactitud posicional, ajustada para el acuerdo de oportunidad, considerado de mucha importancia en la evaluación de modelos por su sencillez y fiabilidad de la manera en que cambian las categorías modeladas (Eastman, 2003).

Idrisi a través del módulo VALIDATE, permite realizar un análisis comparativo utilizando el índice de acuerdo Kappa, que realiza una comparación del grado de ajuste pixel por pixel de los datos observados (reales) y los resultados de la simulación. El valor del índice Kappa se encuentra entre -1 y 1: 1 cuando dos imágenes coinciden perfectamente, -1 si una imagen difiere completamente con otra y 0 cuando todos los cambios pueden haber ocurrido al azar. La ventaja principal de utilizar este módulo

es la posibilidad de discriminar los errores de cantidad de los errores de ubicación (Eastman, 2003; Tarifa, 2000).

Este índice combina principalmente los componentes Klocation y Kquantity: Klocation (kappa para la ubicación), realiza una verificación de la localización de las celdas de cada categoría sin tomar en cuenta la cantidad, mientras que el índice Kquantity (kappa para la cantidad), verifica la cantidad de celdas para cada categoría. El índice Kappa depende de ambos componentes para obtener el resultado de la validación, determinando la ubicación del cambio versus la cantidad de cambio (Peña, 2007; Rutherford et al., 2008).

2.16. Tasa de cambio

La tasa de cambio anual expresa el cambio en porcentaje de las coberturas de suelo al inicio de cada año. Utiliza la superficie de una determinada cobertura en dos épocas diferentes y el número de años transcurridos para determinar cómo ocurren estos cambios (ver Ecuación 8) (FAO, 1996; citado en Velázquez et al., 2001)

Ecuación 8 *Tasa de cambio anual*

$$\delta_n = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1$$

Dónde:

δ_n = Tasa de cambio

S_2 = Superficie en la fecha 2

S_1 = Superficie en la fecha 1

N = Número de años entre las dos fechas

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

Este capítulo comprende los aspectos metodológicos de la investigación realizada. Se expone el desarrollo de los métodos, técnicas y procedimientos que fueron empleados para la consecución de los objetivos propuestos en el estudio; desde la recopilación de información espacial, análisis de variables, hasta la generación de modelos prospectivos del cambio de uso de suelo y cobertura vegetal.

3.1. Escala de trabajo

La escala de trabajo se definió en 1:25000, de acuerdo a la establecida en el proyecto que se encuentra ejecutando el IEE de título "*Tecnología espacial y geofísica en la gestión de riegos geodinámicas externos para la prevención y mitigación de inundaciones y crecidas torrenciales*", debido a que la información proporcionada por la institución para la elaboración del presente proyecto se encuentra a la escala mencionada y en razón de la necesidad de proveer a los técnicos, autoridades y planificadores de información detallada que permita tomar decisiones.

3.1.1. Unidad mínima de mapeo

La unidad mínima de mapeo se calculó utilizando la Ecuación 4. La escala de trabajo para el presente proyecto es 1:25000; entonces: 1 mm en el mapa representa 25 metros en el terreno.

Entonces:

$$\text{UMM} = (4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}) \times [(25 \text{ m} \times 25 \text{ m}) / (1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm})]$$

$$\text{UMM} = 16 \text{ mm}^2 \times 625 \text{ m}^2 / \text{mm}^2$$

$$\text{UMM} = 10000 \text{ m}^2$$

Por lo tanto la unidad mínima de mapeo para el presente proyecto de grado se estableció en 1 Ha.

3.2. Recopilación de información

3.2.1. Cartografía base

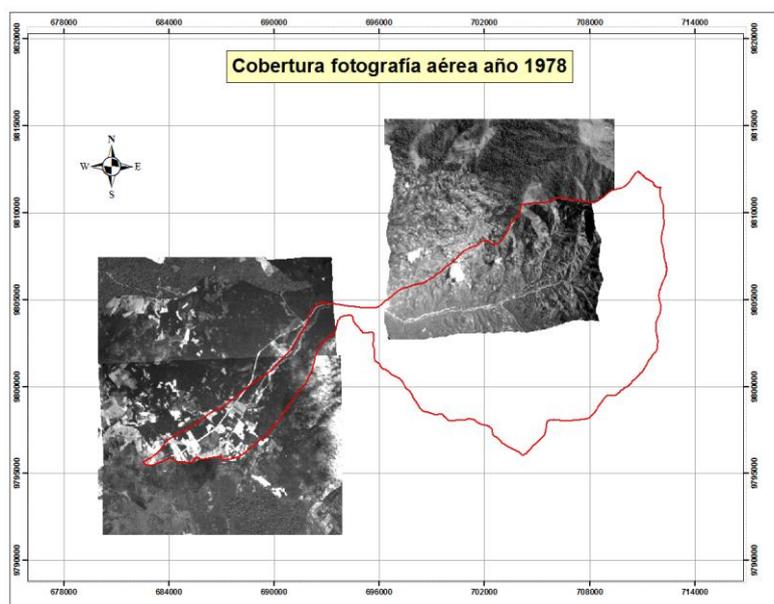
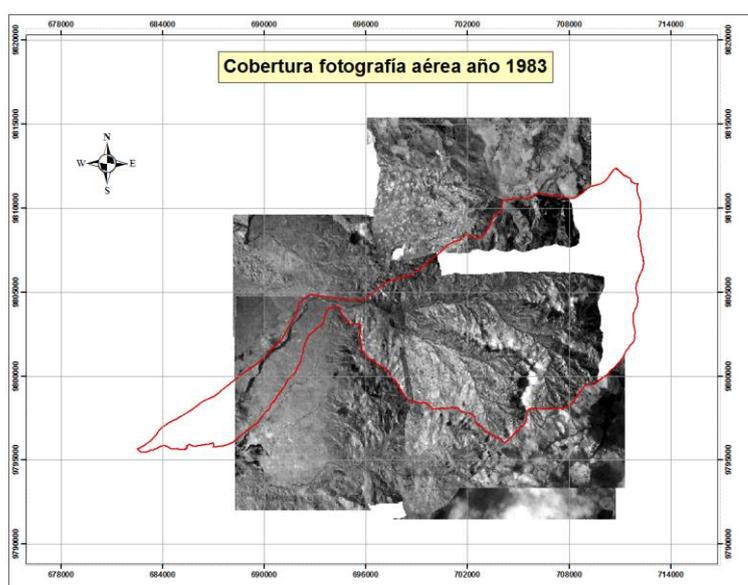
El Instituto Espacial Ecuatoriano proporcionó la cartografía base del área de estudio, generada en el año 2013 a partir de ortofotos SIGTIERRAS 2010 escala 1:30000, e imágenes satelitales.

3.2.2. Fotografías aéreas

Después de realizar los trámites pertinentes, el Instituto Geográfico Militar aportó con fotografías aéreas en formato digital pertenecientes a los sectores San Miguel y Juan Montalvo en la Provincia de Bolívar y Los Ríos, tomadas para el proyecto Carta Nacional a escala 1:60000, correspondientes a la primera y segunda etapa de estudio de los años 1978, 1983 y 2000. Las fotografías aéreas fueron entregadas en formato digital “.tif”, de dimensiones (16862 x 16861) pixeles, resolución vertical y horizontal de 1814 puntos por pulgadas (ppp), resolución radiométrica de 8 bits, las mismas que fueron digitalizadas con un escáner fotogramétrico de resolución 15 micras (ver Tabla 7) (ver Figura 15, Figura 16 y Figura 17).

Tabla 7 Fotografías aéreas utilizadas

Línea de vuelo	Rollo	Cámara	Fotografías	Escala	Fecha de toma
21A	39 Jet	RC-10	8034, 8033	1:60000	02-08-1978
22A	100 Jet	RC-10	18341,18342	1:60000	03-05-1983
23	38 Jet	RC-10	7819	1:60000	02-08-1978
23A	100 Jet	RC-10	18369	1:60000	03-05-1983
24A	54 RC-30	54 RC-30	13078, 13079	1:60000	02-08-2000

**Figura 15** Cobertura con fotografía aérea año 1978, cámara RC-10**Figura 16** Cobertura fotografía aérea año 1983, cámara RC-10

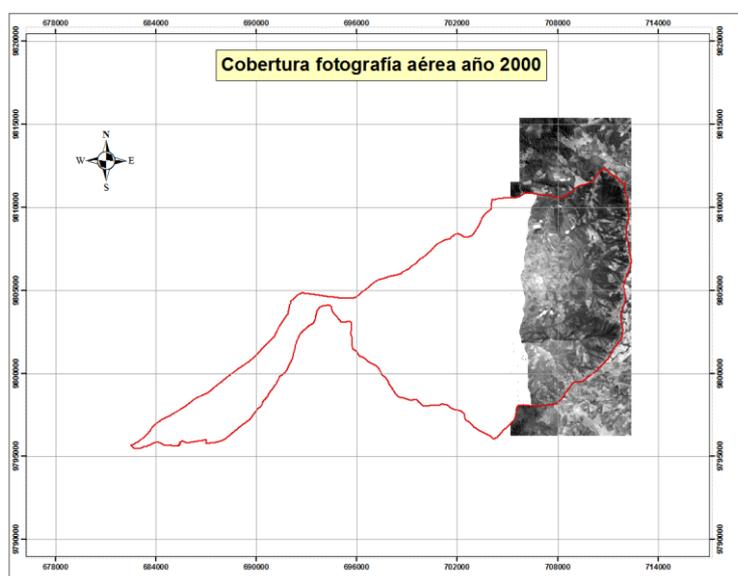


Figura 17 Cobertura fotografía aérea año 2000, cámara RC-30

Por otra parte el IEE, proporcionó un mosaico de ortoimágenes escala 1:30000 generado por SIG-TIERRAS en el año 2010, tamaño de pixel 30 centímetros, que cubre gran parte del área de estudio.

3.2.3. DTM (Modelo digital de terreno)

El modelo digital de terreno fue proporcionado por el Instituto Espacial Ecuatoriano, generado por TELESPAZIO⁸ en el año 2013 y cuenta con un tamaño de pixel 10 m.

3.2.4. Imágenes satelitales

Se descargaron imágenes satelitales de la página web del Servicio Geológico de los Estado Unidos, pertenecientes a la colección TerraLook ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) del año 2000, con resolución espacial 15 metros y 3 bandas en la región espectral del visible e infrarrojo cercano (VNIR).

⁸ **Telespazio**: Compañía de servicios de sistemas geoespaciales establecida en Roma, Italia.

3.2.5. Cartografía temática

El Instituto Espacial Ecuatoriano proporcionó las siguientes coberturas temáticas en formato (.shp): geología, sistemas productivos, movimientos en masa y tipos de suelo.

3.3. Ortorectificación de fotografías aéreas

Para la ejecución del proceso de ortorectificación se utilizó la suite LPS (Leica Photogrammetry Suite) del software ERDAS IMAGINE 9.2. Los insumos necesarios fueron las fotografías aéreas escaneadas (imágenes aéreas), certificados de calibración de la cámara, mosaico de ortoimágenes aéreas (referencia horizontal) y DTM del área de estudio (referencia vertical). El objetivo principal es contar con información base georreferenciada y rectificada de calidad, la misma que será utilizada posteriormente para extraer las coberturas del suelo del área de análisis. El procedimiento de ortorectificación fue el siguiente (ver Figura 18):

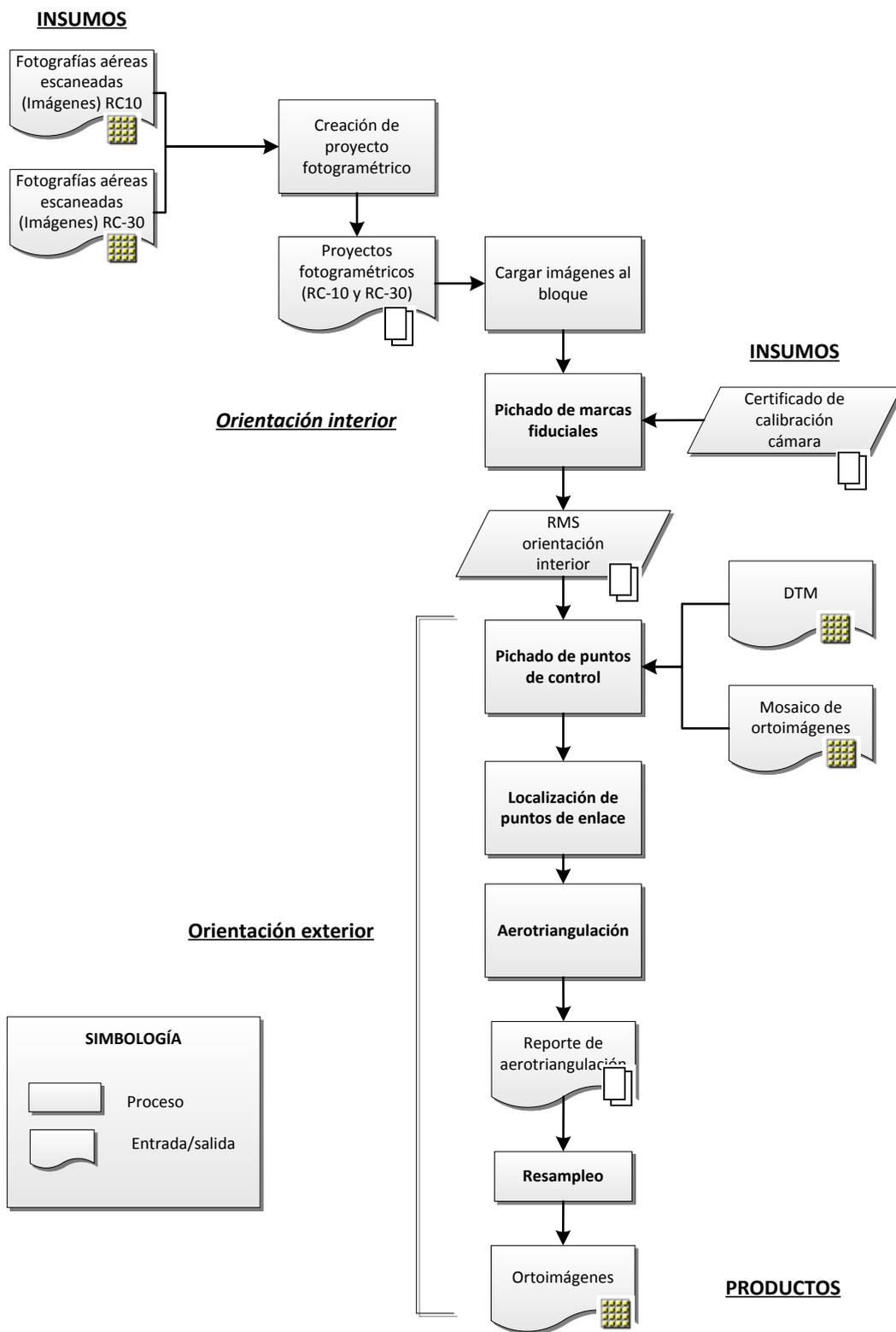


Figura 18 Proceso de ortorectificación

3.3.1. Especificaciones técnicas para la generación de ortofotografías

Para el cálculo de la precisión horizontal se aplicó la Ecuación 2:

$$PH(m) = 0.0003 \text{ mm} * FE$$

$$PH(m) = 0.0003 \text{ mm} * 25000$$

$$PH(m) = 7.5 \text{ m}$$

El cálculo de la precisión vertical se realizó aplicando la Ecuación 3:

$$PV(m) = \frac{1}{4} * 20$$

$$PV(m) = 5 \text{ m}$$

La precisión planimétrica final para obtención de ortofotos debe estar dentro de los 7,5 metros, mientras que la precisión altimétrica dentro de 5 metros. Por otra parte, el valor de RMS de la orientación interna no debe estar por encima de los 0,6 píxeles; en cambio, el RMS de la orientación externa debe ser menor a 2 píxeles (ver Tabla 3).

3.3.2. Proyecto fotogramétrico

Se realizaron dos proyectos de manera independiente debido al origen de las fotografías aéreas, en este caso cámara: RC-10 y RC-30. Es así que se procesaron las imágenes aéreas de la siguiente manera: (ver Tabla 8)

Tabla 8 Fotografías aéreas utilizadas

Cámara	Fotografías
RC-10	8034, 8033, 18341, 18342, 7818, 7819, 18369, 18368
RC-30	13078, 13079, 14215

3.3.3. Adición de imágenes al bloque fotogramétrico

Se procedió a importar las imágenes a ser ortorectificadas, posteriormente se ejecutó la opción para realizar el cálculo de las capas piramidales de cada fotografía con el objeto de optimizar la visualización de las imágenes y la recolección de los puntos de amarre (ver Figura 19).

Row #	Image ID	Description	>	Image Name	Active	Pyr.	Int.	Ext.	DTM	Ortho	Online
1	1		>	c:/tesis_automatas/espe/18341.tif	X	■	■	■	■	■	■
2	2			c:/tesis_automatas/espe/18342.tif	X	■	■	■	■	■	■
3	3			c:/tesis_automatas/espe/18369.tif	X	■	■	■	■	■	■
4	4			c:/tesis_automatas/espe/7819.tif	X	■	■	■	■	■	■
5	5			c:/tesis_automatas/espe/8033.tif	X	■	■	■	■	■	■
6	6			c:/tesis_automatas/espe/8034.tif	X	■	■	■	■	■	■
7	7			c:/tesis_automatas/espe/18368.tif	X	■	■	■	■	■	■
8	8			c:/tesis_automatas/espe/7818.tif	X	■	■	■	■	■	■

Figura 19 Archivo de imágenes

3.3.4. Orientación interior

- **Parámetros geométricos de la cámara RC10**

Una vez ingresadas las imágenes al bloque, el siguiente proceso es definir el modelo del sensor. La información necesaria se obtuvo del certificado de calibración de la cámara de fecha 10-03-1976, que se encontraba vigente al momento de toma de las fotografías. Los datos extraídos fueron (ver Tabla 9):

Tabla 9 Información general de la cámara

Nombre de la cámara	Wild
Descripción	RC10
Distancia focal	153 mm
Punto principal xo (mm)	0
Punto principal yo (mm)	0

- Número de marcas fiduciales: 4
- Coordenadas de las marcas fiduciales
- Distorsión radial de las lentes

- **Parámetros geométricos de la cámara RC30**

La información de cámara RC30 se obtuvo del certificado de calibración de fecha 29-05-1995 que se encontraba vigente al momento de toma de las fotografías. Los datos extraídos fueron (ver Tabla 10):

Tabla 10 Información general de la cámara

Nombre de la cámara	Wild
Descripción	RC30
Distancia focal	152,92 mm
Punto principal x_o (mm)	0,004 mm
Punto principal y_o (mm)	0,002 mm

- Número de marcas fiduciales: 8
- Coordenadas de las marcas fiduciales
- Distorsión radial de las lentes

- **Pinchado de marcas fiduciales en las imágenes**

Antes de proceder al pinchado de las marcas fiduciales, se seleccionó la orientación fiducial adecuada; para esto se comparó el eje del sistema de coordenada de imagen (reporte de calibración) con la orientación de la imagen. En segundo lugar se realizó el pinchado de las marcas fiduciales de cada una de las fotografías aéreas tomando en cuenta el orden de las marcas fiduciales que se detalla en el certificado de calibración de la cámara.

A continuación se efectúa el cálculo del error cuadrático medio (RMS), el mismo que permite determinar si los puntos se han ingresado correctamente. Se considera que el RMS es elevado si supera la mitad de la resolución de escaneo; en este caso, la resolución fue de 15 micras, por ende un error cuadrático mayor a 7 micras no se acepta como válido. Tomando en cuenta la norma IGM citada anteriormente ninguno de los valores RMS en la orientación interior de las dos cámaras supera los 0,6 píxeles. Las precisiones de la orientación interior para cada una de las cámaras fueron las siguientes (ver Tabla 11 y Tabla 12):

Tabla 11 Error medio cuadrático de la orientación interior cámara RC10

N° de imagen	RMS (píxeles)	RMS (micrones)
18341	0.05	0.82
18342	0.05	0.70
18369	0.05	0.71
7819	0.05	0.77
8033	0.03	0.42
8034	0.05	0.81
18368	0.05	0.71
7818	0.05	0.82

Tabla 12 Error medio cuadrático de la orientación interior cámara RC30

N° de imagen	RMS (píxeles)	RMS (micrones)
13078	0.06	0.87
13079	0.06	0.89
14215	0.07	0.98

3.3.5. Procedimiento de orientación exterior

- **Medición de puntos de control**

Para la medición de los puntos de control se utilizó el mosaico de ortoimágenes como base para la extracción de las coordenadas horizontales de los puntos de control. Asimismo, para la obtención de coordenadas verticales se utilizó el DTM (ver Figura 20).

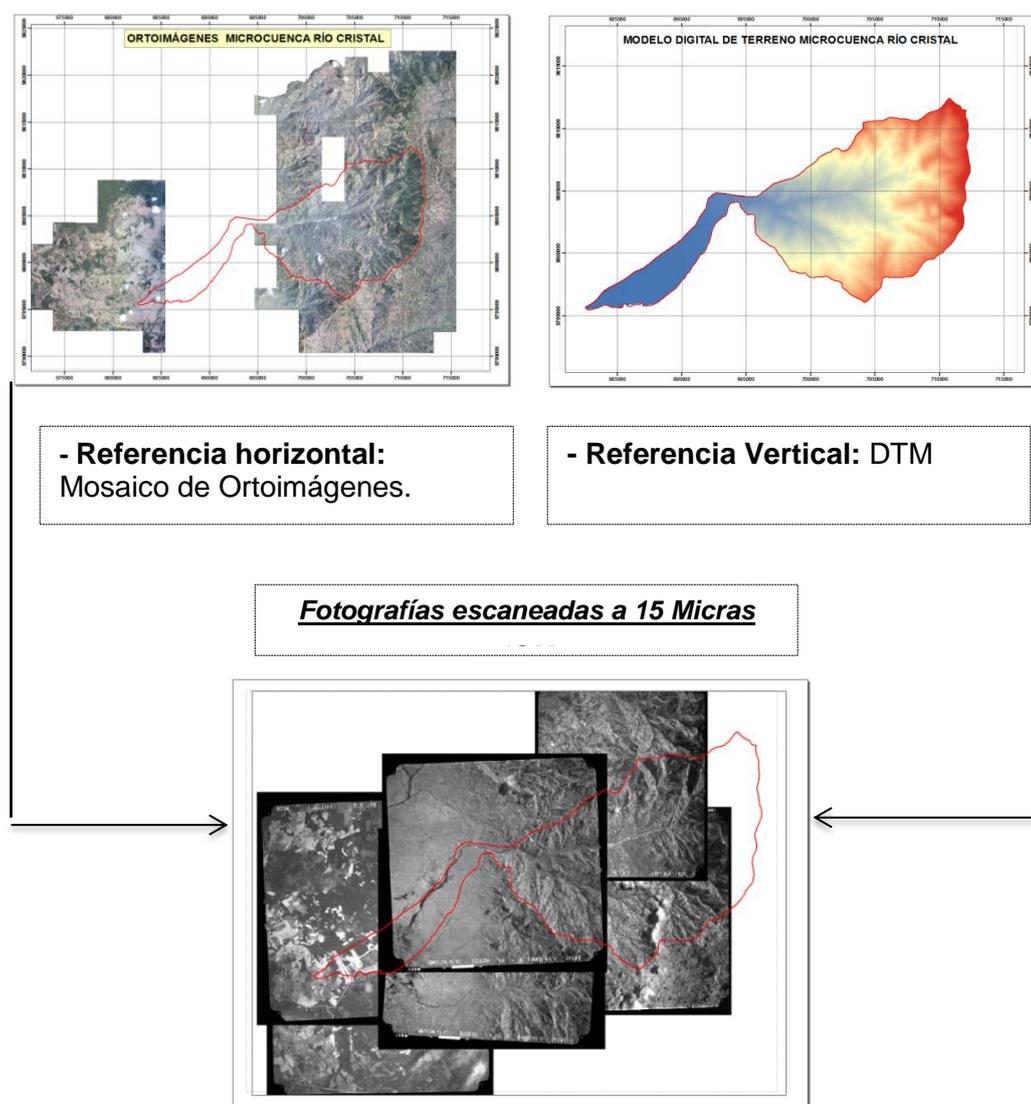


Figura 20 Referencia horizontal y vertical para ortorectificación fotografías

Para el bloque de la cámara RC 10 se localizaron un total 20 puntos de control, mientras que para el bloque de la cámara RC 30 se pincharon 11 puntos de control fácilmente fotoidentificables en la imagen de referencia y en las fotografías a Ortorectificar. Para esto se utilizó la herramienta de medición de puntos (ver Figura 21).

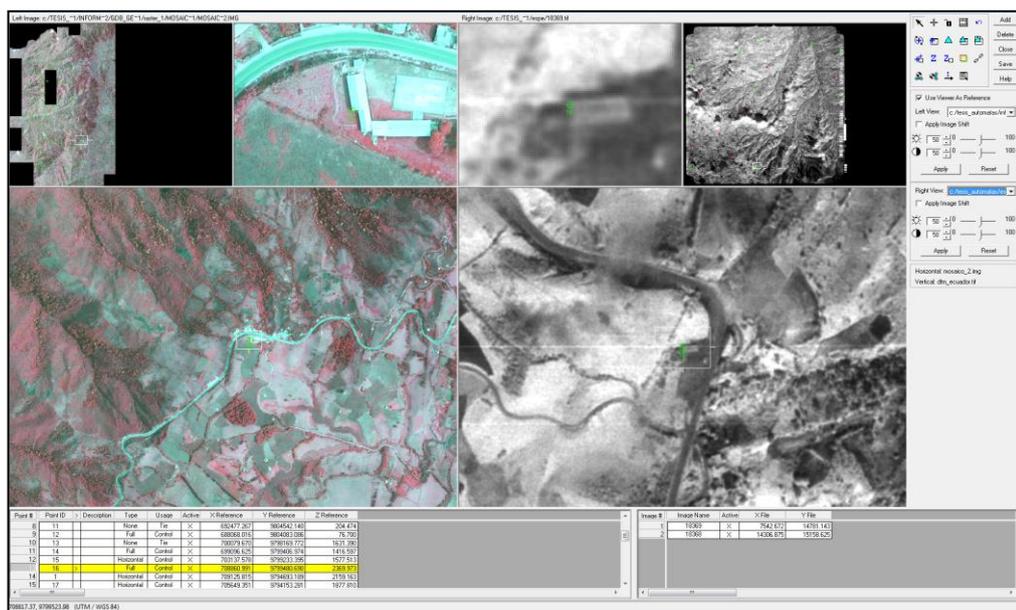


Figura 21 Pinchado de puntos de control sobre imagen de referencia

Fuente: Elaboración propia

- **Puntos de enlace en las imágenes (Tie points)**

Se localizaron para el ajuste del bloque de la cámara RC 10, 21 puntos de enlace, mientras que para la cámara RC 30 un total de 22, distribuidos en las áreas de traslape de dos o más fotografías.

- **Aerotriangulación**

Se ejecutó la aerotriangulación del bloque perteneciente a la cámara RC-10 y se obtuvo un RMS de 1.13 píxeles, mientras que para el bloque de la cámara RC-30, se alcanzó un RMS de 0,88 píxeles; valores que se encuentran por debajo de los 2 píxeles establecidos en las especificaciones

técnicas generales para la realización de cartografía del IGM; además, se encuentran dentro de los 7,5 metros de precisión horizontal y 5 metros de precisión vertical establecidos. Una vez que se comprobaron los resultados se procedió a ejecutar el orto-resamplado (ver Figura 22 y Figura 23)

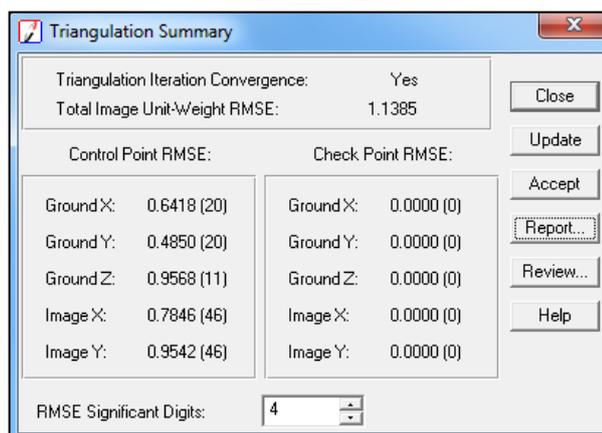


Figura 22 Resumen de aerotriangulación bloque cámara RC 10

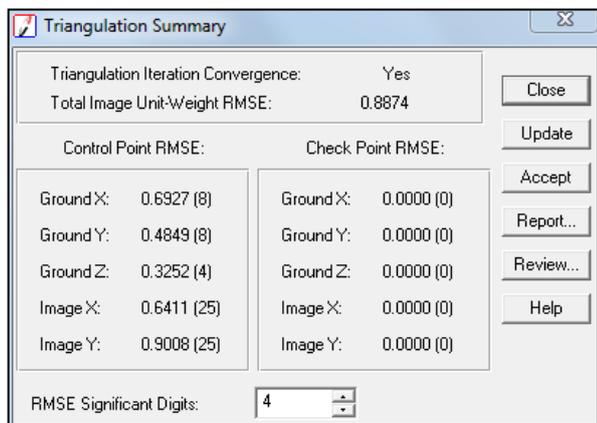


Figura 23 Resumen de aerotriangulación bloque cámara RC 30

Asimismo, se generó un reporte de triangulación que detalla los valores asociados al ajuste del bloque, coeficientes de orientación exterior, parámetros de orientación, residuales de los puntos de control, entre otros. Dichos valores permiten tener una idea más profunda de cómo se realizó el procedimiento mencionado (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

- **Generación de ortofotos**

La ortofotos se generaron utilizando los siguientes parámetros: formato de salida “.tif”, DTM para corrección por fuertes desniveles y método de resamplado vecino más cercano.

Finalizado el procedimiento de resamplado de todas las imágenes, se obtuvieron 8 ortoimágenes para la primera época de estudio, mientras que para la segunda época se generaron 3. Adicionalmente se realizó una minuciosa comprobación de la exactitud posicional de los productos generados, utilizando las imágenes de referencia y la cartografía base proporcionada (ver Figura 24 y Figura 25).

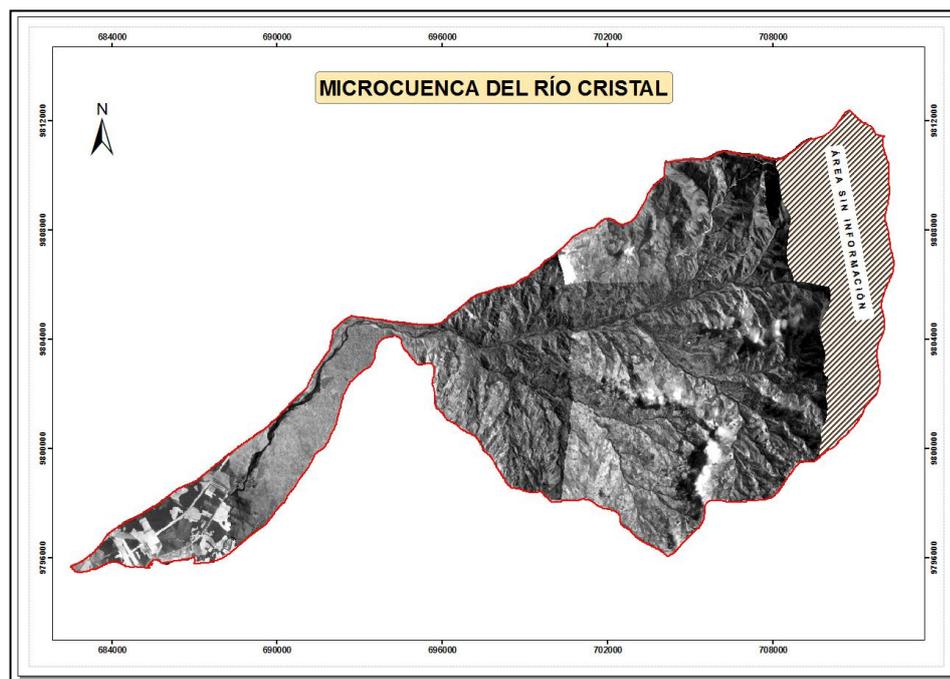


Figura 24 Cobertura de ortoimágenes primera época de estudio (años 1978-1983)

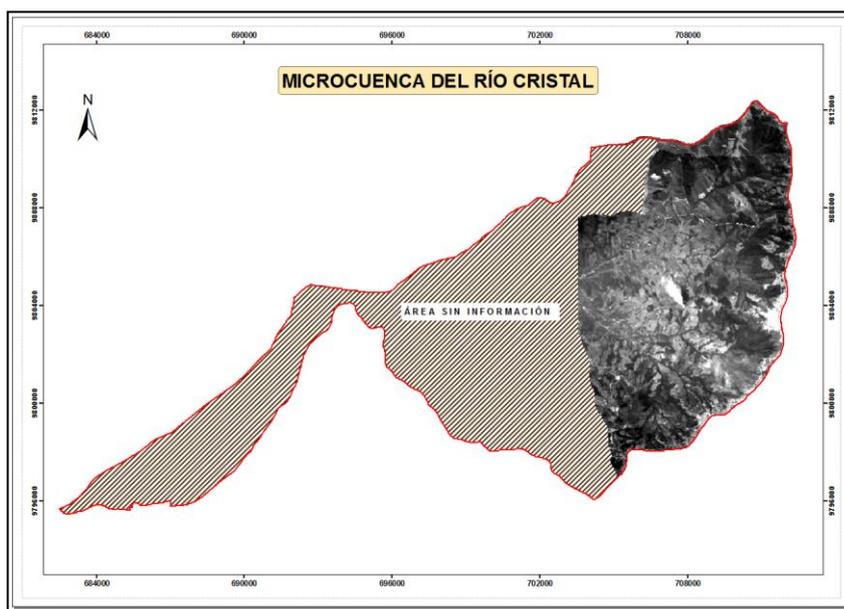


Figura 25 Cobertura de ortoimágenes segunda época de estudio (año 2000)

3.4. Procesamiento de imágenes satelitales

Se utilizaron imágenes ASTER del año 2000 para cubrir el área sin información (ver Figura 26).

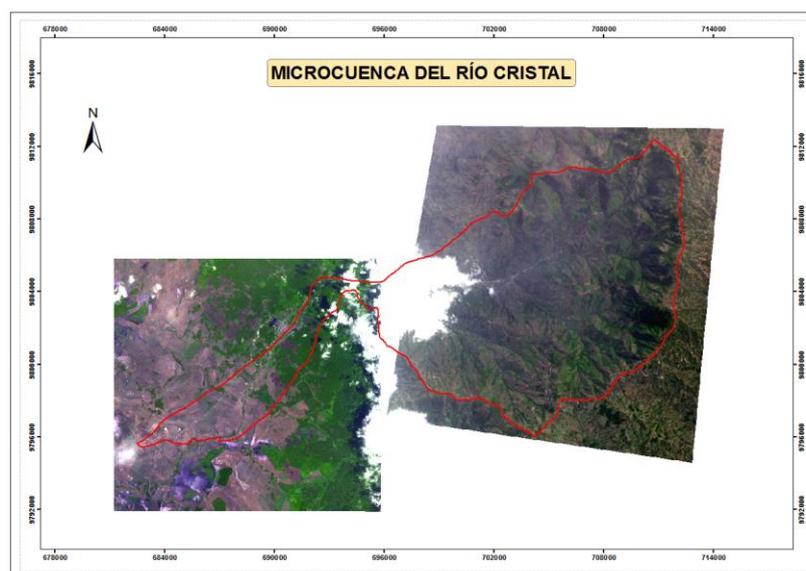


Figura 26 Cobertura del área de estudio con imágenes satelitales ASTER

3.4.1. Corrección Geométrica

Los insumos necesarios para este proceso fueron: Imagen satelital ASTER corregida, referencia horizontal y vertical; en este caso, mosaico de ortoimágenes y DTM respectivamente. Fue necesario aplicar un proceso de corrección geométrica a la imagen ASTER que cubre la cuenca alta del río Cristal, debido a que presentaba desplazamientos ocasionados principalmente por el relieve de la zona. El objetivo es obtener un insumo base para la interpretación de coberturas de suelo. Se siguió el siguiente procedimiento (Figura 27):

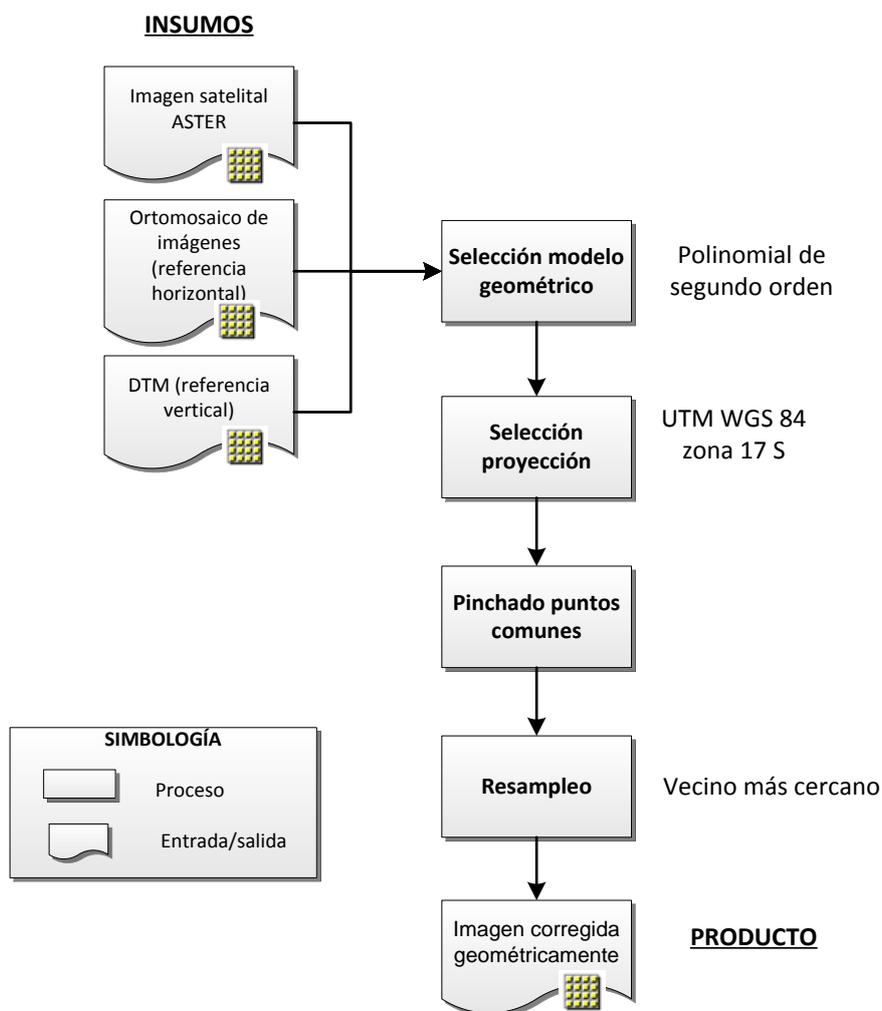


Figura 27 Proceso de corrección geométrica

Se seleccionó la corrección polinomial de segundo orden, proyección UTM WGS 84 zona 17 S. A continuación se cargó como referencia el mosaico de ortofotos del año 2010 en un visualizador y la imagen a ser corregida en otro. Luego se realizó el pinchado de los puntos comunes como: intersección de caminos, construcciones, vías o cualquier detalle que no sea dinámico, en total se ingresaron 14 puntos bien distribuidos en la escena. Para finalizar se ejecutó el resampleo de la imagen seleccionando el método vecino más cercano y tamaño de pixel de 15m, conservando así el tamaño original. Finalizado este procedimiento, los valores del error cuadrático medio para cada uno de los puntos, ni el total, sobrepasaron el tamaño de 1 pixel = 15 metros (Eastman, 2003; Sandoval & Romero, 2009) (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) (ver Figura 28).

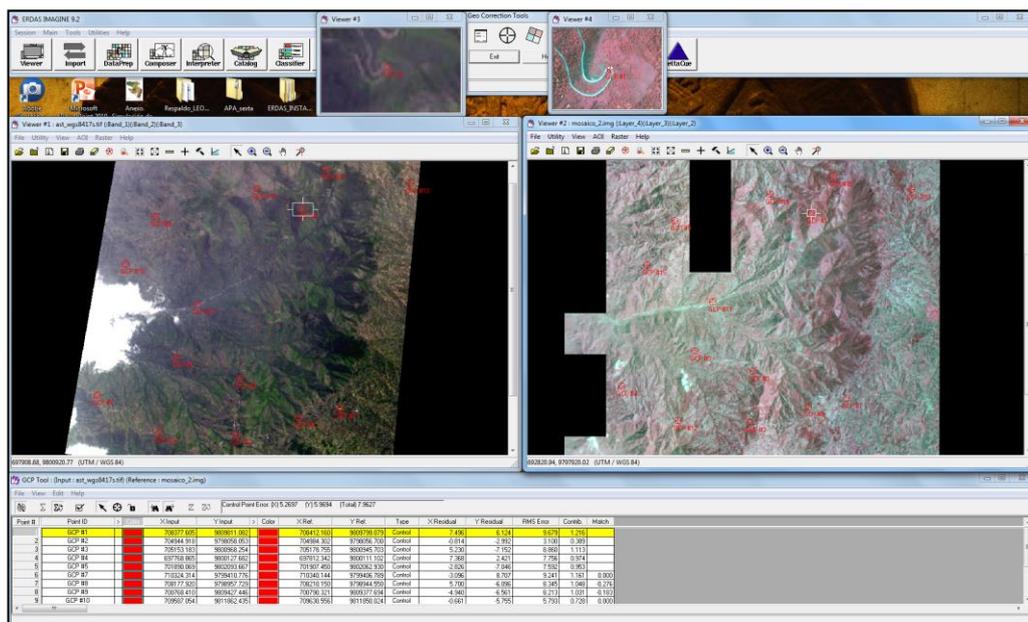


Figura 28 Corrección geométrica de imagen ASTER

3.4.2. Enmascaramiento de imágenes satelitales

Mediante interpretación visual se discriminaron las cubiertas nubosas existentes en las imágenes satelitales (ver Figura 29).

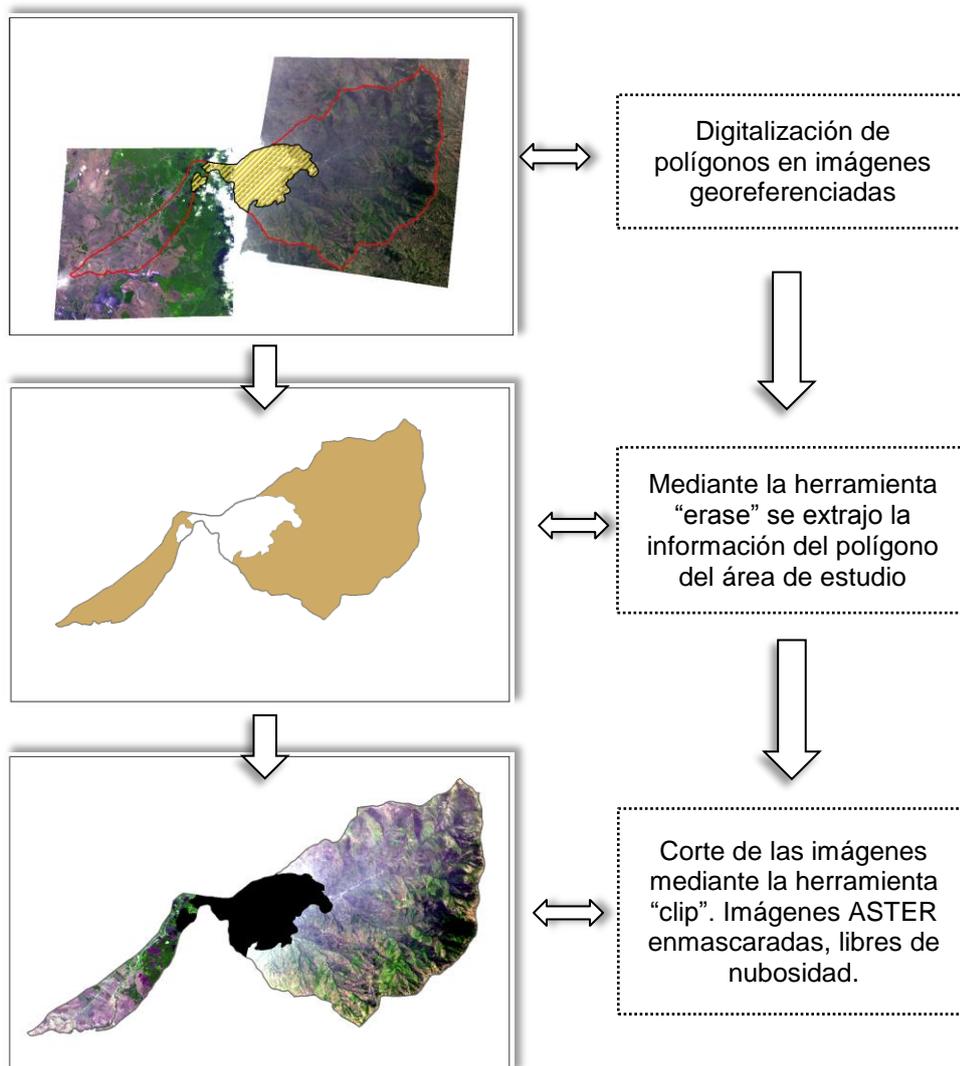


Figura 29 Proceso de obtención de imagen enmascarada

3.5. Observación en campo de coberturas de suelo

Con el objeto de establecer la leyenda temática y determinar los tipos de coberturas de suelo existentes en el área de estudio, los días 18 y 19 de Julio del año 2014 se realizó una salida de campo. En primer lugar se efectuó una planificación previa en gabinete de los sitios de verificación tomando en cuenta factores como accesibilidad, una buena distribución y finalmente se eligieron áreas representativas; es decir, superiores a la Unidad mínima de mapeo (1Ha) (Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**)

3.6. Establecimiento de leyenda temática

Se tomó como referencia la leyenda de cobertura del suelo utilizada por el Ministerio del Ambiente del Ecuador. Se verificó la existencia de la mayoría de los niveles de la leyenda los cuales se ajustaron al grado de detalle extraíble de los insumos disponibles. La cobertura bosque nativo, se generalizó a Bosque, en donde se incluyen la vegetación arbórea primaria y secundaria, debido al grado de dificultad presentada al momento de diferenciar entre ambas. La leyenda de cobertura del suelo utilizada fue la siguiente (ver Cuadro 3):

Cuadro 3 Leyenda temática

Nivel I	Nivel II
Bosque	Bosque
Áreas Agropecuarias	Cultivo Anual
	Cultivo Permanente
	Pastizal
Vegetación Arbustiva y Herbácea	Vegetación Arbustiva
	Vegetación Herbácea
Cuerpo de agua	Natural
Zonas Antrópicas	Área poblada
Otras tierras	Área sin cobertura vegetal
Sin información	Sin información

Fuente: (Ministerio del Ambiente, 2012)

3.7. Interpretación de coberturas temáticas

El proceso de interpretación se realizó tomando como entrada las imágenes aéreas ortorectificadas y las imágenes satelitales corregidas geométricamente. El objetivo es generar coberturas de suelo en formato raster de las tres épocas de análisis, las cuales posteriormente serán

utilizadas para determinar la cantidad de cambio entre coberturas, calibrar y validar el modelo de autómatas celulares.

En la digitalización de las coberturas temáticas se realizaron las siguientes actividades:

- Se crearon “shapefile” de líneas y polígonos para cada una de las épocas de estudio, además se definió el sistema de referencia en WGS84 17-S.
- A continuación, se cargaron las fotografías aéreas rectificadas; mientras que para la segunda época de estudio, las imágenes satelitales. Utilizando las herramientas que se encuentran disponibles en la barra “editor”, se procedió a digitalizar las coberturas del suelo.
- Mediante interpretación digital, se fueron digitalizando dentro del “shapefile” línea, las áreas homogéneas de cobertura del suelo mayor a 10000 m², la misma que fue establecida como la unidad mínima de mapeo.
- Posteriormente, se utilizó la herramienta “trace tool” para generar el polígono a partir de la línea recientemente digitalizada, luego se agregó en la tabla de atributos el código que identifica la clase en la leyenda temática (ver Figura 30).

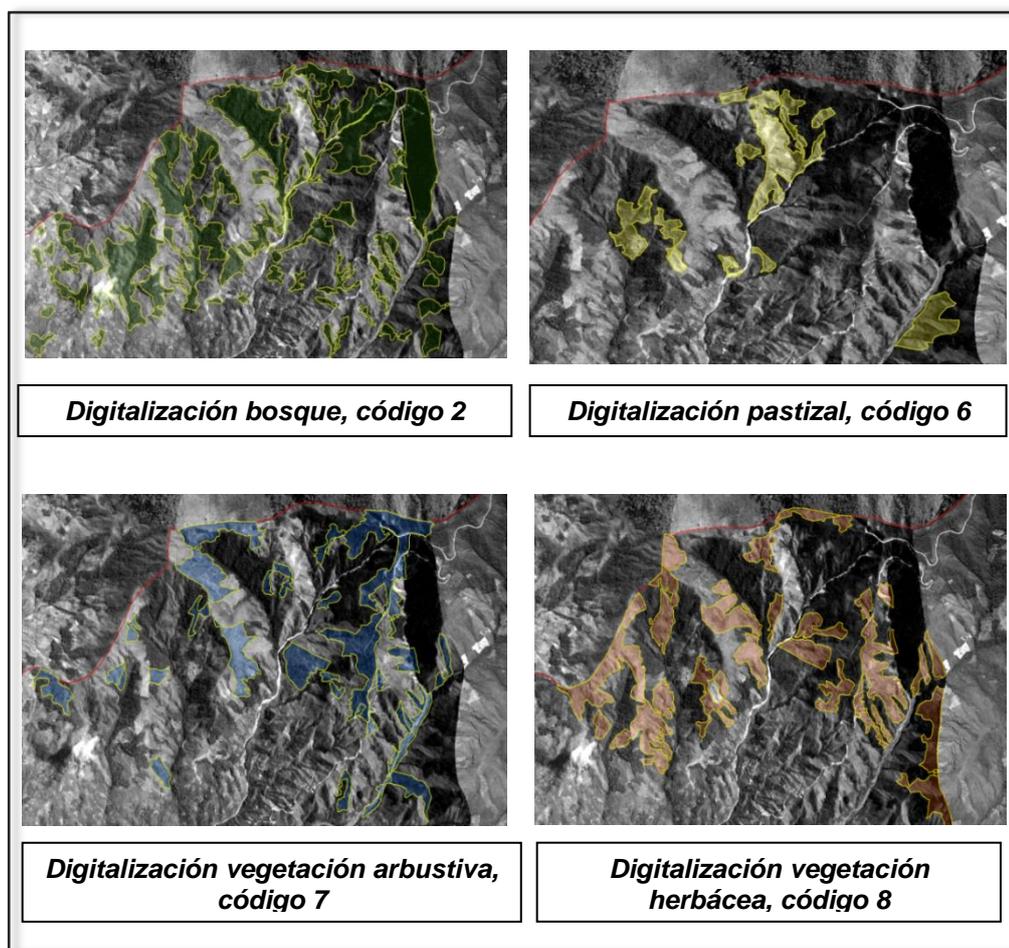


Figura 30 Ejemplos de digitalización de coberturas del suelo

La digitación de las coberturas de los siguientes periodos se efectuó modificando los polígonos para los que se registraron cambios, este tipo de interpretación se denomina interpretación interdependiente. Se ejecutó el proceso anterior para las dos primeras épocas de estudio: año (1978- 1983), y año 2000; en cambio, la información de la tercera época, se obtuvo de la cobertura temática “Sistemas productivos de la microcuenca del río Cristal” en formato “shapefile”, a escala 1:25000; generada por el IEE en el año 2010. Se verificó que no existan polígonos de menor área que la unidad mínima de mapeo y además se adaptó dicha información a la leyenda temática establecida anteriormente para el presente estudio.

3.8. Depuración de Cartografía temática

Se procedió a la depuración de las coberturas de uso de suelo generadas en el proceso anterior con el objetivo de eliminar los errores cometidos al momento de la creación de los polígonos. La información se depuró mediante la aplicación de reglas topológicas a las coberturas de suelo. Para esto, se creó una geodatabase en donde se agregaron las coberturas de las 3 épocas de análisis y se seleccionaron las reglas topológicas que aplican para la corrección de los errores. Como resultado se obtuvieron 3 archivos en formato “.shp” depurados, correspondientes a las tres épocas de estudio (ESRI, 2013)

Gran parte de la información base para la generación de los mapas de cobertura de suelo (fotografías aéreas, ortomosaicos de fotografías aéreas e imágenes satelitales), se encontraban con presencia de coberturas nubosas, por lo que fue necesario eliminar las áreas sin información. En el caso de la cobertura de suelo años 1978, 1983, no se dispone de información de la cuenca alta y ciertas zonas de la cuenca media (ver Figura 31).

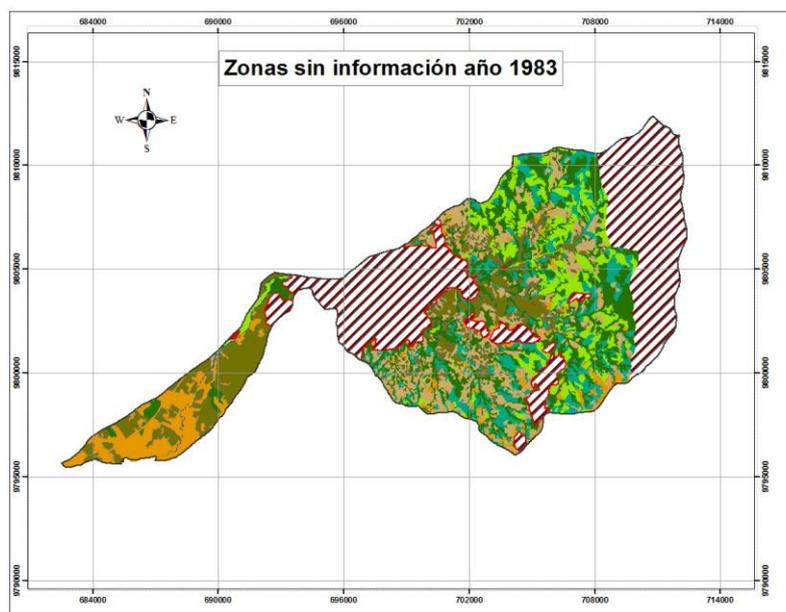


Figura 31 Zonas sin información año 1983

Por otra parte, las imágenes satelitales del año 2000, no contienen información en la cuenca media debido a la presencia de una densa masa nubosa, mientras que la información del año 2010, cubre toda el área de estudio (ver Figura 32 Figura 33).

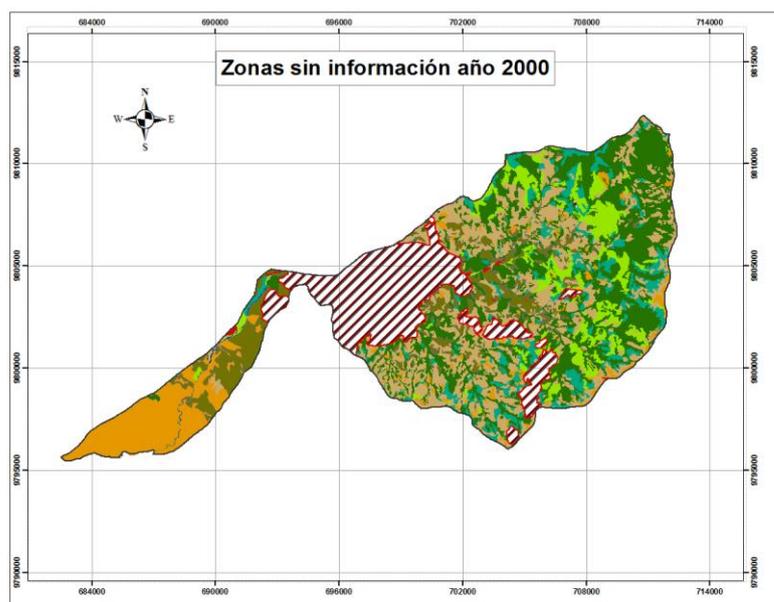


Figura 32 Zonas sin información año 2000

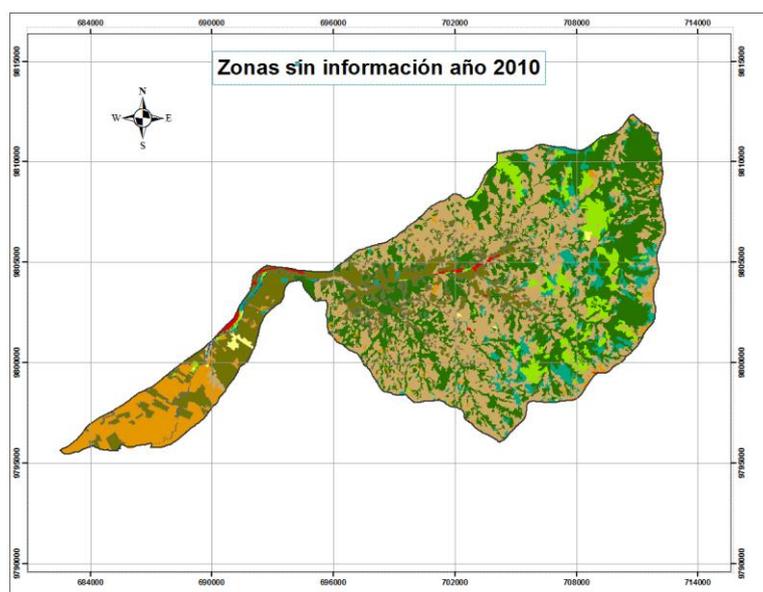


Figura 33 Información año 2010

Un requisito esencial en la generación del modelo, es la disponibilidad de información de cobertura y uso de suelo de las tres épocas de análisis; es decir, se necesita un recubrimiento de las mismas áreas en los tres años de estudio. Por este motivo, se procedió generar una máscara para delimitar las áreas a un perfil determinado por la zona con disponibilidad de información. Eliminando las zonas sin información se obtuvo un área de análisis de 10770,06 Ha. la misma que cubre gran parte de la cuenca alta (ver Figura 34).

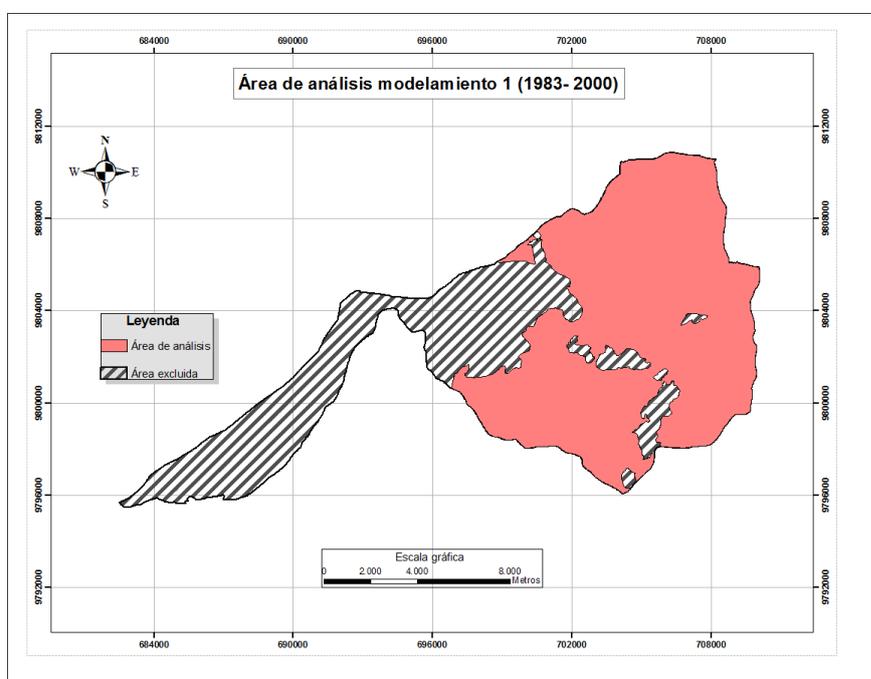


Figura 34 Área de análisis modelamiento.

Finalmente las coberturas resultantes fueron convertidas a formato raster con un tamaño de pixel 8 metros. La codificación utilizada para describir las coberturas de suelo se describe en la Tabla 13.

Tabla 13 Codificación de la cobertura del suelo

COBERTURA DE SUELO	CÓDIGO
Área sin cobertura vegetal	1
Bosque	2
Cuerpo de agua Natural	3
Cultivo Anual	4
Cultivo Permanente	5
Pastizal	6
Vegetación Arbustiva	7
Vegetación Herbácea	8
Área poblada	9

3.9. Variables explicativas del cambio de cobertura de suelo

Para la generación de las variables explicativas se requiere de la siguiente información: DTM, vías principales, vías secundarias, centros poblados, cuerpos de agua, áreas agrícolas e información meteorológica. Serán empleadas en la regresión logística para determinar la probabilidad de cambio a las coberturas de suelo presente en el análisis. Las variables consideradas en el análisis son presentadas en el Cuadro 4.

Cuadro 4 Variables empleadas en la regresión logística

Variable explicativa	Descripción	Fuente
Altitud	Altitud en metros	DTM generado por IEE, tamaño de pixel 10 m
Pendiente	Pendiente en %	Elaboración propia a partir del DTM
Distancia a poblados	Asentamientos humanos	Elaboración propia a partir de puntos de poblados.
Distancia a ríos	Ríos dobles y simples	Elaboración propia a partir de cobertura IEE 1:25000
Distancia a vías principales	Carretera Interprovincial Guaranda Babahoyo	Elaboración propia a partir de cobertura IEE 1:25000
Distancia a vías secundarias	Carreteras secundarias que conectan zonas pobladas rurales y urbanas	Elaboración propia a partir de cobertura IEE 1:25000
Distancia áreas agrícolas	Zonas con presencia de cultivos	Elaboración propia a partir de cobertura IEE 1:25000
Precipitación	Precipitación media anual (mm)	Interpolación de valores (Estaciones Meteorológicas) INAMHI

El procedimiento de obtención de las variables explicativas fue el siguiente:

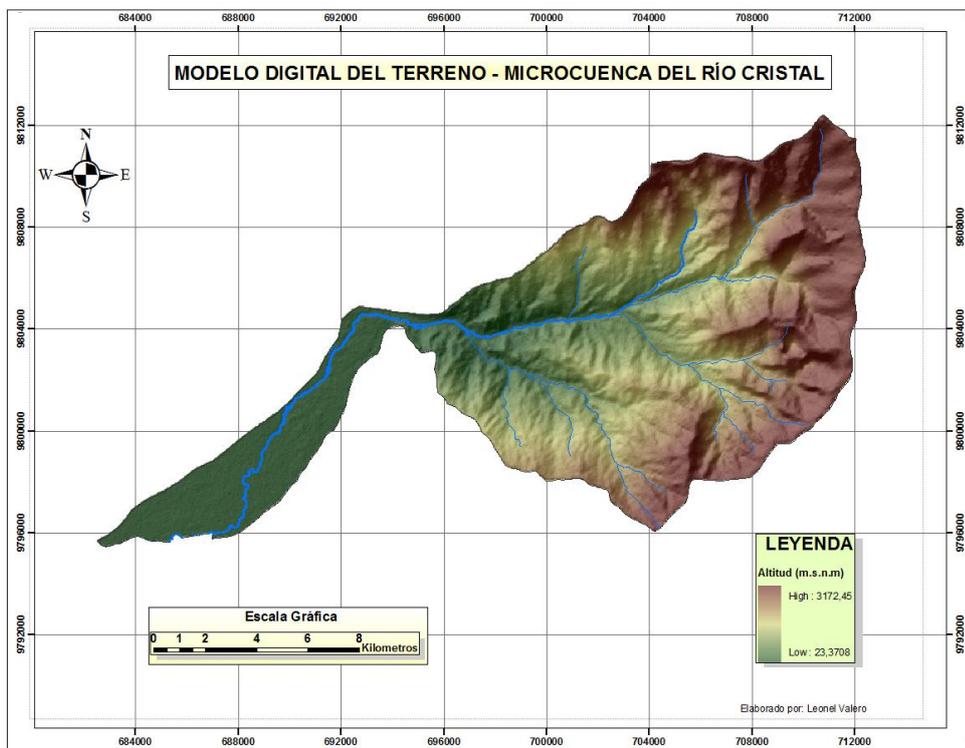
- **Altitud**

La altitud se definió a través de la variable cuantitativa continua representada por el Modelo Digital de Terreno (DTM). La microcuenca del río Cristal es una zona con una gran variación altitudinal en un área relativamente pequeña, se localiza en una zona de transición entre un paisaje de piedemonte y llanura aluvial, es así que la altitud máxima es de 3172,45 m.s.n.m. y la mínima de 23,37 m.s.n.m., además se observa que existe una gradiente altitudinal en sentido este – oeste, que corresponde a la dirección del flujo del río Cristal. En la Tabla 14 se puede observar que una superficie de 60,3 Km² (30,3 %) presenta una altitud menor a 1000 msnm, mientras que las mayor parte de la microcuenca (47%) tiene alturas entre 1000 y 2000 msnm, y finalmente el 0,4 % de la microcuenca se encuentra por encima de los 3000 msnm.

Tabla 14 Superficie de acuerdo a la altitud

Altitud (m)	Superficie(km ²)	%
<1000	60,3	30,3
1000 - 2000	93,4	47,0
2000 - 3000	43,8	22,0
>3000	0,9	0,4

Al estar la altitud altamente correlacionada con la disminución o aumento de la temperatura y de manera frecuente con la variación de los niveles de precipitación, es un factor influyente en la distribución de la cobertura natural a lo largo de microcuenca; en consecuencia, al altitud crea fuertes contrastes locales que afectan directa o indirectamente los procesos biológicos de la zona, por ejemplo el desarrollo de cultivos y el crecimiento natural de especies nativas (ver Figura 35) (Ministerio del Ambiente, 2012).

**Figura 35** Modelo Digital del Terreno

- **Pendiente**

El raster de pendientes en porcentaje se generó a partir del Modelo Digital del Terreno, utilizando la herramienta “Slope” de la extensión “Spatial Analyst” del software ArcGIS, con tamaño de pixel 8 metros (ver Figura 36).

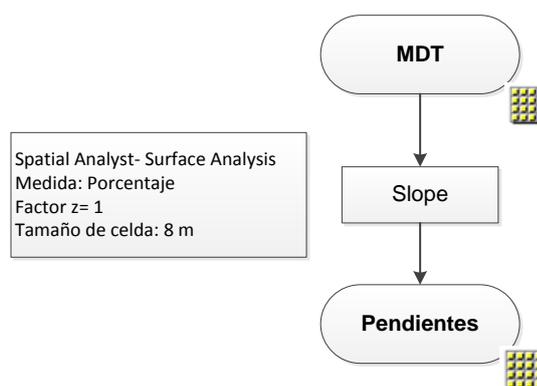


Figura 36 Modelo cartográfico generación variable pendiente

De acuerdo a la Tabla 15 en la microcuenca del Río Cristal existe una superficie de 140 Km² (70% del área total de la microcuenca) con pendientes menores a 50%, es decir una inclinación relativamente baja, la misma que corresponde a la cuenca baja y media del área de estudio, área de fácil acceso que permite el desarrollo de actividades agro productivas. Por otra parte el 28,06% del área de la microcuenca se encuentra entre pendientes comprendidas entre 50 y 100% de inclinación y pequeña áreas con pendientes fuertes mayores a 100%, lo que genera restricciones para el desarrollo de actividades antrópicas.

Tabla 15 Superficie de terreno por pendiente

Pendiente (%)	Superficie (Km ²)	%
< 50	140	70,52
50 - 100	55,7	28,06
100 - 150	2,4	1,23
150 - 200	0,2	0,14
200 - 250	0,04	0,02
>250	0,01	0,008

La pendiente es una variable de suma importancia en el modelamiento porque puede determinar limitaciones en el avance de prácticas agrícolas debido a la inclinación del terreno. Las zonas de altas pendientes presentan accesos más difíciles y por lo tanto mayor dificultad a cambiar de cobertura (ver Figura 37) (Ceballos, López, Trujillo, & Gutiérrez, 2005).

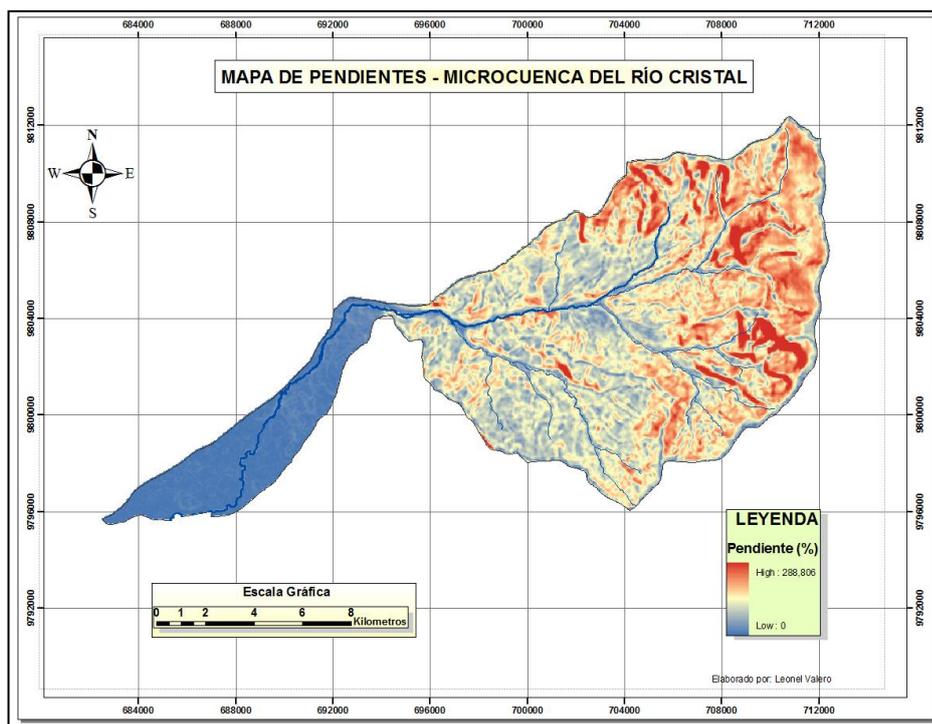


Figura 37 Mapa de pendientes de la Microcuenca del Río Cristal

- **Distancia a: ríos simples, poblados, carreteras principales, carreteras secundarias y áreas agrícolas.**

Para el cálculo de las distancias existentes desde cada objeto, en este caso coberturas en formato vector de: cuerpos de agua, puntos de poblaciones, vías principales y secundarias, se utilizó la herramienta "Straight line" de la extensión "Spatial Analyst".

El parámetro de accesibilidad se obtuvo de la distancia euclidiana a diferentes elementos de la red vial principal y secundaria. Para el cálculo de

la distancia a ríos se ingresó la cobertura en formato vector de ríos que drenan la microcuenca del río Cristal, se estableció la máscara de trabajo y se ejecutó la herramienta Straight line, dando como resultado un raster que contiene la variable continua de distancia a ríos simples. El mapa de distancia a centros poblados se generó a partir de la distancia desde los puntos de asentamientos humanos, fue necesaria la utilización de puntos fuera del área de estudio para obtener información de mejor calidad (ver Figura 38).

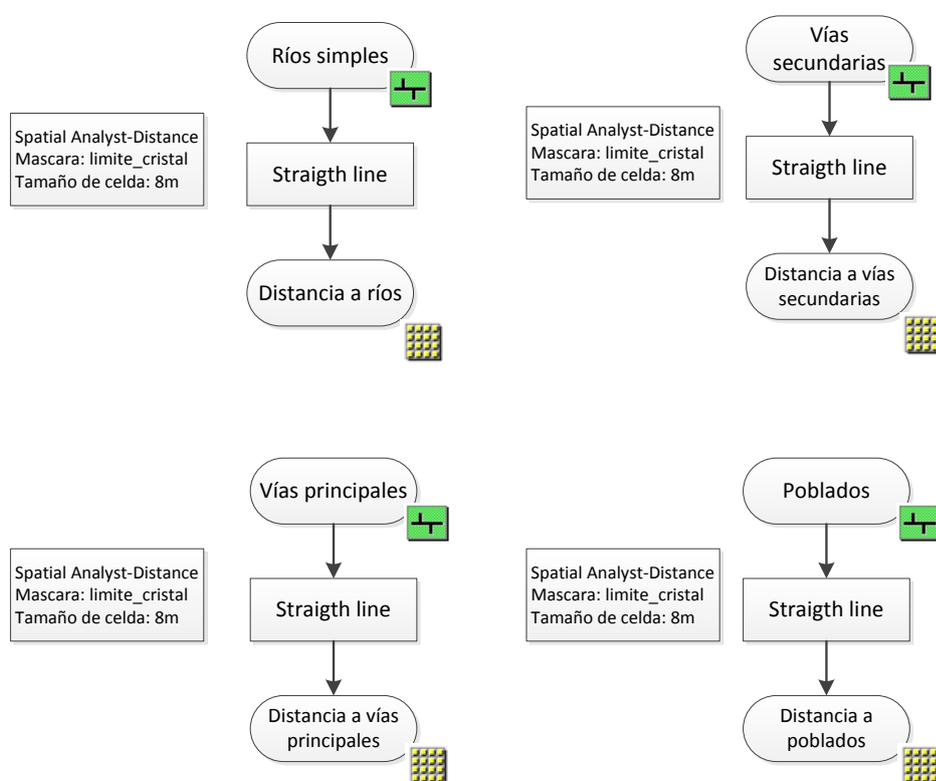


Figura 38 Mapa cartográfico obtención de variables distancia

Los cambios de cobertura vegetal y uso del suelo son provocados por varios factores tanto físicos (pendiente, altitud, distancia a ríos) como factores de origen antrópico: presencia de infraestructura vial y asentamientos humanos.

Los procesos originarios del cambio de cobertura y uso de suelo son de origen antrópico; para esto, se incluyeron variables que consideren de alguna manera la influencia humana y la accesibilidad que tienen hacia las diversas coberturas de suelo.

La deforestación y aclareo de los bosques declina rápidamente conforme disminuye la distancia a vías principales y secundarias (Liu, et al, 1993 citado en Pidal, 2003; Sigtierras, 2011) (ver Figura 39, Figura 40 y Figura 41)

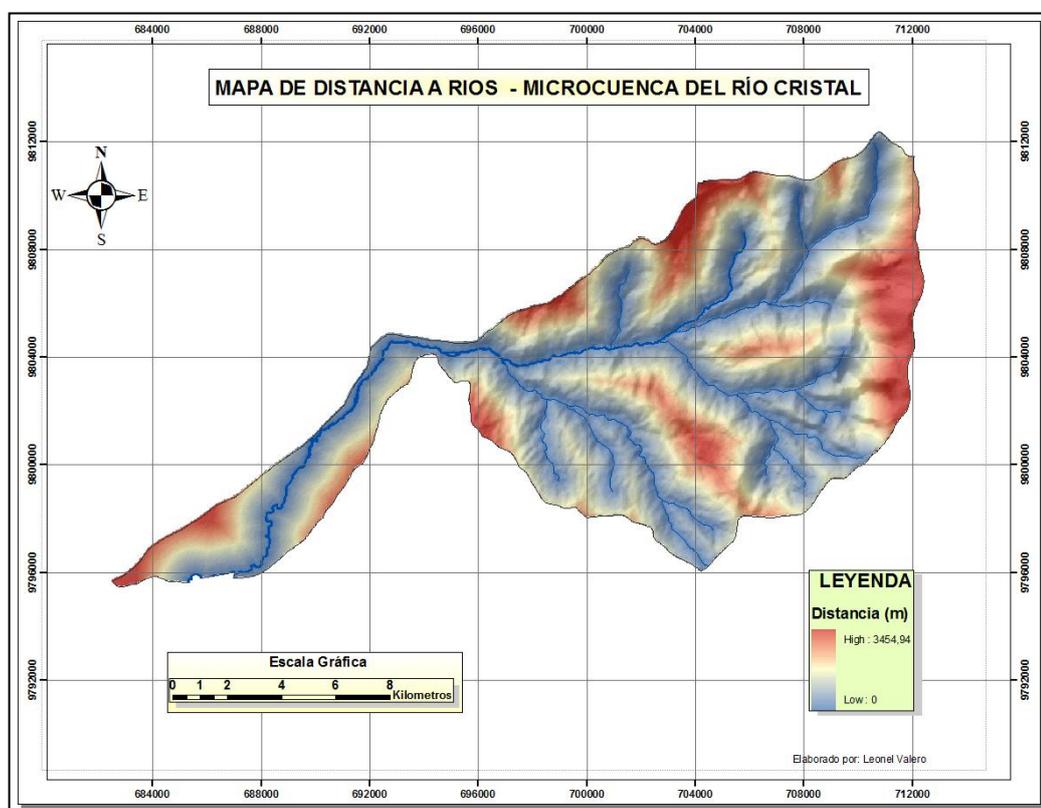


Figura 39 Mapa de distancia a ríos

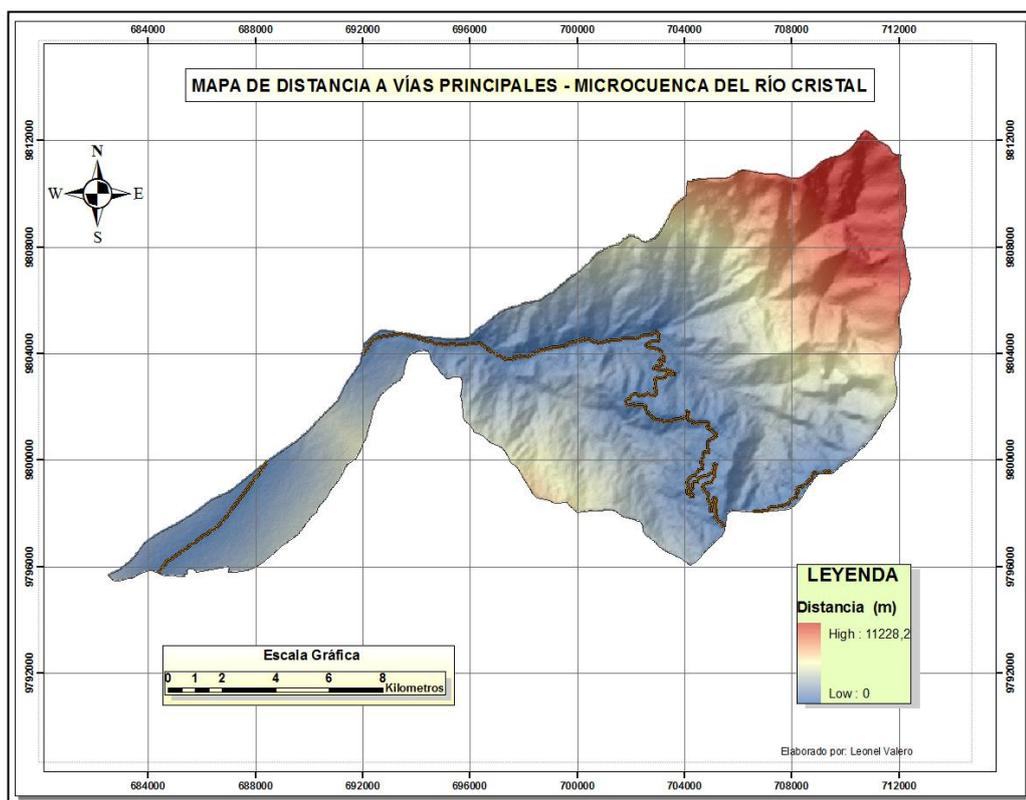


Figura 40 Distancia a vías principales

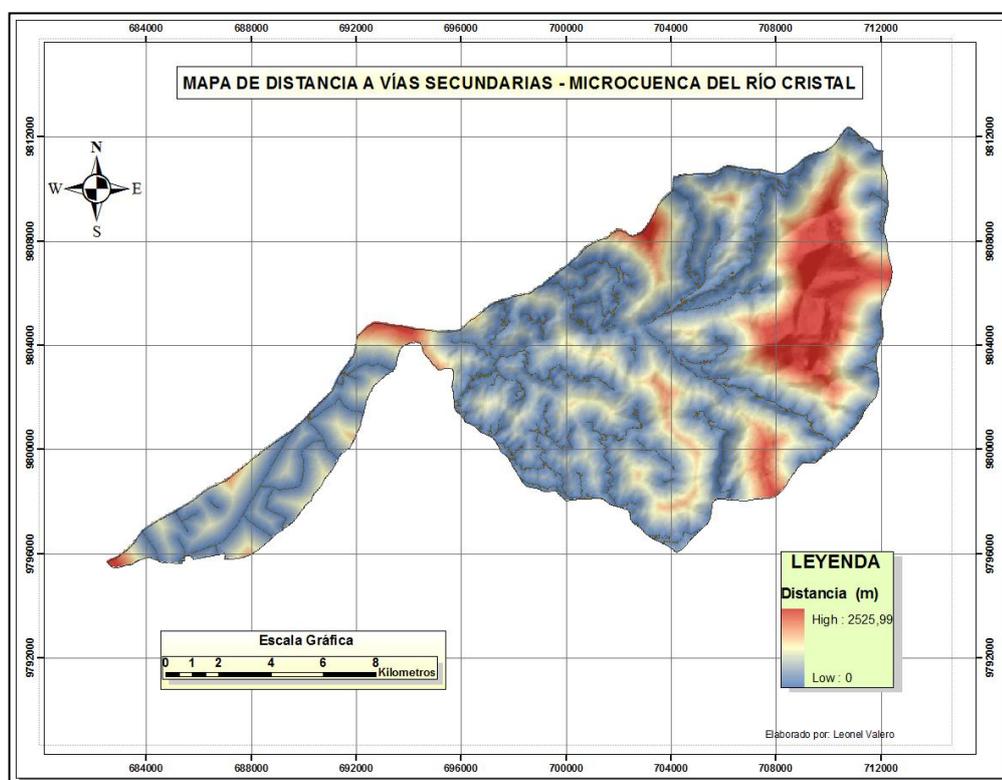


Figura 41 Distancia a vías secundarias

Los asentamientos humanos que se encuentran en el área han ejercido una fuerte presión sobre los ecosistemas naturales, provocando modificaciones aceleradas a las coberturas de suelo presentes. A través de la variable continua distancia a poblados se puede llegar a establecer las relaciones que existen entre los diversos usos que se le da al suelo en las áreas cercanas a poblaciones (ver Figura 42).

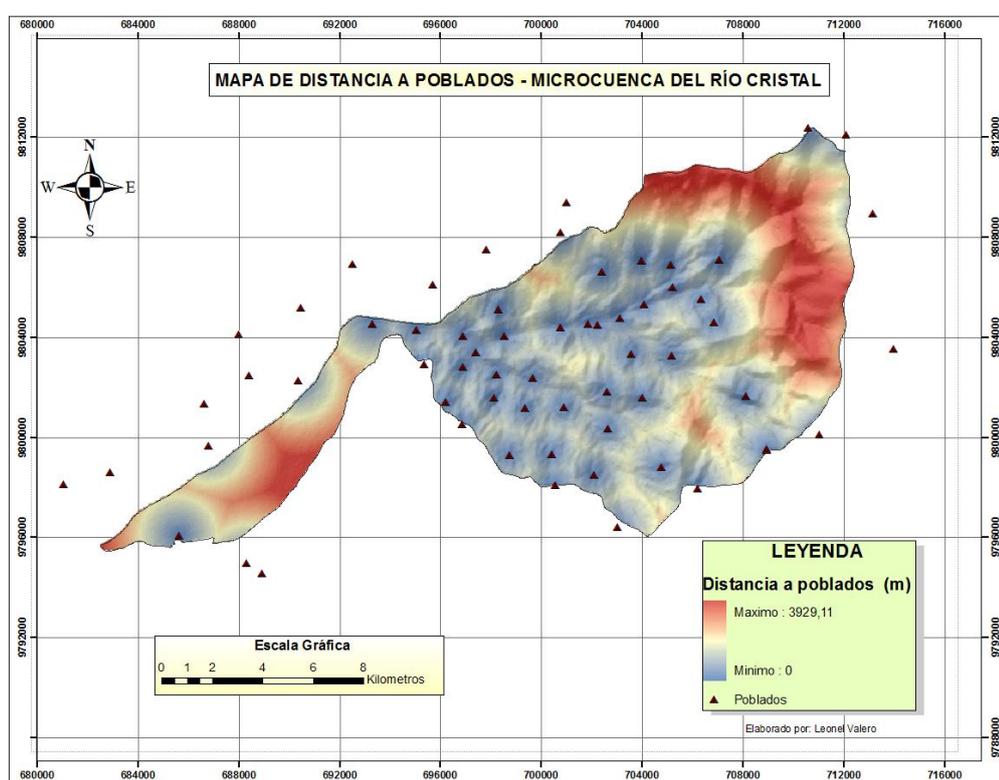


Figura 42 Mapa de Distancia a Centros Poblados

- **Precipitación**

La variable precipitación se realizó utilizando datos de 6 estaciones meteorológicas próximas a la microcuenca del Río Cristal, los mismos que fueron proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Se recolectaron datos de precipitación diaria en mm desde el año 2000 hasta el año 2013, de los cuales se obtuvo el valor de precipitación anual. Finalmente se consiguió la precipitación media anual (mm) de cada una de las estaciones a utilizarse en la interpolación (ver Tabla 16).

Tabla 16 Precipitación Media Anual de estaciones cercanas a la Microcuenca del Río Cristal

Código	Estación	Precipitación anual (mm)		
		Mínima	Máxima	Media
M0388	Rio San Antonio Monjas	1198	2351,8	1786,4
M1117	Instituto 3 de Marzo	397,4	948,5	557,4
M0129	Caluma	1346,2	2274,9	1772,1
M0901	Pita CEDEGE	2007,1	2770,5	2014,6
M0468	Montalvo	718,7	3414,4	1871,3
M0130	Chillanes	406,9	1173,5	778,3

Fuente: (INAMHI, 2013)

La precipitación se utilizó en el modelamiento como una variable continua; para esto, se realizó la interpolación de los valores de precipitación, mediante el método IDW (ver Figura 43).

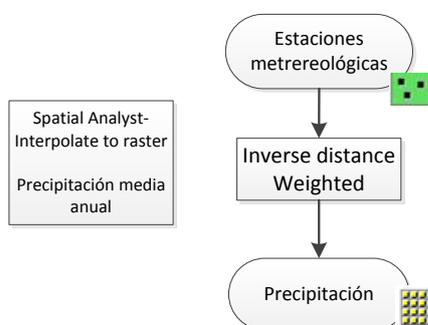


Figura 43 Modelo cartográfico obtención de variable precipitación

La distribución de la precipitación media anual aumenta en sentido Este-Oeste; es decir, los valores máximos de precipitación se presentan en la cuenca baja, en donde se encuentra asentada la población de Montalvo. La pluviosidad mínima corresponde a la estación Instituto 3 de Marzo ubicada en la cuenca alta con precipitaciones anuales inferiores a 948,5 mm (ver Figura 44).

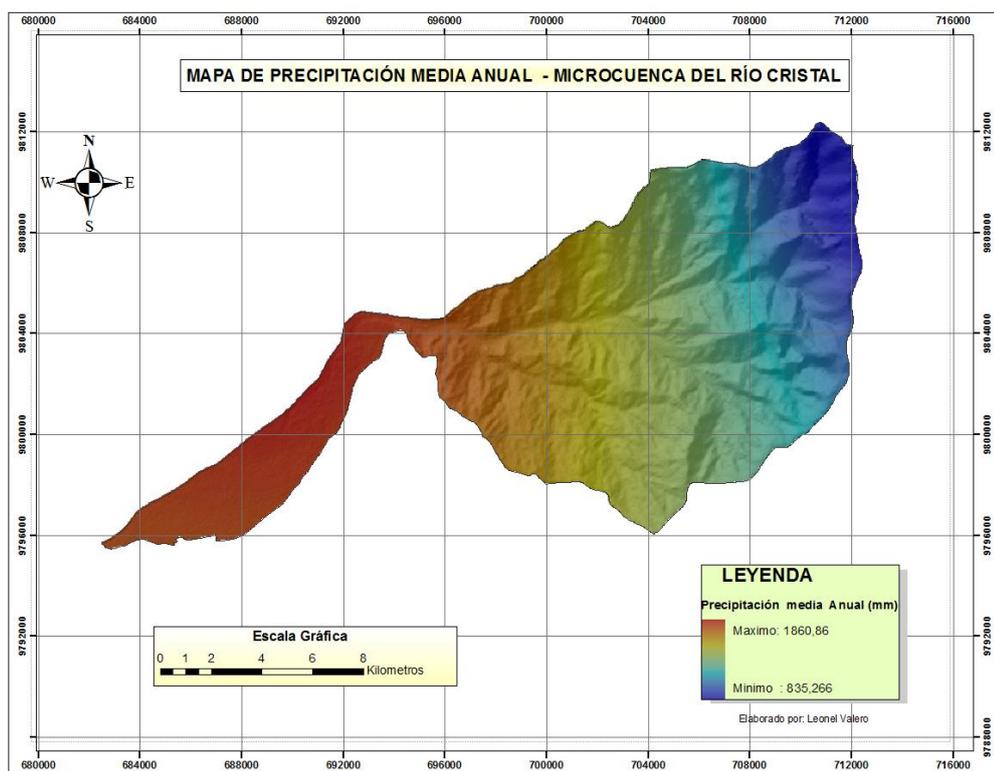


Figura 44 Mapa de Precipitación media anual

Como resultado se generaron un total de 8 variables continuas, las cuales se enmascararon con el área delimitada anteriormente para asegurar que todas las imágenes raster mantengan la misma extensión; es decir, mismo número de filas y columnas, para así evitar conflictos al momento del análisis espacial.

3.10. Modelamiento de autómatas celulares

El modelamiento de autómatas celulares se compone de tres fases: calibración, simulación y evaluación (ver Figura 45).

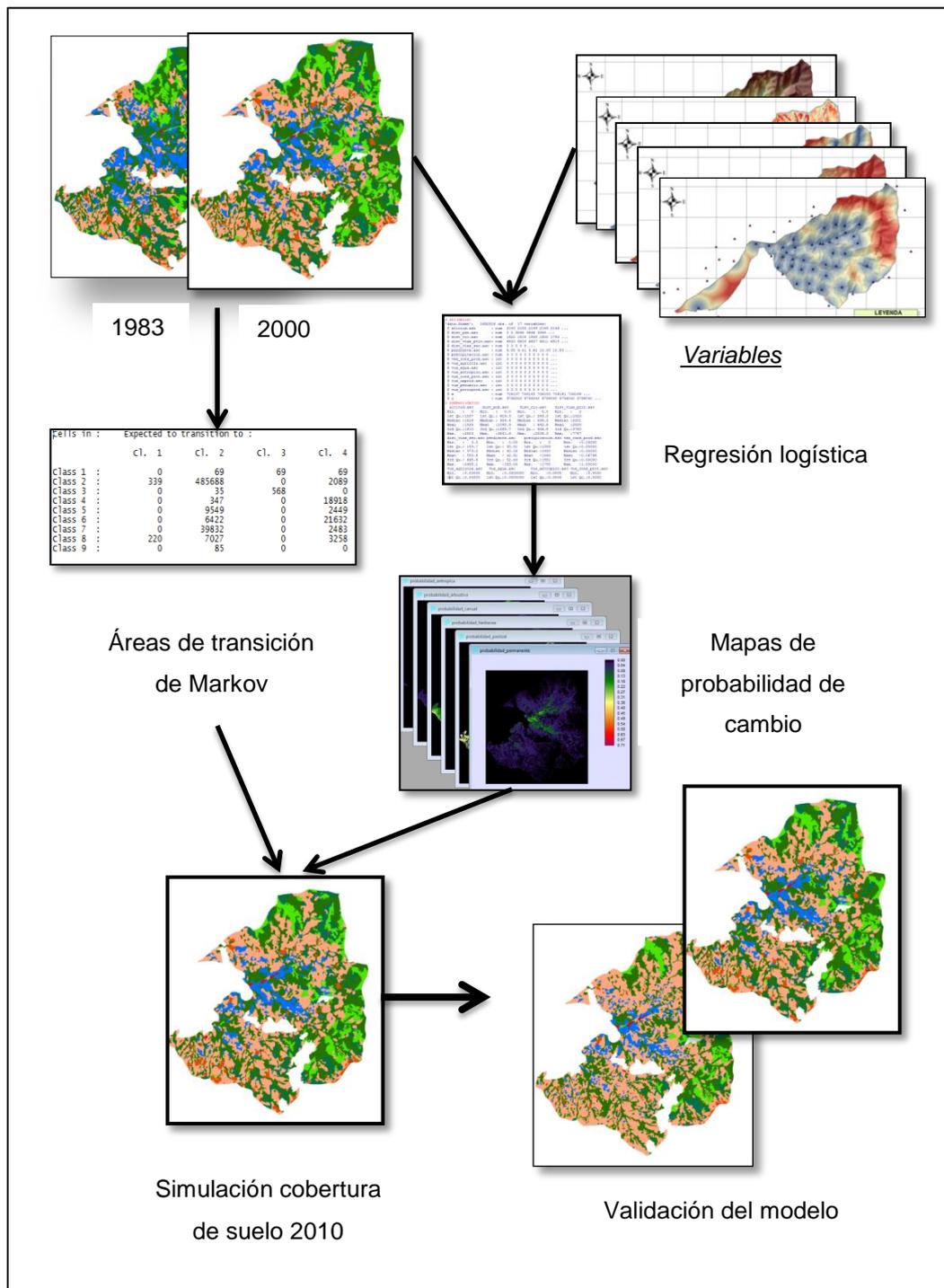


Figura 45 Procedimiento general para simular la cobertura de suelo.

3.10.1. Calibración del modelo de autómatas celulares

En la calibración del modelo es necesario contar con las coberturas de suelo de las 3 épocas de análisis generadas en los procesos anteriores y además con las variables explicativas en formato raster. El objetivo es efectuar regresiones logísticas y mejorar la simulación del modelo de autómatas celulares. Para esto se utilizó el software IDRISI Selva 17.0 versión de prueba para ejecutar el análisis y procesamiento de la información. Se efectuaron los siguientes procesos (ver Figura 46).

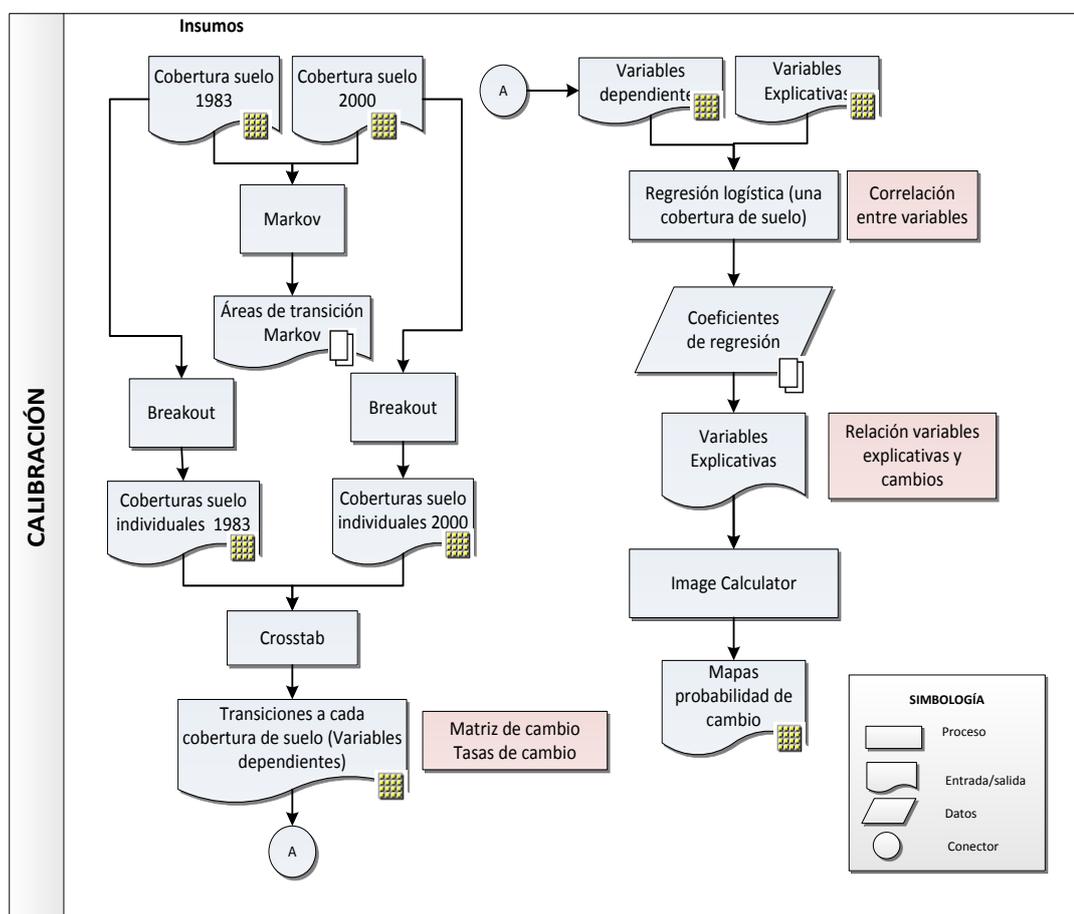


Figura 46 Fase de calibración

Importación de archivos raster

Inicialmente se realizó la importación de los archivos a formato IDRISI Raster (.rst). Los tipos de datos que representan los valores de las celdas que IDRISI reconoce son: enteros, byte, reales y RGB24.

Extracción de coberturas del suelo

En la extracción de las coberturas temáticas se utilizó la herramienta BreakOut, que sirve para separar y extraer las clases presentes en un archivo raster, generando una nueva imagen binaria (0/1) para cada una de las categorías existentes. En total se obtuvieron 18 imágenes binarias: 9 correspondientes a las clases de cobertura de suelo del año 1983 y 9 pertenecientes a la cobertura de suelo año 2000 (ver Figura 47 y Figura 48).

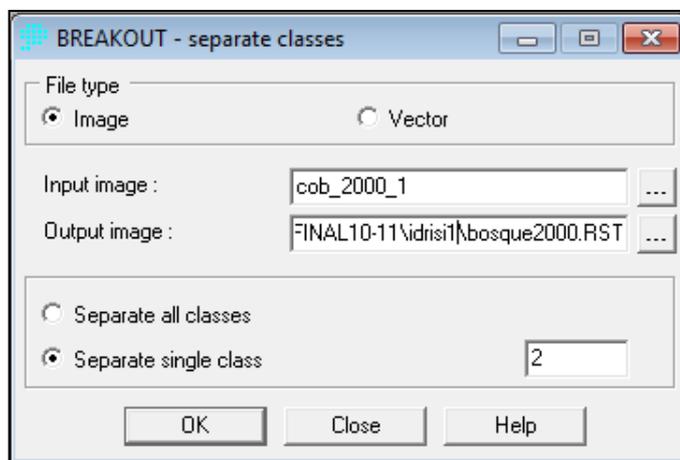


Figura 47 Herramienta Breakout

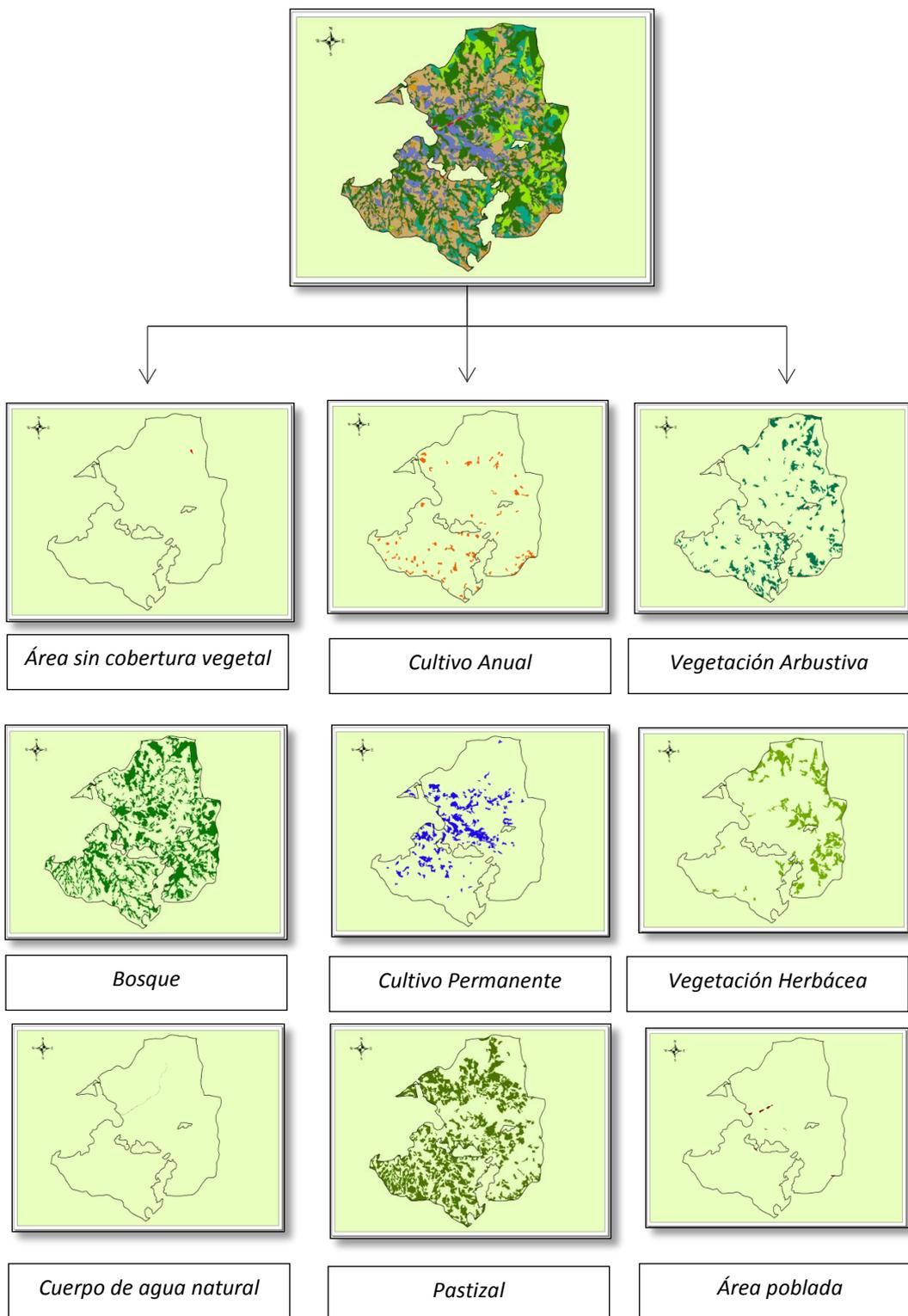


Figura 48 Clases de cobertura de suelo separadas año 2000

Cálculo de la cantidad de cambios

En el cálculo de la cantidad de cambios se requiere utilizar una herramienta que permita comparar todas las transiciones entre coberturas de suelo que hayan ocurrido. Es así que se utilizó la herramienta *Crosstab*, que ejecuta un análisis de tabulación cruzada que esencialmente compara dos mapas con datos cualitativos y genera una imagen resultante que contiene un valor único para cada combinación de valores de entrada (Ver Figura 49).

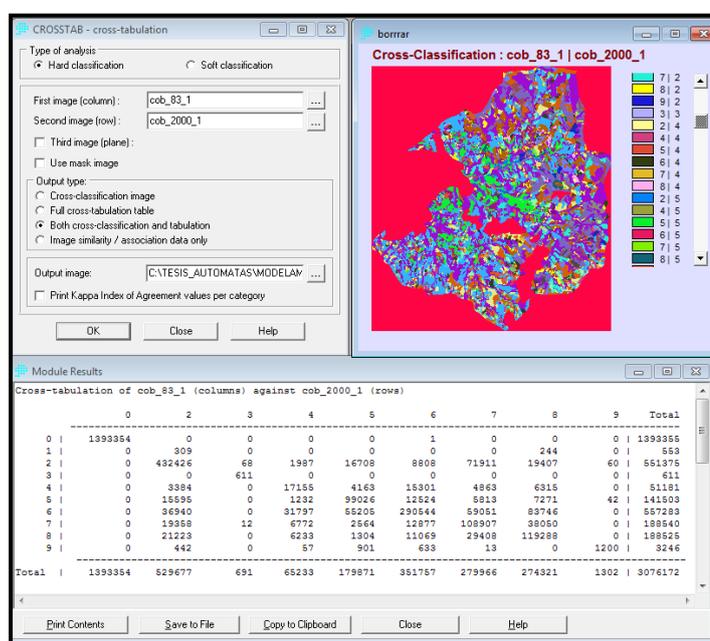


Figura 49 Tabulación cruzada cobertura de suelo años (1983-2000)

Por otra parte con la misma herramienta se utilizaron las imágenes binarias (0/1) que representan la presencia o ausencia de la cobertura (solo pastizal, solo Bosque) de cada época de análisis para cruzarlas y determinar las áreas que cambiaron, por ejemplo: se obtienen las áreas que pasaron a ser pastizal, discriminando las que ya eran pastizal. Se efectuó el mismo procedimiento para cada una de las coberturas de suelo existentes. Estas coberturas constituyen las variables dependientes y serán utilizadas en la ejecución de la regresión logística (ver Figura 50).

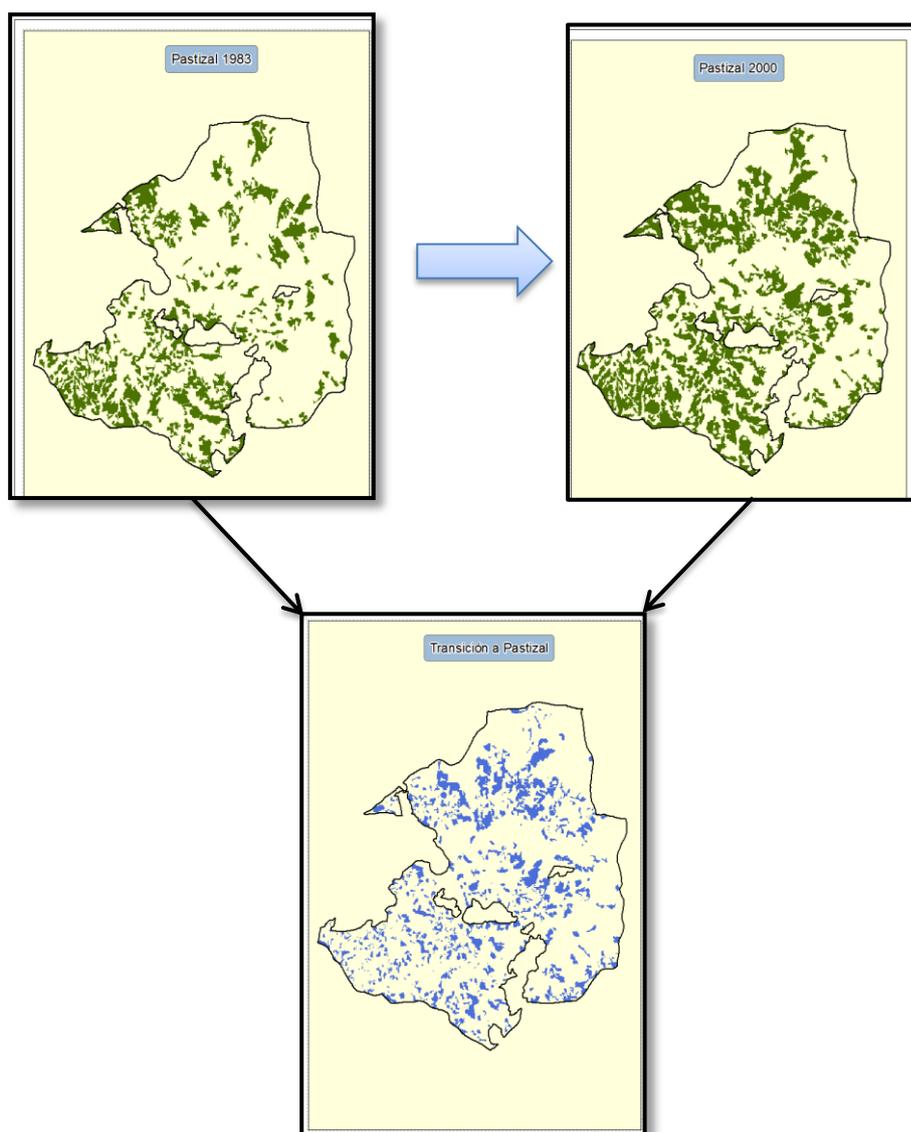


Figura 50 Áreas de transición solo a Pastizal

Cálculo de la probabilidad de cambio

Se espera que los cambios de cobertura y uso de suelo ocurran en las áreas más propensas al cambio. Para analizar la probabilidad de cambio a cada una de las coberturas de suelo, se empleó la técnica de regresión logística la cual requiere el ingreso de la variable dependiente (generada anteriormente) y el grupo de variables que explicarán el cambio de cobertura de suelo.


```

Archivo Edición Formato Ver Ayuda
altitud.asc Bosque.asc dist_pob.asc dist_rio.asc dist_vias_prin.asc dist_vias_sec.asc pendiente.asc precipitaci
2150.48510742188 0 0 1822.06896972656 6799.55322265625 0 8.84670257568359 0 0 0 0 0 0 0 0 6968011503998 979604
2149.67895507813 0 0 1814.80102539063 6803.30322265625 0 9.40902709960938 0 0 0 0 0 0 0 0 6968011504006 979604
2148.86010742188 0 3847.86694335938 1807.5400390625 6807.06005859375 0 9.6230001449585 0 0 0 0 0 0 0 0 6968011
2148.86010742188 0 3846.02905273438 1800.28403781719 6810.82421875 0 10.4534702301025 0 0 0 0 0 0 0 0 6968011
2148.1298828125 0 3844.2060546875 1793.03503417969 6814.59619140625 8 10.8287000656128 0 0 0 0 0 0 0 0 6968011
2147.23388671875 0 3842.39892578125 1785.79296875 6818.375 8 10.8287000656128 0 0 0 0 0 0 0 0 6968011504038 9
2146.3720703125 0 3840.60791015625 1778.55700683594 6822.162109375 8 9.97660064697266 0 0 0 0 0 0 0 0 6968011
2145.84106445313 0 3838.8330078125 1771.32702636719 6825.955078125 11.3137102127075 9.95894908905029 0 0 0 0 0 0 0
2145.84106445313 0 3837.07397460938 1764.10400390625 6829.755859375 16 9.36755752563477 0 0 0 0 0 0 0 0 696801
2145.30908203125 0 3835.3310546875 1756.88793945313 6833.56396484375 16 9.34910011291504 0 0 0 0 0 0 0 0 69680
2145.06591796875 0 3833.60302734375 1749.67895507813 6837.37890625 17.8885402679443 9.34910011291504 0 0 0 0 0
2144.90893554688 0 3831.89111328125 1742.47595214844 6841.2021484375 22.627420425415 9.29626846313477 0 0 0 0 0
2144.82397460938 0 3830.19604492188 1735.28100585938 6845.0322265625 24 9.23029136657715 0 0 0 0 0 0 0 0 69680
2144.82397460938 0 3828.51611328125 1728.09301757813 6848.869140625 24 9.14526081085205 0 0 0 0 0 0 0 0 69680
2144.79907226563 0 3826.85302734375 1720.91101074219 6852.712890625 24 9.02362537384033 0 0 0 0 0 0 0 0 69680
2144.81689453125 0 3825.205078125 1713.73706054688 6856.56494140625 24 9.02362537384033 0 0 0 0 0 0 0 0 69680
2144.86791992188 0 3823.57299804688 1706.57104492188 6860.4228515625 24 8.88698387145996 0 0 0 0 0 0 0 0 69680

```

Figura 52 Nuevo archivo en formato ASCII (variables)

Como resultado se obtuvieron 9 archivos en formato ASCII: 1 que contiene todas las variables de estudio utilizadas para la obtención de la matriz de correlación y 8 archivos que corresponden a cada una de las variables explicativas con la variable dependiente respectiva. No se realizó regresión logística de la cobertura cuerpo de agua natural, por ser una variable poco dinámica en el periodo de estudio, por lo que no se generó el archivo ASCII para esta cobertura. Para el presente proyecto se utilizó el software R Statistics.

Correlación entre variables

Previo a la elaboración de la regresión logística, se requiere analizar las variables a ser utilizadas, eliminando las que no aporten con información y que sean redundantes (correlacionadas). Para esto se exploró el grado de correlación entre las variables explicativas, mediante un análisis estadístico, utilizando el coeficiente de “Spearman”.

Correlación en R Statistics

Las operaciones fueron realizadas en el software R Statistics. Este ofrece varios métodos de análisis de correlación, entre ellos: Pearson, Kendall y Spearman. La secuencia de comandos utilizada en R para realizar la correlación utilizando el método de Spearman fue la siguiente:

1.- Se selecciona la carpeta de trabajo en donde se encuentran todos los datos en formato “.asc”.

2.- Se carga el archivo de datos que contiene toda la información de las variables independientes. Se utiliza el comando “read.table” y se le asigna a la variable datos. Además se establece si contiene un encabezado y cuál es la separación decimal y separación entre datos.

```
datos <- read.table ("salida.txt", header = T, sep = " ", dec = ".")
```

3.- Con el comando “str” se despliega toda la información correspondiente al “dataframe” cargado; asimismo, con el comando “summary”, se puede obtener un resumen estadístico con datos como: media mediana, valor máximo, mínimo, primer cuartil, entre otros (ver Figura 53).

`str(datos)`

`summary(datos)`

```
> str(datos)
'data.frame': 1682818 obs. of 10 variables:
 $ altitud.asc      : num  2150 2150 2149 2149 2148 ...
 $ dist_agricolal.asc: num  2629 2630 2631 2632 2633 ...
 $ dist_pob.asc     : num   0 0 3848 3846 3844 ...
 $ dist_rio.asc     : num  1822 1815 1808 1800 1793 ...
 $ dist_vias_prin.asc: num  6800 6803 6807 6811 6815 ...
 $ dist_vias_sec.asc: num   0 0 0 0 8 ...
 $ pendiente.asc    : num   8.85 9.41 9.62 10.45 10.83 ...
 $ precipitacion.asc: num   0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...
 $ x                : num  706137 706145 706153 706161 706169 ...
 $ y                : num  9796040 9796040 9796040 9796040 9796040 ...

> summary(datos)
 altitud.asc      dist_agricolal.asc  dist_pob.asc      dist_rio.asc
Min.   : 0      Min.   : 0.00      Min.   : 0.0      Min.   : 0.0
1st Qu.:1227    1st Qu.: 43.08    1st Qu.: 619.3    1st Qu.: 243.3
Median :1514    Median : 195.31   Median : 924.4    Median : 535.3
Mean   :1528    Mean   : 413.52   Mean   :1093.9    Mean   : 642.9
3rd Qu.:1810    3rd Qu.: 529.51   3rd Qu.:1383.7   3rd Qu.: 936.9
Max.   :2503    Max.   :3253.52   Max.   :3851.6    Max.   :2508.3
 dist_vias_prin.asc dist_vias_sec.asc pendiente.asc  precipitacion.asc
Min.   : 0      Min.   : 0.0      Min.   : 0.00      Min.   : 0
1st Qu.:1023    1st Qu.: 153.7    1st Qu.: 30.31    1st Qu.:1339
Median :2201    Median : 373.2    Median : 40.16    Median :1450
Mean   :2530    Mean   : 500.6    Mean   : 42.91    Mean   :1444
3rd Qu.:3760    3rd Qu.: 695.6    3rd Qu.: 52.43    3rd Qu.:1551
Max.   :7747    Max.   :2488.1    Max.   :183.03    Max.   :1735
      x                y
Min.   :696801      Min.   :9781232
1st Qu.:702457      1st Qu.:9785592
Median :704697      Median :9788280
Mean   :704580      Mean   :9788578
3rd Qu.:707009      3rd Qu.:9791512
Max.   :710081      Max.   :9796040
```

Figura 53 Ventana de comandos R

4.- Una vez que se ha comprobado la correcta carga de los datos al programa, se procede a verificar los nombres de los vectores (variables), para determinar cuáles van a ingresar en el análisis de correlación. Se utilizó el comando “names” para determinar el orden en el que están ubicadas las variables y así establecer el rango de análisis.

```
names(datos)
```

5.- El próximo paso es la generación de la matriz de correlación entre variables. Se utilizó el comando “cor”, luego se establece el data frame de donde se van a extraer los datos y el rango de análisis que son las 15 primeras columnas. Asimismo, se utilizó el comando “write.csv” para generar una tabla de correlación en formato “.csv” con los valores de los coeficientes de Spearman para todos los pares de variables (ver Figura 54)

```
correlacion <- cor (datos[,c(1:16)], method = "spearman")
write.csv (correlacion, "MatrizCorelacion.csv")
```

```
> correlacion
      altitud.asc dist_agricola1.asc dist_pob.asc dist_rio.asc
altitud.asc      1.0000000      0.5748405      0.5014378      0.21674468
dist_agricola1.asc 0.5748405      1.0000000      0.5016491      0.22933676
dist_pob.asc      0.5014378      0.5016491      1.0000000      0.10048221
dist_rio.asc      0.2167447      0.2293368      0.1004822      1.00000000
dist_vias_prin.asc 0.2854606      0.5328442      0.3427491      0.01774226
dist_vias_sec.asc  0.2921083      0.2760431      0.3359459      0.09298107
pendiente.asc     0.3727572      0.3342703      0.3400336      0.10859151
precipitacion.asc -0.5791461     -0.4702237     -0.4364226      0.09610850
      dist_vias_prin.asc dist_vias_sec.asc pendiente.asc
altitud.asc           0.28546065           0.29210834           0.3727572
dist_agricola1.asc    0.53284424           0.27604310           0.3342703
dist_pob.asc          0.34274909           0.33594586           0.3400336
dist_rio.asc          0.01774226           0.09298107           0.1085915
dist_vias_prin.asc    1.00000000           0.04336220           0.2301155
dist_vias_sec.asc     0.04336220           1.00000000           0.2630606
pendiente.asc         0.23011554           0.26306060           1.0000000
precipitacion.asc    -0.42201338           -0.34213607           -0.3894193
      precipitacion.asc
altitud.asc          -0.5791461
dist_agricola1.asc   -0.4702237
dist_pob.asc         -0.4364226
dist_rio.asc         0.0961085
dist_vias_prin.asc   -0.4220134
dist_vias_sec.asc    -0.3421361
pendiente.asc        -0.3894193
precipitacion.asc    1.0000000
```

Figura 54 Correlación en R

Como resultado se obtuvo una matriz en donde se establecen las correlaciones entre los pares de variables utilizando el coeficiente de "Spearman". García (2010), establece que dos variables se encuentran correlacionadas si el coeficiente de es superior o igual a 0,6; mientras que (Del Hoyo, 2007) describe que un coeficiente de 0,7 es suficiente para eliminar las variables correlacionadas. Para el presente caso, se ha tomado como base un coeficiente de correlación de 0,65, no se encontró ningún par de variables con un índice superior al umbral establecido por lo que no fue necesario eliminar alguna. La codificación de las variables se puede observar en el Cuadro 6 (ver Tabla 17).

Tabla 17 Matriz de correlación entre variables

	VAL	VDA	VDP	VDR	VDV	VDS	VPE	VPR
VAL	1	0.57	0.50	0.22	0.29	0.29	0.37	-0.58
VDA	0.57	1	0.50	0.23	0.53	0.28	0.33	-0.47
VDP	0.50	0.50	1	0.10	0.34	0.34	0.34	-0.44
VDR	0.22	0.23	0.10	1	0.02	0.09	0.11	0.10
VDV	0.29	0.53	0.34	0.02	1	0.04	0.23	-0.42
VDS	0.29	0.28	0.34	0.09	0.04	1	0.26	-0.34
VPE	0.37	0.33	0.34	0.11	0.23	0.26	1	-0.39
VPR	-0.58	-0.47	-0.44	0.10	-0.42	-0.34	-0.39	1

Regresión logística

Después de verificar el grado de correlación y determinar que no existe la necesidad de eliminar variables, se procedió a elaborar las regresiones logísticas para cada una de las coberturas de suelo. Para esto se utilizaron los archivos en formato ASCII generados anteriormente. Este procedimiento se efectuó para el ajuste de 8 regresiones logísticas, con el objeto de obtener los coeficientes de cada variable, que serán utilizados más adelante para elaborar imágenes de probabilidad de cambio a cada una de las 9 coberturas de suelo. Se excluyó la cobertura cuerpo de agua natural por no considerarse dinámica en el periodo de estudio.

Regresión logística en R Statistics

La regresión logística se realizó utilizando la familia de distribución “Binomial”, con el vínculo “logit”.

La secuencia de comandos utilizada en R para efectuar la regresión logística para predecir la presencia o ausencia de la variable dependiente vegetación arbustiva fue la siguiente:

1.- Se selecciona la carpeta de trabajo en donde se encuentran todos los datos en formato “.asc”.

2.- Se carga el archivo de datos que contiene toda la información de las variables independientes. Se utiliza el comando “read.table” y se le asigna a la variable datos. Además se establece si contiene un encabezado y cuál es la separación decimal y separación entre datos.

```
datos <- read.table ("salida.txt", header = T, sep = " ", dec = ".")
```

3.- Con el comando “str” se despliega toda la información correspondiente al “dataframe” cargado; asimismo, con el comando “summary”, se puede obtener un resumen estadístico con datos como: media mediana, valor máximo, mínimo, primer cuartil, entre otros. Para el presente análisis a diferencia del anterior, se incluyó la variable dependiente (ver Figura 55).

```
str(datos)  
summary(datos)
```

```

> str(datos)
'data.frame':  3076172 obs. of  11 variables:
 $ altitud.asc      : num  -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 ...
 $ arbustiva.asc    : int   -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 ...
 $ dist_agricolal.asc: num   -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 ...
 $ dist_pob.asc     : num   -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 ...
 $ dist_rio.asc     : num   -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 ...
 $ dist_viasprin.asc: num   -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 ...
 $ dist_viassec.asc : num   -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 ...
 $ pendiente.asc    : num   -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 ...
 $ precipitacion.asc: num   -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 ...
 $ x                : num  696801 696809 696817 696825 696833 ...
 $ y                : num  9796040 9796040 9796040 9796040 9796040 ...

```

Figura 55 Datos cargados a R

4.- Una vez que se ha comprobado la correcta carga de los datos al programa, se procede a desplegar la información que contiene la variable dependiente, en este caso, vegetación arbustiva. Se utiliza el comando “table”, el “dataframe” en este caso datos y el símbolo “\$” para seleccionar la columna de la cual se desea desplegar su información. Se observa que a más de valores de 0 y 1 existe un valor de -9999 (no data) (ver Tabla 18).

```
table(datos$arbustiva.asc)
```

Tabla 18 Datos presentes en la variable arbustiva

-9999	0	1
1393354	1603185	79633

5.- El requisito elemental en la regresión logística binaria es la existencia de valores que demuestren presencia o ausencia de la cobertura a predecir es decir 0 o 1; en este caso se tienen valores de -9999 que representan zonas sin información, estos valores de variable independiente y dependiente deben ser transformados a 0. Para lograrlo, se utilizó el comando “replace” que reemplaza caracteres y valores. Se genera una nueva variable asignada a *datosreplace*.

```
datosreplace <- replace(datos,datos=="-9999",0)
```

6.- Ya ejecutado el comando se produce el reemplazo, posteriormente se utilizó el comando “table” para comprobar que se hayan asignado correctamente los valores (ver Tabla 19)

Tabla 19 Valores después de la asignación

0	1
2996539	79633

7.- La regresión logística se realizó con una muestra del 10% de los valores de 0 y 10% de valores de 1 de la variable dependiente. Para lograrlo, se realizó un muestreo estratificado. En primer lugar se descargó el paquete “sampling” en donde se encuentra el comando a implementar “strata”. Se selecciona el “dataframe” que contiene la información a muestrear (datosreplac) y la columna herbacea; a continuación, se ingresa el tamaño de las muestras. Se seleccionó un 10 % por lo que se le indicó al programa que tome 299653 valores de 0 y 7963 valores de 1. El método de muestreo elegido fue “srswor” que ejecuta un muestreo estratificado simple aleatorio sin reemplazo, que es lo que se requiere en el análisis.

```
local({pkg <- select.list(sort(.packages(all.available =
TRUE)),graphics=TRUE)
if(nchar(pkg)) library(pkg, character.only=TRUE)})
datosmuestra <- strata (datosreplac,c("arbustiva.asc"),size
=c(300693,6923), method = "srswor")
```

8.- Con el comando “str” se verifica que se haya realizado el muestreo correctamente, el siguiente paso es utilizar el nuevo vector con las muestras seleccionadas de herbácea para extraer en la misma posición los valores de las variables independientes. Se utilizó el comando “getdata” para asignar a un nuevo dataframe los valores de todas las viables dependientes e independientes. Se observó que se realizó correctamente al verificar que el

total de datos muestreados corresponde al 10% de los datos totales (ver Figura 56)

```
str(datosmuestra)
datoslog<-getdata(datosreplac, datosmuestra)
str(datoslog)
```

```
> str(datosmuestra)
'data.frame': 307616 obs. of 4 variables:
 $ arbustiva.asc: num 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...
 $ ID_unit      : int 5 6 13 14 15 16 27 42 61 69 ...
 $ Prob        : num 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 ...
 $ Stratum     : int 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 ...
> summary(datosmuestra)
arbustiva.asc      ID_unit      Prob      Stratum
Min. :0.00000    Min. :      5    Min. :0.1    Min. :1.000
1st Qu.:0.00000   1st Qu.: 769328  1st Qu.:0.1  1st Qu.:1.000
Median :0.00000   Median :1536576  Median :0.1  Median :1.000
Mean   :0.02589   Mean  :1537906   Mean  :0.1   Mean  :1.026
3rd Qu.:0.00000   3rd Qu.:2306772  3rd Qu.:0.1  3rd Qu.:1.000
Max.   :1.00000   Max.  :3076167   Max.  :0.1   Max.  :2.000
> datoslog<-getdata(datosreplac, datosmuestra)
> str(datoslog)
'data.frame': 307616 obs. of 14 variables:
 $ altitud.asc      : num 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...
 $ dist_agricolal.asc: num 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...
 $ dist_pob.asc     : num 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...
 $ dist_rio.asc     : num 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...
 $ dist_viasprin.asc: num 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...
 $ dist_viassec.asc : num 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...
 $ pendiente.asc    : num 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...
 $ precipitacion.asc: num 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...
 $ x                : num 6968833 6968841 6968897 696905 696913 ...
 $ y                : num 9796040 9796040 9796040 9796040 9796040 ...
 $ arbustiva.asc    : num 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...
 $ ID_unit          : int 5 6 13 14 15 16 27 42 61 69 ...
 $ Prob             : num 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 ...
 $ Stratum          : int 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 ...
```

Figura 56 Muestreo estratificado simple en R

Fuente: Elaboración propia

9.- Una vez que se tiene la información preparada se procede a ajustar la regresión logística. Para empezar fue necesario determinar con que nombres se encuentran almacenados las variables, es así que se utilizó el comando “names” para imprimir los encabezados de las columnas. Para elaborar la regresión logística se utilizó el comando “glm”. El comando requiere la siguiente información: la fórmula que establece qué variables van a ingresar en la regresión, la variable dependiente o respuesta seguida del símbolo “~” y a continuación cada variable independiente separadas con el signo “+”. Posteriormente se define la familia que es una descripción de la

distribución de los residuales y la función del vínculo que se usará en el modelo; para el caso de estudio, familia "binomial" y link "logit". Finalmente se imprime el resumen de la regresión en donde se encuentran los coeficientes con sus respectivos análisis estadísticos (ver Figura 57).

```
names(datoslog)
reglog <-
glm(as.factor(arbustiva.asc)~altitud.asc+dist_agricola1.asc+dist_pob.asc+dis
t_rio.asc+dist_viasprin.asc+dist_viassec.asc+pendiente.asc+precipitacion.as
c,family="binomial",data=datoslog)
```

```
Call:
glm(formula = as.factor(arbustiva.asc) ~ altitud.asc + dist_agricola1.asc +
  dist_pob.asc + dist_rio.asc + dist_viasprin.asc + dist_viassec.asc +
  pendiente.asc + precipitacion.asc, family = "binomial", data = datoslog)

Deviance Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.6974  -0.2802  -0.1391  -0.0422   3.8498

Coefficients:
            Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)  -7.023e+00  8.366e-02 -83.951 < 2e-16 ***
altitud.asc    2.005e-03  3.534e-05  56.746 < 2e-16 ***
dist_agricola1.asc -5.136e-04  4.040e-05 -12.714 < 2e-16 ***
dist_pob.asc   -1.898e-04  2.623e-05  -7.235 4.65e-13 ***
dist_rio.asc    5.389e-04  2.713e-05  19.863 < 2e-16 ***
dist_viasprin.asc  1.375e-04  9.164e-06  15.007 < 2e-16 ***
dist_viassec.asc -2.856e-04  2.573e-05 -11.100 < 2e-16 ***
pendiente.asc   8.452e-03  6.103e-04  13.848 < 2e-16 ***
precipitacion.asc  1.350e-04  6.057e-05   2.228  0.0259 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Figura 57 Resultados de la regresión logística

10.- El resumen de la regresión imprime varios indicadores estadísticos de la bondad de ajuste del modelo. Se utilizó el p-valor para evaluar las significancia de cada variable ingresada. En este caso se observa que las variables independientes: altitud, distancia áreas agrícolas, distancia a poblados, distancia a ríos, distancia a vías principales, distancia a vías secundarias y pendiente tienen una alta significancia; es decir, su p-valor es menor que el nivel de significancia establecido, por lo que se rechaza la hipótesis nula de que el valor del coeficiente es cero. Las variables que demostraron un mayor grado de explicación de la variable dependiente fueron utilizadas posteriormente en una nueva regresión logística. Para esto,

se volvió a utilizar el comando “glm” pero con la diferencia de que se eliminaron las variables poco significativas (ver Figura 58).

```
Call:
glm(formula = as.factor(arbustiva.asc) ~ altitud.asc + dist_agricolal.asc +
  dist_pob.asc + dist_rio.asc + dist_viasprin.asc + dist_viassec.asc +
  pendiente.asc, family = "binomial", data = datoslog)

Deviance Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.7058 -0.2788 -0.1358 -0.0450  3.8251

Coefficients:
              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)  -6.895e+00  5.739e-02 -120.145 < 2e-16 ***
altitud.asc    2.031e-03  3.313e-05   61.313 < 2e-16 ***
dist_agricolal.asc -5.483e-04  3.732e-05 -14.693 < 2e-16 ***
dist_pob.asc   -1.848e-04  2.613e-05  -7.073 1.52e-12 ***
dist_rio.asc    5.628e-04  2.502e-05   22.489 < 2e-16 ***
dist_viasprin.asc  1.419e-04  8.941e-06   15.868 < 2e-16 ***
dist_viassec.asc -2.999e-04  2.491e-05 -12.041 < 2e-16 ***
pendiente.asc   8.545e-03  6.082e-04   14.049 < 2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Figura 58 Resumen de segunda regresión logística

11.- Finalmente se imprimen los coeficientes de la regresión logística, los cuales serán utilizados para la generación de los mapas de probabilidad de cambio a cada una de las coberturas de suelo.

Generación de imágenes de probabilidad de cambio

Con los coeficientes de regresión logística obtenidos anteriormente es posible generar mapas de probabilidad de cambio, utilizando las imágenes en formato raster de cada variable en análisis. Para esto se utilizó la herramienta de modelación matemática “Image calculator”.

Las imágenes de probabilidad fueron generadas utilizando la Ecuación 7 que describe la función de distribución logística (ver Figura 59).

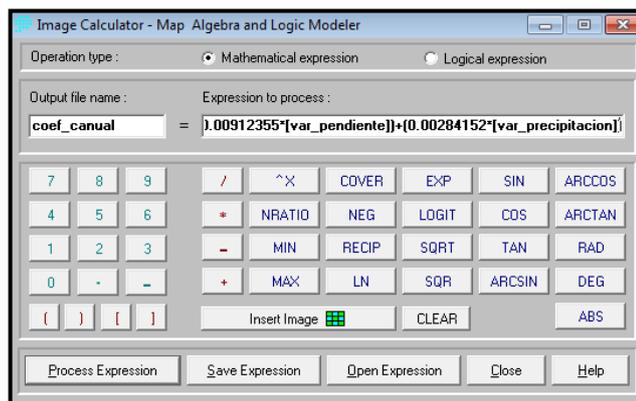


Figura 59 Generación de imágenes de probabilidad en Image calculator

Como resultado se obtiene una imagen en formato raster que describe la probabilidad de cada pixel de cambiar a la cobertura de suelo estudiada; en este caso probabilidad de cambiar a cultivo anual (variable dependiente). Se generaron en total 8 imágenes de probabilidad de cambio para cada cobertura de suelo (ver Figura 60).

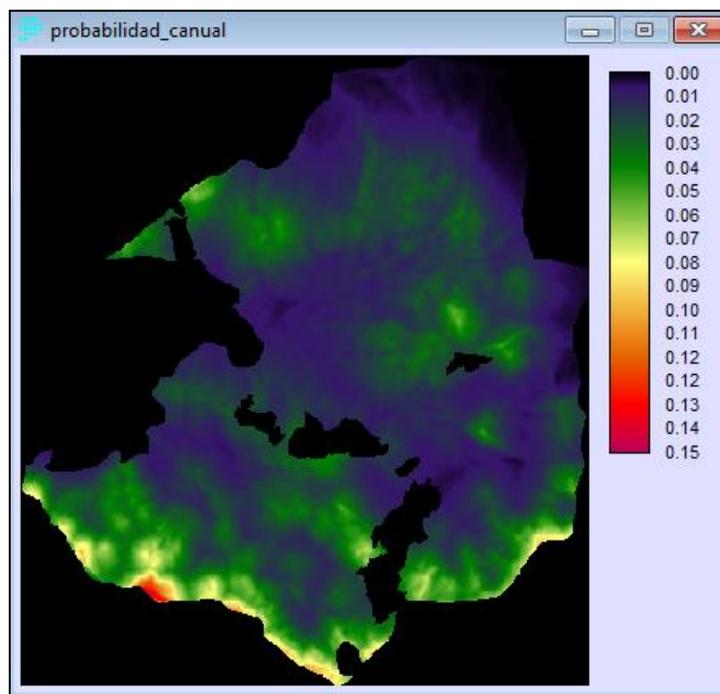


Figura 60 Probabilidad de cambio a cultivo anual

Finalmente mediante la herramienta “Collection Editor” de Idrisi las variables explicativas fueron almacenadas en un “raster group”, que se utiliza para facilitar el ingreso de datos en varios módulos analíticos, en este caso el módulo Ca_Markov. Las imágenes de probabilidad de cambio deben estar organizadas en el mismo orden que las clases de cobertura de suelo. Este es uno de los insumos para la calibración del modelo de autómatas celulares (ver Figura 61).

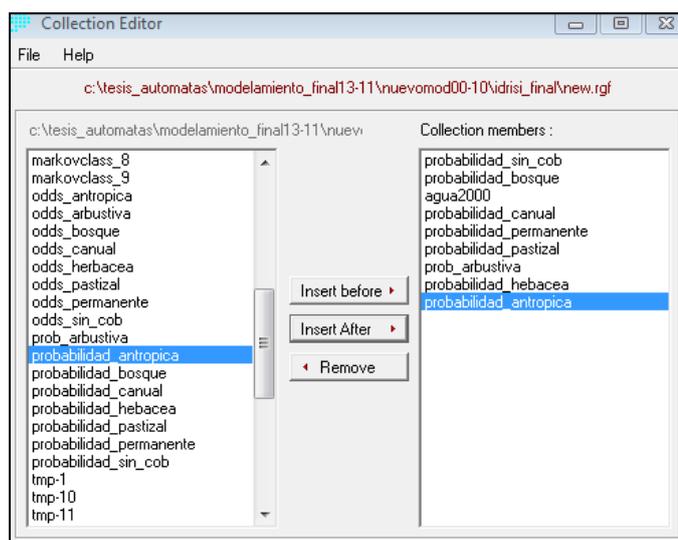


Figura 61 Creación de raster group de variables explicativas

Análisis de Markov

Para ejecutar dicho proceso se requiere ingresar dos imágenes cualitativas de cobertura de suelo de diferentes fechas. Deben contener el mismo número de categorías y la codificación debe estar sincronizada; por ejemplo, la cobertura bosque en la imagen 1 esta codificada con el número 3, de igual manera en la imagen dos la misma cobertura debe estar codificada con el número 3. Además se debe ingresar el prefijo con el que se van a generar las imágenes de probabilidad condicional, luego el número de periodos de tiempo entre la primera y segunda imagen y también el periodo de tiempo que se quiere proyectar, finalmente el tratamiento que se le va a dar a las áreas de fondo sin información (ver Figura 62).

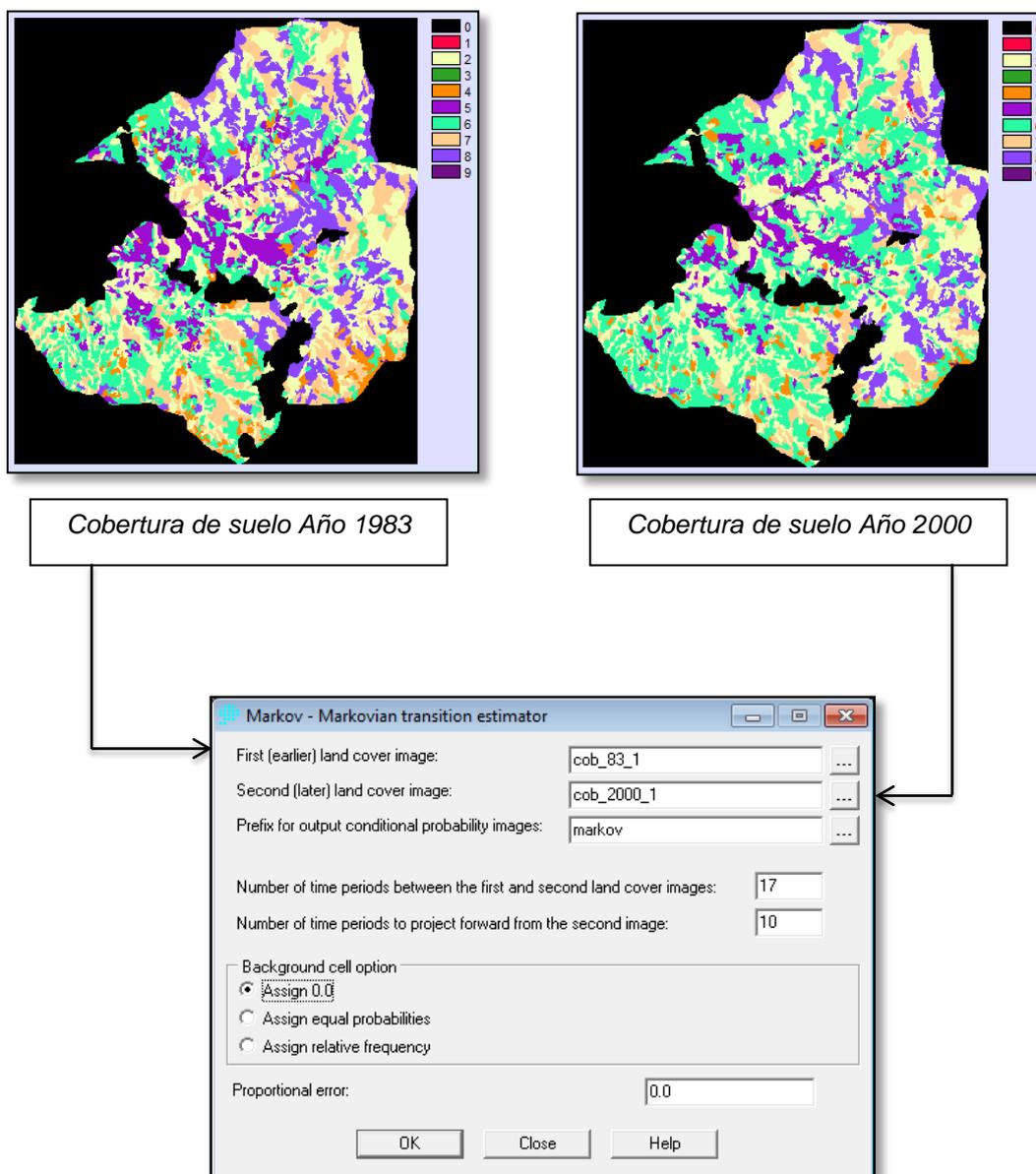


Figura 62 Módulo Markov de Idrisi

En la ejecución del presente análisis se ingresó la imagen de cobertura del suelo del año 1983 y la cobertura de suelo del año 2000, con un periodo de tiempo de 17 años y 10 años de proyección a futuro, además se asignó un valor de 0 al fondo sin información. El producto obtenido son las áreas de transición de Markov, que fueron utilizadas posteriormente en la fase de simulación.

3.10.2. Simulación año 2010 con autómatas celulares

La fase de simulación se alimenta de los siguientes insumos: Cobertura del suelo base, desde donde se va a efectuar la proyección, las áreas de Markov generadas en el proceso anterior y la colección de mapas de probabilidad de cambio obtenidos de las regresiones logísticas. El producto generado es un mapa simulado de cobertura de suelo. La simulación se desarrolló siguiendo este procedimiento (ver Figura 63 y Figura 64)

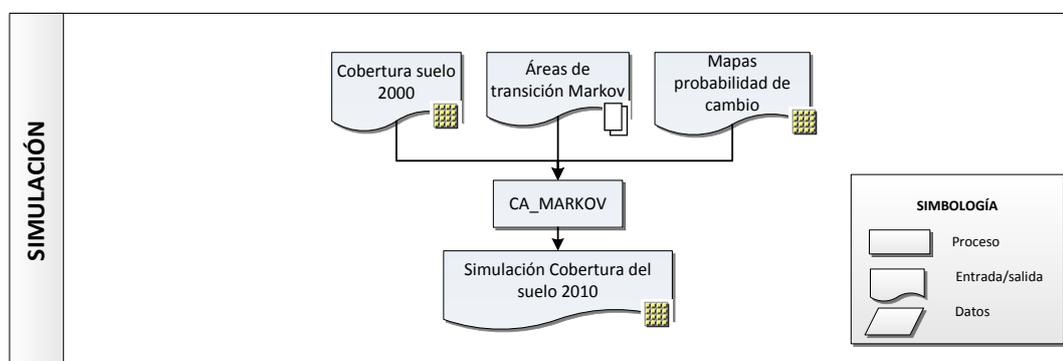


Figura 63 Simulación con autómatas celulares

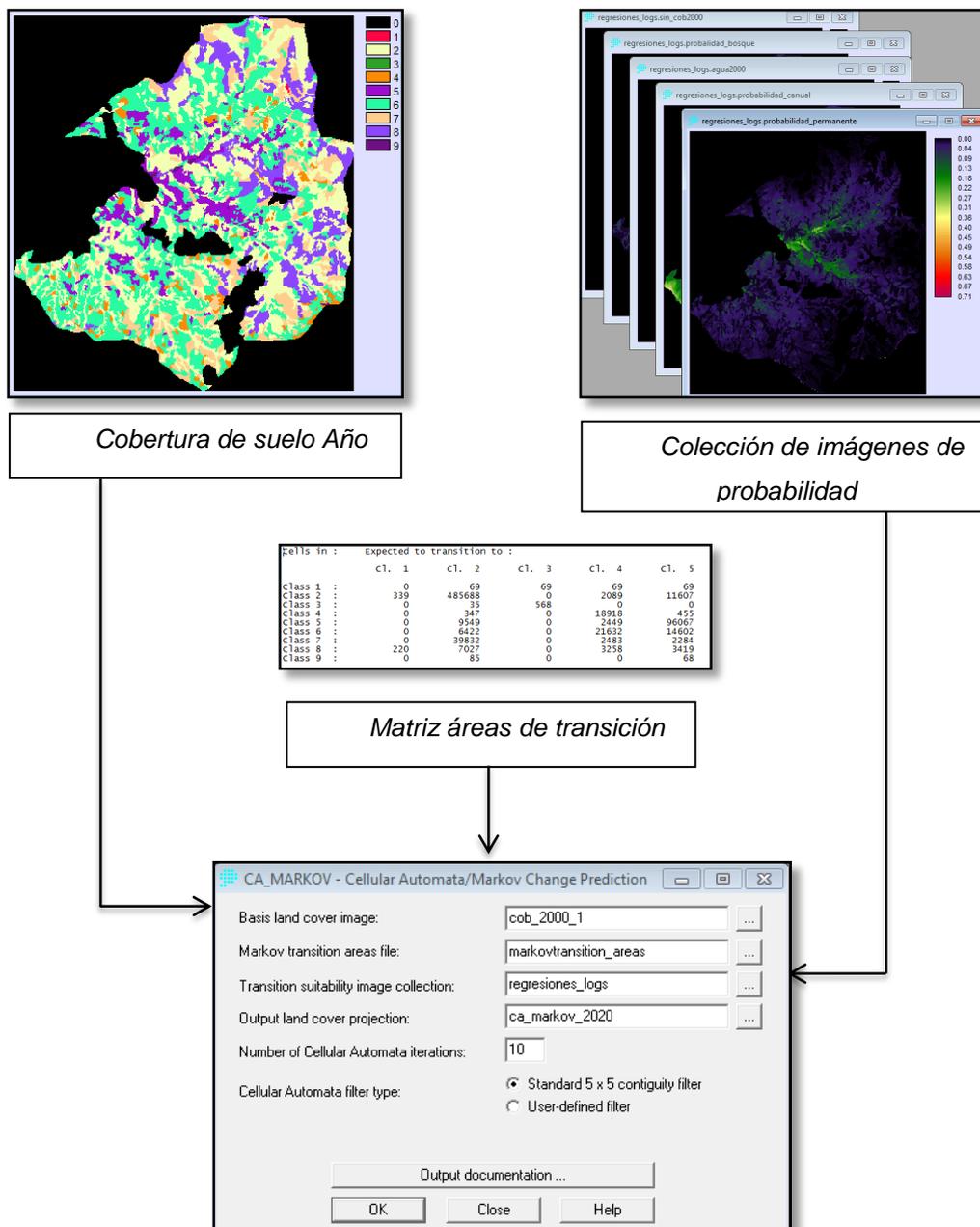


Figura 64 Módulo CA_MARKOV de Idrisi

Después de realizar las operaciones descritas, se obtuvo una imagen simulada al año 2010 en formato raster que representa la localización espacial y las áreas de las clases de cobertura de suelo. Esta imagen posteriormente será comparada con una imagen real para determinar el grado de ajuste a la realidad, este proceso se denomina validación.

3.10.3. Validación de modelo de autómatas celulares

Antes de elaborar la simulación de cobertura de suelo para el año 2020, fue necesario evaluar la confiabilidad del modelo de autómatas celulares y su interacción con las variables explicativas. Para esto se evaluó el error en la cantidad y localización de los píxeles en el mapa simulado y la realidad. En consecuencia se desarrolló un primer modelo en donde se utilizaron las coberturas de suelo de los años 1983 y 2000 para simular al año 2010, y posteriormente comparar con la imagen observada de cobertura de suelo 2010; por lo tanto la validación se efectuó mediante la comparación entre la imagen correspondiente a la simulación de cobertura de suelo del año 2010 y la imagen observada de cobertura de suelo del año 2010 (ver Figura 65).

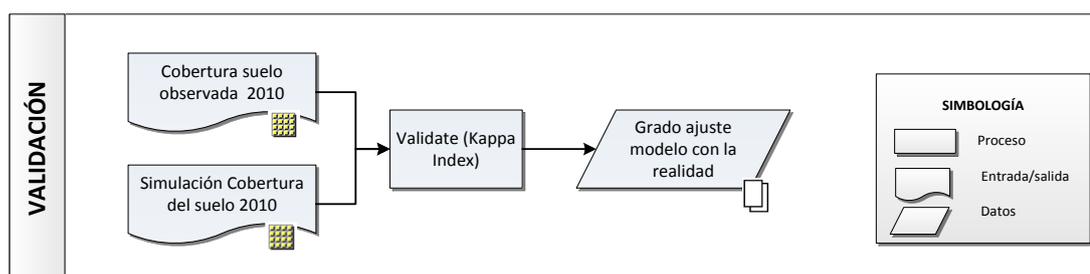


Figura 65 Proceso de validación de la cobertura simulada vs cobertura observada

En el proceso de validación se ingresó en primer lugar la imagen que contiene la simulación para el año 2010 y la imagen observada o de referencia del mismo año, no se utilizó ninguna máscara para discriminar un área específica de análisis. Finalizado el proceso, el sistema genera un informe donde se evidencian los índices kappa de ajuste (ver Figura 66 y Figura 86).

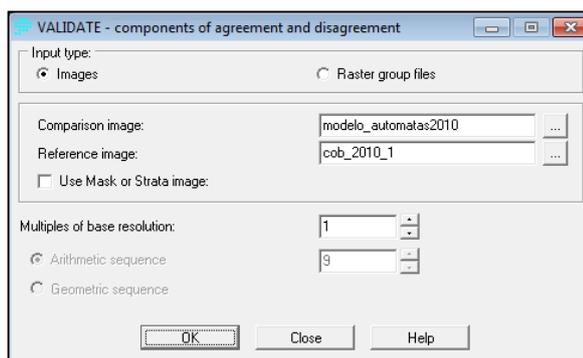


Figura 66 Modulo VALIDATION en Idrisi

Finalmente se obtuvo un mapa simulado de cobertura de suelo para el año 2010, después de comprobar que el ajuste fue bueno, se procedió a generar la siguiente simulación para el año 2020, siguiendo el mismo procedimiento descrito, para lo que se tomó como base las coberturas de los años 2000 y 2010.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos una vez aplicada la metodología antes descrita, se plantea el análisis de los cambios espacio temporales del uso y cobertura de suelo de los tres periodos de análisis; las tasas de cambio entre coberturas, el análisis de las variables explicativas, su grado de influencia en las modificaciones y finalmente se analiza el modelo generado utilizando autómatas celulares.

4.1. Mapas de cobertura y uso del suelo

Es necesario distinguir que existe una diferencia significativa entre uso y cobertura. Como se mencionó anteriormente el uso corresponde a la utilidad que el ser humano le da a las diferentes coberturas de suelo; por ende, varias clases pueden ser utilizadas de la misma forma.

En consecuencia, analizando el territorio, mediante observación en campo e investigando la literatura se infirió en los usos que el hombre le da al suelo en el área de estudio. En primer lugar se evidenció la existencia de grandes áreas agrícolas compuestas por una serie de cultivos anuales y permanentes, entre ellos: café, banano, caña de azúcar, maíz, mora, naranja, orito, plátano, entre otros, cultivados mayoritariamente en zonas comunes lo que se denomina mosaicos agropecuarios; en este caso, el uso que el hombre le da al suelo es agrícola, por lo que se han incluido las clases cultivo anual y cultivo permanente dentro del uso agrícola. Por otra parte, la ganadería es una de las principales fuentes de subsistencia de la población local, es así que grandes áreas que en principio se encontraban cubiertas con vegetación natural se han modificado para este fin. Los pastizales se componen de vegetación herbácea dominada por especies de gramíneas y leguminosas que requieren de labores de cultivo y manejo; por

esta razón, se ha determinado que los pastizales tienen un uso pecuario (Ministerio del Ambiente, 2012).

El río Cristal cruza longitudinalmente el área poblada de Balsapamba, el cual ha incentivado a la población a desarrollar actividades turísticas. Se ha evidenciado mediante observación en campo la presencia de una serie de áreas recreativas en las riveras del Cristal, donde los habitantes aprovechan el caudal del río para beneficiarse y obtener ganancias; por este motivo, el uso de suelo para el cuerpo de agua natural se determinó como recreativo. El uso de suelo corresponde a las actividades que desarrolla el hombre sobre el territorio, es así que al analizar la bibliografía se definió a las coberturas naturales (bosque, vegetación arbustiva y vegetación herbácea) como tierras sin uso alguno. El bosque, podría ser utilizado para fines de recreación; sin embargo, la fisiografía irregular del territorio y la difícil accesibilidad no ha permitido que desarrollen estas actividades. Además, las áreas sin cobertura vegetal fueron incluidas en esta categoría de uso de suelo debido a que son áreas erosionadas y localizadas en zonas de fuertes pendientes lo que no ha permitido al hombre aprovecharse de esta. Utilizando este criterio las coberturas de suelo y sus respectivos usos de suelo se asociaron de la siguiente manera: (ver Cuadro 5).

Cuadro 5 Uso de suelo y sus coberturas de suelo

Uso de suelo	Cobertura de suelo
Agrícola	Cultivo Permanente
	Cultivo Anual
Pecuario	Pastizal
Recreación	Cuerpo de agua natural
Residencial Rural	Área poblada
Sin uso	Bosque
	Vegetación Arbustiva
	Vegetación Herbácea
	Área sin cobertura vegetal

Al final, se generó un mapa para cada periodo de análisis en donde se expone la distribución espacial de los usos y cobertura del suelo (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

4.2. Codificación uso/coberturas de suelo y variables explicativas

A fin de facilitar la visualización y presentación de los resultados en las tablas, se codificaron las coberturas de suelo y las variables explicativas empleadas en el modelamiento (ver Cuadro 6).

Cuadro 6 Codificación de coberturas de suelo y variables explicativas utilizadas en el modelamiento

Cobertura	Código	Uso	Código	Variable	Código
Bosque	BN	Agrícola	AGR	Altitud	VAL
Cultivo Anual	CA	Pecuario	PEC	Pendiente	VPE
Cultivo Permanente	CP	Recreación	REC	Distancia a poblados	VDP
Pastizal	PS	Residencial rural	RES	Distancia ríos	VDR
Vegetación Arbustiva	VA	Sin uso	SIN	Distancia a vías principales	VDV
Vegetación Herbácea	VH			Distancia a vías secundarias	VDS
Cuerpo de agua natural	AG			Distancia a áreas agrícolas	VDA
Área poblada	AP			Precipitación	VPR
Área sin cobertura vegetal	SC				

4.3. Análisis de los cambios de uso/cobertura de suelo período 1983-2000

Las superficies existentes en cada clase de uso/cobertura y la cantidad de cambio en Hectáreas, se presenta en la Tabla 20.

Tabla 20 Superficie y porcentaje por tipo de uso y cobertura de suelo periodo 1983-2000

Áreas de uso y cobertura de suelo						
Uso de suelo	Cobertura de suelo	Año 1983		Año 2000		Cambio (Ha)
		(Ha)	(%)	(Ha)	(%)	
Agrícola		1568.7	14.6	1233.2	11.5	-335.5
	CP	1151.2	10.7	905.6	8.4	-245.6
	CA	417.5	3.9	327.6	3.0	-89.9
Pecuario		2251.2	20.9	3566.6	33.1	1315.4
	PS	2251.2	20.9	3566.6	33.1	1315.4
Recreación		4.4	0.0	3.9	0.0	-0.5
	AG	4.4	0.0	3.9	0.0	-0.5
Residencial rural		8.3	0.1	20.8	0.2	12.4
	AP	8.3	0.1	20.8	0.2	12.4
Sin uso		6937.4	64.4	5945.6	55.2	-991.8
	BN	3389.9	31.5	3528.8	32.8	138.9
	VH	1755.7	16.3	1206.6	11.2	-549.1
	VA	1791.8	16.6	1206.7	11.2	-585.1
	SC	0.0	0.0	3.5	0.0	3.5
Total uso		10770.0	100.0	10770.0	100.0	
	Total cobertura	10770.0	100.0	10770.0	100.0	

El uso del suelo ha sufrido cambios significativos durante el periodo de análisis, provocados completamente por la actividad antrópica que se ha desarrollado en los últimos años. En el año 1983 del total del área de estudio se observa que el 64% se encontraba sin uso alguno, el 20% del área se utilizaba para actividades pecuarias, mientras que un 14% para actividades agrícolas, solamente el 0.1% de área se hallaba con uso residencial rural. Por otra parte, en el año 2000 se determinó que en el 55% de la superficie no se desarrollaba actividad antrópica alguna, el uso pecuario especialmente para alimentación de especies ganaderas ocupaba el 33%, mientras que el 11% del suelo se utilizaba para el desarrollo de actividades agrícolas. El uso residencial rural todavía en menor proporción ocupaba el 0,2% de la superficie analizada (ver Figura 67).

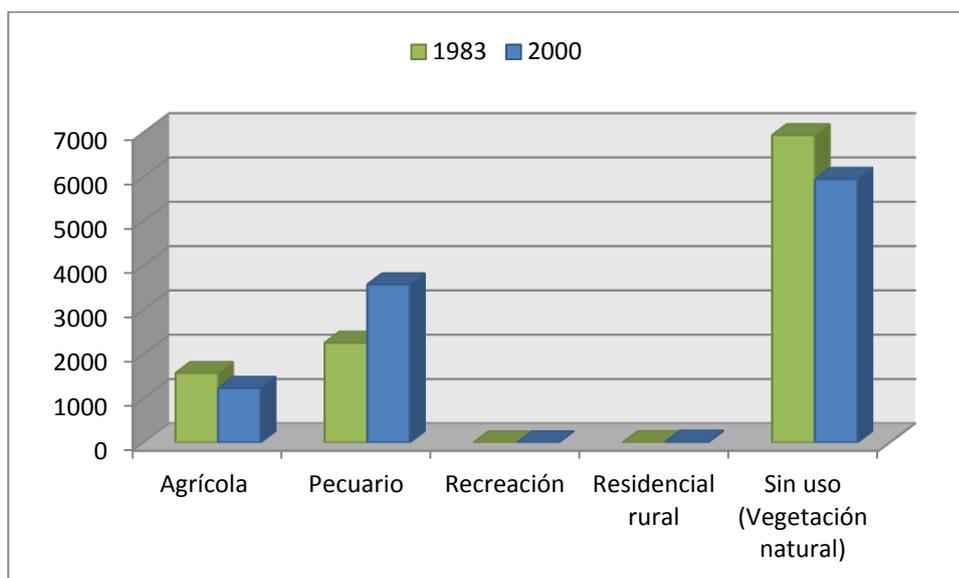


Figura 67 Variaciones en los usos de suelo periodo 1983-2000

Tabla 21 Matriz de áreas de transición entre usos de suelo 1983-2000

		Uso de suelo año 2000					
		AGR	PEC	REC	RES	SIN	Total
Uso de suelo año 1983	AGR	778.1	556.8	0.0	6.1	227.6	1568.7
	PEC	178.1	1859.5	0.0	4.1	209.6	2251.2
	REC	0.0	0.0	3.9	0.0	0.5	4.4
	RES	0.3	0.0	0.0	7.7	0.4	8.3
	SIN	276.7	1150.3	0.0	2.9	5507.4	6937.4
	Total	1233.2	3566.6	3.9	20.8	5945.6	10770.0

Analizando los cambios ocurridos en el sector durante el primer periodo estudio de 17 años (ver Tabla 20), se evidenció que las coberturas utilizadas para fines pecuarios son las que más cambiaron con un incremento de 1315 Ha., lo que se materializa en una ampliación de 12% del área total ocupada en el año 1983; además, se determinó que el hombre intervino en 991 Ha de coberturas que no se utilizaban para fines antrópicos de los cuales 49 Ha. pasaron a formar parte de superficies para uso agrícola y 941 Ha. a uso pecuario.

En las décadas de los años 70 y 80, la producción agropecuaria en el Ecuador sufrió una serie de transformaciones radicales, en donde se observaron una serie de tendencias importantes entre las que se tiene que el área de producción de alimentos básicos para el mercado interno disminuyó entre 1970 y 1989, la cual decreció en 345000 toneladas. Mientras que las áreas dedicadas a pastos casi se duplicó en este periodo, cambio relacionado al decremento del área que antes se dedicaba a la producción de alimentos básicos, a favor del aumento de zonas para la producción de leche y carne y sus derivados (Waters, 2000).

La demanda de productos de calidad y de mayor valor nutricional ha incentivado a los productores locales a incrementar la producción pecuaria a nivel nacional, la misma que en los años 80 se concentra en explotaciones de 10 a 500Ha., dedicadas por completo a la actividad lechera en forma intensiva, casi sin preocuparse por la actividad agrícola. En respuesta a esta demanda se han visto obligados a consumir la vegetación natural y convertirla en pastizales destinados para la alimentación del ganado (FLACSO, 1980). Por lo tanto, se observa un incremento substancial en las áreas destinadas al uso pecuario, alimentadas por zonas antes destinadas a la agricultura, que se han abandonado por la disminución en la productividad provocada por la pérdida de la carga de nutrientes en los suelos por malas prácticas agrícolas.

En términos de cobertura de suelo para el año 1983 se observó una gran dominancia del bosque, el cual presenta una cobertura del 31% de la superficie, los pastizales se encuentran en un 20%, las áreas de vegetación arbustiva y herbácea para este año representan el 16% de la superficie cada una (ver Figura 68 y Figura 69).

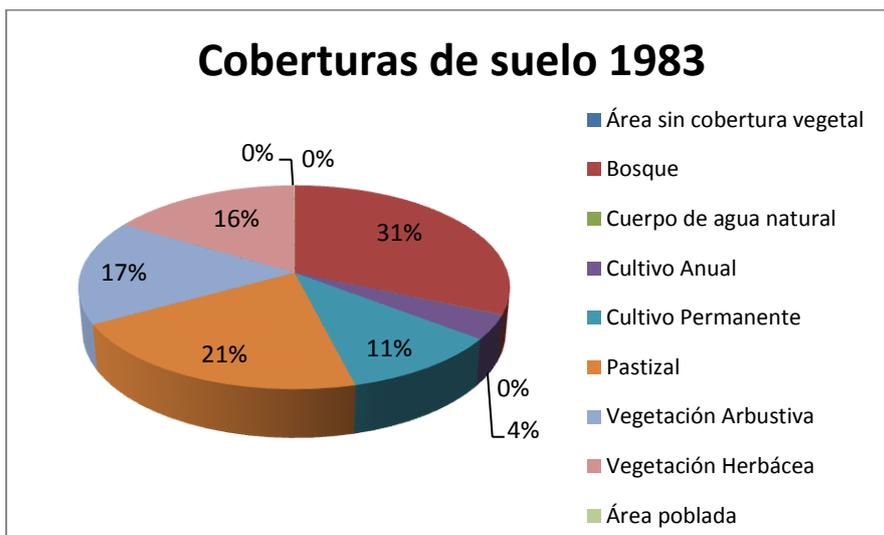


Figura 68 Porcentaje de coberturas de suelo 1983

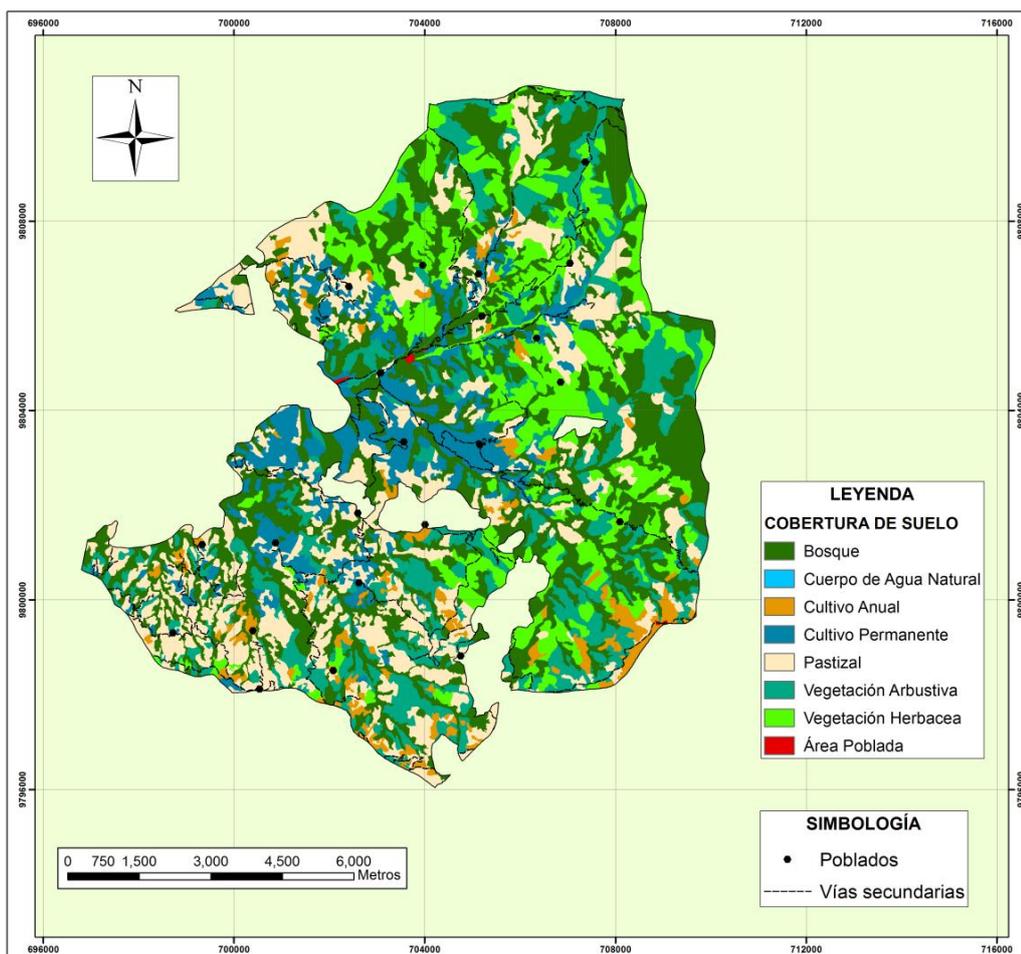


Figura 69 Cobertura de suelo año 1983

Respecto al año 2000, tomando en cuenta las coberturas interpretadas en cada clase, se obtuvo que la superficie que cubre mayoritariamente la porción de la microcuenca analizada para esta época es el pastizal con 33%, seguido muy de cerca por el bosque con 32%; además, la vegetación herbácea y arbustiva se hallaba en el 11% de la superficie cada una, mientras que los cultivos permanentes cercanos en su mayoría a la población de Balsapamba se desarrollaban en 8% del suelo, los cultivos anuales esparcidos en mayor proporción en los límites de la microcuenca ocupan solo el 3% (ver Figura 70)

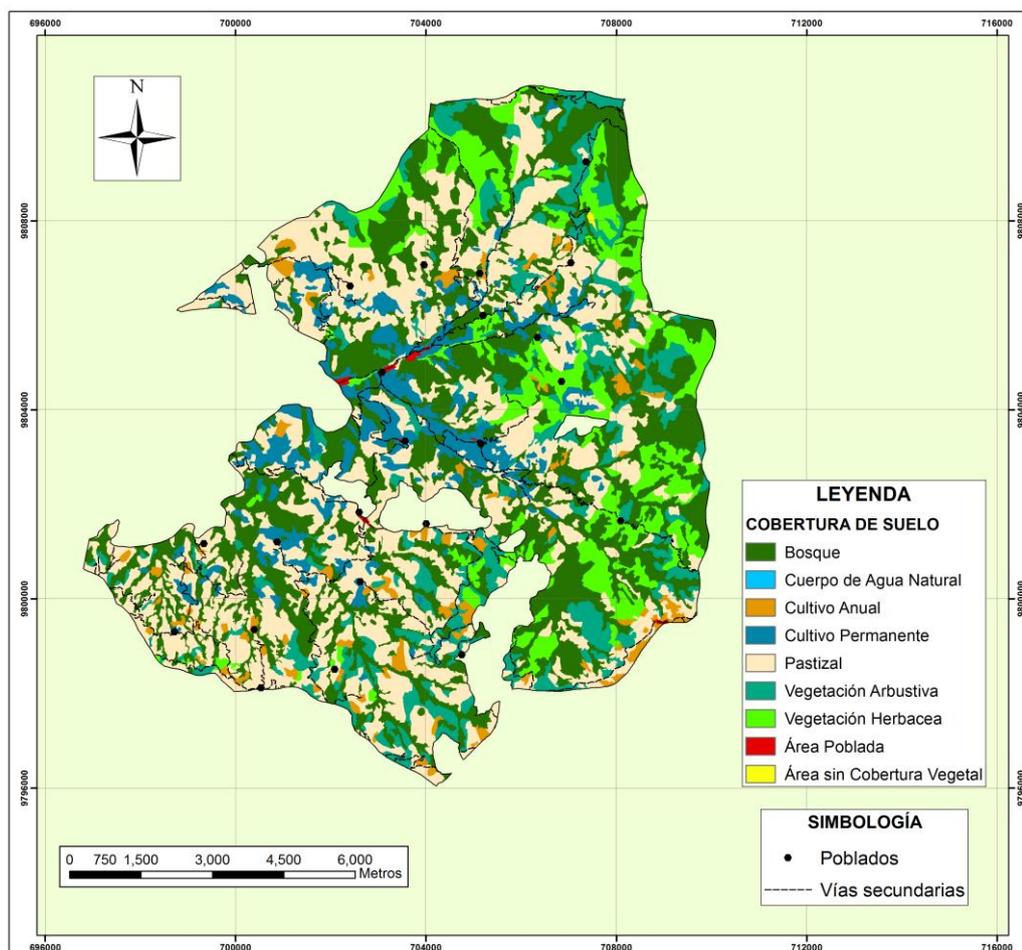


Figura 70 Cobertura de suelo año 2000

En la Tabla 20 se describen las áreas de cobertura de suelo y sus correspondientes cambios producidos en un periodo de 17 años. El cambio más representativo observado es el incremento de áreas de pastizales en 1315 Ha., provenientes principalmente de vegetación herbácea, arbustiva, bosque, cultivos anuales y permanentes; de manera que, todas las coberturas naturales cedieron superficie en más de 200 Ha. al pastizal, lo que explica su acelerado crecimiento (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y ver Figura 71)

Tabla 22 Tasa de cambio de cobertura de suelo entre 1983 y 2020

Cobertura	Tasa de cambio (%)		
	Periodo 1983-2000	Periodo 2000-2010	Periodo 2010-2020
Área sin cobertura vegetal	0	14.07	-0.15
Bosque	0.24	-0.53	-0.80
Cuerpo de agua natural	-0.72	0	0
Cultivo Anual	-1.42	-9.68	-3.35
Cultivo Permanente	-1.40	-2.33	-1.54
Pastizal	2.74	3.78	1.57
Vegetación Arbustiva	-2.30	-6.08	-4.27
Vegetación Herbácea	-2.18	-4.89	-4.18
Área poblada	5.52	2.26	1.69

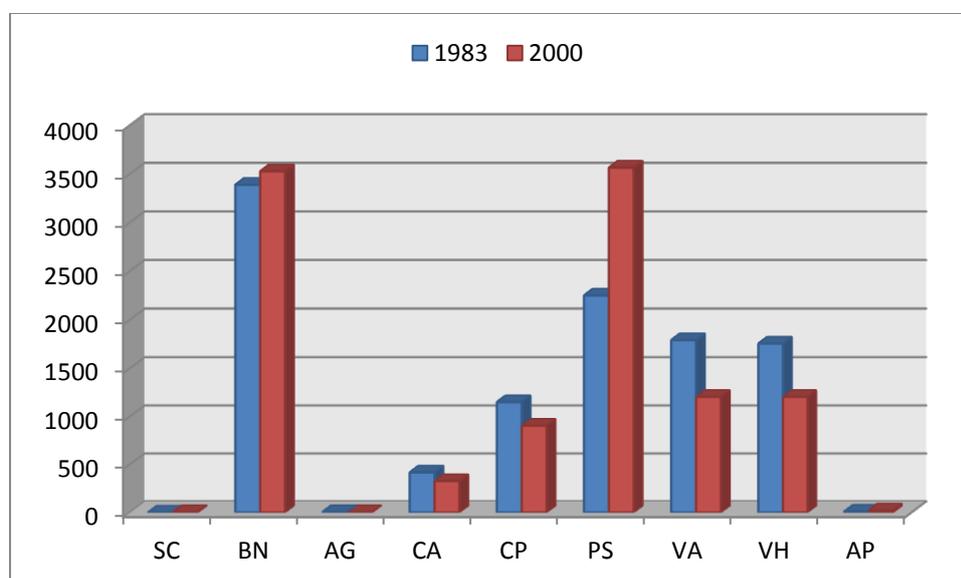


Figura 71 Variaciones en las coberturas de suelo periodo 1983-2000

La Tabla 22 presenta que el pastizal creció a una tasa del 2.7% anual durante el periodo 1983-2000, mientras que la vegetación arbustiva y herbácea se perdió a una tasa anual de 2.3% y 2.2% respectivamente. Además de la pérdida de vegetación natural (arbustiva y herbácea) se determinó que existió una recuperación del bosque; es decir, más ganancias que pérdidas, principalmente proveniente de 460 Ha. de vegetación arbustiva que cambiaron a bosque, mientras que la pérdida de bosque más importante fue hacia pastizal con 236 Ha. Asimismo, se evidenció una tendencia a la disminución de áreas agrícolas compuestas por coberturas de cultivo anual y permanente con 90 y 245 Ha. respectivamente, las cuales pasaron a convertirse en zonas de pastizal representando en total 178 Ha de pérdidas de cultivos, con una tasa de pérdida de cultivos anuales de 1.42% y permanentes de 1,40% (ver Figura 72) La presencia de áreas pobladas se duplicó en este periodo, incrementándose en 12 Ha. principalmente en zonas donde ya se encontraban asentamientos humanos y en menor proporción en zonas aledañas a la carretera San Miguel-Montalvo.

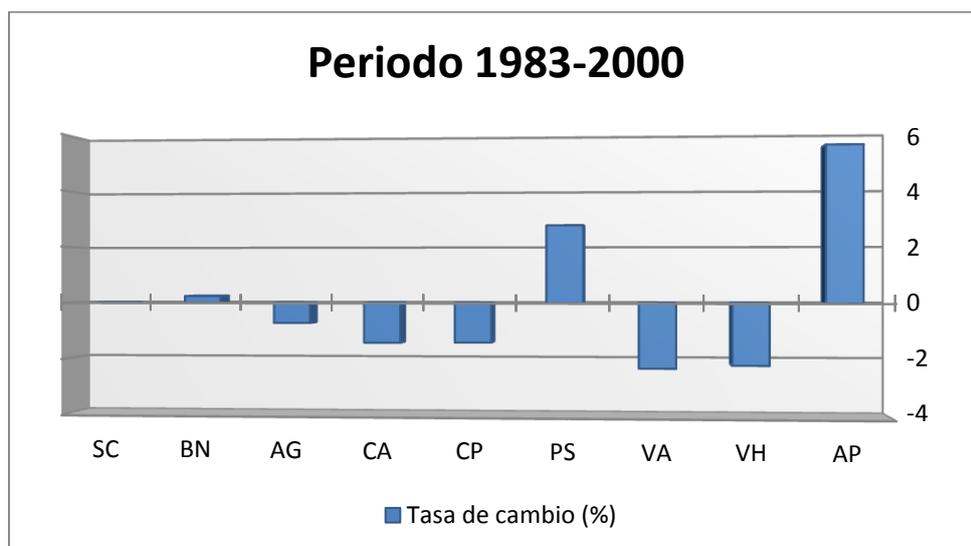


Figura 72 Tasas de cambio de coberturas de suelo periodo 1983-2000

4.4. Análisis de los cambios de uso/cobertura de suelo período 2000-2010

La Tabla 23 demuestra que para el año 2010, el uso y cobertura de suelo presentó aumentos y disminuciones significativas de ciertas clases. Aproximadamente la mitad de la superficie analizada se utilizaba para fines pecuarios, específicamente el 48%, las zonas sin ningún uso de origen antrópico se hallaban en el 44% del área; por otra parte, las zonas de uso agrícola ocupaban solo el 7%. Asimismo, los asentamientos rurales que corresponden al uso residencial se han desarrollado en el 0,2% del área analizada.

Tabla 23 Superficie y porcentaje por tipo de uso y cobertura de suelo periodo 2000-2010

Áreas de uso y cobertura de suelo						
Uso de suelo	Cobertura de suelo	Año 2000		Año 2010		Cambio (Ha)
		(Ha)	(%)	(Ha)	(%)	
Agrícola		1233.2	11.5	833.5	7.7	-399.6
	CP	905.6	8.4	715.2	6.6	-190.5
	CA	327.6	3.0	118.4	1.1	-209.2
Pecuario		3566.6	33.1	5170.4	48.0	1603.8
	PS	3566.6	33.1	5170.4	48.0	1603.8
Recreación		3.9	0.0	3.9	0.0	0.0
	AG	3.9	0.0	3.9	0.0	0.0
Residencial rural		20.8	0.2	26.0	0.2	5.2
	AP	20.8	0.2	26.0	0.2	5.2
Sin uso		5945.6	55.2	4736.2	44.0	-1209.3
	BN	3528.8	32.8	3347.2	31.1	-181.6
	VH	1206.6	11.2	731.1	6.8	-475.4
	VA	1206.7	11.2	644.7	6.0	-561.9
	SC	3.5	0.0	13.2	0.1	9.7
Total uso		10770.0	100.0	10770.0	100.0	
	Total cobertura	10770.0	100.0	10770.0	100.0	

Las variaciones en los usos de suelo se representan en la Figura 73, donde se evidencia un claro aumento en las zonas de uso pecuario y una marcada disminución de las áreas sin uso antrópico y en menor proporción una disminución de las superficies agrícolas. Cabe recalcar que los cambios se analizaron para un periodo de 10 años, en los que las áreas de uso pecuario fueron las que se modificaron mayoritariamente con un incremento de 1603 Ha., provenientes en su mayoría de zonas que antes se encontraban sin uso antrópico (bosque, vegetación arbustiva y herbácea); en la Tabla 24, se verifica la transformaron de 1127 Ha. compuestas por zonas sin uso a superficies pecuarias, lo que materializa un periodo con una marcada tendencia al crecimiento de pastizales para abastecer la producción pecuaria local obligando a sacrificar las coberturas naturales. Otro cambio representativo fue la disminución de áreas utilizadas para actividades agrícolas en 400 Ha., proceso de transformación de que sigue la misma

tendencia del periodo anterior, que consiste en una pérdida paulatina de dichas áreas las cuáles pasar a ser utilizadas para fines pecuarios.

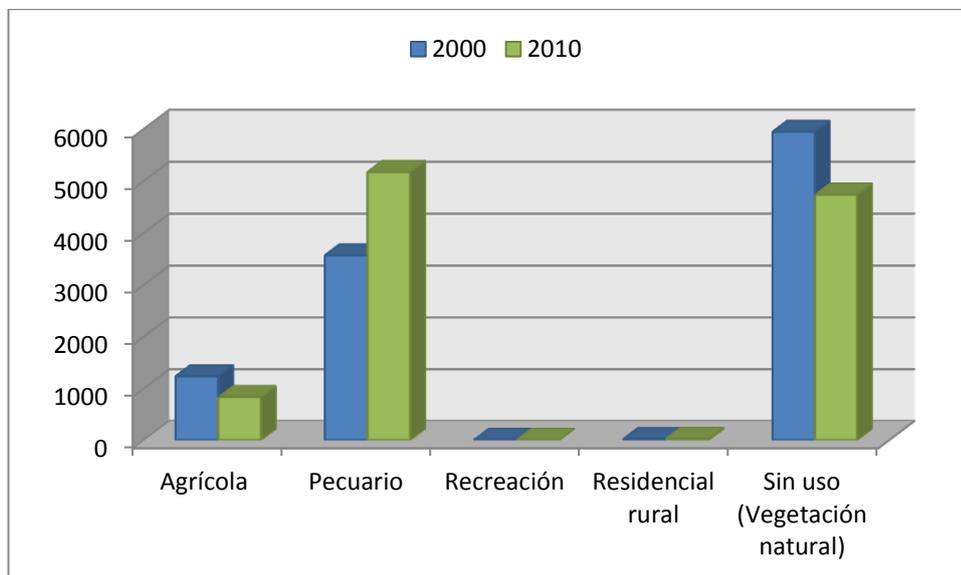


Figura 73 Variaciones en los usos de suelo periodo 2000-2010

Tabla 24 Matriz de áreas de transición entre usos de suelo 2000-2010

		Uso de suelo año 2010					
		AGR	PEC	REC	RES	SIN	Total
Uso de suelo año 2000	AGR	587.8	567.0	0.0	2.8	75.6	1233.2
	PEC	89.6	3337.8	0.0	0.5	138.7	3566.6
	REC	0.0	0.0	3.9	0.0	0.0	3.9
	RES	0.0	0.0	0.0	20.8	0.0	20.8
	SIN	156.2	1265.6	0.0	1.9	4521.9	5945.6
	Total	833.5	5170.4	3.9	26.0	4736.2	10770.0

La Figura 74 describe las variaciones en las coberturas de suelo para un periodo de estudio de 10 años, tiempo durante el cual se han desarrollado una serie de modificaciones en las coberturas naturales por parte del hombre. Se observa que los pastizales se incrementan aproximadamente en 1/3 de la superficie con la que contaba una década antes; es decir, un

aumento de 1603 Ha. valor superior al del periodo de estudio anterior en el que se incrementó solo 1315 Ha. en 17 años (ver Figura 75 y Figura 76).

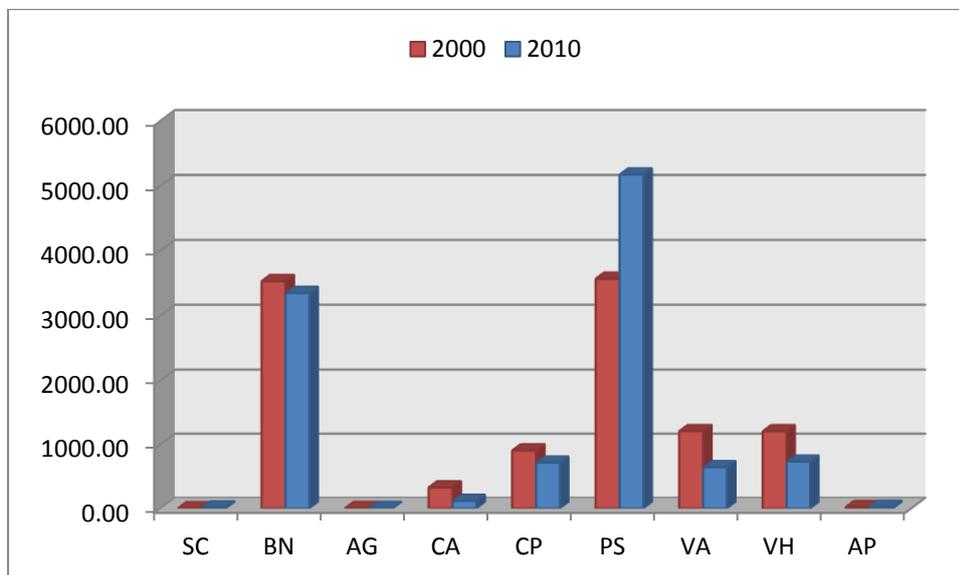


Figura 74 Variaciones en las coberturas de suelo periodo 2000-2010

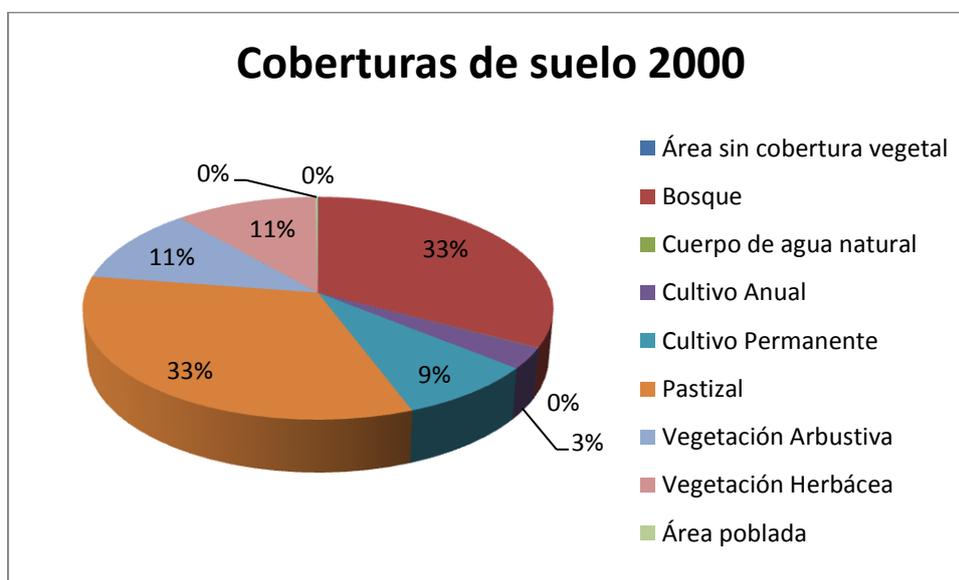


Figura 75 Porcentaje de coberturas de suelo año 2000

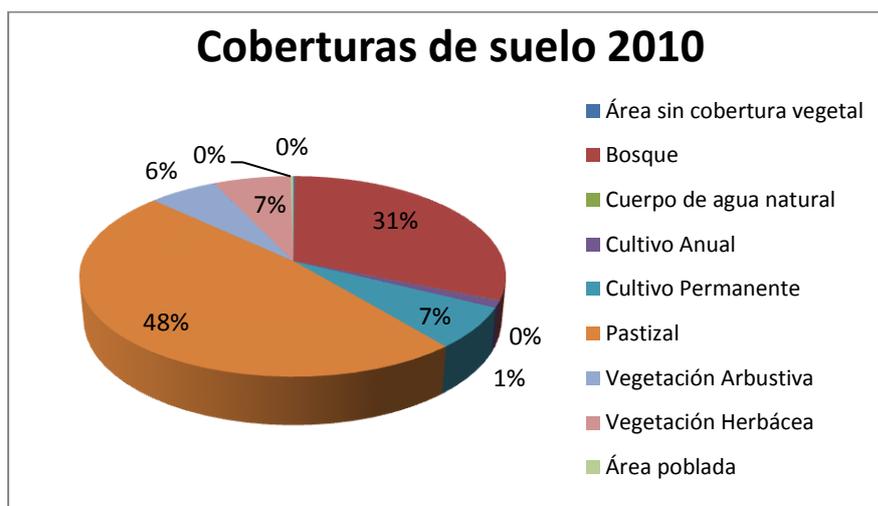


Figura 76 Porcentaje de coberturas de suelo año 2010

Estas áreas se derivan de la supresión de más de 800 Ha. de vegetación arbustiva y herbácea, que se han perdido a una tasa del 6% y 4.8% respectivamente (ver Figura 77), lo que denota una rápida pérdida de las coberturas naturales en un periodo de tiempo tan corto. Adicionalmente 270 Ha. de bosque han cambiado a pastizal y en menor proporción a superficies de cultivos anuales y permanentes. Asimismo, las coberturas de cultivos anuales y permanentes han mermado en 500 Ha., a una tasa de 9.7% y 2.3% respectivamente, continuando con la tendencia del periodo pasado de conversión en pastizales.

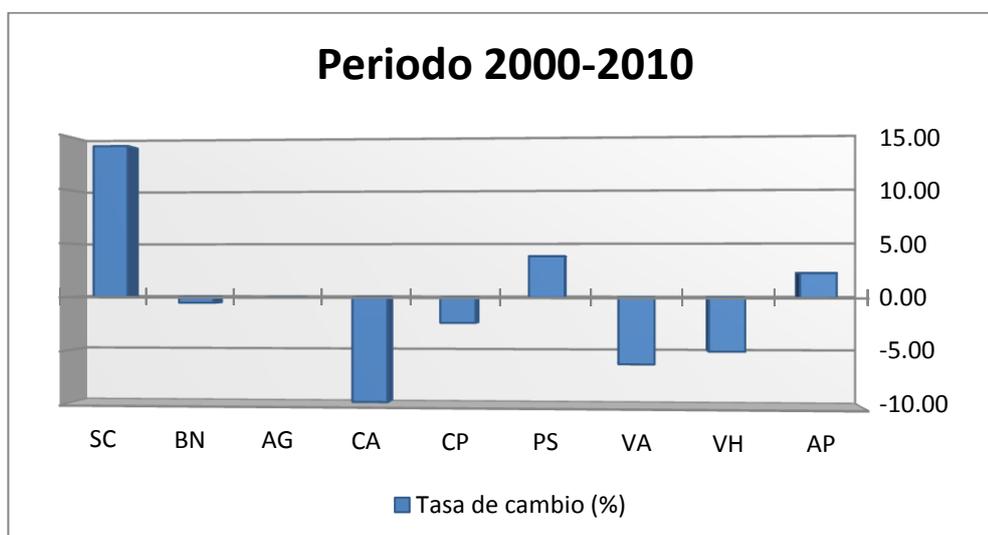


Figura 77 Tasa de cambio de coberturas de suelo periodo 2000-2010

El área analizada comprende la parroquia rural de Balsapamba, la misma que para el año 2001 presentaba una población de 2839 Habitantes, mientras que para el año 2010 disminuyó a 2765 Habitantes. Esto demuestra una tasa de crecimiento poblacional negativa de -0.29%, en relación a la pobreza por Necesidades Básicas Insatisfechas-NBI, el 21.8% es pobre por NBI extremo y el 62.47% es pobre por NBI no extremo. A nivel cantonal, el 57% de la población se dedica a actividades de agricultura, ganadería y caza y tan solo el 1,86% a industrias manufactureras (INEC, 2010; SNGR et al., 2013).

A nivel provincial se ha observado un aumento paulatino de la producción de carne bovina, con 298 Toneladas métricas en el año 2000, hasta alcanzar 400 Toneladas métricas en el año 2008. Por otra parte, la provincia se ha especializado en la producción de leche, aportando la mitad de la producción total de la zona de planificación 5. Se evidencia que ha presentado un crecimiento dinámico en la producción lechera, con 64 millones de litros en el año 2000 valor que se incrementó a 83 millones de litros para el año 2008, todo esto debido a la alta demanda en la región costa. Según Agrocalidad, el número de cabezas de ganado en el área del trópico y subtropical de la provincia de Bolívar para el año 2010 sobrepasaba las 110000 unidades (MCPEC, 2011).

Es así que la difícil situación económica ha incentivado a la población local a migrar hacia las grandes ciudades en busca de fuentes de empleos y ha obligado a los pobladores y productores locales a explotar los recursos naturales con los que cuentan. Se evidencia un lento crecimiento de las áreas pobladas consolidadas, la tendencia es el establecimiento de viviendas junto a la carretera San Miguel-Montalvo. Además se observa una disminución de las tierras cultivadas debido a las malas prácticas agrícolas, a pesar de esto todavía se conservan áreas destinadas a cultivos permanentes entre ellos banano, naranja, café, plátano y caña de azúcar, en menor cantidad cultivos de ciclo corto como: maíz, fréjol, trigo y cebada. Por

el contrario la ganadería bovina se ha incrementado a pasos acelerados con el establecimiento de fincas ganaderas especializadas en la producción de leche para satisfacer el mercado local, y en menor cantidad para producción de carne destinada a satisfacer las necesidades de la población.

4.5. Análisis de los factores que condicionan la evolución de las coberturas de suelo

Los cambios en las coberturas de suelo se encuentran condicionados por una serie de factores que contribuyen de manera variada en la explicación del fenómeno. Desde un punto de vista espacial se seleccionaron una serie de variables explicativas para ajustar modelos basados en regresión logística a cada una de las coberturas analizadas y así obtener imágenes de probabilidad de cambio. En la Tabla 25, se observan las variables que influyen significativamente en el cambio a cada una de las coberturas de suelo estudiadas. Los valores corresponden a la probabilidad de que el cambio se produzca por casualidad; en efecto, un valor de probabilidad baja indica que el factor analizado es altamente significativo en la predicción del cambio. La Tabla 26 muestra los coeficientes de las variables y sus respectivos signos con los cuales se puede llegar a determinar si dicha variable influye negativa o positivamente en la probabilidad de cambio.

Tabla 25 Grado de explicación de la probabilidad de transición a cada uno de las coberturas de suelo, correspondiente a cada variable

Variable	Cobertura de suelo							
	SC	BN	CA	CP	PS	VA	VH	AP
	(Pr(> z))	(Pr(> z))	(Pr(> z))	(Pr(> z))	(Pr(> z))	(Pr(> z))	(Pr(> z))	(Pr(> z))
Altitud	3.63e-07 ***	0.05797 .	< 2e-16 ***	< 2e-16 ***	<2e-16 ***	<2e-16 ***	< 2e-16 ***	0.00287 **
Distancia áreas agrícolas	4.27e-06 ***	0.00341 **	< 2e-16 ***	< 2e-16 ***	<2e-16 ***	<2e-16 ***	0.214	0.36442
Distancia a poblados	4.03e-09 ***	< 2e-16 ***	5.48e-06 ***	0.95173	1e-10 ***	4.65e-13 ***	< 2e-16 ***	< 2e-16 ***
Distancia ríos	0.180439	< 2e-16 ***	< 2e-16 ***	< 2e-16 ***	<2e-16 ***	<2e-16 ***	< 2e-16 ***	0.00112 **
Distancia a vías principales	2.74e-07 ***	< 2e-16 ***	< 2e-16 ***	1.65e-13 ***	<2e-16 ***	<2e-16 ***	< 2e-16 ***	< 2e-16 ***
Distancia a vías secundarias	0.000475 ***	< 2e-16 ***	0.00042 ***	1.12e-05 ***	<2e-16 ***	<2e-16 ***	< 2e-16 ***	2.31e-12 ***
Pendiente	4.31e-11 ***	< 2e-16 ***	3.51e-05 ***	0.00275 **	<2e-16 ***	<2e-16 ***	< 2e-16 ***	5.26e-14 ***
Precipitación	0.008245 **	< 2e-16 ***	< 2e-16 ***	< 2e-16 ***	<2e-16 ***	0.0259 *	1.53e-14 ***	< 2e-16 ***

*** Muy significativa Pr= 0–0,001, ** Poco significativa Pr= 0,001–0,01, * No significativa Pr=0,01–0,1

Tabla 26 Coeficientes que determinan el grado de contribución de cada variable a la probabilidad de cambio a las coberturas de suelo

Variable	Cobertura de suelo							
	SC	BN	CA	CP	PS	VA	VH	AP
	$b * 10^4$	$b * 10^4$	$b * 10^4$	$b * 10^4$	$b * 10^4$	$b * 10^4$	$b * 10^4$	$b * 10^4$
Constante	-521100	-63150	-90900	-67270	-59640	-68950	-69200	-118200
Altitud	118.00		15.81	-11.11	5.23	20.31	23.56	
Distancia áreas agrícolas	-83.18		-17.17	-11.49	-14.97	-5.48		
Distancia a poblados	-28.31	3.80	-1.98		1.07	-1.85	-3.31	-122.30
Distancia ríos		-5.49	5.36	-4.44	4.93	5.63	-4.43	
Distancia a vías principales	65.98	-1.32	2.19	1.04	1.80	1.42	1.62	-20.20
Distancia a vías secundarias	-63.64	4.47	-1.70	-3.04	-1.58	-3.00	2.35	-62.77
Pendiente	418.70	107.80	-49.38		47.73	85.45	107.80	-637.90
Precipitación		22.28	19.74	33.24	20.52		-4.70	94.23

Al analizar las variables incluidas en el ajuste de regresión logística se determinó que para predecir el cambio a un área sin cobertura vegetal, las variables distancia a ríos y precipitación no influyen de manera significativa, lo que explica que el cambio hacia dicha categoría se ve grandemente influenciado por la pendiente y la actividad antrópica. La presencia de asentamientos humanos junto a las carreteras principales y secundarias, las cuales se construyeron en zonas con fuertes pendientes, son factores que incrementan la probabilidad de que las zonas cercanas a estas se conviertan en eriales debido a la ocurrencia de grandes movimientos en masa y malas prácticas agrícolas, lo que contribuye a la erosión y por consiguiente pérdida de la estabilidad de taludes. En el caso de la pendiente se observó que a mayor pendiente existe mayor probabilidad de cambio a zonas sin cobertura vegetal; por el contrario, la proximidad a zonas pobladas, áreas agrícolas y vías secundarias incrementa la probabilidad de transición a la mencionada clase (ver Figura 78).

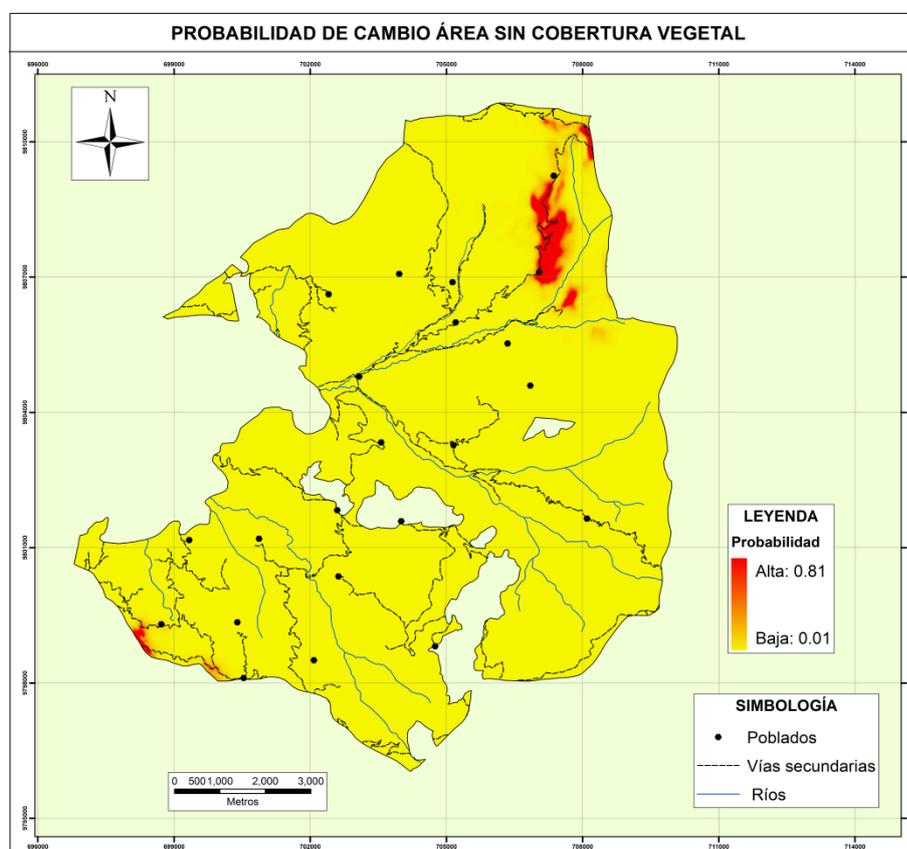


Figura 78 Probabilidad de cambio Área sin cobertura vegetal

Con respecto a la cobertura Bosque se encontró que las variables altitud y distancia a áreas agrícolas no son significativas al momento de explicar el fenómeno, por lo que fueron excluidas de la nueva regresión. La mayoría de cambios hacia dicha cobertura se da por procesos de recuperación desde la vegetación arbustiva y áreas de baja o nula intervención humana. Se observó que a menor distancia a poblados, vías secundarias y bajas pendientes disminuye la probabilidad de cambio a bosque; por el contrario, esta probabilidad se incrementa en zonas cercanas a los cuerpos de agua (ver Figura 79).

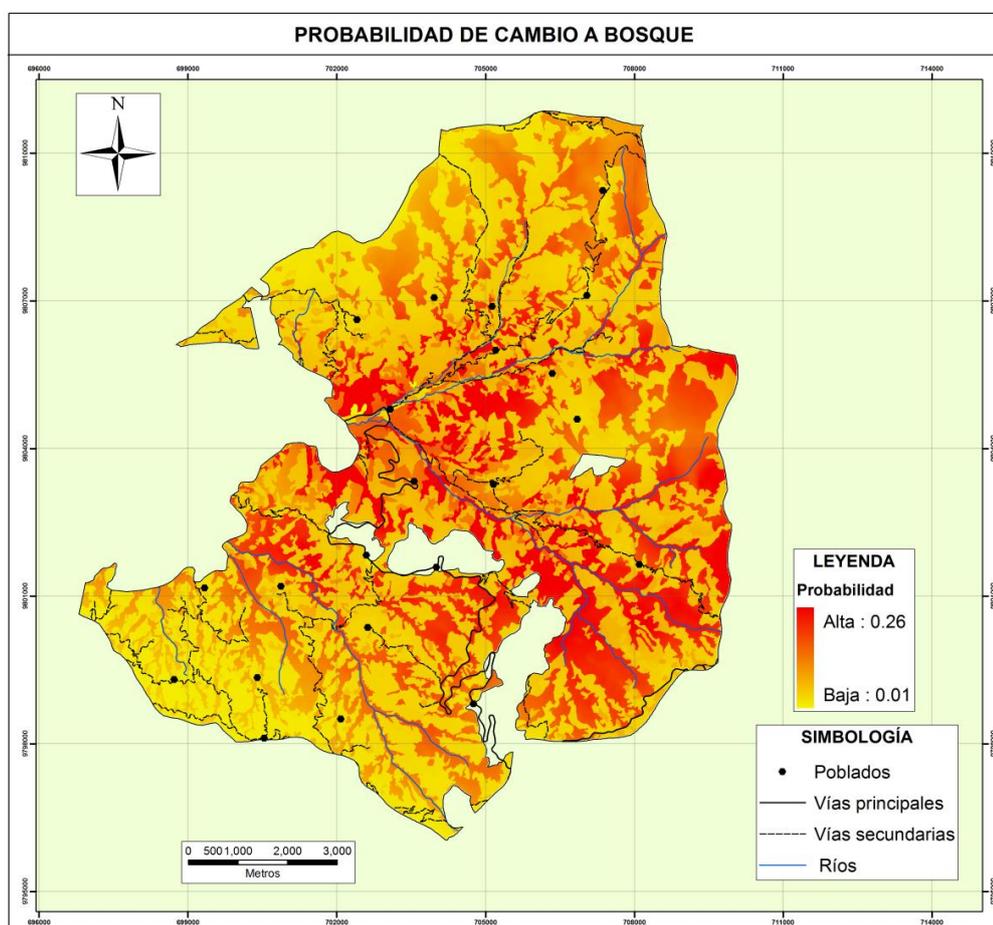


Figura 79 Probabilidad de cambio a bosque

En la determinación de la probabilidad de cambio a cultivos anuales se obtuvo que todas las variables influyen significativamente en la explicación del fenómeno, por lo que no se encontró necesidad de eliminar ningún

factor. Las áreas pobladas ejercen una influencia importante para las transiciones hacia cultivos anuales, mediante el modelo de regresión logística se obtuvo que las zonas más cercanas a poblados, a zonas agrícolas ya establecidas y vías secundarias tienen una mayor probabilidad de cambiar en el siguiente periodo, otra variable que influye en gran manera es la pendiente, la cual regula en cierta forma estas modificaciones, por lo que a mayor pendiente, existe menos probabilidad de transición a cultivos anuales. La altitud se relaciona directamente, a mayor altitud mayor probabilidad de transición (ver Figura 80).

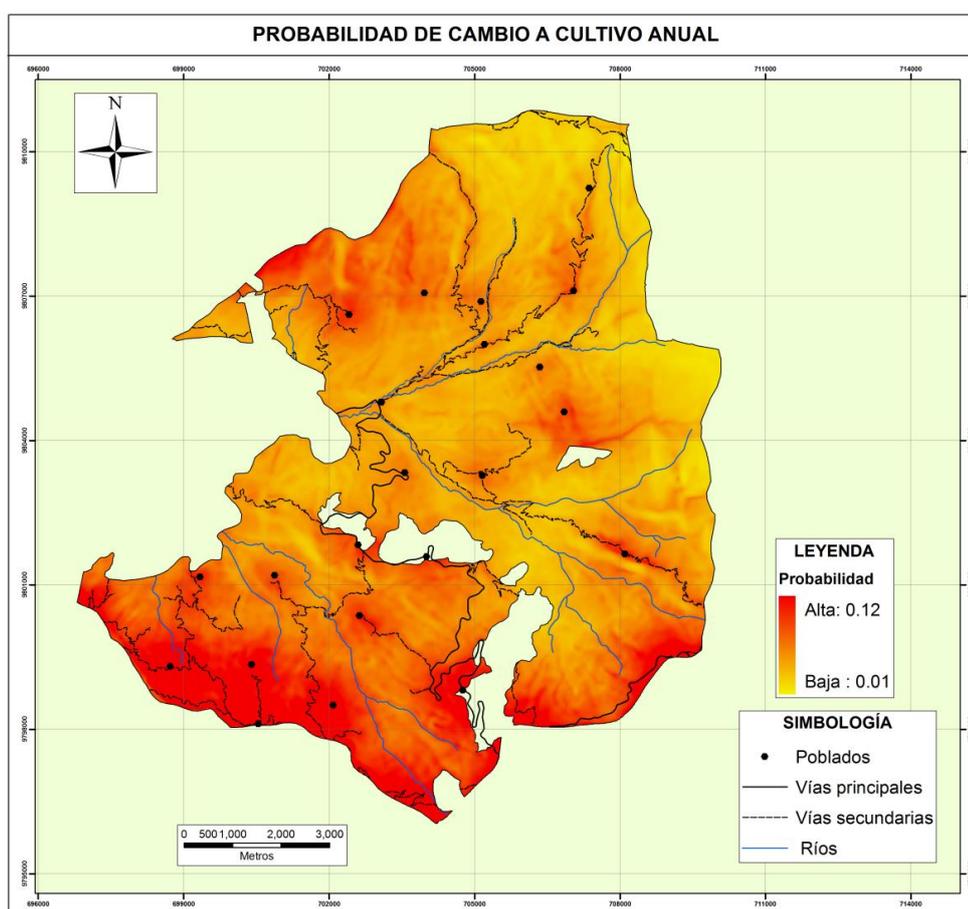


Figura 80 Probabilidad de cambio a cultivo anual

La distancia a los poblados y la pendiente son factores que no influyen de manera importante en la probabilidad de cambio hacia cultivos permanentes. La razón por la que la distancia a poblados no aporta con

información útil en el modelo de regresión es porque estos cultivos no tienen la tendencia a localizarse a una determinada distancia de todos los poblados, en su mayoría se distribuyen en grandes extensiones agrícolas sólo en zonas cercanas a Balsapamba y en menor proporción cerca a los poblados Alungoto y Angas. La pendiente no proporciona de información al modelo, por la disposición de estos cultivos en zonas con pendientes variadas, y al no seguir un patrón específico no se puede ser utilizada para predecir el fenómeno. Por otra parte existe una marcada tendencia al desarrollo de estas actividades a cortas distancias de las áreas agrícolas y de los ríos El salto y San Jorge de los cuales se aprovechan sus aguas para el riego de cultivos. Asimismo, la probabilidad se incrementa en zonas cercanas a vías secundarias, que son los principales accesos a los poblados más aislados (ver Figura 81).

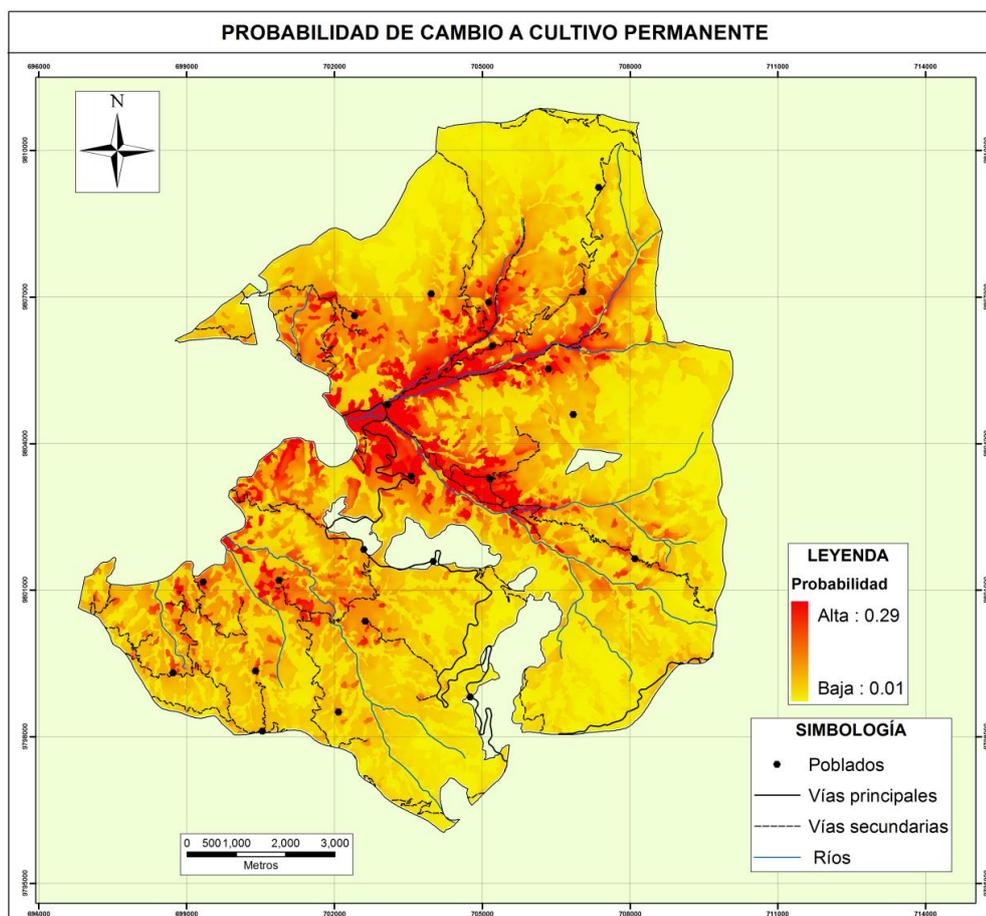


Figura 81 Probabilidad de cambio a cultivo permanente

En la determinación de la probabilidad de cambio a pastizales, se evidenció que todas las variables son significativas en este proceso, principalmente las de origen antrópico y en menor magnitud la pendiente. La distribución de esta cobertura se produce principalmente en espacios próximos a zonas agrícolas que a corto plazo pasarán a transformarse en pastizales. La cuenca alta caracterizada por fuertes pendientes y extensas coberturas naturales, posee baja probabilidad de cambio, todo esto por la difícil accesibilidad y grandes distancias a los asentamientos humanos (ver Figura 82).

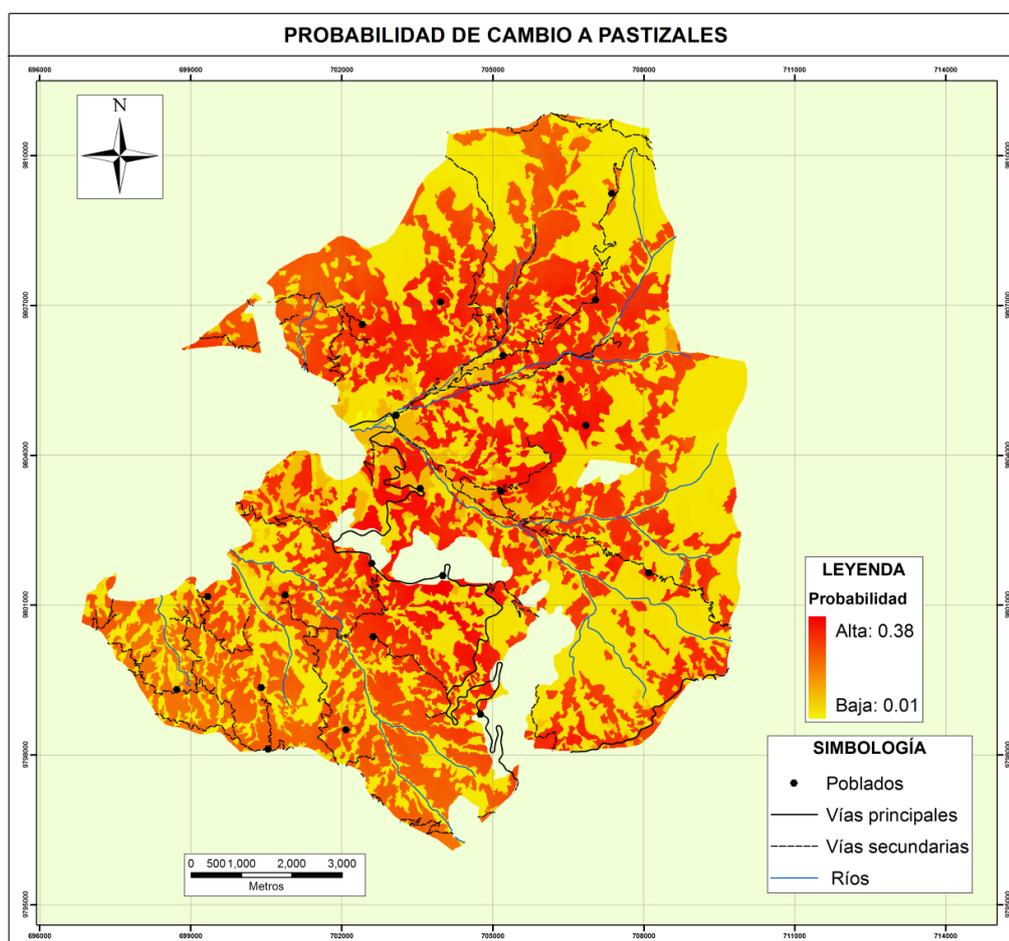


Figura 82 Probabilidad de cambio a pastizales

Se evidenció que la mayoría de factores influyen significativamente en el cambio hacia vegetación arbustiva, excepto la precipitación, dado que es

muy probable que se presenten cambios en zonas altas con baja precipitación o cercanas a la costa con mayores volúmenes de precipitación. Los sectores con alta probabilidad de cambio son los de elevadas pendientes; es decir, mientras se incrementa la inclinación del terreno existe más probabilidad de transición a vegetación arbustiva, por la irregularidad de la superficie y la presencia de áreas de cultivos en abandono con difícil accesibilidad ya sea por su pendiente, altitud o gran distancia a las zonas de intervención antrópica como: núcleos urbanos y vías de comunicación. Asimismo se determinó que estas coberturas tienden a desarrollarse en las cimas y laderas fuertemente inclinadas del sistema montañoso local (ver Figura 83).

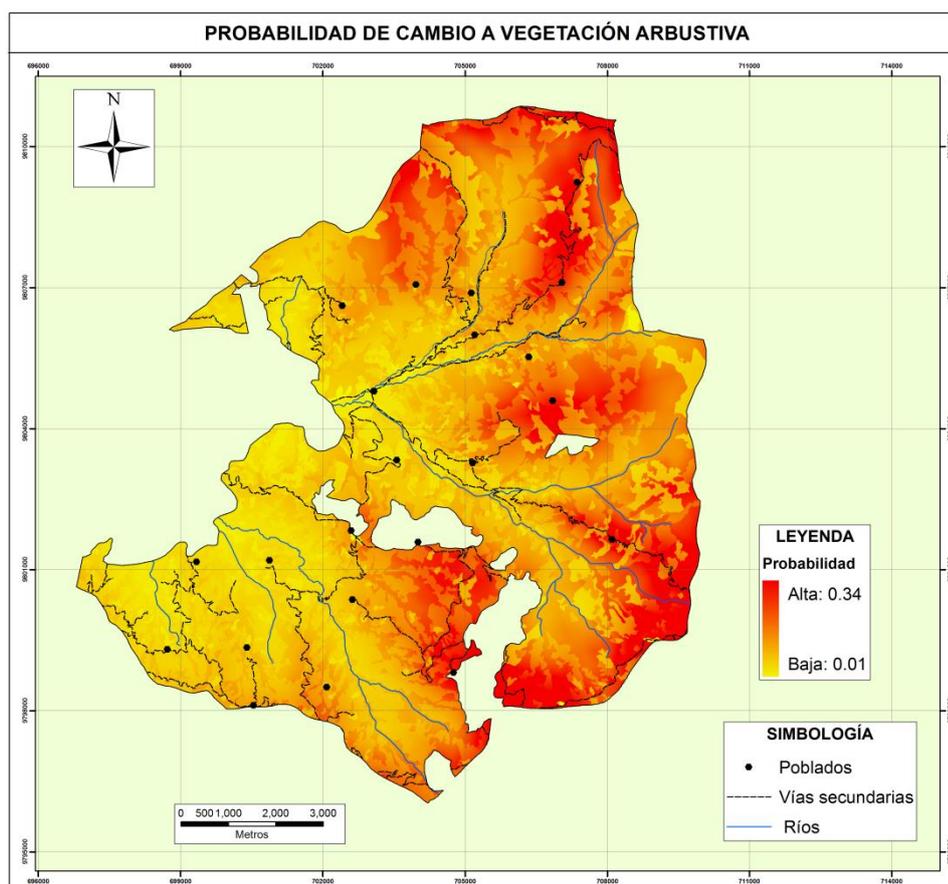


Figura 83 Probabilidad de cambio a Vegetación arbustiva

La vegetación herbácea natural crece espontáneamente en zonas donde el hombre nunca ha intervenido o bien ha dejado de utilizarlas para diversos

finos. Todas las variables ingresadas en el modelo de regresión influyen de manera significativa en la probabilidad de transición a vegetación herbácea, excepto la distancia a zonas agrícolas. Las áreas con mayor probabilidad de cambio se encuentran en la cuenca alta, con pendientes moderadas a fuertes, en donde predomina el abandono de suelos que progresivamente se ve sustituido por un fino tapiz de vegetación espontánea compuesto por especies herbáceas a corto plazo y más adelante de vegetación arbustiva (ver Figura 84).

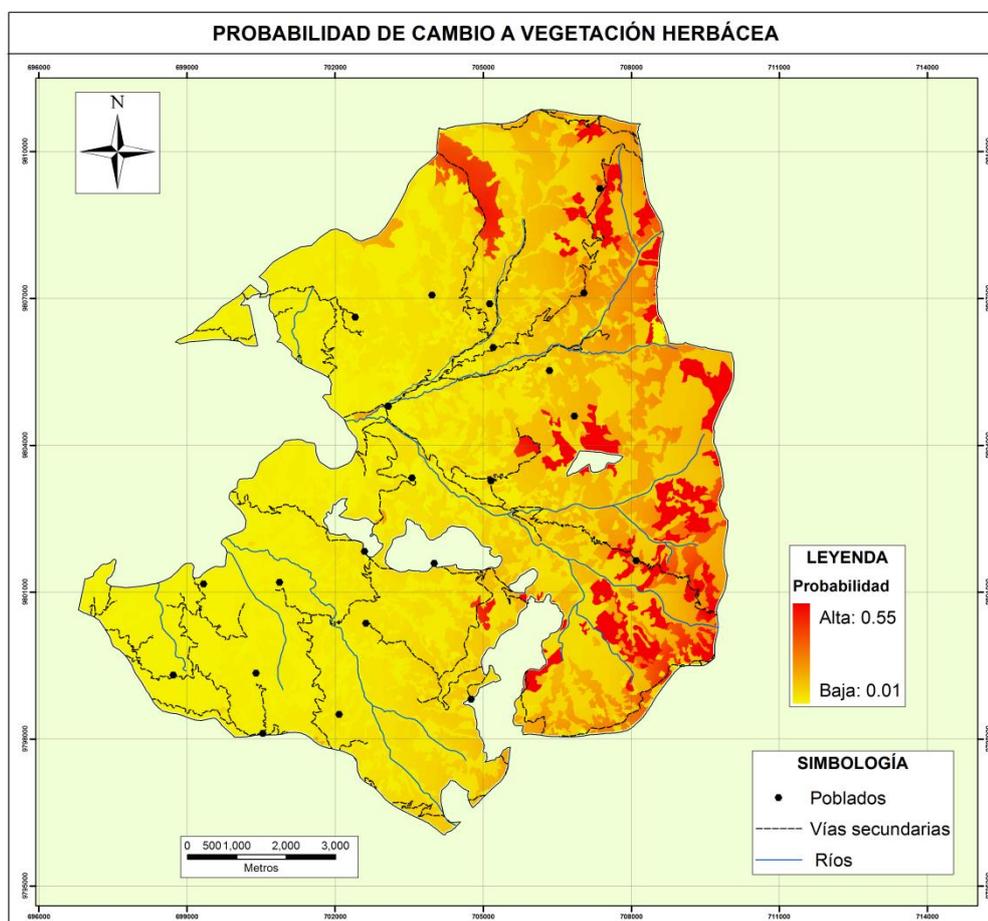


Figura 84 Probabilidad de cambio a vegetación herbácea

La probabilidad de cambio a zonas pobladas puede ser predicha con mayor facilidad debido a la inclusión de una serie de variables antrópicas que tienen influencia directa con el crecimiento y establecimiento de dichas áreas. Las variables distancia a zonas agrícolas y distancia a ríos no fueron

significativas y por lo tanto se no se utilizaron en el ajuste del nuevo modelo. Por el contrario, la variable que más aportó es la distancia a poblados, por lo que la probabilidad aumenta mientras más cerca se encuentre a un asentamiento ya consolidado. En menor magnitud la distancia a vías principales, secundarias, y la pendiente limitan el establecimiento de zonas habitadas (ver Figura 85).

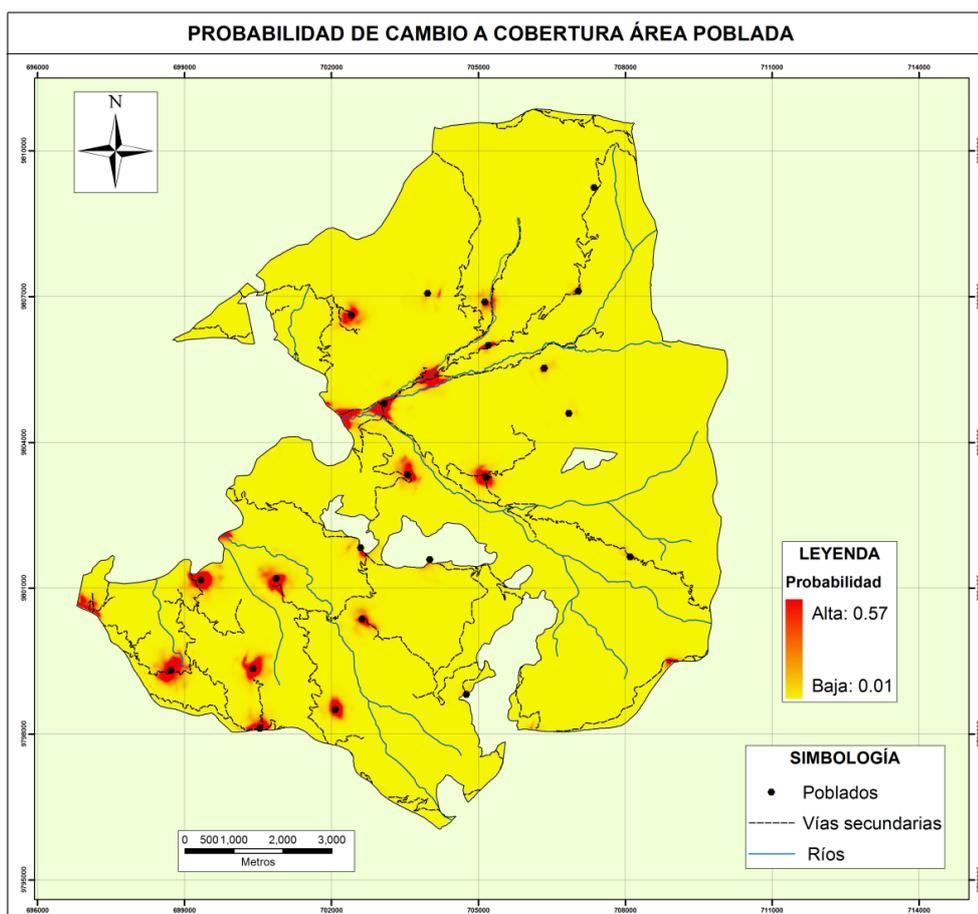


Figura 85 Probabilidad de cambio a cobertura área poblada

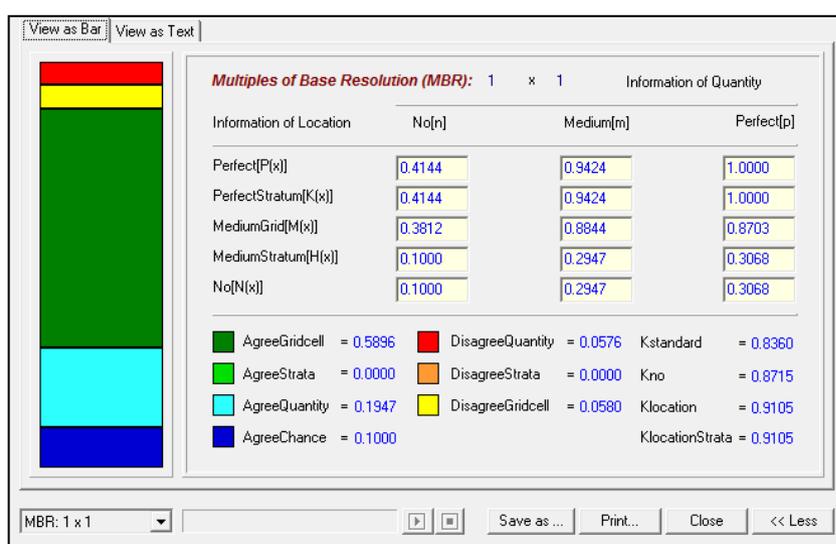
4.6. Validación de modelo de autómatas celulares

La validación del modelo se efectuó utilizando el índice kappa, al comparar el mapa de cobertura de suelo simulado para el año 2010 con autómatas celulares y el mapa observado para el mismo año. Landis & Koch (1977), realizaron una caracterización de diferentes rangos de valores para el índice kappa de acuerdo al grado de ajuste existente (ver Tabla 27).

Tabla 27 Calidad del ajuste de acuerdo a índice Kappa

Valor de Kappa (%)	Calidad
0	Pésima
0 - 20	Mala
20 - 40	Razonable
40 - 60	Buena
60 - 80	Muy Buena
80 - 100	Excelente

Para determinar el grado de ajuste global del modelo, el índice Kappa utiliza los subíndices Kappa de ubicación y Kappa para cantidad. Se obtuvo un valor de 91% en el subíndice Kappa de ubicación y de acuerdo a la caracterización descrita anteriormente el ajuste fue excelente, simulando correctamente la posición del 91% de los píxeles. Por otra parte, se alcanzó un subíndice Kappa para cantidad de 87%, éste describe el acuerdo en la cantidad de píxeles presentes en cada clase del mapa simulado contra el observado. El ajuste global del modelo se expresa mediante el índice Kappa para el que se obtuvo un valor de 84%; de esta forma, la simulación efectuada representa muy bien los cambios ocurridos en el periodo de estudio (ver Figura 86).

**Figura 86** Validación de modelo de autómatas celulares

Analizando los resultados obtenidos se determinó que el modelo calibrado con las variables explicativas simula de excelente forma la cobertura del suelo. Sin embargo este ajuste depende de la cantidad de píxeles y la localización de estos en toda la extensión del área de estudio.

De acuerdo a la cantidad de píxeles presentes en cada clase, el ajuste obtenido fue muy bueno (87%); sin embargo, es conveniente analizar cuáles fueron las coberturas con mayor acuerdo. En la Tabla 28, se describen las superficies en Ha. por cada clase de uso de suelo simulado y observado. Se encontró que las coberturas: Cuerpo de agua natural y Área poblada fueron las de mayor ajuste con errores de 0.3 y 2.7 Ha. respectivamente. Sin embargo, es necesario destacar que el área que ocupan en la microcuenca es pequeña, por consiguiente el error alcanzado será bajo. Esta diferencia es explicada por las bajas tasas de cambio y el gran tiempo que requieren estas modificaciones.

Tabla 28 Áreas de coberturas de suelo simulada vs observada

Áreas de cobertura de suelo					
Uso de suelo	Cobertura de suelo	Año 2010 (interpretación)		Año 2010 (simulado)	
		Área (Ha)	Área (%)	Área (Ha)	Área (%)
Agrícola		833.5	7.7	1148.4	10.7
	CP	715.2	6.6	822.6	7.6
	CA	118.4	1.1	325.7	3.0
Pecuario		5170.4	48.0	4046.7	37.6
	PS	5170.4	48.0	4046.7	37.6
Recreación		3.9	0.0	3.6	0.0
	AG	3.9	0.0	3.6	0.0
Residencial rural		26.0	0.2	28.6	0.3
	AP	26.0	0.2	28.6	0.3
Sin uso		4736.2	44.0	5542.7	51.5
	BN	3347.2	31.1	3515.7	32.6
	VH	731.1	6.8	1013.8	9.4
	VA	644.7	6.0	1010.6	9.4
	SC	13.2	0.1	2.6	0.0
Total uso		10770.0	100.0	10770.0	100.0
	Total cobertura	10770.0	100.0	10770.0	100.0

Por otra parte, la cobertura bosque en relación a su área tuvo un error de 168 Ha. Fue la clase que se simuló de mejor manera debido a que las transiciones hacia bosque son bajas. Del mismo modo, la capa que presentó mayor error fue pastizal, con 1123 Ha. de diferencia; cabe destacar, que es la más abundante en la microcuenca y se encuentra influenciada por muchos factores socioeconómicos que no fueron considerados en el estudio (ver Figura 87).

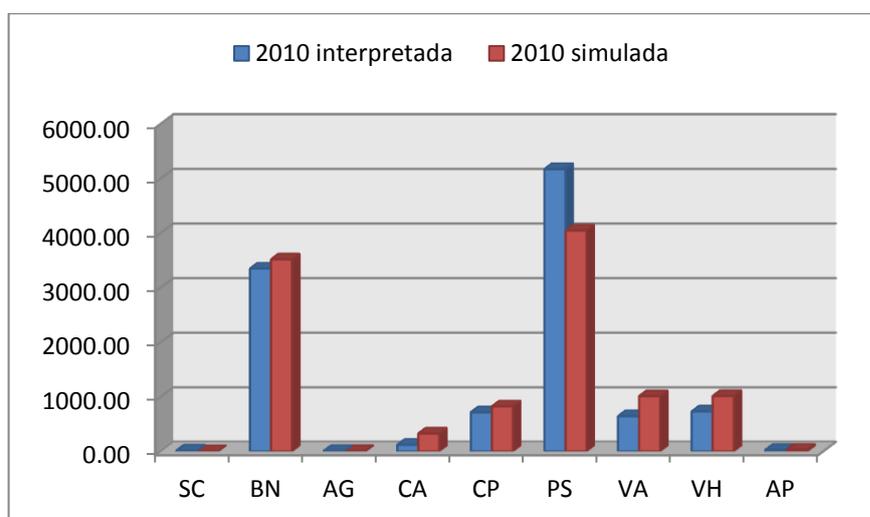


Figura 87 Superficie de cobertura de suelo interpretada vs simulada

Los cultivos anuales tuvieron un error considerable, el área simulada se duplicó con respecto al área real observada, puede deberse a varios factores entre ellos: la significancia de todas las variables en la regresión logística, lo que denota confusión en la determinación de la probabilidad de cambio, la estacionalidad de los cultivos anuales; es decir, el gran dinamismo que presentan lo que dificulta su proyección a largo plazo.

El mapa de cobertura de suelo simulado se presenta en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, al comparar el ajuste por ubicación se determinó que fue mucho mejor que la coincidencia por cantidad. Visualmente se puede determinar qué coberturas no fueron simuladas correctamente. Empezando por los cultivos anuales en los que observa un comportamiento de tendencia variada; en la cuenca alta una pérdida de las

zonas de cultivos de ciclo corto y un incremento al Sur del área de estudio, cosa que no sucede en la realidad, en donde la tendencia es una pérdida substancial de los cultivos anuales en toda la extensión de análisis. Asimismo el avance de los pastizales no se modela correctamente, se pierden a una tasa más baja de lo normal lo que se materializa en una mayor permanencia de la vegetación herbácea, arbustiva y bosques, que se ajustaron muy bien a lo observado (ver Figura 88 y Figura 89).

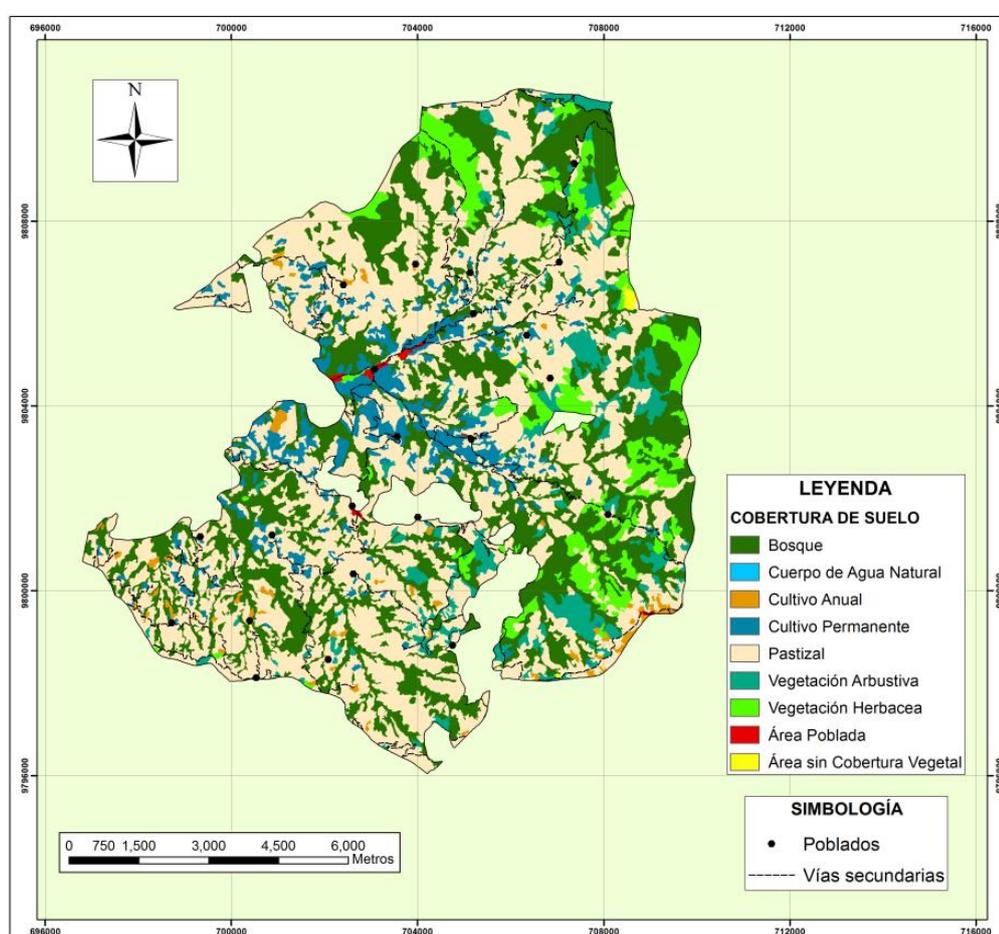


Figura 88 Cobertura de suelo año 2010

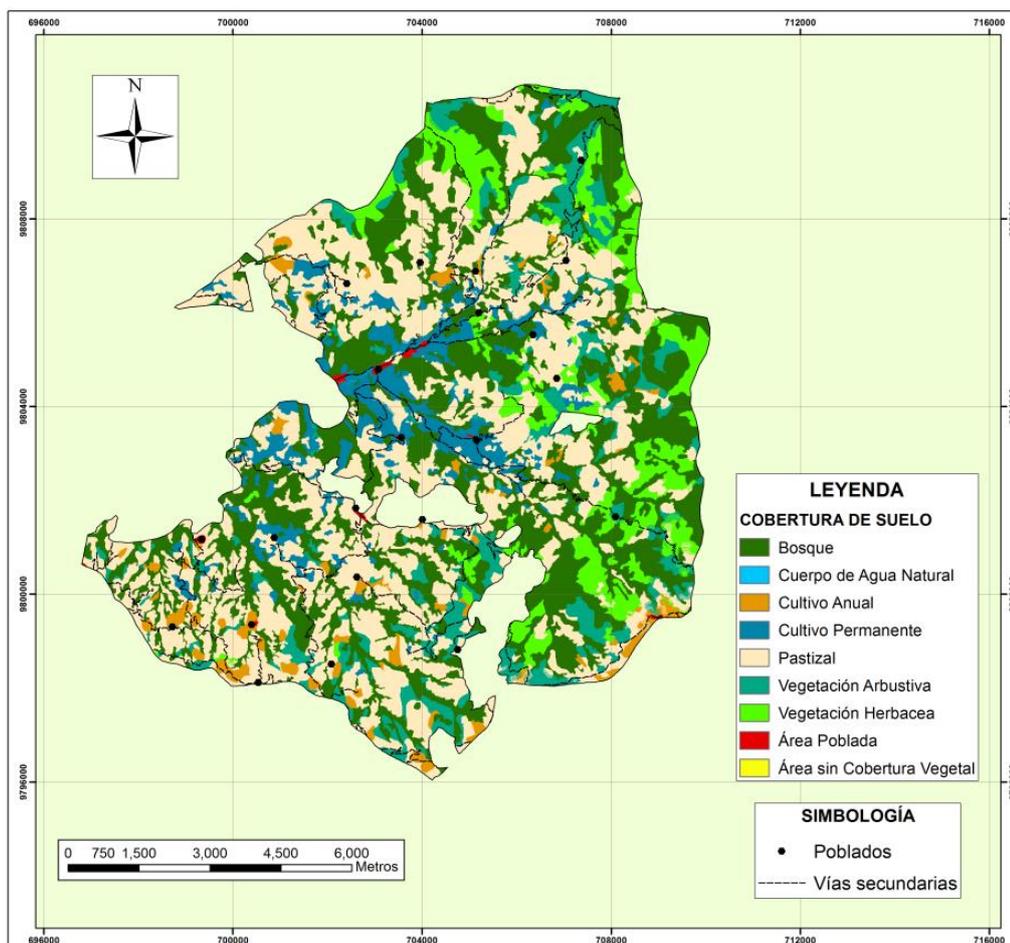


Figura 89 Cobertura de suelo simulada año 2010

4.7. Análisis de los cambios de uso/cobertura de suelo período 2010-2020

Las superficies correspondientes a cada clase analizada se muestran en la Tabla 29. En cuanto al uso de suelo para el año 2020, el 56% de la superficie total de la microcuenca será utilizada para fines pecuarios. Las áreas sin uso alguno representarán tan solo el 37% de la superficie, mientras que las áreas agrícolas sólo el 6%.

Tabla 29 Superficie y porcentaje por tipo de uso y cobertura de suelo periodo 2010-2020

Áreas de cobertura de suelo						
Uso de suelo	Cobertura de suelo	Año 2010 (interpretación)		Año 2020 (simulado)		Cambio (Ha)
		Área (Ha)	Área (%)	Área (Ha)	Área (%)	
Agrícola		833.5	7.7	696.5	6.5	-137.0
	CP	715.2	6.6	612.3	5.7	-102.8
	CA	118.4	1.1	84.2	0.8	-34.2
Pecuario		5170.4	48.0	6042.2	56.1	871.8
	PS	5170.4	48.0	6042.2	56.1	871.8
Recreación		3.9	0.0	3.9	0.0	0.0
	AG	3.9	0.0	3.9	0.0	0.0
Residencial rural		26.0	0.2	30.7	0.3	4.7
	AP	26.0	0.2	30.7	0.3	4.7
Sin uso		4736.2	44.0	3996.7	37.1	-739.6
	BN	3347.2	31.1	3089.8	28.7	-257.4
	VH	731.1	6.8	477.2	4.4	-254.0
	VA	644.7	6.0	416.7	3.9	-228.0
	SC	13.2	0.1	13.0	0.1	-0.2
Total uso		10770.0	100.0	10770.0	100.0	
	Total cobertura	10770.0	100.0	10770.0	100.0	

La simulación realizada permitió determinar cuáles son las clases de uso de suelo más susceptibles al cambio, las que ganaron y perdieron extensión. El principal cambio observado es el incremento de las zonas de uso pecuario con un balance positivo de 871 Ha. en 10 años, valor preocupante que requiere de atención prioritaria porque estas extensiones serán extraídas de 645 Ha. de áreas sin uso antrópico; es decir, vegetación natural. Asimismo, se evidencia una pérdida de las zonas de uso agrícola, de las cuales 232 Ha. pasarán a ser utilizadas para fines pecuarios en el siguiente periodo, mientras que 97 Ha. de zonas sin uso antrópico serán utilizadas para el desarrollo de actividades agrícolas, es así que se obtiene un balance negativo de 137 Ha. (ver Tabla 30) que denota mayores pérdidas que ganancias y una disminución importante que sigue la tendencia de periodos anteriores en el cambio de uso agrícola a pecuario. En menor magnitud el

uso residencial rural se extenderá 4.7 Ha. derivadas de zonas que antes eran utilizadas para fines agrícolas y sin uso antrópico (Figura 90).

Por lo tanto es importante señalar que es necesario el establecimiento de normativas locales destinadas a la protección de las áreas sin uso antrópico, efectuando una delimitación de zonas prioritarias de conservación en las que se incluyan coberturas naturales como Bosque, vegetación arbustiva y herbácea que se encuentren en zonas de pendientes fuertes y cercanas a los cuerpos de agua.

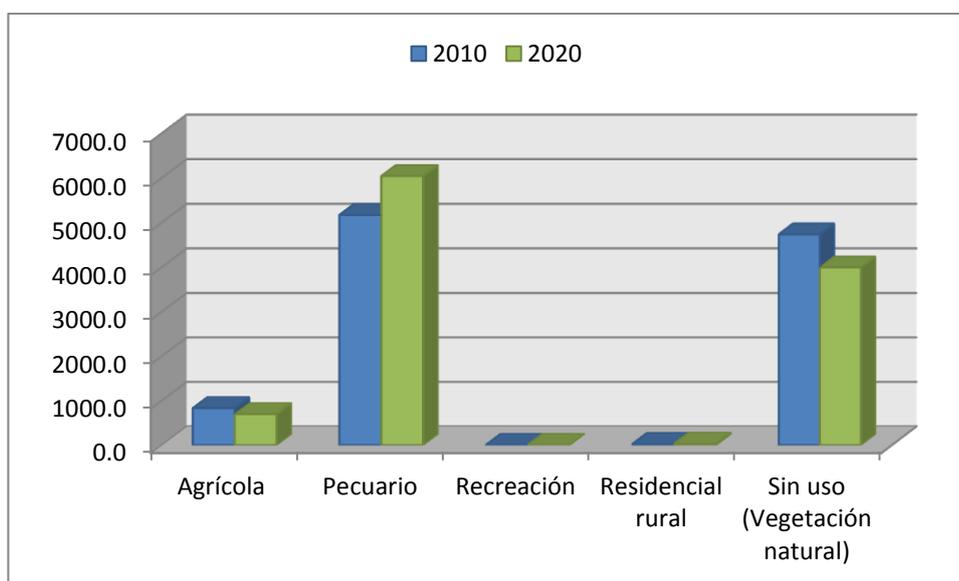


Figura 90 Variaciones en los usos de suelo periodo 2010-2020

Tabla 30 Matriz de áreas de transición entre usos de suelo 2010-2020

		Uso de suelo simulado año 2020					
		AGR	PEC	REC	RES	SIN	Total
Uso de suelo año 2010	CATEGORÍA	594.5	232.0	0.0	2.3	4.8	833.5
	AGR	4.1	5155.1	0.0	0.7	10.5	5170.4
	PEC	0.0	0.0	3.9	0.0	0.0	3.9
	RES	0.0	0.0	0.0	26.0	0.0	26.0
	SIN	97.9	655.1	0.0	1.8	3981.4	4736.2
	Total	696.5	6042.2	3.9	30.7	3996.7	10770.0

El análisis de los cambios en los usos de suelo permitió establecer las relaciones más importantes en cuanto a pérdidas y ganancias que tendrán las áreas utilizadas para diversos fines; asimismo, es trascendente analizar la dinámica de la cubierta del suelo, cuantificar los cambios y establecer hacia donde se dirigen.

En la Tabla 29 a más de las variaciones en los usos de suelo se encuentran las superficies de cada cobertura. Para el año 2020, se espera un dominancia completa de los pastizales, que cubrirán más de la mitad del área de estudio con 56% de presencia, mucho más que la vegetación natural junta; en cambio, los bosques se extenderán tan solo sobre el 28% de la superficie total que logrará conservarse por la difícil accesibilidad y la irregularidad del terreno en el que están establecidos (ver Figura 91).

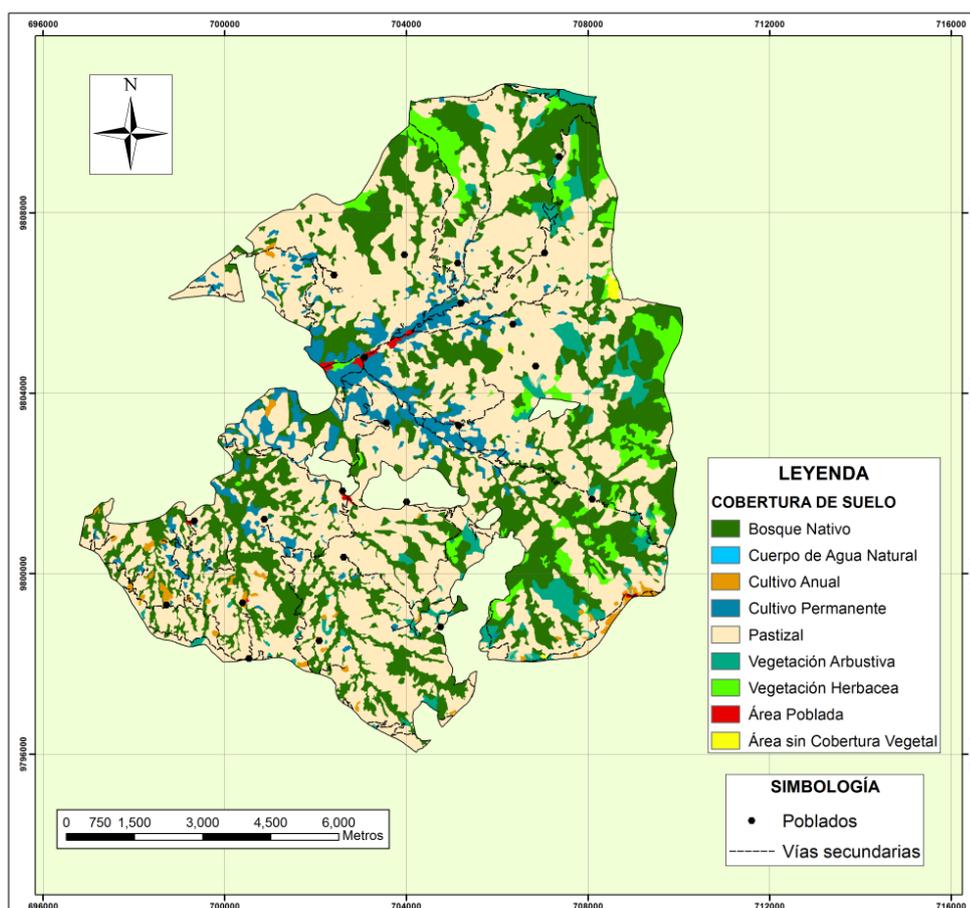


Figura 91 Cobertura de suelo simulada año 2020

Del mismo modo, la presencia de cultivos permanentes será mayor que los cultivos anuales con 5.7% y 0.8% respectivamente. Por otra parte los remanentes de vegetación natural serán muy escasos; la vegetación herbácea se conservará tan solo en el 4.4%, mientras que la vegetación arbustiva cubrirá el 3.9% del territorio (ver Figura 92).

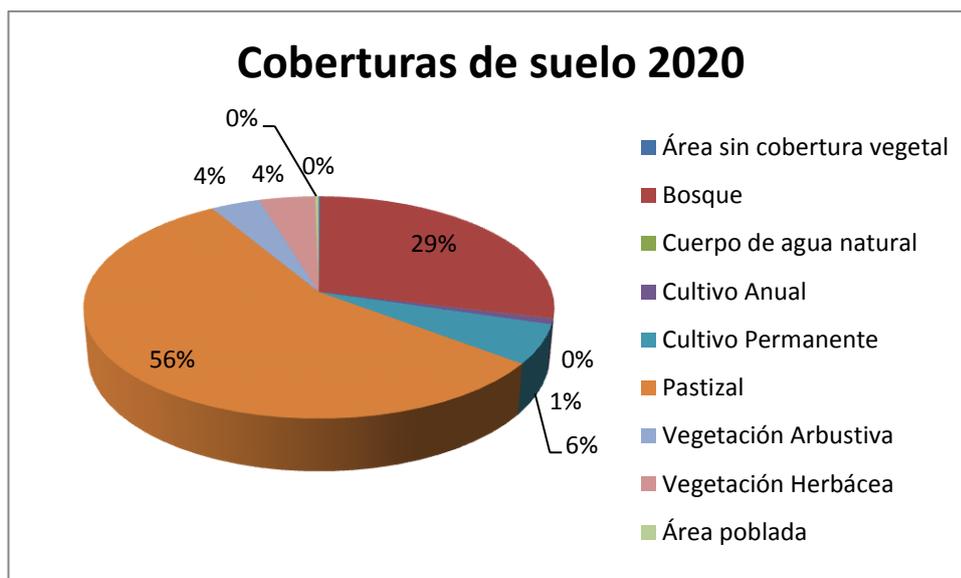


Figura 92 Porcentaje de coberturas de suelo simuladas año 2020

En la Figura 94, se muestran las variaciones presentadas en las coberturas de suelo para el periodo 2010-2020. El principal cambio que presentaran las clases, es el incremento de las áreas de pastizales con 871 Ha. a una tasa de cambio anual de 1.5%, valor inferior al presentado en el periodo pasado (1603Ha.), pero de igual forma muy significativo. La disminución en la tasa de cambio para este periodo se debe a la restricción que ejerce el territorio sobre las actividades antrópicas; es decir, las coberturas naturales que son las que en mayor proporción se modificarán y formarán pastizales, se encuentran en áreas de difícil accesibilidad y pendientes fuertes lo que desacelera la pérdida de la vegetación natural.

Asimismo la vegetación herbácea y arbustiva presentarán pérdidas importantes hasta el año 2020, se reducirán sus coberturas en 254 Ha. y 228 Ha. respectivamente, valores inferiores a las disminuciones observadas

en el periodo anterior, ambas a una tasa de cambio superior al 4% (ver Figura 93).

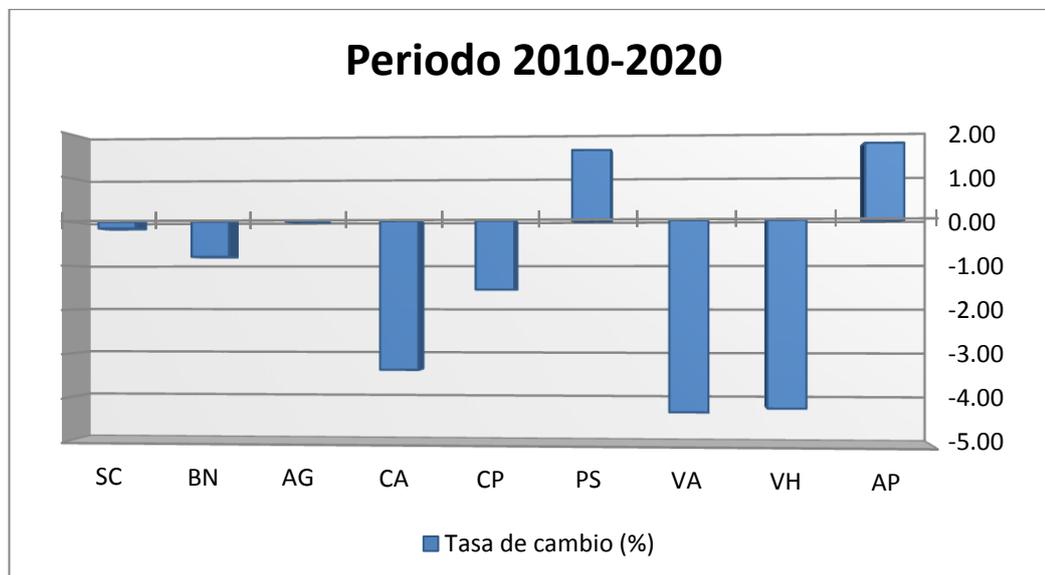


Figura 93 Tasa de cambio de coberturas de suelo periodo 2010-2020

Los cultivos anuales y permanentes continuarán con la misma tendencia de años anteriores, una disminución considerable de sus extensiones; principalmente los cultivos anuales se reducirán en 34 Ha. y al principio de cada año cambiarán a una tasa del 3.5%, se observa la permanencia de los cultivos de ciclo corto en la cuenca alta en los poblados: Matapalo, Como Cruz y Guapaloma. Los cultivos permanentes de igual forma que los periodos anteriores tienen una disposición a la baja, con una disminución de 102 Ha. a una tasa de pérdida de 1.5%, menor que en años anteriores. Por su parte, las zonas pobladas se extenderán 4.7 Ha. mayormente en la población de Balsapamba, en zonas antes cubiertas por cultivos permanentes

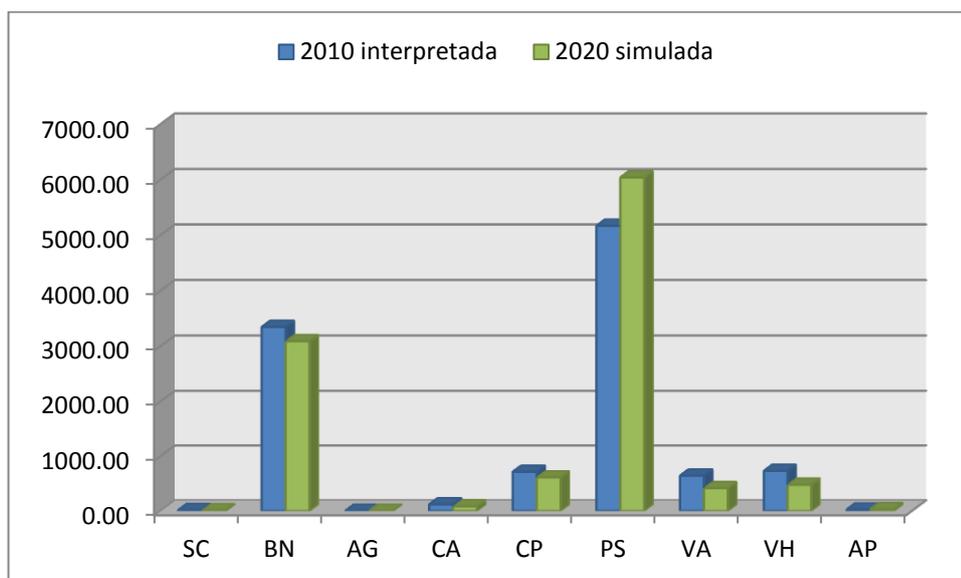


Figura 94 Variaciones en las coberturas de suelo periodo 2010-2020

En consecuencia, las coberturas de suelo distribuidas en la microcuenca del río Cristal al igual que en años anteriores sufrirán cambios significativos en cuanto a la pérdida de vegetación natural y posterior conversión en pastizales destinados al uso pecuario.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se cumplieron en su totalidad los objetivos y metas planteados en un principio, esencialmente el desarrollo de un análisis multitemporal y la obtención de modelos prospectivos de cobertura y uso de suelo de la Microcuenca del Río Cristal, lo que permitió entender el gran dinamismo del paisaje en estos últimos años, los factores que regulan estas modificaciones y hacia donde se dirigen, proveyendo de insumos para la implementación de planes de manejo de tierras.
- El desarrollo de un estudio multitemporal involucra la recopilación de información base correspondiente a varias épocas; en respuesta, el Instituto Espacial Ecuatoriano aportó significativamente con productos cartográficos, sin embargo fue insuficiente para el tipo de estudio a ejecutarse; por esta razón, fue necesario generar información propia en cuanto a coberturas de suelo, a fin de proveer al modelo de insumos de calidad y mejorar significativamente su ajuste a la realidad.
- La información base de la que se extrajeron las coberturas de suelo fueron imágenes satelitales y fotografías aéreas, las cuales deben garantizar una gran exactitud posicional por la necesidad de detectar las zonas de cambio; es así que los procesos de ortorectificación se vuelven trascendentales y críticos. La corrección geométrica de la imagen satelital alcanzó un error cuadrático medio en posición de 7.1 metros, menor al tamaño de píxel del sensor lo que garantiza una alta precisión planimétrica. Por otra parte, la precisión final de los procesos de ortorectificación, fue superior al valor que establece la norma para

escalas 1:25000 (7.5 metros), alcanzando en el primer bloque un error cuadrático medio de 1.13 metros y 0.88 metros en el segundo.

- Uno de los objetivos del presente estudio es la cuantificación de las áreas pertenecientes a cada cobertura de suelo y sus dinámicas a lo largo de los años; para esto, fue necesario realizar una correcta delimitación de las clases. En respuesta, se efectuó una interpretación interdependiente que consiste en modificar los polígonos solamente en zonas donde se han evidenciado cambios, lo que permitió identificar y cuantificar las superficies de una manera más efectiva.
- Los modelos de regresión logística constituyen herramientas útiles para establecer relaciones de dependencia entre variables biofísicas y la evolución de las coberturas de suelo; de este modo, proporcionan información valiosa para la identificación de los principales factores y su grado de influencia sobre los cambios en el paisaje. Se evidenció que los cultivos permanentes se establecen preferentemente a cortas distancias de cuerpos de agua y áreas agrícolas ya consolidadas, las zonas pobladas presentan mayor probabilidad de expandirse mientras más cerca se encuentran a un asentamiento humano y en pendientes bajas; adicionalmente, se corrobora la idea de que las áreas de recuperación de vegetación natural se concentran lejos de la intervención antrópica y en fuertes pendientes.
- El análisis multitemporal revela que en el periodo 1983-2000, debido a la fuerte actividad antrópica, se ha evidenciado un incremento significativo de las áreas de pastizales; es así, que en 1983 se contaba con 2250 Ha., mientras que para el año 2000 aumentó a 3560 Ha., crecimiento proveniente de vegetación arbustiva y herbácea que se redujeron en más de 500 Ha. cada una y en menor proporción pérdida de zonas de cultivos anuales y permanentes, mediante el abandono de actividades agrícolas y cambio hacia actividades pecuarias. El periodo

2000- 2010 presentó la misma tendencia: reducción de vegetación natural y áreas agrícolas e incremento de pastizales.

- Los modelos de autómatas celulares demostraron ser herramientas con un alto potencial en la simulación de escenarios futuros, utilizados ampliamente en análisis de crecimiento urbano, cambios en el uso de suelo, deslizamientos; en suma, cualquier proceso dinámico predecible. Para el caso de estudio, la combinación de autómatas celulares con cadenas de Markov permite tomar en cuenta en la regla de decisión el estado previo de la celda central y las celdas vecinas, proceso combinado en el que fue posible además la inclusión de imágenes de probabilidad de cambio, lo que permitió calibrar el modelo e incrementar la probabilidad de alcanzar mejores resultados. El ajuste del modelo fue muy bueno, 83%; sin embargo, al analizar visualmente el mapa generado se evidenció que los cultivos anuales no fueron simulados correctamente y se concluye que se debe al gran dinamismo de la cobertura lo que dificulta su proyección a largo plazo.
- La proyección de las superficies de cobertura de suelo al año 2020, muestra un panorama nada alentador, con un incremento importante de las zonas de pastizales en 871 Hectáreas, pérdida de vegetación natural de 739 Ha., y de igual forma que en los periodos anteriores disminución de las áreas agrícolas, valores inferiores a décadas pasadas pero de igual forma con impactos significativos en los ecosistemas; cabe destacar que las estimaciones son menos fiables mientras se incrementa el periodo de análisis, debido a que se presentan cambios cíclicos difíciles de predecir en largos periodos.

5.2. Recomendaciones

- Las variables explicativas del cambio de cobertura de suelo influyen de diferente forma en la probabilidad de transición; por este motivo, se recomienda efectuar un proceso de normalización de los valores de las variables a fin de que los coeficientes obtenidos sean indicadores del peso de cada factor y así determinar cuáles ejercen mayor influencia en las modificaciones.
- Las modificaciones en las coberturas de suelo se encuentran condicionadas por una serie de factores tanto biofísicos como socioeconómicos, de acuerdo a la información disponible se decidió utilizar solo variables biofísicas; sin embargo, estos cambios se regulan además por factores de concentración de población y actividades económicas; por lo tanto, es recomendable incluir en el modelamiento variables como: nivel de pobreza, número de parcelas, contratación en agricultura, edad media, densidad poblacional, rama de actividad, entre otras.
- El fin de los modelos prospectivos es simular con el mayor ajuste posible los cambios en las coberturas de suelo; por este motivo, en la validación se recomienda que el periodo a proyectar sea igual que el utilizado para la calibración, por ejemplo: si se desea simular al año 2010, se requiere información de los años 1990 y 2000 con un periodo de 10 años, lo que garantizará que los cambios se predigan de mejor manera.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alejandro, D., & Gómez, R. (2011). *Descripción y Aplicaciones de los Autómatas Celulares* (pp. 15–16). Acatlan. Recuperado de http://delta.cs.cinvestav.mx/~mcintosh/cellularautomata/Summer_Research_files/Arti_Ver_Inv_2011_DARG.pdf
- Anu, M. (1997). *Introduction to modelling and simulation* (pp. 3–4). Binghamton, NY. Recuperado de http://www.inf.utfsm.cl/~hallende/download/Simul2002/Introduction_to_Modeling_and_Simulation.pdf
- Arias, C., Alvarez, K., Palacios, W., Medina, I., & Pinos, G. (2010). Estudio Multitemporal de Cobertura Vegetal y Uso del Suelo entre los Años 1990, 2010 y Proyección al 2030 a Escala 1:50.000 para el Centro y Sur Oriente de la Amazonía Ecuatoriana y Sistematización de la información sobre los aspectos socio-económicos y S. Quito, Ecuador. Recuperado de [http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/RESPALDOS/INFO_FRONTERA_ZONA1/7.INFORMACION_GPS_SUCUMBIOS/Memoria T%C3%A9cnica Estudio Multitemporal TNC/RESULTADOS.pdf](http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/RESPALDOS/INFO_FRONTERA_ZONA1/7.INFORMACION_GPS_SUCUMBIOS/Memoria_T%C3%A9cnica_Estudio_Multitemporal_TNC/RESULTADOS.pdf)
- Arozarena, A., & Otero, I. (2001). Sistema captura y análisis de la información territorial. Madrid. Recuperado de <http://ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-y-fotogrametria/topografia-cartografia-y-geodesia/material-de-clase>
- Astudillo, S., & Huilcamaigua, S. (2011). *Utilización de autómatas celulares para modelar el cambio de uso de suelo y cobertura vegetal y su comparación con técnicas alternativas. Caso de estudio: sector comprendido entre agrícola Payamino y Callanayacu, Provincia de Orellana*. Universidad de las Fuerzas Armadas, Quito.
- Ballesteros, F. (2011). *Propuesta de gestión integrada de recursos hídricos para la microcuenca del río Cristal, parroquia Balsapamba, catón*

San miguel , Provincia de Bolívar. Universidad Técnica Particular de Loja, Loja.

- Bedon, F., & Pinto, S. (2012). *Evaluación de técnicas de detección de cambios del uso de la tierra a través del análisis multitemporal de imágenes satelitales en el cantón Daule*. Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Sangolquí.

- Benitez, C. (2002). Ortorrectificacion de fotografias aéreas utilizando el software ERDAS Imagine. Recuperado de <http://www.cartografia.cl/download/manuales/erdas.pdf>

- Bernis, W. (2010). *Levantamiento y análisis multitemporal de pasivos ambientales en el campo marginal Bermeo mediante el uso de Sensores Remotos*. Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Quito.

- Braulio, I. (2005). *Principios básicos de la fotogrametría actual. (Tesis de pregrado)*. Instituto Politécnico Nacional, Mexico D.F. Recuperado de <http://ing.unne.edu.ar/dep/goeciencias/fotointer/pub/teoria2011/parte01/fotom.pdf>

- Butler, M., Belbin, J., & MacNeill, J. (1990). *Cartografía de recursos marinos: un manual de introducción* (p. 281). Roma. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/003/t0390s/T0390S08.htm#ch8>.

- Buzai, G. (2007). Actualización de cálculos y distribuciones espaciales a través de cadenas de markov y autómatas celulares. *Matteucci*, 433–450. Recuperado de <http://www.gesig-proeg.com.ar/documentos/articulos/2007-Buzai-INTA.pdf>

- Ceballos, A., López, J., Trujillo, A., & Gutiérrez, A. (2005). Cartografía del riesgo de erosión en el consejo popular punta de la sierra mediante el empleo de SIG. Tlaxcala. Recuperado de [http://www.convenciontropicocuba.com/CIETA/Aplicacion de SIG y de la Percepcion Remota a Estudios Territoriales.pdf](http://www.convenciontropicocuba.com/CIETA/Aplicacion%20de%20SIG%20y%20de%20la%20Percepcion%20Remota%20a%20Estudios%20Territoriales.pdf)

- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental* (Tercera., pp. 1 – 594). Barcelona: Ariel.
- CISMIL. (2006a). Mapa de Uso del Suelo 2001. *Almanaque Agropecuario Del Ecuador*. Quito. Recuperado de <https://www.flacso.edu.ec/portal/pnTemp/PageMaster/pau6a0qddacjs7a0mbs708k5cs5eau.pdf>
- CISMIL. (2006b). *Objetivos desarrollo del Milenio* (pp. 1–258). Quito. Recuperado de http://www.unitecnologica.edu.co/otros/LOS_OBJETIVOS_DE_DESARROLLO_DEL_MILENIO.pdf
- Del Hoyo, V. (2007). Empleo de regresión logística para la obtención de modelos de riesgo humano de incendios forestales. Madrid. Recuperado de http://www.geogra.uah.es/firemap/pdf/VilardelHoyo_Granada.pdf
- Di Gregorio, A., & Jansen, L. (2005). *Sistema de Clasificación de la Cobertura de la Tierra* (pp. 13–100). Roma. Recuperado de http://www.glcn.org/downs/pub/docs/manuals/lccs/LCCS2-manual_270208_es.pdf
- Diario El comercio. (2014). 150 hectáreas de arroz están perdidas en el cantón Montalvo por inundaciones. Retrieved April 05, 2014, from http://www.elcomercio.com.ec/pais/losrios-invierno-arroz-inundaciones-magap-lluvias_0_1075092638.html
- Eastman, R. (2003). Guía para SIG y procesamiento de imágenes. Worcester: Clark University. Recuperado de <http://www.clarklabs.org/products/spanish-manual.cfm>
- ERDAS. (2001). Guía Erdas 8.4 Español. Atlanta, Georgia: ERDAS. Recuperado de http://cdc.lamolina.edu.pe/Descargas/sensores_remotos/guia_erdas.html

- ESRI. (2013). ArcGIS Resources. *Ayuda de ArcGIS 10.1*. Retrieved September 26, 2014, from <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html#//00qn000001p000000>
- Fallas, J. (2001). Escaneo, georeferenciación y vectorización de material cartográfico y de fotos aéreas utilizando ArcView. Heredia. Recuperado de http://www.mapealo.com/Costaricageodigital/Documentos/alfabetizacion/ARCVIEW_ESCANEEO_GEOREF_VECT.PDF
- FLACSO. (1980). El proceso de transformación de la producción lechera serrana y el aparato de generación transferencia en Ecuador. Quito.
- García, A. (2010). Análisis de los factores que condicionan la evolución de los usos del suelo en los pequeños asentamientos urbanos de la costa norte de Galicia. *Asociación de Geógrafos Españoles*, 54, 57–79.
- Gomez, A. (2009). *Estudio multitemporal de la dinámica de transformación espacial de la cobertura por crecimiento urbano, en una zona de la localidad de Suba, Bogotá –Colombia, en el periodo 1955 – 2006*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogota. Recuperado de oab.ambientebogota.gov.co/apc-aa-files/.../multitemporal_cobertura.pdf
- Gonzales, X., & Marey, M. (2004). *Fotointerpretación de los usos de suelo* (p. 25). Santiago de Compostela.
- Guerra, E. (2006). *Análisis multitemporal de la cobertura y uso de la tierra a través del sistema LCCS en la cuenca baja del Río Grande-Santa Cruz*. Universidad Mayor San Simon, Cochabamba.
- Guillen, A., Serrato, O. P. L., & Garnica, J. J. A. (2014). Correlación No-Paramétrica y su Aplicación en la Investigaciones Científica Non-Parametric Correlation and Its Application in Scientific Research, 9(2), 31–40.

- IEE. (2012). *Tecnología espacial y geofísica en la gestión de riegos geodinámicas externos para la prevención y mitigación de inundaciones y crecidas torrenciales* (pp. 1–33). Quito, Ecuador.
- IGM. (2006). *Especificaciones técnicas generales para la realización de cartografía topográfica a cualquier escala* (pp. 1–29). Quito.
- IGM. (2008). *Especificaciones Técnicas para Ortofotos Digitales* (pp. 1–10). Quito.
- INEC. (2010). Censo Población y vivienda 2010. Quito.
- Ines, V. (2007). *Análisis tempo espacial de la cobertura nivo glaciar del iliniza sur*. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador. Recuperado de bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/549/1/CD-1054.pdf
- Jaime, C., & Rodríguez, C. (2008). No Title.
- Jensen, J. (1996). *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Landis, R., & Koch, G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159 – 174.
- León, A., & Flores, R. (2008). *Introducción a los Sistemas Dinámicos y Autómatas Celulares Verano de Investigación 2008* (pp. 1–16). Acatlan. Recuperado de http://delta.cs.cinvestav.mx/~mcintosh/cellularautomata/Summer_Research_files/sd.pdf
- Lopez, A. M. (2011). *Introducción a la vida artificial y autómatas celulares* (pp. 1–20). Acatlan. Recuperado de http://uncomp.uwe.ac.uk/genaro/Papers/Veranos_McIntosh_files/vida_artificial_Miriam.pdf

- López, M., & Caselles, V. (1991). *Introducción a la teledetección en seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos Renovables: Agricultura*. Universidad de Valencia, Valencia.
- Mas, J., Kolb, M., Houet, T., Paegelow, M., & Camacho, M. (2010). *Una comparación de diferentes enfoques de modelación de cambios de cobertura / uso del suelo* (pp. 1–10). México D.F. Recuperado de http://www.ugr.es/~camacho/archivos/CV/Mas_etal_una_comparacion_SELPERGto2010.pdf
- MCPEC. (2011). *Agendas para la transformación productiva territorial-Provincia de Bolívar*. Quito.
- Medina, B. Y. (2007). *Deslizamientos e Impactos Ambientales de los Huracanes Mitch y Stan, en Guatemala*. Guatemala. Recuperado de <http://hercules.cedex.es/hidraulica/PROHIMET/Br07/Comunicaciones/Medina.pdf>
- 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. ESPE, Quito*.
- Mendez, M., Agüero, B., & Pérez, E. (2005). *Procesamiento de Imágenes del Satélite ASTER para la Actualización de la Red Vial a escala 1:100 000 con fines de Control de Flota* (p. 20). La Habana.
- Meza, C. (2010). *Aplicación del Sistema de Información Geográfica (SIG) en el modelamiento del río Ucayali*. Lima, Perú. Recuperado de <http://industrial.unmsm.edu.pe/upg/archivos/libros/meza/SIGcorregido.pdf>
- Ministerio del Ambiente. (2012). *Línea base de deforestación del Ecuador continental* (pp. 1–32). Quito, Ecuador. Recuperado de <http://sociobosque.ambiente.gob.ec/?q=node/595>

- Montoya, A., & Arrobo, V. (2014). *Vicerrectorado de investigación y vinculación con la colectividad maestría en evaluación y auditoría de sistemas tecnológicos promoción iv*. ESPE, Quito.
- Morris, T. (1966). *Manual of Photogrammetry* (3rd ed., pp. 25–28). Falls Church.
- Ormeño, S. (2006). *Teledetección fundamental* (Tercera., pp. 150–155). Madrid. Recuperado de <http://pdi.topografia.upm.es/santi/download/FunTeled.PDF>
- Padilla, O. (2005). Autómata celulares: una solución a la geosimulación. *Revista Geoespacial*, 2, 76. Recuperado de <http://www.espe.edu.ec/encuesta/sitiorevistas/revistas/civil/RevistaGeoespacialN2.pdf>
- Peña, J. (2007). *Efectos ecológicos de los cambios de coberturas y usos de suelo en la Marina Baixa (Alicante)*. Universidad de Alicante, Alicante.
- Pérez, U. (1997). Los modelos digitales de elevación y sus aplicaciones en un SIG. Bogotá.
- Pidal, J. H. (2003). Modelización de cambio de cobertura del suelo en la provincia de napo para el periodo 1990 – 2000, utilizando regresión logística y maxent., 1–13.
- Puentes, I., Navarro, M., & Pezzola, A. (2009). Sistema de clasificación de la cobertura del suelo. Buenos Aires. Recuperado de http://inta.gob.ar/documentos/cobertura-del-suelo-de-la-republica-argentina.-ano-2006-2007-lccs-fao/at_multi_download/file/INFORME TECNICO lccs.pdf
- Rutherford, G. N., Bebi, P., Edwards, P. J., & Zimmermann, N. E. (2008). Assessing land-use statistics to model land cover change in a

mountainous landscape in the European Alps. *Ecological Modelling*, 212(3-4), 460–471. doi:10.1016/j.ecolmodel.2007.10.050

- Sandoval, G., & Romero, H. (2009). *Análisis del proceso de cambio de uso y cobertura de suelo en la expansión urbana del gran valparaíso*. Universidad de Chile, Santiago.

- Sarria, F. (2004). SIG aplicados al análisis y cartografía de riesgos climáticos. Murcia. Recuperado de http://www.uhttp://www.um.es/geograf/sigmur/cursos/SIG_clima.pdfm.es/geograf/sigmur/cursos/presentacion.pdf

- SIGTIERRAS. (2011). Valoración de tierras rurales cantón Santa Cruz. Quito. Recuperado de http://www.santacruz.gob.ec/gadsantacruz2/gmscdocs/2012/sectecnica/ANEXO_01_MEMORIAS_TECNICAS.pdf

- SNGR, PNUD, & UEB. (2013). Perfil territorial y análisis de vulnerabilidad del cantón San Miguel de Bolívar. San Miguel. Recuperado de [http://repositorio.cedia.org.ec/bitstream/123456789/858/1/Perfil territorial SAN MIGUEL.pdf](http://repositorio.cedia.org.ec/bitstream/123456789/858/1/Perfil_territorial_SAN_MIGUEL.pdf)

- Tarifa, E. (2000). *Teoría de Modelos y Simulación*. Jujuy.

- Urquía, A. (2004). *Simulación*. Madrid. Recuperado de http://www.uned.es/543072/Files/teoria_Simulacion.pdf

- Velázquez, A., Mas, J., Gallegos, J., Saucedo, R., Alcántara, P., Castro, R., ... Ezcurra, E. (2001). *Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México* (No. 62) (pp. 28–29). México D.F.

- Von Thaden, J. J. (2012). *Cambio de uso de suelo y cobertura vegetal en el municipio de Guelatao de Juárez, Oaxaca, México*. Universidad de la Sierra Juárez. Recuperado de <http://www.unsij.edu.mx/tesis/>

- Waters, W. (2000). El desarrollo de las agroexportaciones en el Ecuador: la primera respuesta empresarial. Quito.
- Zapata, O. (2003). *Fundamentos de fotogrametría para imágenes de contacto y digitales*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/12562/6/70074527.2003.pdf>