

# UNIVERSIDAD DE CUENCA

FACULTAD DE ARQUITECTURA Y  
URBANISMO



MAESTRÍA EN  
ORDENACIÓN TERRITORIAL

PROSPECTIVA DEL USO DEL SUELO Y  
COBERTURA VEGETAL EN EL  
ORDENAMIENTO TERRITORIAL  
Caso cantón Cuenca



UNIVERSIDAD DE CUENCA  
*desde 1867*

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE  
MAGISTER EN ORDENACIÓN TERRITORIAL (MSc)



**AUTORA:**

BLGA. NANCY JAQUELINE PINOS ARÉVALO  
C.I. 0102692647

**DIRECTOR:**

MSc. ARQ. BORIS FRANCISCO VÉLEZ TAMARIZ  
C.I. 0102115839

Cuenca, noviembre de 2015

## Resumen

El objetivo de esta investigación, fue la evaluación de una metodología para la construcción de escenarios futuros a año 2010 y 2030 a partir de un análisis multitemporal con imágenes satélites Landsat de los años 1991 y 2001 en el territorio de cantón Cuenca a una escala 1:100000; empleando modelos de simulación (Autómatas celulares de cadenas de Markov CA\_MARKOV y el Land Change Modeler -LCM), en base al análisis histórico o multitemporal (cadenas de Markov), en la cobertura y uso del suelo del cantón. Para el modelo de aptitud de suelo se usó el método de Evaluación Multicriterio – EMC y luego una Evaluación Multi-Objetivo – EMO con la técnica de Suma Lineal Ponderada – SLP y Análisis del Punto Ideal – API. Este último método requiere la definición de objetivos para determinar la aptitud del suelo en conservación, agrícola, pecuaria, forestal y urbano, cada uno de esto debe tener criterios en base a los factores que posibilitan su aptitud y también se identificaron algunas restricciones tanto morfológicas como ecosistémicas.

Al final de esta investigación se pudo demostrar que las cobertura de páramo, vegetación herbácea, leñosa y leñosa nativa, presentan una pérdida de 49.066,3 hectáreas, que corresponden a -2% hectáreas por año; en el año 1991 tenían un total de 267.873,7 hectáreas, para el año 2001 se reducen a 218.807,4 hectáreas, lo que nos indica que la mayoría de cambios se dio en estas coberturas. La categoría de pasto y cultivos es la mayor crecimiento presenta, en 1991 con 22.796,1 ha y para el año 2001 se incrementa a 70.639,8 ha, dando una tasa de cambio del 12% anual, es decir que la transición se dio a esta cobertura. Las categorías de agua, suelo descubierto y suelo urbano, presentaban para 1991 un total de 6.877,8 ha y en el 2001 presenta 8.100 ha, con una tasa de cambio del 1,6% anual.

La construcción de los modelos al año 2010 y 2030 tiene la misma tendencia disminución de la cobertura de paramo en 17.000 hectáreas aproximadamente en ese periodo, disminución de la vegetación herbácea, leñosa y leñosa nativa. El incremento de pastos y cultivos en aproximadamente 41 mil hectáreas.

Es evidente el incremento de las zonas urbanas dentro del territorio, siendo esta la segunda causa más fuerte de cambio de uso del suelo.

**PALABRAS CLAVES:** *Usos del suelo; cambios de usos del suelo; escenarios; simulaciones; modelos; Ciudad de Cuenca; planificación; ordenación del territorio. Imágenes satelitales, análisis multitemporal, dinámicas de cambio.*

## Abstract

The objective of this research was to evaluate a methodology for the construction of future scenarios in the years 2010 to 2030 from a multi-temporal analysis of Landsat satellite images of 1991 and 2001 in the Canton Cuenca on a scale 1: 100 thousand; using simulation models cellular automata of Markov Chain (CA\_MARKOV) and Land Change Modeler -LCM), based on historical or multitemporal analysis Markov Chain, in coverage and land use in the city. EMC and then a Multi-Objective Assessment - EMO with the technique of Linear Weighted Sum - SLP and Ideal Point Analysis - API. The latter method requires the definition of objectives to determine suitability of soil conservation, agriculture, livestock, forestry and urban, each of these criteria should be based on the factors that make your ability and some morphometric restrictions were also identified as ecosystem.

At the end of this research it was proved that the coverage of moor, herbaceous vegetation, woody and native woody vegetation has a loss of 49,066.3 hectares, corresponding to 2% hectares per year; in 1991 had a total of 267,873.7 hectares for 2001 are reduced to 218,807.4 hectares, which indicates that most of the changes occurred in these coverages. The category of grass and crops is the fastest growing presented in 1991 to 22,796.1 hectares and for 2001 is increased to 70,639.8 ha, giving a rate of change of 12% annual, it means that the transition is made to this coverage. The categories of water, bare soil and urban land, had in 1991 a total of 6877.8 ha and in 2001 has 8,100 ha, with an exchange rate of 1.6% annually.

The construction of the models in the years 2010 to 2030 have the same trend of decreasing coverage land in approximately 17,000 hectares in this period, decreased native herbaceous, woody and woody vegetation. The increase of pastures and crops in about 41 thousand hectares.

Clearly the increase in urban areas within the territory, making it the second strongest cause of change in land use.

**Keywords:** *land use, land use change, scenarios, simulations, models, Cuenca, spatial planning, Satellite images, multitemporal, dynamic change analysis.*

## Índice de contenidos

Resumen .....	i
Abstract .....	ii
Índice de contenidos .....	iii
Índice de tablas .....	vi
Índice de ilustraciones.....	vii
Índice de mapas .....	viii
Agradecimientos .....	xii
Dedicatoria .....	xii
Introducción.....	xiii
Antecedentes .....	xiv
Objetivos .....	xv
Justificación.....	xvi
Problema.....	xvii
1.    CAPITULO I: REVISION DE LA LITERATURA.....	1
1.1.    Conceptos básicos.....	1
1.2.    Ordenamiento Territorial .....	2
1.2.1.    El sistema Territorial y el Modelo Territorial.....	3
1.2.2.    La prospectiva en el ordenamiento territorial.....	3
1.2.3.    Generación de escenarios .....	4
1.2.4.    La cobertura vegetal y uso del suelo como insumo para la construcción de la prospectiva .....	4
1.3.    Introducción a la teledetección.....	5
1.3.1.    Análisis multitemporal de la cobertura vegetal .....	6
1.4.    Construcción del modelo tendencial de cobertura y uso del suelo al año 2010.....	6
1.5.    Descripción del área de estudio.....	7
1.5.1.    Ubicación.....	7
1.5.2.    Situación actual del cantón Cuenca.....	10
2.    CAPITULO II: MARCO METODOLÓGICO.....	16



2.1.	Insumos.....	16
2.2.	Imágenes de satélite .....	16
2.3.	Software .....	17
2.4.	Métodos.....	17
2.4.1.	Identificación y selección de las imágenes satélites.....	17
2.4.2.	Corrección Geométrica .....	18
2.4.3.	Corrección radiométrica .....	23
2.5.	Clasificación digital de las imágenes satélites de los años 1991 y 2001 .....	27
2.5.1.	Escala de los productos cartográficos a obtener. ....	29
2.5.2.	Definición de las categorías de cobertura y uso del suelo .....	29
2.5.3.	Fase de entrenamiento .....	31
2.5.4.	Análisis de las estadísticas de entrenamiento .....	32
2.5.5.	Fase de asignación .....	33
2.5.6.	Cambio de cobertura y uso del suelo .....	33
2.5.7.	Matrices de tabulación cruzada .....	33
2.5.8.	Calculo la Tasa Anual de Cambio (TAC) .....	34
2.6.	Modelos de Predicción.....	35
2.6.1.	Predicción de cambio de cobertura y uso de suelo .....	35
2.6.2.	Land Change Modeler.....	36
2.6.2.1.	Cadenas de Markov .....	36
2.6.2.2.	Autómatas celulares.....	36
2.6.2.3.	Evaluación multicriterio – EMC .....	37
2.6.2.4.	La técnica de Sumatoria Lineal Ponderada – SLP, .....	39
2.6.2.5.	La técnica del Análisis de Punto Ideal - API .....	40
3.	CAPITULO III: RESULTADOS.....	42
3.1.	Clasificación digital de las imágenes satélites de los años 1991 y 2001 .....	42
3.1.1.	Cobertura vegetal y uso del suelo 1991 .....	42
3.1.2.	Cobertura vegetal y uso del suelo 2001 .....	43
3.2.	Análisis de cambio de cobertura y uso del suelo.....	46

3.3.	Tasa Anual de Cambio (TAC) para el cantón Cuenca .....	48
3.4.	Dinámica del proceso de cambio de la cobertura y uso del suelo.....	49
3.5.	Simulación de escenarios de uso del suelo a futuro en el cantón Cuenca. ....	55
3.5.1.	Modelo de simulación al año 2010.....	55
3.5.2.	Modelo de simulación al año 2030.....	59
3.5.3.	Variables de análisis (influencia de variables) .....	59
3.5.4.	Técnicas de evaluación Multi Criterio para la aptitud de uso del suelo .....	60
3.5.4.1.	Criterios: factores para aptitud del suelo, a ser empleados en el cantón Cuenca	60
3.5.4.2.	Matriz de evaluación .....	65
3.5.4.3.	Restricciones o limitaciones para la determinación de uso del suelo el cantón Cuenca .....	67
3.5.4.4.	Normalización de factores.....	68
3.5.4.5.	Ponderación de factores (pesos) .....	78
3.5.4.6.	Aplicación de técnicas multicriterio para determinar la aptitud de suelo	79
3.5.5.	Técnica Suma Lineal Ponderada – SLP .....	79
3.5.6.	Técnica del Análisis de Punto Ideal - API .....	86
3.5.7.	Determinación de la capacidad de acogida del territorio empleando técnicas de Evaluación Multi Objetivo - EMO .....	93
3.5.7.1.	Ponderación de mapas de aptitud .....	93
3.6.	Validación de los modelos .....	104
3.6.1.	Comparación de los diferentes escenarios realizados .....	104
4.	CAPITULO IV: CONCLUSIONES .....	106
4.1.	Conclusiones.....	106
5.	CAPITULO V: RECOMENDACIONES .....	108
5.1.	Recomendaciones .....	108
6.	BIBLIOGRAFÍA .....	109

## Índice de tablas

Tabla 1: Evolución de la Población y Densidad de Cuenca, 1950-2010.....	9
Tabla 2: Coeficientes de calibración para imágenes Landsat5 .....	24
Tabla 3: Coeficientes de calibración para imágenes Landsat7 .....	24
Tabla 4: Categorías de cobertura vegetal y uso del suelo.....	30
Tabla 5: Divergencia transformada entre las categorías de la imagen Cuenca 1991.....	32
Tabla 6: Divergencia transformada entre las categorías de la imagen Cuenca 2001.....	32
Tabla 7: Categorías de cobertura y uso del suelo al año 1991 .....	43
Tabla 8: Categorías de cobertura y uso del suelo al año 2001 .....	43
Tabla 9: Tasa de cambio por cobertura en el cantón Cuenca entre 1991 y 2001.....	48
Tabla 10: Matriz de tabulación cruzada entre los años 1991 y 2001 en hectáreas y porcentaje .....	50
Tabla 11: Superficie del cantón Cuenca que ha sufrido cambios en el uso del suelo .....	51
Tabla 12: Transición de categorías entre 1991 a 2001 en el cantón Cuenca .....	53
Tabla 13: Matriz de probabilidad de cambio 1991 al 2010 .....	56
Tabla 14: Criterios y factores para determinar la capacidad de uso en conservación, agrícola, pecuario y forestal.....	61
Tabla 15: Criterios y factores para uso determinar la capacidad de uso urbano .....	61
Tabla 16: Matriz de criterio de capacidad de acogida según uso de suelo.....	62
Tabla 17: Matriz de criterio de capacidad de acogida según la topografía del terreno (Pendiente porcentaje) .....	62
Tabla 18: Matriz de criterio de capacidad de acogida según clases agrológicas.....	64
Tabla 19: Matriz de criterio de capacidad de acogida según altitud del terreno .....	64
Tabla 20: Matriz de evaluación del factor de cobertura vegetal y uso del suelo .....	65
Tabla 21: Matriz de evaluación del factor de topografía del terreno (Pendiente porcentaje). .....	66
Tabla 22: Matriz de evaluación del factor de clases agrológicas .....	66
Tabla 23: Ponderación de factores para determinar la aptitud de uso de conservación: .....	78
Tabla 24: Ponderación de factores para determinar la aptitud de uso agrícola, pecuario y forestal:.....	78
Tabla 25: Ponderación de factores para determinar la aptitud de uso urbano:.....	79
Tabla 26: Superficie a asignar a los uso del suelo por aptitud .....	95
Tabla 27: Superficie asignada para cada aptitud para uso .....	95
Tabla 28: Diferencia en el resultado de la capacidad de acogida con las dos técnicas aplicadas Suma Lineal Ponderada SLP y Análisis al Punto Ideal API .....	101
Tabla 29: Probabilidad de cambio del uso del suelo al año 2030 .....	102

## Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Relieve del cantón Cuenca.....	8
Ilustración 2: Evolución de la población del cantón Cuenca.....	10
Ilustración 3: Esquema del crecimiento de la ciudad – Trama urbana.....	12
Ilustración 4: Ámbito de la Ordenanza de uso y ocupación del suelo vigente .....	13
Ilustración 5: Crecimiento del área urbana de la ciudad de Cuenca .....	14
Ilustración 6: Comparación de cobertura y uso del suelo entre los años 2000 y 2013 de cantón Cuenca .....	15
Ilustración 7: Imágenes de Satélite Landsat usadas para la investigación .....	19
Ilustración 8: Ubicación de puntos de control entre imagen de 1987 (izq) e imagen de 1991 (der).....	22
Ilustración 9: Valores de RMS obtenidos con los 227 puntos de control .....	23
Ilustración 10: Resultado de la corrección radiométrica y recorte de las Imágenes Satélite Landsat con el contorno del cantón Cuenca.....	28
Ilustración 11: Matriz de tabulación cruzada.....	34
Ilustración 12: Diagrama del proceso de análisis de la tasa de cambio .....	35
Ilustración 13: Disposición de las celdas .....	37
Ilustración 14: Proceso para Cadenas de Markov .....	37
Ilustración 15: Ocupación de los usos del suelo para el año 1991, en porcentajes.....	46
Ilustración 16: Ocupación de los usos del suelo para el año 2001, en porcentajes.....	47
Ilustración 17: Evolución de los diferentes uso del suelo en porcentaje entre 1991 y 2001. .	47
Ilustración 18: Tasa de cambio por año de la cobertura y uso del suelo en el cantón Cuenca .....	49
Ilustración 19: Ganancias y pérdidas registradas para cada uno de los usos del suelo en el cantón Cuenca. ....	51
Ilustración 20: Proceso de construcción del modelo de predicción al 2010 en el software IDRISI.....	55
Ilustración 21: Restricciones zonas de conservación .....	68
Ilustración 22: Proceso de normalización (0 – 1) de la capa de vías .....	69
Ilustración 23: Proceso de normalización (0 – 1) de la capa de asentamientos humanos ....	69
Ilustración 24: Proceso de normalización (0 – 1) de la capa de red de agua potable.....	70
Ilustración 25: Proceso de normalización (0 – 1) de la capa de red de alcantarillado .....	70
Ilustración 26: Proceso de normalización (0 – 1) de la capa de uso agrícola .....	71
Ilustración 27: Proceso de normalización (0 – 1) de la capa de uso pecuario .....	71
Ilustración 28: Proceso de normalización (0 – 1) de la capa de uso forestal .....	72
Ilustración 29: Proceso de normalización (0 – 1) de la capa de conservación.....	72
Ilustración 30: Proceso de normalización (0 – 1) de la capa de uso urbano.....	73

Ilustración 31: Factores para determinar la aptitud de uso para conservación .....	73
Ilustración 32: Factores para determinar la aptitud de uso para uso agrícola.....	74
Ilustración 33: Factores para determinar la aptitud de uso para uso pecuario.....	75
Ilustración 34: Factores para determinar la aptitud de uso para uso forestal.....	76
Ilustración 35: Factores para determinar la aptitud de uso para uso urbano .....	77
Ilustración 36: Proceso para ingresar pesos - API .....	94
Ilustración 37: Ingreso de los datos en el módulo MOLA de IDRISI SELVA.....	96
Ilustración 38: Aptitud del uso del suelo en conservación, agrícola, pecuario, forestal y urbano, aplicando la técnica EMO - Suma Lineal Pondera .....	97
Ilustración 39: Aptitud del uso del suelo en conservación, agrícola, pecuario, forestal y urbano, aplicando la técnica EMO – Análisis del Punto Ideal - API.....	99
Ilustración 40: Dinámica de cambio de superficie en las categorías de uso del suelo en 1991, 2001, 2010 y 2030 .....	105

## Índice de mapas

Mapa 1: Ubicación Geográfica del cantón .....	7
Mapa 2: Mapa base del cantón Cuenca .....	11
Mapa 3: Mapa de la cobertura y uso del suelo al año 1991 .....	44
Mapa 4: Mapa de la cobertura y uso del suelo al año 2001 .....	45
Mapa 5: Mapa de Ganancias, Pérdidas y Persistencia de las categorías de uso del suelo en el cantón Cuenca. ....	52
Mapa 6: Mapa de proceso de cambio entre 1991 y 2001 .....	54
Mapa 7: Predicción de uso del suelo de cantón Cuenca al año 2010.....	57
Mapa 8: Mapa de la cobertura vegetal y uso del suelo del cantón Cuenca al 2010 - Imagen Rapid Eye.....	58
Mapa 9: Aptitud para uso de conservación con la técnica Suma Lineal Ponderada -SLP ....	81
Mapa 10: Aptitud para uso agrícola con la técnica Suma Lineal Ponderada -SLP .....	82
Mapa 11: Aptitud para uso pecuario con la técnica Suma Lineal Ponderada -SLP .....	83
Mapa 12: Aptitud para uso forestal con la técnica Suma Lineal Ponderada -SLP .....	84
Mapa 13: Aptitud para uso urbano con la técnica Suma Lineal Ponderada -SLP.....	85
Mapa 14: Aptitud para uso de conservación con la técnica de Análisis del Punto Ideal - API .....	88
Mapa 15: Aptitud para uso agrícola con la técnica de Análisis del Punto Ideal - API .....	89
Mapa 16: Aptitud para uso pecuario con la técnica de Análisis del Punto Ideal - API .....	90
Mapa 17: Aptitud para uso forestal con la técnica de Análisis del Punto Ideal - API .....	91
Mapa 18: Aptitud para uso urbano con la técnica de Análisis del Punto Ideal - API.....	92



Mapa 19: Aptitud del uso del suelo en conservación, agrícola, pecuario, forestal y urbano, aplicando la técnica EMO - Suma Lineal Pondera ..... 98

Mapa 20: Aptitud del uso del suelo en conservación, agrícola, pecuario, forestal y urbano, aplicando la técnica EMO – Análisis del Punto Ideal – API..... 100

Mapa 21: Modelo predictivo al 2030 del cambio de uso del suelo del cantón Cuenca ..... 103




UNIVERSIDAD  
DE CUENCA

Nº 031027

CUARENTA  
CENTAVOS

Yo, **NANCY JAQUELINE PINOS AREVALO**, autora de la tesis "**Prospectiva del uso del suelo y cobertura vegetal en el ordenamiento territorial Caso cantón Cuenca**", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de **Master en Ordenamiento Territorial**. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora.

Cuenca, 11 de noviembre de 2015



**NANCY JAQUELINE PINOS AREVALO**  
C.I: 0102692647



UNIVERSIDAD  
DE CUENCA

Nº 032434

CUARENTA  
CENTAVOS

Yo, **NANCY JAQUELINE PINOS AREVALO**, autora de la tesis "**Prospectiva del uso del suelo y cobertura vegetal en el ordenamiento territorial Caso cantón Cuenca**", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 11 de noviembre de 2015



**NANCY JAQUELINE PINOS AREVALO**  
C.I: 0102692647



## Agradecimientos

*“Mi vida está hecha de toda las vidas” (Pablo Neruda).*

La culminación de esta tesis ha conllevado un gran esfuerzo personal, lleno de momentos de euforia, pero también dificultad. El comienzo es complicado hubo obstáculos que obligó a regresar por el camino ya recorrido.

Mi más sincero agradecimiento al Arq. Boris Vélez Tamariz, mi Director, su confianza, conocimiento, orientación y paciencia que han hecho posible la culminación de este trabajo.

De forma muy especial quiero agradecer a todas

También quiero agradecer a mis amigos Lorena Vivanco, Mónica Mendieta, Graciela Verdugo, Patricia Quezada, Queta Martínez, Paul Lituma, Andrés Luzuriaga, Ricardo Vázquez, Esteban Rodas, Janeth Banegas, Luisa Pacheco, Viviana Crespo por el tiempo “robado”, siempre dispuestos a apoyarme y brindarme aliento para continuar por este camino.

## Dedicatoria

A mis hijos Andrés y Sebastián, quienes permanentemente me apoyaron con espíritu alentador, contribuyendo incondicionalmente a lograr las metas y objetivos desde el inicio de este trabajo.

A mi esposo Omar, por dedicarme tu tiempo, tu paciencia y comprenderme en los malos momentos y propulsor de mi formación.

A mis padres, mis hermanos, sobrina y de manera muy especial a mi abuela Rosalía (+), les dedico este triunfo.

¡Tengo suerte de estar rodeada de estos hermosos ángeles!

## PROSPECTIVA DEL USO DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL EN EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL – CASO CANTÓN CUENCA

### Introducción

En las últimas décadas el Ecuador ha experimentado fuertes cambios en su cobertura vegetal natural y de uso del suelo, el avance de frontera agrícola, un acelerado y desordenado crecimiento de las áreas urbanas, la presión que éstas ejercen sobre el territorio, han provocado que se sacrifiquen tierras con potencial agrícola, convirtiendo suelo rural en urbano, el desplazamiento de áreas de cultivos y ganaderas se ubiquen en las laderas de las montañas o zonas menos fértiles, perdiendo la función social del suelo.

La construcción de escenarios está íntimamente ligado al estudio del cambio climático y pérdida de biodiversidad o modelamiento del paisaje. En los últimos años este tipo de investigaciones han tomado relevancia no solo en el campo medio ambiental, sino como parte de la metodología en los planes de ordenamiento territorial.

La prospectiva, o construcción de escenarios, es el simulacro de un determinado momento y el camino que lleva a un estado final, de ahí la importancia en los planes de ordenamiento territorial.

Existen varios planteamiento metodológicos para la construcción de escenarios, nuestro estudio se centra en analizar los cambios en el uso de suelo, componente elemental y básico para la planificación, pues es ahí donde se realizan todas las actividades humanas, sujetas a la dinámica natural e inducida que sufre el territorio y donde se realiza el ordenamiento como tal.

El cantón Cuenca, es un territorio que está experimentando acelerados cambios de usos del suelo de una manera intensa y extensa en su espacio territorial. Se puede apreciar el crecimiento de zonas destinadas para vivienda, apertura de vías y el crecimiento de áreas productivas en las zonas de las laderas de montaña, disminuyendo las zonas de paramo y bosques naturales e incrementándose áreas de riesgo por deslizamientos o hundimientos. Por esta razón es necesario generar posibles escenarios que ayuden a establecer directrices para la toma de decisiones en una adecuada planificación territorial.

Por lo expuesto anteriormente, esta investigación pretende aplicar diferentes métodos para el análisis de la dinámica de la cobertura vegetal y uso del suelo en el cantón Cuenca, esperando contribuir a establecer una metodología de la prospectiva en el uso del suelo cantonal.

## Antecedentes

La constitución de la República del Ecuador, el Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización – COOTAD y el Código Orgánico de Planificación y Finanzas Públicas – COPFP, establece que las competencias de los Gobiernos Autónomos Descentralizados –GAD's es la elaboración de sus Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial – PDyOT, en los cuales se definen estrategias que le permitan ordenar las actividades humanas en función de la cualidades territoriales, con el objetivo de minimizar y a la vez aprovechar al máximo la vocación del suelo.

La finalidad de la ordenación territorial es el "...ordenar, compatibilizar y armonizar las decisiones estratégicas de desarrollo respecto de los asentamiento humanos, las actividades económico-productivas y el manejo de los recursos naturales en función de las cualidades territoriales, a través de la definición de lineamientos para la materialización del modelo territorial de largo plazo, establecido por el nivel de gobierno respectivo" (Art. 43 del COPFP).

En el ordenamiento territorial, según Gómez Orea, 2013, el "territorio" es considerado como un sistema, en el que se realizan las actividades que la población practica sobre el medio físico y las interacciones que se producen entre ellas a través de los canales de relación que proporcionan funcionalidad al sistema. Siendo el medio físico un componente esencial en la planificación.

El ordenamiento territorial se desarrolla en tres grandes fases o etapas: diagnóstico, prospectiva y propuestas (programación o modelo de gestión), cada una con diferentes herramientas y metodologías. La fase del diagnóstico presenta un sin número de información, la fase de propuestas también cuenta con amplias metodologías desarrolladas. La fase de la prospectiva en el desarrollo de los PDyOT cuenta con un nivel poco desarrollado si lo comparamos con las fases antes descritas.

La prospectiva en el ordenamiento territorial, es la construcción de los escenarios que deben ser entendidos como descripciones de un posible futuro que ayudan a orientar la fase de la propuesta en base a los diferentes escenarios que pueden construirse a partir de la información del diagnóstico, diseñando escenarios futuros, ya sean tendenciales, óptimos o de consenso, es la fase más compleja y poco desarrollada en la formulación de los planes de ordenamiento territorial. (Brown et al., 2002; EEA, 2007c; Patel et al., 2007).

En la prospectiva es de gran relevancia la construcción del escenario futuro ya que ayuda a la toma de decisiones y a la determinación de políticas y estrategias que encaminen a lograr el objetivo del ordenamiento territorial.

Dentro de la construcción de escenarios futuros, existe un creciente interés en conocer el cambio de uso del suelo que se producen en el territorio, así como las posibles causas que influyen en el ámbito social y económico. Este tipo de análisis tuvo sus inicios en el año 1993 con el proyecto “*Land Use and Land Cover Change*” (LUCC) ejecutado por los programas de investigación *International Geosphere - Biosphere Programme (IGBP)* y *Human Dimension Programme*, como coordinador de la dimensión humana en cambio global, iniciando la “ciencia de cambio de suelo”, la misma que con el desarrollo de los sistemas de información geográfica – SIG/Teledetección buscan identificar y resolver las inquietudes sobre el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo que influyen en el cambio climático, biodiversidad y servicios eco sistémicos (Turner, 2002 en Henríquez, 2011 en Gallardo, 2014)

La construcción de los escenarios es y han sido insumos para la planificación y toma de decisiones en las políticas públicas por varios años. Sin embargo dentro del sistema territorial, hace muy poco tiempo se ha iniciado investigaciones sobre la dinámica del uso del suelo. El cambio de cobertura vegetal natural en áreas de uso agrícola y ganadero, la construcción de obras de infraestructura (área urbana) en suelos con vocación productiva y uso del suelo, ya que los resultados alcanzados serán de utilidad para los procesos de planificación.

Para la modelación es importante identificar las variables que influyen en la dinámica de un territorio, con el objetivo de comprender por qué ocurren esos cambios, dónde ocurren, cómo y cuándo. Esto facilitara el identificar las áreas críticas del lugar y poder actuar de manera más eficiente y con estrategias que logren cumplir su intervención.

## Objetivos

### Objetivo General

Evaluar la metodología para generar los escenarios futuros o probables (tendenciales) de utilización del territorio para el año 2010 a partir de un análisis multitemporal utilizando técnicas de teledetección, aplicadas a imágenes multispectrales del satélite LANDSAT-TM, con 30 metros de resolución espacial de los años 1991-2001 como insumo para la planificación territorial.

### Objetivos Específicos

- a. Analizar el cambio en la vegetación y uso del suelo en un periodo y lugar determinado.
- b. Identificar y cuantificar las zonas donde ocurrió la los cambios en la cobertura vegetal natural.

- c. Construir el modelo tendencial de la cobertura vegetal y uso del suelo del cantón Cuenca al año 2010 a partir del análisis de cobertura de suelo de los años 1991 y 2001
- d. Evaluar la confiabilidad de la metodología aplicada para la predicción del modelo tendencial.

## Hipótesis

¿El análisis multitemporal de la cobertura vegetal y uso del suelo de dos periodos anteriores permiten realizar una predicción de la tendencia de los usos de ocupación de una confiabilidad aceptable?

¿Los criterios y variables utilizadas en la generación de la prospectiva tendencial influyen en los resultados obtenidos?

## Justificación

En los últimos años se ha incrementado el número de investigaciones en el análisis y modelamiento de cambio de uso del suelo, sobre todo en temas relacionados con procesos de deforestación, cambio climático, recursos hídricos y con mayor énfasis en dinámicas de urbanización; buscando identificar las causas y consecuencias del mismo sobre los ecosistemas, ámbito social y económico.

El estudio del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo resulta ser un proceso muy complejo ya que se requiere de información cartográfica muy detallada, el uso de las imágenes satelitales, los sistemas de información geográfico y la teledetección facilitan estos análisis, pero se requiere de conocimientos avanzados en el manejo de estas herramientas. Su apropiada análisis, nos permiten tratar de entender las dinámicas de estos cambios. Los modelos de simulación son instrumentos para la construcción de modelos tendenciales o deseados como insumos para la planificación

El cantón Cuenca, es un territorio que está experimentando acelerados cambios de usos del suelo de una manera intensa y extensa en su espacio territorial. Se puede apreciar el crecimiento de zonas destinadas para vivienda, apertura de vías y el crecimiento de áreas productivas en las zonas de las laderas de montaña, disminuyendo las zonas de paramo y bosques naturales e incrementándose áreas de riesgo por deslizamientos o hundimientos. Por esta razón es necesario generar posibles escenarios que ayuden a establecer directrices para la toma de decisiones en una adecuada planificación territorial.

## Problema

En las últimas décadas el Ecuador ha experimentado fuertes cambios en su cobertura vegetal natural y de uso del suelo, el avance de frontera agrícola, un acelerado y desordenado crecimiento de las áreas urbanas, la presión que éstas ejercen sobre el territorio, han provocado que se sacrifiquen tierras con potencial agrícola, convirtiendo suelo rural en urbano, el desplazamiento de áreas de cultivos y ganaderas se ubiquen en las laderas de las montañas o zonas menos fértiles, perdiendo la función social del suelo.

De acuerdo a datos difundidos por el Ministerio de Ambiente en el 2012, el Ecuador presenta una tasa anual de cambio de cobertura boscosa de -0,71% para el periodo 1990 – 2000 y de -0,66% para el periodo 2000 – 2008. Dando como resultado un promedio de deforestación de 89.944 hectáreas/ año, y de 77.647 ha/año para cada periodo, respectivamente (MAE, 2012). Según los registros en la Cuenca del Rio Paute, entre el periodo de 1991 y 2000, el promedio de deforestación es de 78,08 TM/ha/año (Diforpa, 2007).

Existe limitada información sobre los cambios de cobertura vegetal y uso del suelo en el territorio cantonal, por lo que se propone la generación de escenarios futuros o probables (tendenciales) de utilización del territorio para el año 2010 a partir de un análisis multitemporal utilizando técnicas de teledetección como insumo para la planificación territorial.

La construcción de escenarios a partir de un análisis histórico de los cambios de la cobertura vegetal y uso del suelo nos permitirá predecir los posibles cambios a futuro. El uso de modelos de simulación son herramientas que nos pueden ayudar a identificar estrategias de intervención más efectivas. De igual manera un modelo nos permitirá predecir los posibles efectos de las políticas públicas pueden tener en el territorio analizando los parámetros ambientales, sociales y económicos.

## 1. CAPITULO I: REVISION DE LA LITERATURA

### 1.1. Conceptos básicos

Un aspecto determinante en la realización de estudios de ordenamiento territorial, es la fase de la prospectiva o Diseño de Escenarios, es un momento en el que toda la información analizada en las etapas anteriores entran como insumo para pensar y diseñar el futuro del uso, aprovechamiento y ocupación del territorio, especialmente referido a los tres ejes del Diagnostico Integrado: el uso y la aptitud de uso del territorio, el desarrollo económico territorial y la integración funcional del territorio. En la prospectiva, resulta de fundamental importancia el concepto de construcción del escenario tendencial del medio físico, poniendo énfasis en la cobertura vegetal y uso del suelo donde se encuentran los recursos a ser explotados en beneficio de las actividades humanas como base para el desarrollo de acciones planificadas y sistemáticas en el futuro.

El conocimiento de los cambios en la vegetación y el uso del suelo que se dan un periodo de tiempo y en un lugar determinado. El presente proyecto propone analizar los cambios producidos en los periodos temporales entre los años 1991 y 2001, cuantificar dichos cambios con la ayuda de sensores remotos y la utilización de Sistemas de Información Geográfica. Estimar la velocidad (tasa de cambio) a la que se modifica la vegetación y el uso del suelo. Posteriormente la cobertura vegetal y uso del suelo proyectar para los próximos 10 años (2010), utilizando las cadenas de Markov y la evaluación multicriterio, ya que éste proporciona la base para determinar las tendencias que siguen los procesos que modifican los ecosistemas (deforestación, erosión, degradación y pérdida de la biodiversidad), así como también permite conocer la evolución de las actividades productivas humanas en una región determinada. Finalmente se validará el modelo comprobará dicha prospectiva con el uso del suelo generado en el año 2010 con la imagen RapidEye, lo que nos permitirá establecer los criterios y variables más adecuadas para este modelamiento.

La planificación tradicional es esencialmente retrospectiva, puesto que los objetivos que se persiguen son determinados en gran medida, por lo que sucede en el presente y ha sucedido en el territorio donde se planifica. En la modalidad prospectiva ocurre a la inversa. Primero, se establece el futuro deseado tan abiertamente como sea posible, esto es, de manera creativa y libre de las restricciones de la experiencia y las circunstancias actuales. Segundo, con esta imagen de lo deseable en mente, se procede a la selección del futuro más satisfactorio a partir de las posibilidades actuales y las lecciones del pasado (Inzunza, 2000 en Gallardo, 2014).

Existen muchos futuros posibles, pero de ellos sólo algunos tienen en este momento la mayor probabilidad de ocurrencia. Por esa razón, la prospectiva debe ser capaz de identificar aquellos escenarios futuros que en el período que va del presente al horizonte del estudio, puedan presentarse. Generalmente se usa en el proceso un horizonte temporal de 10 a 20 años: Mediante el uso de metodologías que son empleadas ampliamente en distintas disciplinas científicas, la prospectiva busca identificar los escenarios futuros más probables y deseables hacia los cuales debe orientarse una organización, una región o un país. Existen muchas metodologías distintas, aunque la más usada para la Prospección en Planificación Territorial es el Método de Construcción de Escenarios que incorpora otras metodologías como: Método Delphi, Método de Probabilidades de Bayes, Método de la Matriz de Impacto Cruzado, Exploración del Entorno y Método de Análisis Morfológico.

En este texto la necesidad de la prospectiva en la ordenación del territorio, para planear el uso sostenible de sus recursos, facilita la restauración, protección y conservación de sus elementos renovables, el aprovechamiento en calidad y cantidad de su oferta ambiental y la solución justa y responsable de su problemáticas.

En la prospectiva, resulta de fundamental importancia el concepto de construcción del escenario tendencial del medio físico, poniendo énfasis en la cobertura vegetal y uso del suelo donde se encuentran los recursos a ser explotados en beneficio de las actividades humanas como base para el desarrollo de acciones planificadas y sistemáticas en el futuro.

En el ámbito mundial una de las metodologías modernas y de más uso es la utilización de los sensores remotos, esta valiosa metodología es utilizada para identificar, describir, cuantificar y monitorear los cambios de la cobertura vegetal, los avances de la frontera agrícola y los patrones de comportamiento de estas unidades espaciales, por actividades y alteraciones antropogénicas o cambios climáticos, así como la descripción de escenarios tendenciales.

Este trabajo se basó en la percepción remota y análisis cartográfico con el uso de Sistemas de Información Geográfica. Un Estudio Multitemporal de la cobertura vegetal y uso del suelo en los años 1991 - 2011 y proyección al 2030 en el cantón Cuenca Ecuador.

## 1.2. Ordenamiento Territorial

El ordenamiento territorial se ha venido convirtiendo en una de las herramientas más importantes para la planificación del uso del suelo y son mucho los enfoques que desde las diferentes disciplinas se emplean. Trata de combinar factores de carácter humano, social con elementos que caracterizan al territorio como los físicos y bióticos, convirtiendo al



ordenamiento en un escenario propicio para la resolución de intereses antrópicos y de procesos de transformación sobre los diferentes ecosistemas que lo convierten en un ejercicio de gran complejidad. El ordenamiento territorial es un proceso mediante el cual se orienta el desarrollo integral de una entidad territorial o región.

### **1.2.1. El sistema Territorial y el Modelo Territorial**

Dentro del sistema territorial, en el cual todas las actividades se desarrollan en un espacio que tiene una relación de pertenencia, donde se localizan los recursos, siendo el medio biofísico el espacio de interacción con todos los elementos del sistema, desarrollándose las actividades al momento en el que se producen, pero también facilita el poder visibilizar una planificación a futuro antes de intervenir.

Uno de los elementos del sistema territorial es el componente biofísico, y el suelo a su vez es parte de este, entonces el suelo es uno de los motores vitales del sistema territorial, ya que en base a su vocación, accesibilidad y dinamismo nos permite realizar las diferentes actividades.

### **1.2.2. La prospectiva en el ordenamiento territorial**

La utilización de la prospectiva en los procesos de planeación y ordenamiento territorial es muy reciente. Se consideran, en este sentido, los aportes de (Gabiña, 1998 en Camacho, 2010) como una de las primeras aproximaciones sistematizadas que se realizan en la dirección de planes de ordenamiento territorial prospectivos.

Para lograr que la prospectiva sea útil en la formulación de los planes, tiene que necesariamente insertarse en el proceso de toma de decisiones y ser sus escenarios una información valiosa para la elaboración del modelo territorial.

Debemos actuar en el presente guiados por el criterio de que los hechos futuros no deben tomarnos por sorpresa, sino ser el resultado de una construcción colectiva consciente, lograda a partir de acciones presentes que buscan inducir los procesos actuales para aproximarlos a un futuro deseado. Ello implica un esfuerzo por elaborar diferentes escenarios, escoger el que queremos y prepararlo.

Los procesos de OT utilizan aportes conceptuales y metodológicos de la prospectiva. En especial, visiones alternativas de futuros deseados, escenarios alternativos de futuros posibles y métodos para lograr transformar los deseos, expectativas y conocimientos en imágenes objetivo que servirán de guía para nuestras actuaciones de hoy.

El enfoque prospectivo intenta evitar que las decisiones de OT sean reactivas para convertirlas en proactivas, es decir, evitar que las catástrofes y problemas nos sigan sorprendiendo y, más bien, acudiendo a una actitud de vigía prospectiva, podamos descubrir en el presente los gérmenes de los hechos futuros y prepararnos para ellos o, si así lo queremos, re direccionarlos mediante el esfuerzo colectivo.

Quizá la etapa más compleja del proceso de ordenamiento, es la prospectiva territorial. Es un momento del plan donde se requiere capacidad creativa, concertación y sobre todo un profundo conocimiento de los resultados del diagnóstico y como las diferentes variables influyen en él. La formulación de un Plan de Ordenamiento Territorial debe iniciarse con la realización de un estudio de la ocupación y transformación del territorio a través de tiempo, para indicar como se debe orientar y organizar en el futuro lo administrativo, jurídico, ambiental, social, económico y lo funcional.

### **1.2.3. Generación de escenarios**

La construcción de escenarios de cambio de uso del suelo resultan ser muy útiles ya que pueden ayudar a la formulación de políticas públicas en el desarrollo sostenible de un territorio. Se convierten en una herramienta muy útil para anticipar y prevenir intervenciones inadecuadas en la gestión territorial. Los modelos de simulación permiten incorporar factores que nos ayuden a aclarar ciertas tendencias y actuar de manera más eficaz.

### **1.2.4. La cobertura vegetal y uso del suelo como insumo para la construcción de la prospectiva**

Un aspecto determinante en la realización de estudios de ordenamiento territorial, es el conocimiento de los cambio en la vegetación y el uso del suelo que se dan en un periodo de tiempo y en un lugar determinado, es importante estimar la velocidad a la que se modifica la vegetación y uso del suelo, ya que este proporciona la base para determinar las tendencias que siguen los procesos que modifican los ecosistemas (deforestación, erosión, degradación y pérdida de la biodiversidad), así como también permite conocer la evolución de las actividades productivas humanas en una región determinada o del crecimiento del área urbana.

El conocimiento de los cambios en la vegetación y el uso del suelo que se dan en un periodo de tiempo y en un lugar determinado, son de importancia relevante. Es sustancial estimar la velocidad a la que se modifica la vegetación y uso del suelo, ya que este proporciona la base para determinar las tendencias que siguen los procesos que modifican los ecosistemas

(deforestación, erosión, degradación y pérdida de la biodiversidad), así como también permite conocer la evolución de las actividades productivas humanas en una región determinada.

Para este estudio se propone calcular la tasa de cambio de la vegetación y los usos del suelo, para el periodo comprendido entre 1991 y el 2001, en base a estas aplicaciones se propone generar los escenarios futuros o probables de utilización del territorio para el año 2010, de acuerdo a las tendencias identificadas durante los 10 años, permitiendo de esta manera plantear alternativas de utilización del territorio acordes con su potencial para que la población haga un uso sustentable de los recursos naturales.

Los modelos de cambio de uso se han transformado en una poderosa herramienta de análisis espacial orientada, principalmente, a los siguientes aspectos:

- a. Explorar los variados mecanismos que fuerzan los cambios de uso del suelo y las variables sociales, económicas y espaciales que conducen a esto;
- b. Proyectar los potenciales impactos ambientales y socioeconómicos derivados de los cambios en el uso del suelo, y;
- c. Evaluar la influencia de alternativas políticas y regímenes de manejo sobre los patrones de desarrollo y uso del suelo (Aguayo et al., 2006 en Mejía, 2014).

El análisis se realiza a través de la Geomática, como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) de estructura raster como base para la aplicación de procedimientos de asociación espacial (modelado cartográfico) y evolución espacial (autómatas celulares) en la generación de resultados espacio-temporales. La cartografía digital y los resultados numéricos obtenidos pueden considerarse una herramienta de gran importancia para la toma de decisiones espaciales en la definición de lineamientos en planificación territorial, por lo que es necesario evaluar si los criterios considerados para la proyección nos dan un resultado apegado a la realidad, para esto es necesario compararla con información actualizada, en nuestro caso la cartografía de la cobertura vegetal y uso del suelo del año 2010, si las predicciones están dentro del error estadístico aceptable, entonces los criterios son los adecuados.

### **1.3. Introducción a la teledetección**

La teledetección (*Remote Sensing*), se define como la ciencia y arte de obtención de información acerca de un objeto, área, o fenómeno a través del análisis de información adquirida por un dispositivo que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno bajo investigación. (Chuvieco, 2007)

Teledetección espacial es la técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, suponiendo que entre la tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, o por emisión propio (Chuvieco, 1996)

Un sensor remoto se define como un instrumento especial cuya tecnología permite la obtención de información de objetos sin estar físicamente en contacto con él. Estos instrumentos se conocen en conjunto como Sensores Remotos incluyendo aparatos como la cámara fotográfica, sistemas scanners y de radar (Avery, 1992 en Gallardo, 2014)

### **1.3.1. Análisis multitemporal de la cobertura vegetal**

El análisis multitemporal de fotografías aéreas e imágenes de satélite, de acuerdo a diversos autores, constituye un método efectivo para la detección de cambios en la vegetación dada la alta correlación existente entre la variación espectral en la imagen y el cambio en la cubierta vegetal, que permite evaluar las consecuencias de estos cambios a partir de su detección, control y análisis rápido y eficiente (Green, 1994 citado por Acuña, 2005).

En el ámbito mundial, las técnicas de teledetección han sido utilizadas en la identificación de cambios en la cobertura y usos de la tierra. Esta valiosa tecnología sirve para el monitoreo de fenómenos naturales u otras modificaciones que experimenta una región como consecuencia de la intervención del hombre (Muchoney y Hajack, 1994 citado por Salvatierra, 2000).

Los estudios relacionados con el análisis contribuyen a la definición de las categorías debido a que proporcionan un elemento adicional de análisis como son los cambios del estado fenológico de las especies vegetales (Conese y Maselli, 1991 citado por Salvatierra, 2000).

### **1.4. Construcción del modelo tendencial de cobertura y uso del suelo al año 2010**

El propósito de esta fase es la de reflejar los diferentes aspectos que se encuentran relacionados con el territorio y que ayuden a determinar un escenario tendencial en base a la información generada a través de los procesos anteriores. Es una etapa que permitirá resumir el estado actual del territorio y su estado futuro no muy lejano, ayudando a la toma de decisiones para una gestión adecuada del territorio.

En esta etapa se validan los cambios producidos entre los años 1991 – 2001 y la proyección al año 2010, el resultado será validado con el mapa de cobertura vegetal y uso del suelo del año 2010 obtenido a través del análisis multitemporal, determinando cuál de las

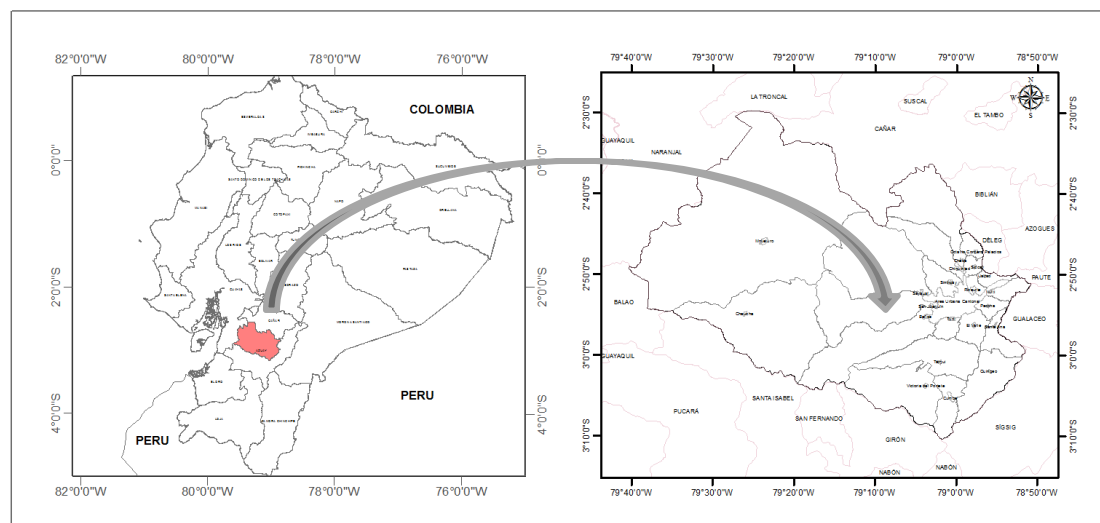
combinaciones de variables se ajusta más con la realidad. Evaluando de esta manera la precisión de los modelos obtenidos de cada tipo de cobertura. Se utilizara el índice Kappa y una matriz de confusión, que son utilizados para evaluar la concordancia entre lo real y lo modelado, el mismo proceso de evaluación se realizará con mapa de cobertura vegetal y uso del suelo generado con las imágenes RapidEye 2010.

## 1.5. Descripción del área de estudio

### 1.5.1. Ubicación

El área de estudio comprende 366.532,94 hectáreas, y se ubica entre las coordenadas 672 264,126 N – 9 722 625,52 E y 719 142,103 N – 9 648 830,512 E; pertenece a la provincia del Azuay y se ubica en la Región Centro Sur de la República del Ecuador, representa el 41% del territorio provincial y el 1,32% del nacional. Limita al norte con la provincia de Cañar, al sur con cantón Girón, al este con el cantón Paute y Gualaceo y al oeste con la provincia del Guayas. Políticamente, el cantón está formado por 15 parroquias urbanas y 21 rurales. Tiene un área urbana con una extensión de 7.299.69 hectáreas, y unas 359.233,25 hectáreas que corresponden al área rural.

*Mapa 1: Ubicación Geográfica del cantón*

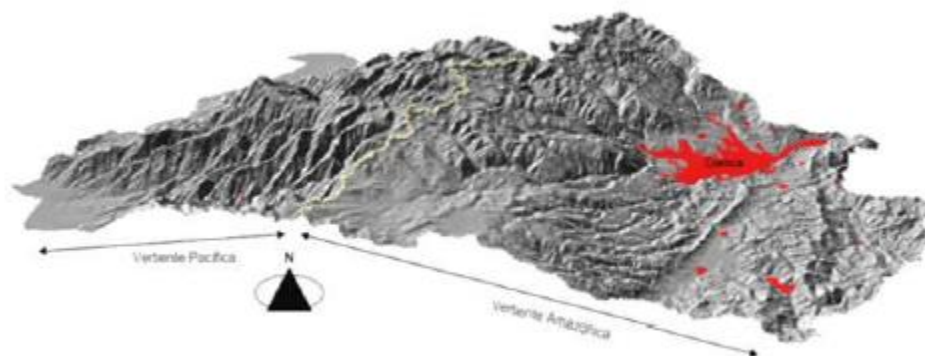


**Fuente y elaboración:** Propia, 2015

Se extiende en dos diferentes regiones fisiográficas: la vertiente de la cordillera andina oriental y occidental, con un intervalo altitudinal que va de los 20 m a 4 560 m s.n.m. lo que permite diferenciar cuatro zona importantes.

- Zona1: Valle interandino con altura entre 2300 m s.n.m. a 2900 m s.n.m. a una temperatura promedio entre 13° y 19° C. con una superficie de 20.7% del Cantón.
- Zona2: Cima Fría de la Cordillera Occidental con altitudes entre 2900 m s.n.m. y 4560 m s.n.m. temperatura entre 7° a 13° C. siendo su superficie el 46.4% del área del Cantón.
- Zona3: Vertiente Externa de la Cordillera Occidental con altitud entre 320 m s.n.m. y 2,900 m s.n.m. y temperatura entre 13° y 25° C. ocupando el 27.6% de la superficie del Cantón.
- Zona4: Piedemonte altitudes entre 20 m s.n.m. y 320 m s.n.m. con temperaturas entre 23° a 26° C. y representa el 5.3% de la superficie del Cantón. (Tomado del PDOT, 2015).

Ilustración 1: Relieve del cantón Cuenca



**Fuente y elaboración:** PDOT, 2011

Cuenca es la tercera ciudad a nivel nacional, considerado como un nodo regional que articula la dinámica territorial de la región 6, de acuerdo a la zonificación para el desarrollo por la Secretaría Nacional de Planificación – SENPLADES. Los primeros asentamientos humanos dentro del cantón datan de 8060 a.C., pasando por la conquista cañarí; en 1470, la conquista incásica y luego la conquista española en 1547 fundada y nombrada como “Santa Ana de los ríos de Cuenca”. En la época colonial se logra la independencia en 1820 pasando por toda la etapa republicana y conocida como: “Cuenca, la Atenas del Ecuador”.

Uno de los proyectos que tuvieron gran influencia en su dinámica territorial fue el ferrocarril, los sistemas de agua potable y alcantarillado que dotando de un servicio básico, influyen en el progreso de la ciudad. La generación de energía eléctrica es uno de los proyectos que mayor influencia tienen en la dinámica territorial.

El territorio cantonal se caracteriza por una gran heterogeneidad ambiental, debido a su accidentada topografía, definiendo una variedad de paisajes diversos y complejos, Se encuentra el Parque Nacional El Cajas y el Área Nacional de Recreación Quimsacocha que comprende 29.389 ha y 3.204,3 ha respectivamente; y que representan el 9% del territorio cantonal, las áreas y bosques protectores cubren el 47% del territorio; con 4 cuencas hidrográficas, la del Santiago (52,4%), Jubones (0,23%), Naranjal-Pagua (26,4%) y Cañar (21%). Ver mapa No. 2.

Para el año 2010, Cuenca tiene una población de 505.585 habitantes, de los cuales el 98% se ubica en el valle de la vertiente de la cordillera andina oriental y el 65% se concentra en la Ciudad de Cuenca.

El crecimiento demográfico que tuvo la ciudad de cuenca a inicio de la colonia hasta mediado del siglo XX fue bastante lento, en 1950 se realiza el primer censo en la cual se determina que la ciudad tenía 50 mil habitantes comparados con los 35 mil contabilizados en 1885, dando un crecimiento del 4% anual (Mejía, V. 2014).

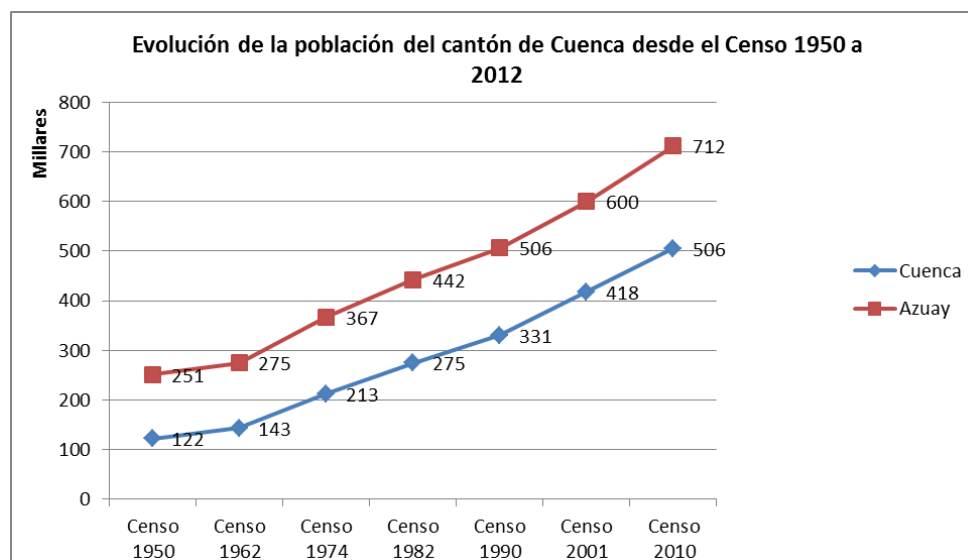
Tabla 1: Evolución de la Población y Densidad de Cuenca, 1950-2010.

Año	Población	Superficie ha	Densidad hab / ha
1950	52.696	850	62
1962	74.765	1.550	48
1974	104.470	2.500	42
1982	152.365	3.900	39
1990	198.390	5.300	37
2001	278.995	6.043	46
2010	331.888	7.059	47

Fuente: Tomado de Mejía, V. 2014.

La misma información la podemos observar en la siguiente ilustración.

Ilustración 2: Evolución de la población del cantón Cuenca



Fuente: Tomado de BID, Crecimiento urbano de la Ciudad de Cuenca, 2014, GADM CUENCA.

### 1.5.2. Situación actual del cantón Cuenca

El territorio ha experimentado gran presión por el uso del suelo en los últimos cuarenta años, como ha ocurrido en el resto del país. Se observan distintas tendencias en el uso del suelo relacionadas con la agricultura y la ganadería que además de responder a las condiciones ambientales, obedecen a la influencia de las actividades económicas de las áreas circundantes, si analizamos el cambio de uso del suelo a nivel nacional podemos observar que este se centra en la pérdida de vegetación boscosa por otro tipo de cobertura, dando un valor de 200. 000 ha/año (MAE, 2007)

Cuenca tiene una trayectoria en la planificación territorial y estratégica, si realizamos un gráfico de los diferentes planos del área urbana desde inicios de su fundación, podemos observar como el crecimiento de suelo para uso urbano ha ido variando desde 1557 al 2011, como lo podemos observar en la ilustración No. 3, donde se detalla los diferentes límites de las áreas urbanas de la ciudad de Cuenca.

Actualmente el cantón cuenta con una normativa de uso y ocupación del suelo urbano y rural aprobado en mayo del 2003. Esta normativa zonifica al cantón en cuatro grandes áreas: área urbana; cabeceras parroquiales; área de influencia inmediata y cuencas hidrográficas. Ver ilustración No. 4.

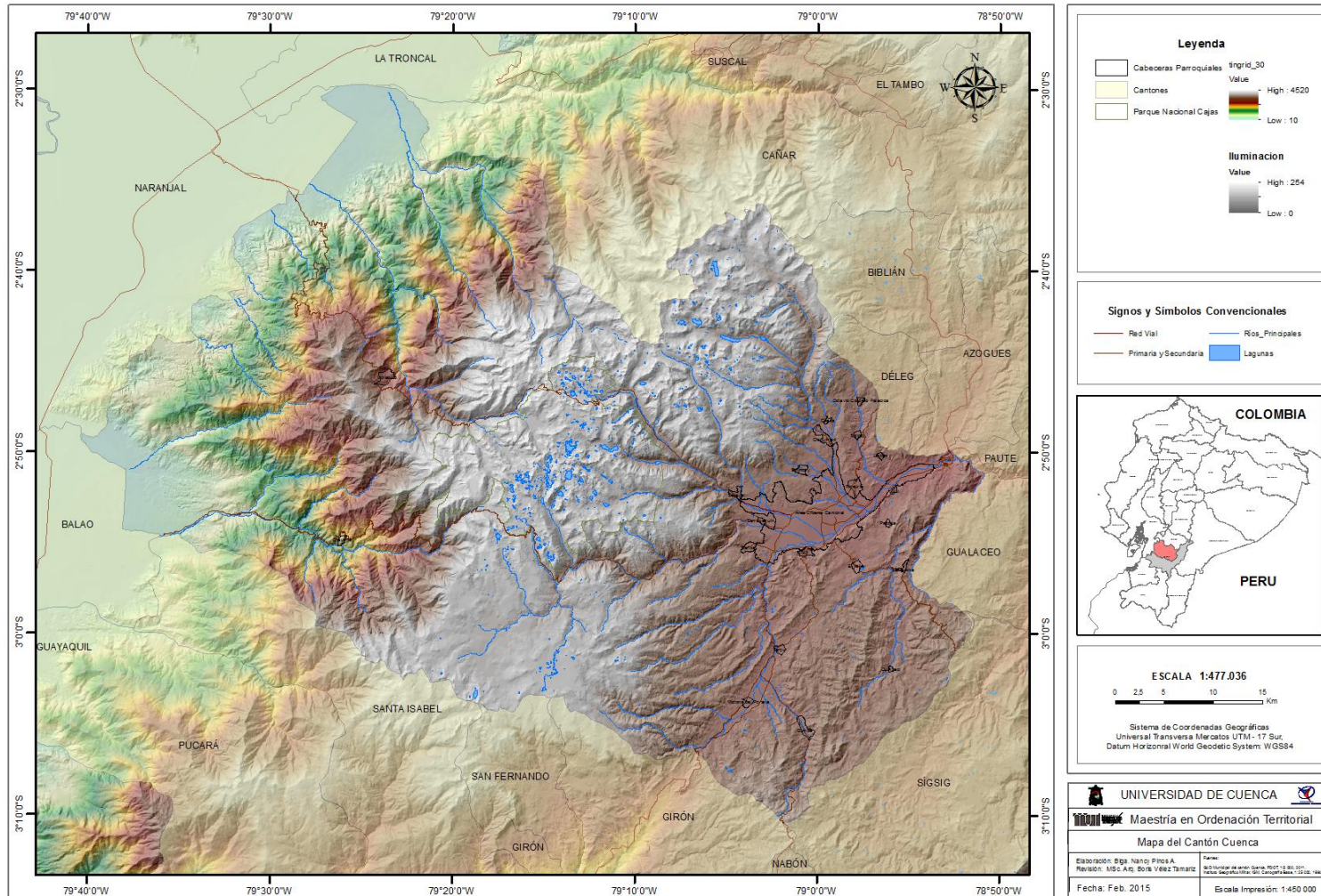


Mapa 2: Mapa base del cantón Cuenca

ECUADOR - ESCALA 1:477.036

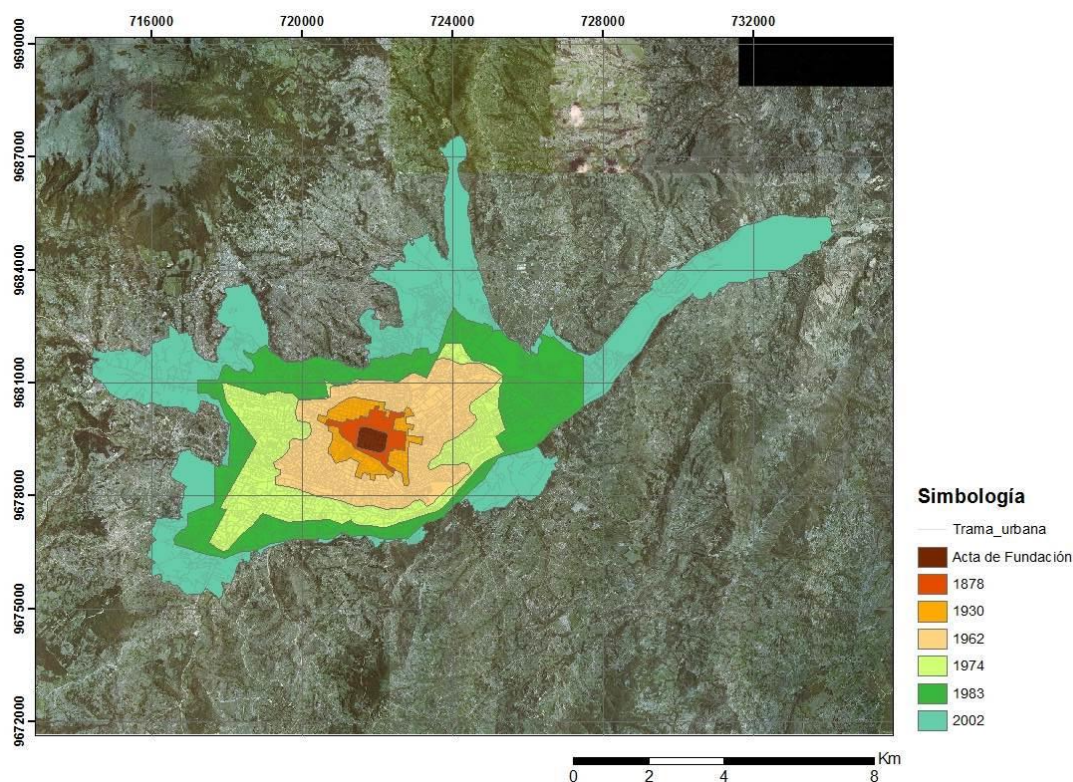
Cantón Cuenca, Provincia del Azuay

EDICION 1; MT



Fuente y Elaboración: Propia, 2015

Ilustración 3: Esquema del crecimiento de la ciudad – Trama urbana



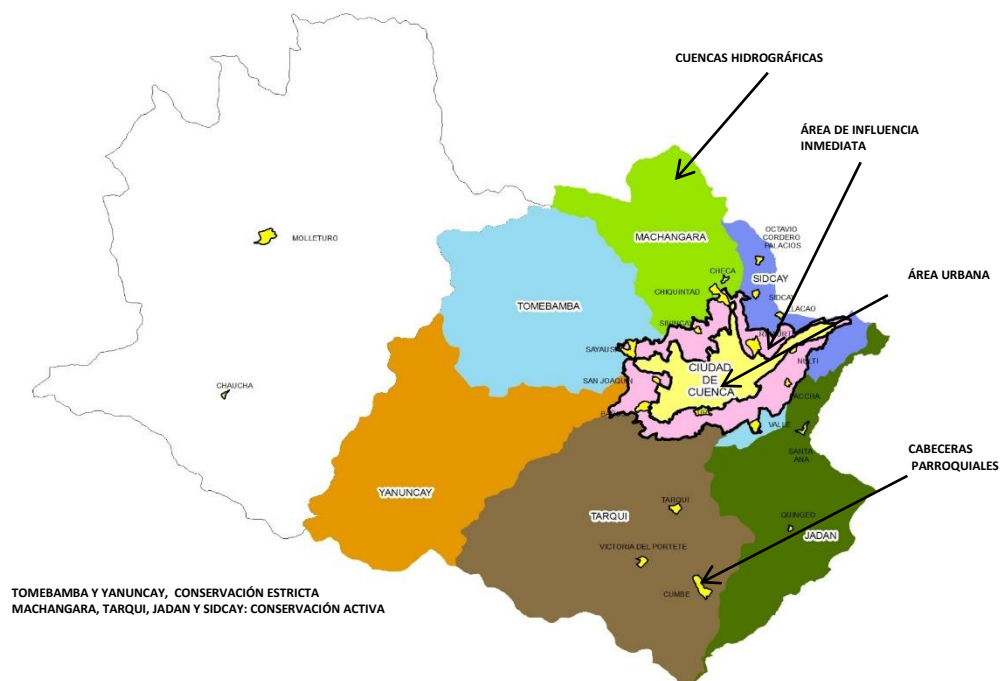
Fuente y Elaboración: Tomado de Mejía, V., 2014

El acelerado crecimiento desordenado que se ha dado en los últimos 20 años en zonas circundantes al área urbana, ha provocado la disminución de los suelos productivos del cantón, los mismos que han soportado una fuerte presión por fraccionamiento, reduciendo el área con potencial productivo y que trae implicaciones en la economía de la población y del cantón, de igual manera la falta de dotar de servicios básicos se vuelve más complicada e incrementa los valores de inversión por parte de las entidades públicas que tienen a cargo estos servicios, de igual manera la pérdida de zonas boscosas que favorecían la protección ante diferentes amenazas naturales han sido reemplazadas por viviendas dispersas y actividades agrícolas y una ganadería de subsistencia en la gran parte del territorio cantonal.

Al año 2010, el 26% del territorio presente una cobertura natural y el 52% a uso agro productivo y el 21% a zonas urbanas, información generada con imágenes RapidEye al 2011. Según el Estudio del Banco Interamericano de Desarrollo – BID, realizado en 2014, en el área de



Ilustración 4: Ámbito de la Ordenanza de uso y ocupación del suelo vigente



**Fuente y Elaboración:** Tomado de GAD Municipal Cuenca, 2014 de la Ordenanza: “Reforma, Actualización, Complementación y Codificación de la Ordenanza que Sanciona el Plan de Ordenamiento Territorial del Cantón Cuenca, Determinaciones para el Uso y Ocupación del Suelo Urbano”

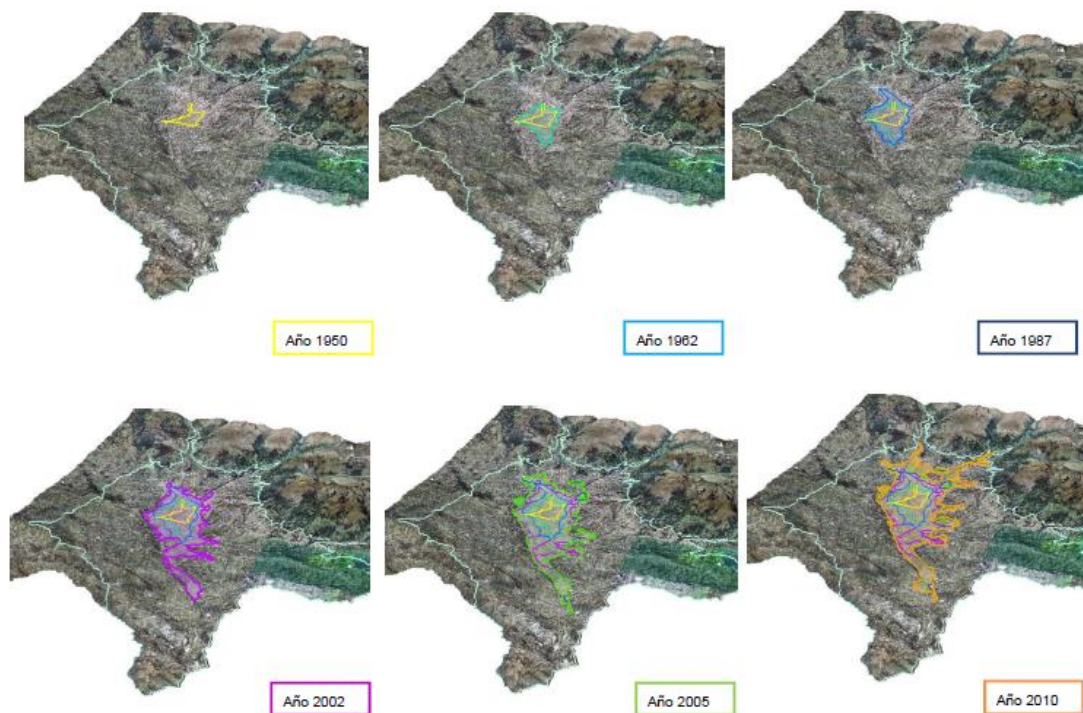
influencia inmediata a la ciudad de Cuenca, indica que sólo el área urbana ha crecido 120 hectáreas aproximadamente en los últimos 50 años (Informe Final del Estudio CE 3 Crecimiento urbano en la ciudad de Cuenca, 2014). Ver ilustración No. 5.

En el análisis multitemporal que realizan entre los años 1987, 2002 y 2010, demuestran una disminución del 30% de la cobertura vegetal en un periodo de 23 años, que a la vez éstas mismas incrementen en un 29.69% de las zonas urbanas y dispersas. De acuerdo a este estudio se concluye que el incremento del suelo urbano, es del 155% y corresponde a zona residencial y un incremento del 600% de suelo industrial.

El Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial cantonal analiza la cobertura vegetal y uso del suelo entre los años 2000 y 2013, información proporcionada por el Ministerio del Ambiente, en el cual se puede observar la disminución de áreas naturales y el incremento de suelos con usos agrícolas, pecuarios y urbanos, dando un 18,24% de cambio en su cobertura en un periodo de 13 años.

De igual forma el PDyOT Cantonal al 2015, zonifica al territorio en 5 diferentes niveles: área urbana, área de conservación, de recuperación, expansión urbana, de producción. Ver ilustración No. 6.

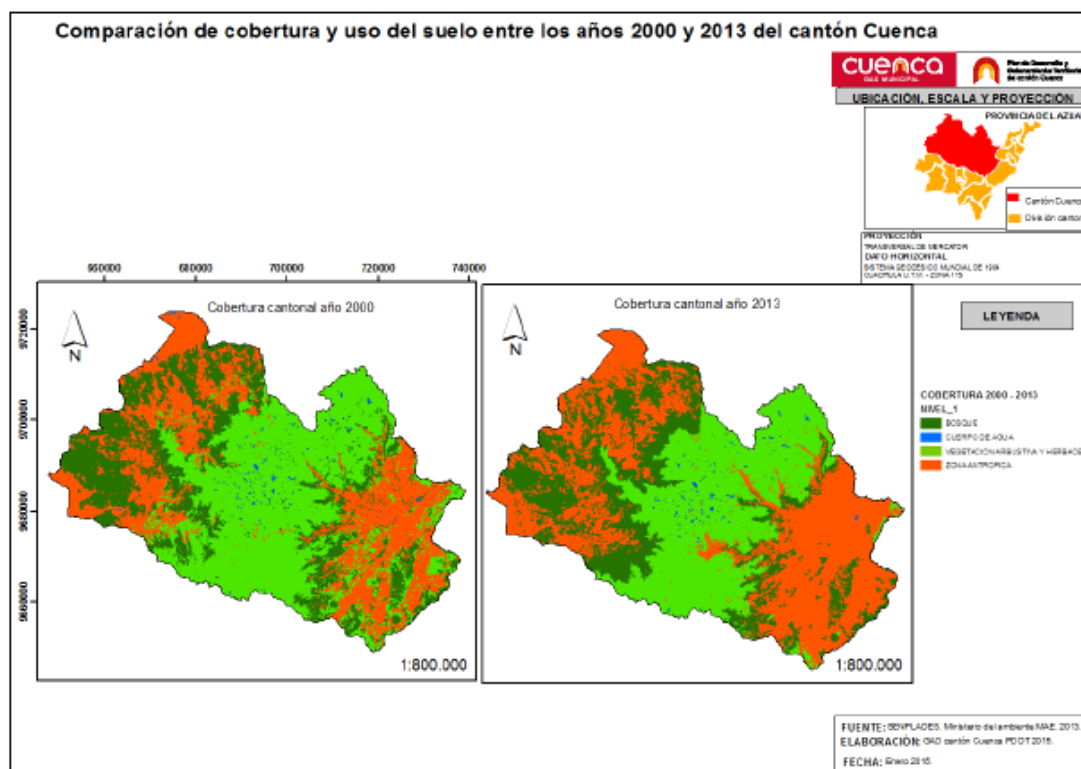
Ilustración 5: Crecimiento del área urbana de la ciudad de Cuenca



Año	Imagen	Huella	Superficie huella urbana Ha	TMCAA Huella urbana	Población proyectada por censo	TMCAA Poblacion	Densidad Hab/ha
2010	Ortofoto 1:5,000	2010 Consolidado	6187,79	4,12%	331.888	2,23%	53,64
2005	Imagen satelital	2005 Consolidado	5056,98	1,57%	297.175	1,59%	58,77
2002	Landsat	2002 Consolidado	4826,70	2,36%	283.433	3,16%	58,72
1987	Landsat	1987 Consolidado	3403,01		177.775		52,24

**Fuente y Elaboración:** Tomado del BID, Informe Final del Estudio CE 3 Crecimiento urbano en la ciudad de Cuenca, 2014

Ilustración 6: Comparación de cobertura y uso del suelo entre los años 2000 y 2013 de cantón Cuenca



Fuente y Elaboración: Tomado de Mejía, V., 2014

## 2. CAPITULO II: MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se describe la metodología y las fuentes de datos como insumo a ser utilizadas en el procesamiento de las imágenes satelitales, la generación de los escenarios futuros con los diferentes métodos, previo la revisión de información cartográfica disponible para esta investigación.

### 2.1. Insumos

Para determinar la dinámica o cambio del uso del suelo y cobertura vegetal en el cantón Cuenca se partió de la recopilación y análisis de información cartográfica disponible, encontrando las fuentes de información que se detallan a continuación:

- **Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca – MAGAP.** Se dispone de cartografía de capacidad de uso del territorio que cubre el territorio continental, a escala 1:250.000, correspondiente a los años 1982 y 1990.
- **Secretaría del Agua, Demarcación Hidrográfica de Santiago - SENAGUA,** dispone de información cartográfica de la Cuenca del Río Paute a escala 1:100.000, de los años 1991, 2000, 2001 y 2007. La información no cubre la totalidad del cantón Cuenca. Fuente: Universidad del Azuay, 2001.
- **Ministerio del Ambiente – MAE.** Se cuenta con cartografía de la Cobertura vegetal de los años 2000 y 2008, a una escala 1:100.000 y cubre todo el territorio cantonal.
- **GAD Municipal del cantón Cuenca – GADM Cuenca.** El Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Cuenca, dispone de información cartográfica de uso y cobertura vegetal del año 2010, a escala 1:25.000 para todo el cantón Cuenca, construido a partir de imágenes de satélite Rapid Eye.

### 2.2. Imágenes de satélite

Para iniciar el tema de investigación es necesario contar con las imágenes satélites que fueron descargadas del Servicio Geológico de los Estados Unidos o USGS por sus siglas en inglés (United States Geological Survey), correspondientes al sensor Landsat 5 y 7, de los años 1991 y 2001 respectivamente. A estas imágenes se les realiza un procesamiento digital con el objetivo de contar con las características adecuadas para los diferentes análisis.

## 2.3. Software

Se utilizó el programa ArcGis 10.2, como software de apoyo y para el análisis espacial en el modelo de Evaluación Multicriterio.

El software IDRISI SELVA, es un programa de fácil manejo y contiene varios módulos para el análisis espacial y estadístico que ayudan a la toma de decisiones. El módulo Land Change Modeler, Cadenas de Markov y Automatas Celulares de Cadenas de Markov que fueron usados en esta investigación.

El programa ENVI 4.5, también se utilizó como apoyo para la clasificación y pre procesamiento de las imágenes de satélite.

## 2.4. Métodos

### 2.4.1. Identificación y selección de las imágenes satélites

Las imágenes de satélites han sido seleccionadas, tomando en cuenta un criterio de calidad:

- i) Cobertura de nubes, no mayor al 10% de la superficie a estudiar,
- ii) Las imágenes tienen una diferencia de fechas de 10 años aproximadamente,
- iii) El Sensor, se eligió imágenes correspondientes al sensor Landsat 5 y Landsat 7, que es un sensor multiespectral y posee bandas ubicadas estratégicamente en el espectro electromagnético para el estudio de la vegetación.

Existen agencias espaciales que ponen a disposición del público imágenes de satélite, entre ellos NOAA, MODIS y Landsat. De estos tres proveedores, las imágenes landsat son las que mejor resolución espacial presenta con 30m de tamaño de pixel en las bandas multiespectral.

### Imágenes de satélite Landsat

La agencia estadounidense de Administración Nacional del Espacio y Aeronáutica, conocida como NASA por sus siglas en inglés, desarrollo un programa espacial para la observación de la tierra, enviando el primer satélite el ERST (*Earth Resource Technology Satellite*) en 1972, posteriormente el programa sería renombrado como Landsat a partir del segundo satélite en 1975. Hasta el momento se han lanzado ocho satélites del programa Landsat siendo el último lanzamiento en febrero.2013 del Landsat 8 y tan solo el sexto satélite (Landsat6) perdido tras su lanzamiento. Cada satélite enviado al espacio lleva consigo mejoras sustanciales en cuanto a resolución espacial, resolución radiométrica, resolución temporal y resolución espectral. La buena resolución de sus sensores, el carácter global

y periódico hacen de este programa el de mayor serie histórica de imágenes de cobertura terrestre. [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/landsat/launch/](http://www.nasa.gov/mission_pages/landsat/launch/)

Las imágenes del satélite Landsat, que cubren el cantón Cuenca corresponde al path 10 row 62, las mismas se registran desde el año 1985 hasta febrero del 2015. El satélite Landsat pasa por el mismo lugar cada 16 días (resolución temporal), tiene un tamaño de pixel de 15m, 30m y 120m (resolución espacial), y registra la información en 8 bandas (resolución espectral). La información se encuentra disponible en la dirección: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Ver ilustración No. 7.

Las imágenes identificadas tiene una diferencia de 10 años entre fechas de adquisición de las tomas (año 1991 y 2001) y requieren ser corregidas geométricamente, es decir que estén ajustadas al mismo sistema de coordenadas geográficas y corregidas radiométricamente para minimizar los efectos del ángulo de iluminación solar, efectos de sombras a causa de la topografía, entre otros. Las correcciones a ser aplicadas a las imágenes no solo servirán para la generación de los mapas de cobertura y uso del suelo, sino servirá también para aplicar técnicas de detección de cambios.

#### 2.4.2. Corrección Geométrica

No todas las imágenes de satélite se encuentran georreferenciadas, es decir no poseen un sistema de coordenadas para una localización geográfica, por lo que es necesario asignar a las imágenes un sistema de coordenadas.

La corrección geométrica de una imagen, se la realiza a partir de puntos de control, por diferentes métodos: a) empleando cartografía digital de la zona de estudio, b) utilizando imágenes ortorectificadas, es decir que tienen establecido un sistema de coordenadas geográfico; y c) realizando mediciones GPS en los puntos de control.

En este trabajo se realizó la corrección geométrica de la imagen Landsat5 del 15.oct.1991 tomando como base una imagen satélite ortorectificada del sistema Landsat5 del 26.mar.1987; y, para la corrección geométrica de la imagen Landsat7 del 03.nov.2001 se realizó tomando como base la imagen Landsat7 del 02.oct.2001.

La corrección geométrica por puntos de control, parte de que se conoce las coordenadas de la imagen de referencia (en este caso corresponden a las imágenes Landsat5 del 26.mar.1987, Landsat7 del 02.oct.2001) así como las coordenadas de la imagen a corregir



Ilustración 7: Imágenes de Satélite Landsat usadas para la investigación

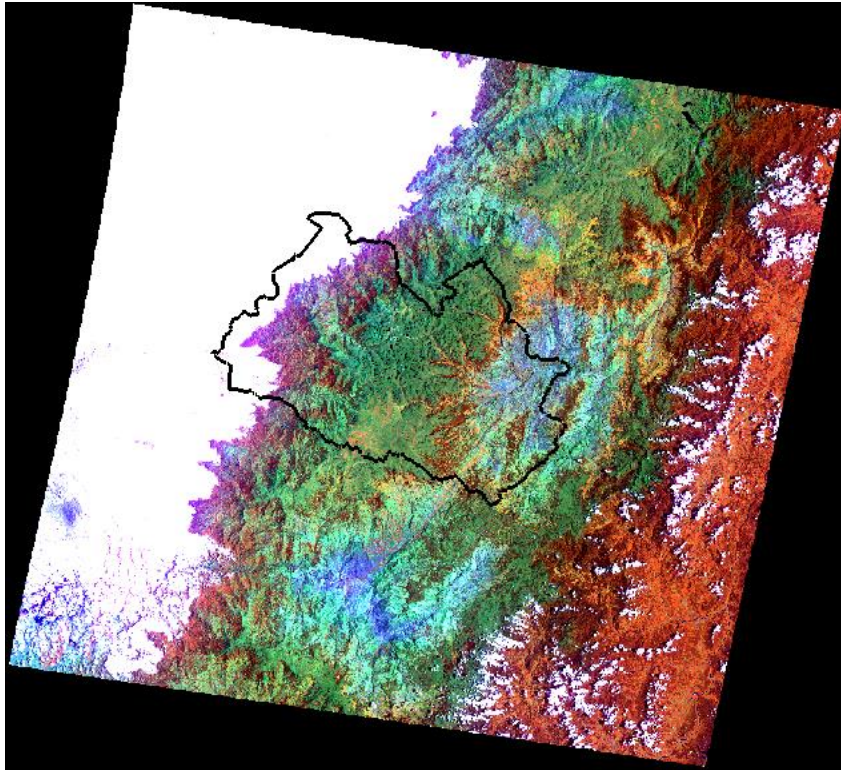
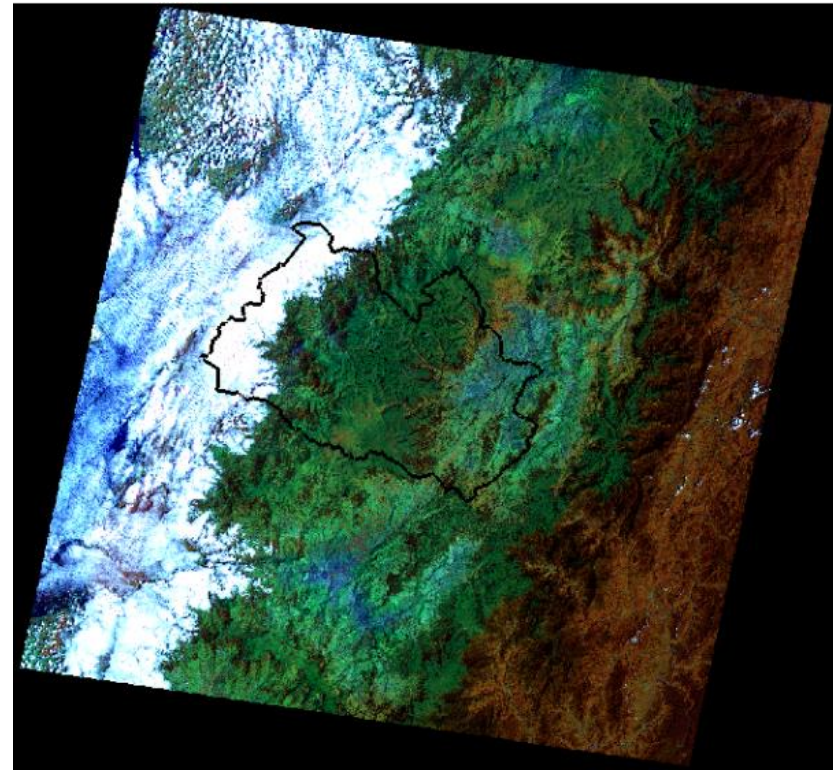


Imagen Satélite Landsat5, P10R62,  
capturada el 15 de octubre de 1991



Satélite Landsat7, P10R62,  
capturada el 3 de noviembre de 2001

Fuente y Elaboración: Propia, 2015

(dos imágenes a corregir: imagen Landsat5 del 15.oct.1991 y la imagen Landsat7 del 03.nov.2001). La corrección geométrica se realiza en tres fases:

- 1) Localización de puntos comunes en la imagen de referencia y la imagen a corregir;
- 2) Cálculo de las funciones de transformación entre las coordenadas de la imagen objetivo y las de referencia; y,
- 3) Transferencia de los Niveles Digitales - ND<sup>1</sup> originales a la nueva posición, definida por la transformación previa.

#### Localización de puntos comunes en la imagen de referencia y la imagen a corregir

Tanto la imagen Landsat5 de mar.1987 como la imagen landsat7 de oct.2001 se encuentran ortorectificadas, es decir que posee un sistema de coordenadas geográfica, que se encuentra con los siguientes parámetros:

- Datum horizontal: WGS84 (World Geodetic System 1984)
- Sistema de Coordenadas: UTM (Universal Transversa Mercator)
- Zona UTM: 17S (Zona 17, hemisferio Sur)

#### *Número de puntos de control*

El número de puntos depende de la complejidad geométrica de la imagen, para imágenes con un ángulo de visión instantáneo pequeño como de las imágenes Landsat7, la transformación puede realizarse con ecuaciones lineales simples. Matemáticamente para ecuaciones de primer grado se requiere de 3 puntos, 6 puntos para 2do. grado y 10 para una ecuación de 3er grado. En el presente este trabajo se emplearon ecuaciones lineales de primer grado para la corrección geométrica, y se ubicaron 227 puntos de control para la imagen de 1991 y 91 puntos de control para imagen de noviembre de 2001. Ver ilustración No. 8.

#### *Localización*

Los puntos de control empleados fueron localizados en el cruce de vías, sobre todo en vías principales, ya que representan los sitios más estables a modificaciones o alteraciones en el tiempo considerado, sin embargo con la finalidad de mejorar la geometría se localizaron puntos de las intersecciones de ríos.

---

<sup>1</sup> Nivel Digital – ND: es un valor numérico asignado a cada pixel de la imagen y que representa a la radiancia recibida por el sensor. Chuvieco, 2007.

### *Distribución*

Los puntos fueron situados de forma uniforme sobre las imágenes de satélite tratando de abarcar el territorio en estudio, evitando concentrar puntos en un determinado sector para no tener errores provocados por una exagerada ponderación.

### *Calculo de las funciones de transformación*

La corrección digital de la geometría de una imagen se realiza estableciendo unas funciones de transformación por medio de ecuaciones matemáticas en base a las coordenadas de los puntos de control seleccionados previamente. En este caso particular se empleó la función polinomial de primer grado.

Los coeficientes de las funciones de transformación son calculados por el método de mínimos cuadrados, donde la bondad del grado de ajuste se mide por la importancia de los residuales, es decir por la diferencia entre el valor estimado y el observado para cada uno de los puntos muestrales, es decir cuanto mayor sea este valor el ajuste es menor en cada punto.

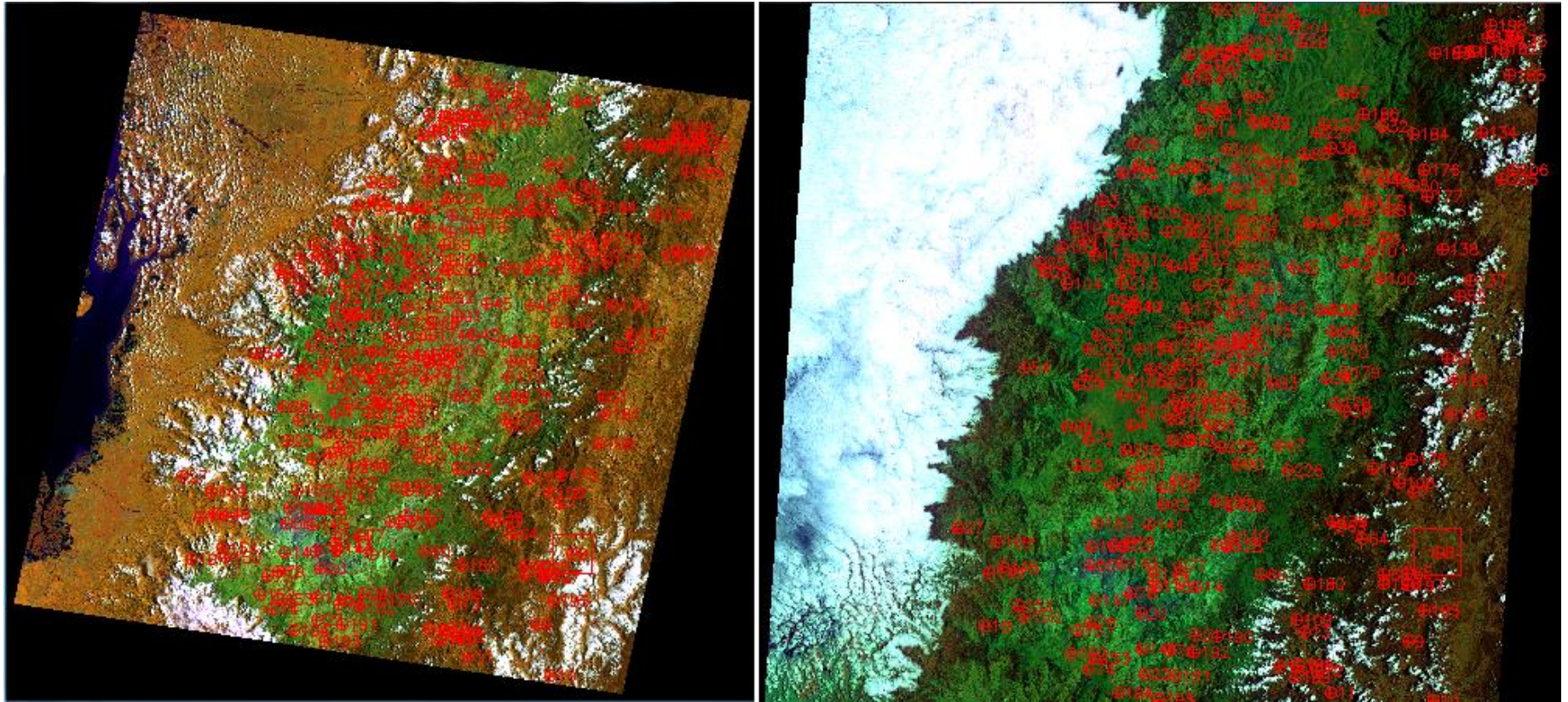
Ahora bien, la calidad general de la corrección geométrica se evalúa a través del *error medio cuadrático* RMSE que se calcula como la raíz cuadrada de las desviaciones entre los valores observados y los estimados por la regresión, tanto para filas como para columnas. Para emplear imágenes en la detección de cambios se requiere de un RMSE entre 0.5-1.0. Para la imagen Landsat5 de oct.1991 se obtuvo en RMS de 0.992790 y para la imagen Landsat7 de nov.2001 se obtuvo un RMS de 0.970429. Ver ilustración No. 9.

### *Transferencia de los ND originales a la posición corregida*

Las funciones analizadas hasta ahora, permite proporcionar coordenadas (georeferenciar) a la imagen que inicialmente no las tiene, por lo que posteriormente es necesario llevar los valores de ND a esas coordenadas. Ahora el asunto en este apartado es como trasvasar o llevar los ND a las nuevas coordenadas, para ello existen tres métodos: 1) vecino más próximo, 2) interpolación bilineal y 3) convolución cúbica. El método utilizado en este trabajo fue el vecino más próximo (*nearest neighbour*) que sitúa en cada celda de una nueva imagen corregida el ND del píxel más cercano en la imagen original, se empleó este método ya que presenta la menor transformación de los ND originales en comparación con los otros dos métodos que para cada celda suponen una interpolación de valores de ND y un ajuste más riguroso a los puntos de control, en lugar de un mejor ajuste a toda la imagen que se obtiene con el método del vecino más próximo.



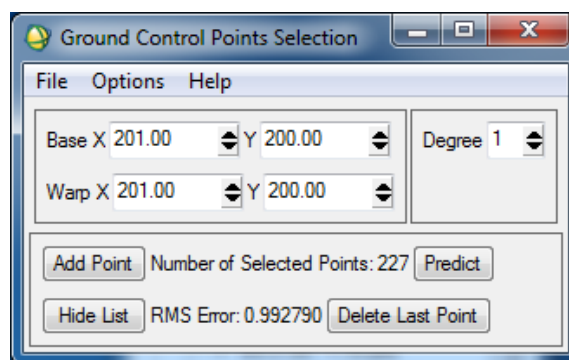
Ilustración 8: Ubicación de puntos de control entre imagen de 1987 (izq) e imagen de 1991 (der)



Fuente y Elaboración: Propia, 2015

Ilustración 9: Valores de RMS obtenidos con los 227 puntos de control

	Base X	Base Y	Warp X	Warp Y	Predict X	Predict Y	Error X	Error Y	RMS
#213+	3355.57	2883.43	3059.43	2290.43	3060.8140	2289.9172	1.3840	-0.5128	1.4759
#214+	2947.40	3586.20	2756.60	3045.20	2757.7990	3044.6228	1.1990	-0.5772	1.3307
#215+	3574.38	4038.38	3445.50	3400.38	3445.0798	3400.6247	-0.4202	0.2447	0.4863
#216+	3617.38	3746.38	3445.50	3105.25	3445.4447	3105.4874	-0.0553	0.2374	0.2438
#217+	3560.38	4223.38	3458.50	3585.38	3457.9835	3585.6831	-0.5165	0.3031	0.5989
#218+	3174.38	4243.38	3077.38	3661.50	3078.1190	3661.7007	0.7390	0.2007	0.7658
#219+	3426.38	4579.50	3376.50	3957.50	3376.6822	3957.5107	0.1822	0.0107	0.1825
#220+	3002.38	3378.50	2780.50	2831.38	2782.2261	2831.1372	1.7261	-0.2428	1.7431
#221+	3095.38	3270.38	2857.50	2710.38	2858.7972	2710.6271	1.2972	0.2471	1.3205
#222+	2967.50	4999.50	2982.50	4439.63	2982.5564	4439.8632	0.0564	0.2332	0.2399
#223+	3358.50	3939.50	3216.38	3334.50	3216.6801	3334.2523	0.3001	-0.2477	0.3892
#224+	3632.25	3893.38	3482.38	3248.38	3481.4739	3248.7470	-0.9061	0.3670	0.9776
#225+	3950.50	4330.25	3861.38	3634.38	3860.2959	3634.5766	-1.0841	0.1966	1.1018



Fuente y Elaboración: Propia, 2015

Una vez realizadas las correcciones radiométrica y geométrica, se procedió a recortar cada imagen con respecto al cantón Cuenca. El límite del cantón empleado para el recorte corresponde al límite del 2011 empleando por el PDOT del GAD cantonal de Cuenca.

### 2.4.3. Corrección radiométrica

En las imágenes es necesario convertir los niveles digitales a parámetros físicos de radiancia de terreno, y para conseguir esto es necesario efectuar los siguientes cálculos:

Radiancia espectral recibida en el sensor; y, Cálculo de reflectividad.

#### Radiancia espectral recibida en el sensor

La medición en el sensor se codifica en un valor numérico denominado nivel digital (ND), como resultado de los coeficientes de calibración específicos para cada sensor. Por lo tanto al tener información de los coeficientes se puede obtener los valores de radiancia espectral

detectada por el sensor a través de los ND. (2010, Chuvieco). Para convertir los valores de Nivel Digital a valores de Radiancia, se aplica la siguiente expresión:

$$L_{(k)} (Wm^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}) = ND_{(k)} * Gain + Offset$$

Donde  $L_{(k)}$  es la radiancia correspondiente a la banda  $k$  recibida en el sensor,  $Gain$  (ganancia) y  $Offset$  o  $BIAS$  (sesgo); son los coeficientes de calibración del sensor para la mencionada banda y  $ND_{(k)}$  el nivel digital de la imagen en esa banda.

En la siguiente tabla, se indican los coeficientes de calibración para imágenes Landsat5, según Chander y Markham, 2003 en Chuvieco, 2007.

Tabla 2: Coeficientes de calibración para imágenes Landsat5

Radiancia espectral, LMIN $\lambda$ y LMAX $\lambda$ en W/(m2.sr. $\mu$ m)									
Fechas Procesamiento	Desde Marzo 1, 1984				Posterior Mayo 5, 2003				ESUN = W/(m2. $\mu$ m)
	Hasta Mayo 4, 2003								
Banda	LMIN $\square$	LMAX $\square$	G rescale	B rescale	LMIN $\square$	LMAX $\square$	G rescale	B rescale	Landsat 5
1	-1,52	152,10	0,602431	-1,52	-1,52	193,0	0,762824	-1,52	1957
2	-2,84	296,81	1,175100	-2,84	-2,84	365,0	1,442510	-2,84	1826
3	-1,17	204,30	0,805765	-1,17	-1,17	264,0	1,039880	-1,17	1554
4	-1,51	206,20	0,814549	-1,51	-1,51	221,0	0,872588	-1,51	1036
5	-0,37	27,19	0,108078	-0,37	-0,37	30,2	0,119882	-0,37	215,0
6	1,2378	15,30	0,055158	1,2378	1,2378	15,303	0,055158	1,2378	-
7	-0,15	14,38	0,056980	-0,15	-0,15	16,5	0,065294	-0,15	80,67

Fuente y Elaboración: Propia, 2015

En la tabla No. 3, se indican los coeficientes de calibración para imágenes Landsat7, según Chander y Markham, 2003.

Tabla 3: Coeficientes de calibración para imágenes Landsat7

L7 ETM+ Sensor (Q calmin = 1 y Qcalmax=255)					
Low Gain (LPGS)					
Banda	LMIN $\square$	LMAX $\square$	G rescale	B rescale	ESUN
	W/(m2.sr. $\mu$ m)		W/(m2.sr. $\mu$ m)	W/(m2.sr. $\mu$ m)	W/(m2. $\mu$ m)
1	-6,2	293,7	1,180709	-7,36	1997
2	-6,4	300,9	1,209843	-7,61	1812
3	-5,0	234,4	0,942520	-5,94	1533
4	-5,1	241,1	0,969291	-6,07	1039
5	-1,0	47,57	0,191220	-1,19	2308

6	0	17,04	0,067087	-0,07	N/A
7	-0,35	16,54	0,066496	-0,42	84,9
PAN	-4,7	243,1	0,975591	-5,66	1362

**High Gain (LPGS)**

Banda	LMIN	LMAX	G rescale	B rescale	ESUN
	W/(m2.sr.μm)	W/(m2.sr.μm)	W/(m2.sr.μm)	W/(m2.sr.μm)	W/(m2.μ)
1	-6,2	191,6	0,778740	-6,98	1997
2	-6,4	196,5	0,798819	-7,2	1812
3	-5,0	152,9	0,621654	-5,62	1533
4	-5,1	157,4	0,639764	-5,74	1039
5	-1,0	31,06	0,126220	-1,13	2308
6	3,2	12,65	0,037205	3,16	N/A
7	-0,35	10,8	0,043898	-0,39	84,9
PAN	-4,7	158,3	0,641732	-5,34	1362

Fuente y Elaboración: Propia, 2015

Toda imagen de satélite dispone de un archivo de metadato en el cual se indica los parámetros de adquisición o en su defecto los valores de radiancia mínima  $L_{\min}$  y máxima ( $L_{\max}$ ) a partir de los cuales se puede obtener los coeficientes de calibración de ganancia (Gain) y sesgo (Offset o BIAS).

La radiancia mínima registrada en el sensor se obtiene cuando el ND = 0, reemplazando estos valores en la ecuación (1), tenemos:

$$L_{\text{sensor},k} = ND_k \cdot \text{Gain} + \text{Offset}$$

$$L_{\min,k} = 0 \cdot \text{Gain} + \text{Offset}$$

$$L_{\min,k} = \text{Offset}$$

Siguiendo similar procedimiento, se calcula la radiancia máxima que se obtiene con un ND=255.

$$L_{\text{sensor},k} = ND_k \cdot \text{Gain} + \text{Offset}$$

$$L_{\max,k} = 255 \cdot \text{Gain} + L_{\min,k}$$

$$\text{Gain} = \frac{L_{\max,k} - L_{\min,k}}{255}$$

Radiancia del suelo

$L_{\text{sensor},k} = L_{\text{suelo},k} + L_{a,k}$  La radiancia que llega al sensor no es más que la suma de la radiancia del suelo más la radiancia atmosférica que se expresa en la siguiente ecuación:



Teniendo en cuenta que se conoce la radiancia del sensor  $L_{sensor,k}$ , explicada en párrafos anteriores y que la radiancia atmosférica  $L_{a,k}$  se puede obtener a partir del valor mínimo registrado en cada banda  $k$ , queda como incógnita la radiancia del suelo. Si despejamos la radiancia del suelo de la ecuación anterior, tenemos la expresión:

$$L_{suelo,k} = L_{sensor,k} - L_{a,k}$$

El término  $L_{a,k}$  corresponde al valor de radiancia que aporta la atmósfera. Una corrección atmosférica es compleja y requiere normalmente muchos parámetros de reflectancias en la imagen. Como estos datos no se encuentran en las imágenes con las que se trabaja, se realizó una corrección de una manera sencilla, registrando el valor mínimo de radiancia en cada banda, lo que supone estimar el parámetro  $L_{a,k}$  a partir del valor mínimo del histograma.

### Calculo de Reflectividades

En este apartado se trata de convertir los valores de radiancia en valores de reflectividad, mediante la siguiente expresión:

$$\rho_k = \frac{D\pi(L_{sen,k} - L_{a,k})}{E_{0,k} \cos\theta_i \tau_{k,i}}$$

**Donde:**

$D$ : Factor de corrección de distancia Tierra – Sol

$E_{0,k}$ : Irradiancia solar en el techo de la atmósfera

$\theta_i$ : Ángulo cenital de flujo incidente

$\tau_{k,i}$ : Transmitividad

**El Factor de corrección de distancia Tierra – Sol (D)**, se calcula por la siguiente expresión:

$$D = \left[ 1 + 0.01674 \left( \sin 2\pi \left( \frac{J - 93.5}{365} \right) \right) \right]^2$$

Donde  $J$  es el número de orden correspondiente al día del año, el mismo que se puede obtener a partir de la fecha de adquisición de la imagen satélite convertida en día juliano. Este valor varía aproximadamente entre 0.983 (3.enero) en el perihelio y 1.017 (4.julio) en el afelio.

El **ángulo cenital del flujo incidente**, formado por la vertical y los rayos solares (en los modelos simplificados como el que se indica, este ángulo se equipara al ángulo cenital solar,



que es el complementario del ángulo de elevación solar y que viene en la cabecera de la imagen, lo que supone que la superficie del terreno es llano). El ángulo cenital debe estar en radianes.

El **valor de irradiancia solar en el techo de la atmósfera** para esa banda del espectro, conocida a partir de las tablas solares.

Los valores de **transmitividad estándar**, son tomados de Chuvieco, 2010 y corresponde a los siguientes valores:

$$\tau_{k,i} = 0.70 \text{ (TM1)}, 0.78 \text{ (TM2)}, 0.85 \text{ (TM3)}, 0.91 \text{ (TM4)}, 0.95 \text{ (TM5)}, 0.97 \text{ (TM7)}$$

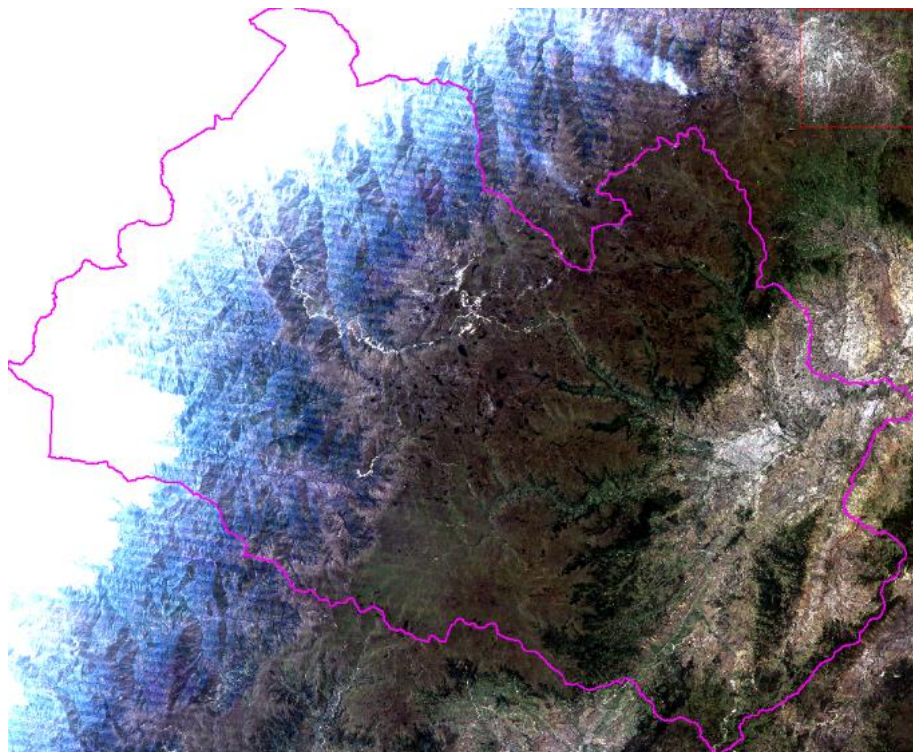
Finalmente, se aplican los valores respectivos a cada banda del sensor landsat 7 y se obtiene los valores de reflectividad, que corresponde a los valores de reflectividad de las diferentes coberturas del suelo. Una vez obtenidas las imágenes corregidas radiométricamente se procede con la corrección geométrica. Ver ilustración No. 10.

## 2.5. Clasificación digital de las imágenes satélites de los años 1991 y 2001

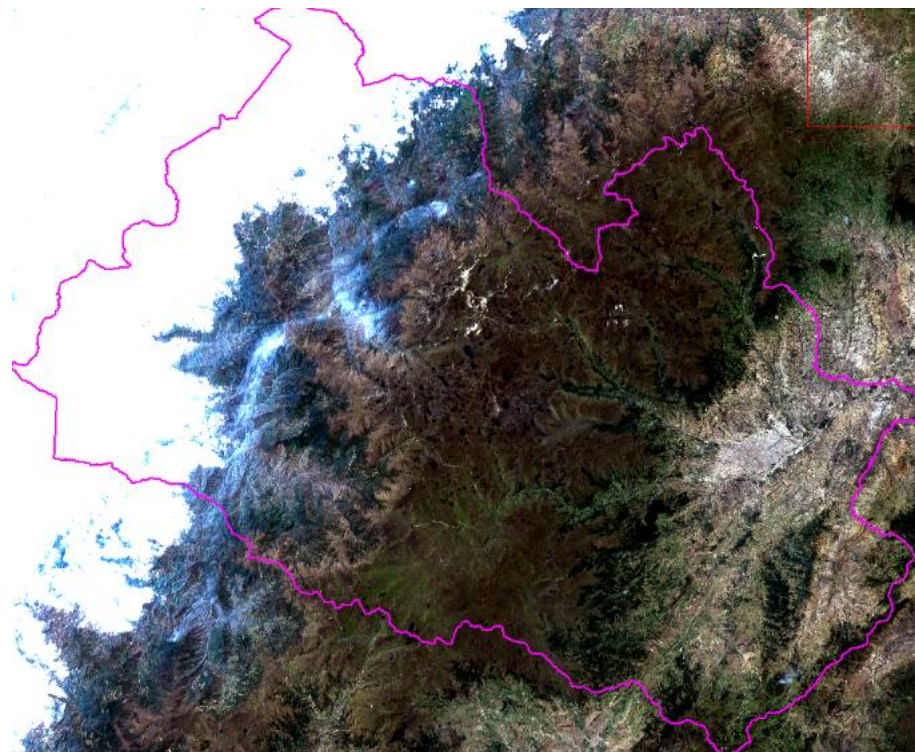
Uno de los productos de la clasificación digital es la generación de cartografía e inventario de las categorías o coberturas de una zona de estudio. A partir de las imágenes multibanda corregidas se construye una nueva imagen del mismo tamaño y de las características originales, con la importante diferencia de que el ND (nivel digital) de cada píxel no tiene relación con la radiancia detectada por el sensor, sino que es una etiqueta que identifica la categoría asignada a ese píxel. A partir de esta nueva imagen se puede generar cartografía temática, así como un inventario estadístico del número de píxeles asignados a cada categoría.

La clasificación digital de una imagen se realiza posterior a los procesos de corrección y realce. Sin embargo se puede abordar una clasificación exclusivamente a partir de los ND de la imagen, ya que las categorías temáticas suelen definirse de modo relativo a las condiciones específicas de la escena a clasificar. Por lo que la clasificación digital no busca una definición absoluta de cada cubierta, que pudiera ser aplicable a cualquier imagen, sino más bien una caracterización relativa, válida para una determinada imagen y un territorio en concreto (Robinove, 1981 en Bosque Sendra, 2001). Por lo tanto no resulta preciso conocer detalladamente las condiciones de adquisición: basta identificar en la imagen las clases a discriminar, sin pretender que esa identificación sea extrapolable a otras situaciones.

Ilustración 10: Resultado de la corrección radiométrica y recorte de las Imágenes Satélite Landsat con el contorno del cantón Cuenca



Satélite Landsat5, del cantón Cuenca,  
capturado el 15 de octubre de 1991



Satélite Landsat7, del cantón Cuenca,  
capturado el 3 de noviembre de 2001

**Fuente y Elaboración:** Propia, 2015

En resumen no se trata de establecer un modelo entre medidas digitales y parámetros físicos; sino entre medidas digitales, para un sensor, una zona y una fecha determinada, y tipos de cubierta, por lo que la clasificación supone un proceso más cualitativo apoyado en un importante componente estadístico.

La clasificación digital implica categorizar una imagen multibanda. En términos estadísticos, esto supone reducir la escala de medida, de una variable continua (los ND detectados por el sensor) a una escala nominal o categórica.

### **2.5.1. Escala de los productos cartográficos a obtener.**

La escala de los productos cartográficos que se puede generar a partir de imágenes de satélite Landsat, es 1:100.000 tomando en cuenta que se emplearan las bandas multispectrales que tienen una resolución espacial de 30m.

La escala, se estima por la expresión:

3 veces la resolución espacial, es decir  $3 \times 30\text{m} = 90\text{m}$ .

Luego, en 1mm de mapa se dibujan 90m, por tanto la escala es 1:90.000 que se aproxima a 1:100.000

### **2.5.2. Definición de las categorías de cobertura y uso del suelo**

Para el cantón Cuenca, se ha definido ocho categorías de cobertura y uso del suelo. En el proceso de clasificación digital se partieron de las cinco primeras categorías indicadas en la tabla No. 4, que luego apoyados en la herramienta de árboles de decisión se reclasificaron tres categorías obteniendo finalmente ocho categorías más las categorías de las nubes para completar el área del territorio cantonal, las mismas que se indica a continuación.

Tabla 4: Categorías de cobertura vegetal y uso del suelo

Categoría	Cobertura y uso
0	Nubes
1	Agua
2	Pastos y cultivos
3	Páramo
4	Suelo descubierto
5	Vegetación leñosa
6	Vegetación herbácea
7	Vegetación leñosa nativa
8	Suelo urbano

Fuente y Elaboración: Propia, 2015

A continuación se describe cada una de las categorías de cobertura vegetal y uso del suelo.

### Agua

Corresponde a cuerpos de agua, lagos, lagunas, reservorios, ríos, y otros.

### Pastos y cultivos

En esta categoría se incluyen las áreas de cultivos anuales y de ciclo corto; los pastos con o sin riego, así como áreas de pasto natural, e incluso zonas

### Páramo

En el cantón Cuenca, la cobertura de páramo se presenta en altitudes mayores a los 2800 m s.n.m. para lo cual se empleó el modelo digital de terreno del cantón para discriminar la cobertura de páramo de la vegetación herbácea, siendo páramo la cobertura sobre los 2800 m y vegetación herbácea la que se encuentra bajo los 2800 m.

### Vegetación leñosa

En cuanto a la vegetación leñosa, se distinguió la vegetación leñosa nativa de la vegetación plantada o exótica. El criterio empleado ha sido la altura, sobre los 2800 se da la presencia de bosque alto andino, en este trabajo se denomina **vegetación leñosa nativa**, que se diferencia de la vegetación leñosa plantada o exótica que se presenta en cotas inferiores a los 2800 m y que se le denomina de manera general como vegetación leñosa.

### **Vegetación herbácea**

Corresponde a la cobertura vegetal de baja altura y presenta una mezcla entre especies herbáceas y leñosas, se localiza en áreas con pendientes muy pronunciadas, son especies pioneras.

### **Suelo descubierto**

El suelo descubierto corresponde a las áreas urbanas, suelo sin cobertura vegetal y áreas con vegetación de baja altura. Para diferenciar el suelo sin cobertura de aquel con escasa vegetación se utilizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada –NDVI.

El valor de NDVI que diferencia estas dos coberturas es de 0.08 para la imagen de 1991; valores inferiores a 0.08 corresponden a suelo descubierto de vegetación y valores de NDVI superiores corresponden a suelo con vegetación de baja altura que se denomina vegetación herbácea. Para la imagen del 2001 el valor de NDVI que permite esta discriminación corresponde al valor de -0.20.

### **Suelo urbano**

La categoría de suelo descubierto agrupaba al suelo urbano. Para discriminar estas dos categorías se utilizó el criterio el valor medio de la textura. Para la imagen de 1991 se identificó al suelo urbano con valores comprendidos entre 26 a 39 de valor medio de textura. Para la imagen de 2001 el suelo urbano se identificó con valores entre 14 y 34.

### **Nubes**

Las imágenes de 1991 y 2001 presentan una gran cobertura de nubes, por lo que es necesario retirar las nubes del mapa de cobertura vegetal y uso del suelo.

## **2.5.3. Fase de entrenamiento**

La clasificación digital se inicia definiendo cada una de las categorías que pretende discriminarse. La clasificación digital se basa en los valores numéricos de los píxeles, esto es se trata de obtener el Nivel Digital - ND, o mejor aún el rango de ND, que identifica a cada categoría, para todas las bandas que intervienen en la clasificación. Ahora bien las distintas categorías no se definen por un solo ND, sino por un conjunto de ND, más o menos próximos entre sí. En términos de clasificación digital esto supone que existe una cierta dispersión en



torno al ND medio de cada categoría, más o menos significativa según las clases que se consideren y la propia complejidad del paisaje donde éstas se asienten.

Por ello la fase de entrenamiento resulta compleja: se trata de definir con rigor cada una de las categorías que pretende discriminarse, teniendo en cuenta su propia variabilidad en la zona de estudio.

La clasificación digital se logra seleccionando una muestra de píxeles de la imagen, que representen las categorías de interés y a partir de estos píxeles pueden calcularse los ND medios y la variabilidad numérica de cada categoría, en todas las bandas que intervienen en la clasificación, por lo que una defectuosa o errónea selección de píxeles o de categorías conlleva pobres resultados en la clasificación.

#### 2.5.4. Análisis de las estadísticas de entrenamiento

Para aplicar el método de clasificación supervisado se tomaron muestras sobre cinco categorías: agua, pastos y cultivos, páramo, suelo descubierto y vegetación leñosa. Para determinar la calidad de las muestras se empleó el índice de divergencia transformada que compara dos categorías y proporciona valores entre 0 y 2, siendo 2 un indicador que entre las categorías identificadas no se mezclan es decir existe una buena separabilidad. Las muestras son aceptables cuando presentan valores  $\geq 1.98$  de separabilidad. En las siguientes tablas se indican los valores de divergencia transformada obtenidos para los sitios de muestro en las imágenes de 1991 y 2001.

Tabla 5: Divergencia transformada entre las categorías de la imagen Cuenca 1991

Categoría	Agua	Páramo	Vegetación Leñosa	Pastos y cultivos	Suelo descubierto
<b>Agua</b>	-				
<b>Páramo</b>	2.00000000	-			
<b>Vegetación Leñosa</b>	1.99999970	1.99995491	-		
<b>Pastos y cultivos</b>	2.00000000	1.99997140	1.99470288	-	
<b>Suelo descubierto</b>	2.00000000	1.98089144	1.99999446	1.99998865	-

Tabla 6: Divergencia transformada entre las categorías de la imagen Cuenca 2001

Categoría	Agua	Páramo	Vegetación Leñosa	Pastos y cultivos	Suelo descubierto
<b>Agua</b>	-				
<b>Páramo</b>	1.99999999	-			
<b>Vegetación Leñosa</b>	2.00000000	1.99999977	-		
<b>Pastos y cultivos</b>	2.00000000	1.99997551	1.99999461	-	
<b>Suelo descubierto</b>	2.00000000	1.99767695	2.00000000	1.99957757	-

Fuente y Elaboración: Propia, 2015

Para las categorías de vegetación leñosa nativa, vegetación herbácea y suelo urbano, se utilizó el método de árbol de decisión, apoyados en cartografía cantonal. La categoría de las nubes se digitalizó en las imágenes y luego fue unificada para todas las imágenes.

### 2.5.5. Fase de asignación

En esta fase se trata de asignar cada uno de los píxeles de la imagen a una de las categorías previamente identificadas. Esta asignación se realiza tomando en cuenta las bandas que componen la imagen y las muestras obtenidas para cada categoría.

Existen varios métodos de clasificación (asignación), entre ellos: mínima distancia, paralelepípedos, máxima probabilidad, distancia euclidiana, distancia de mahalanobis, redes neuronales, entre otros. En nuestro caso para las imágenes de 1991 y 2001 los mejores resultados se obtuvieron con el clasificador de “Mínima Distancia”, obteniendo el mapa de cobertura y uso de suelo con cinco clases: agua, pastos y cultivos, páramo, suelo descubierto y vegetación leñosa. Sobre la información obtenida de cobertura vegetal y uso de suelo se aplicó un filtro de mayoría (majority) con una matriz de 3x3, con la finalidad de minimizar el efecto de sal y pimienta<sup>2</sup>, que no es más que la eliminación de áreas menores a 3000 m<sup>2</sup>, con la finalidad de generalizar la información temática.

Posteriormente a través de árboles de decisión se reclasificaron tres categorías: páramo, vegetación leñosa y suelo descubierto en función de la altura y del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada – NDVI, por sus siglas en inglés.

### 2.5.6. Cambio de cobertura y uso del suelo

Realizadas las clasificaciones de las imágenes de 1991 y 2001, se procede a realizar el análisis estadístico de las diferentes categorías de cobertura y uso del suelo, para ello se utilizó el módulo LCM del software IDRISI, que permite describir las ganancias y pérdidas de las diferentes categorías.

### 2.5.7. Matrices de tabulación cruzada

Se ha hecho uso de matrices de tabulación cruzada o matrices de transición, método propuesto por Pontius et al. (2004) para analizar mapas de usos del suelo por pares temporales con el objetivo de detectar los cambios más significativos entre los diferentes usos

---

<sup>2</sup> El efecto “sal y pimienta”, es el resultado del proceso de clasificación por píxel, de los cuales sólo se considera la reflectancia para su asignación a una categoría y los píxeles pueden quedar aislados; para eso se aplican filtros post clasificación los cuales uniformizan las clases, reasignándolos a una categoría (Chuvieco,2007).

del suelo. Estas matrices se corresponden con una tabla que compara la superficie de cada uno de los dos mapas de usos del suelo que se analizan; cada una de las celdas de la diagonal principal muestra la superficie de cada uso que ha permanecido estable durante dicho periodo, mientras que el resto de las celdas muestra la superficie que ha cambiado y hacia qué categoría se ha dirigido dicho cambio.

Con la información proporcionada por dicha matriz pueden obtenerse, además, valores de ganancias, pérdidas, intercambios, cambio total y cambio neto para cada categoría de uso del suelo.

En la siguiente ilustración se muestra detalladamente la definición de dicha matriz. Las categorías de usos del suelo del Tiempo1 están representadas en las filas y las categorías de usos del suelo del Tiempo2 en las columnas.  $P_{ij}$  representa la proporción de un uso del suelo que transiciona de la categoría  $i$  a la categoría  $j$ .  $P_{jj}$ , en la diagonal, indica la proporción de persistencia de la categoría  $j$ , mientras que el resto de celdas indican una transición de la categoría  $i$  a una categoría diferente  $j$ .

Ilustración 11: Matriz de tabulación cruzada.

		Tiempo 2			Total Tiempo 1	Pérdidas
		Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3		
Tiempo 1	Categoría 1	$P_{11}$	$P_{12}$	$P_{13}$	$P_{1+}$	$P_{1+} - P_{11}$
	Categoría 2	$P_{21}$	$P_{22}$	$P_{23}$	$P_{2+}$	$P_{1+} - P_{22}$
	Categoría 3	$P_{31}$	$P_{32}$	$P_{33}$	$P_{3+}$	$P_{1+} - P_{33}$
Total Tiempo 2		$P_{+1}$	$P_{+2}$	$P_{+3}$		
Ganancias		$P_{+1} - P_{11}$	$P_{+2} - P_{22}$	$P_{+3} - P_{33}$		

Fuente y Elaboración: Tomado de Pontius et al, 2004

### 2.5.8. Calculo la Tasa Anual de Cambio (TAC)

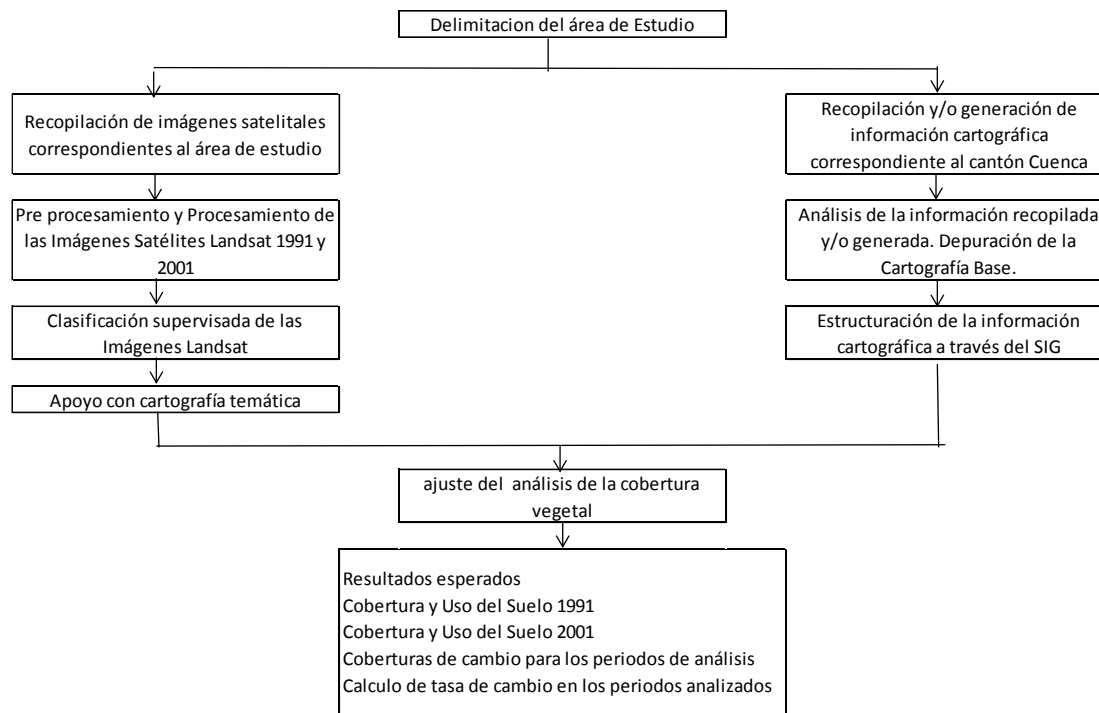
La base territorial para realizar el análisis serán las diferentes categorías de cobertura vegetal y uso de los suelos generados para las dos imágenes. Se calcula la superficie de ocupación de la vegetación y de los tipos de uso del suelo de los años 1991 y 2001; posteriormente se estimará la tasa de cambio correspondiente, utilizando la siguiente fórmula:



$$S_n = \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^{1/n} - 1 \times 100$$

Dónde: S=tasa de cambio anual  
 S<sub>1</sub>=superficie en la fecha 1  
 S<sub>2</sub>=superficie en la fecha 2  
 n = número de años entre las dos fechas

Ilustración 12: Diagrama del proceso de análisis de la tasa de cambio



Fuente y Elaboración: Propia, 2015

## 2.6. Modelos de Predicción

Un modelo es una representación de un componente o proceso de la realidad. Existen modelos estáticos, donde los datos de entrada y salida corresponden a un mismo instante en el tiempo, y modelos dinámicos donde la salida corresponde a un tiempo distinto al dato de entrada (Clavero, 2010).

### 2.6.1. Predicción de cambio de cobertura y uso de suelo

Las herramientas de modelación para el cambio de uso del suelo permiten explorar y proyectar escenarios a futuro o prospectivos, analizar y entender los procesos cuantitativos y cualitativos

que influyen en los desequilibrios territoriales. Consiste en obtener la transición de una categoría de la cobertura y uso del suelo por otra, valorando y jerarquizando los posibles factores que causan ese cambio.

## **2.6.2. Land Change Modeler**

Es un módulo de IDRISI SELVA, el cual permite realizar un análisis de ganancias y pérdidas del uso del suelo, el análisis de tendencias y proyecciones al futuro.

### **2.6.2.1. Cadenas de Markov**

Es una serie de eventos, en donde la probabilidad de que ocurra un evento depende del evento inmediato anterior, lo que condiciona las posibilidades de los eventos futuros, haciéndole dependiente de la situación del evento anterior.

Permiten modelar un escenario futuro a partir de dos estados anteriores en donde el valor del tiempo  $t_2$  depende de los valores de los tiempos  $t_0$  y  $t_1$ , el análisis de las cadenas de Markov se base en la dinámica interna del sistema (Proceso Estocástico), en donde registra una tendencia evolutiva de la cobertura vegetal y uso del suelo, no considera variables explicativas y descriptivas. El método considera que los cambios observados en un periodo de tiempo tiene tendencia a repetirse en un periodo posterior (Paegelow, Camacho Olmedo, 2002).

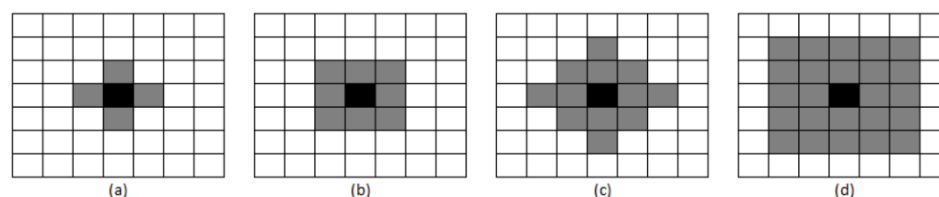
Para la aplicación del modelo se toma los mapas de cobertura vegetal y uso suelo correspondiente al año 1991 ( $t_0$ ) y 2001 ( $t_1$ ), se analiza el cambio o áreas de transición de las categorías en cada periodo y se realiza el modelado o predicción de cambio a los años 2010 y 2030.

Es necesario calcular una matriz de probabilidad de transición o cambio que presenta cada categoría de cobertura vegetal y uso del suelo a cambiar a otra categoría o permanecer en la misma categoría en un tiempo determinado. Se genera un grupo de imágenes que espacializan dichas probabilidades.

### **2.6.2.2. Autómatas celulares**

Según Wolfram S en Chuvieco, 2007., 1994; las Cadenas de Markov junto con los autómatas celulares son capaces de modelar dinámicas espaciales muy complejas que presentan las ciudades. Su nombre se debe a que están conformadas por celdas dispuestas como un tablero de ajedrez. Esta matriz de células visualiza la probabilidad de cambio de uso del suelo, dependiendo de la vecindad de cada celda.

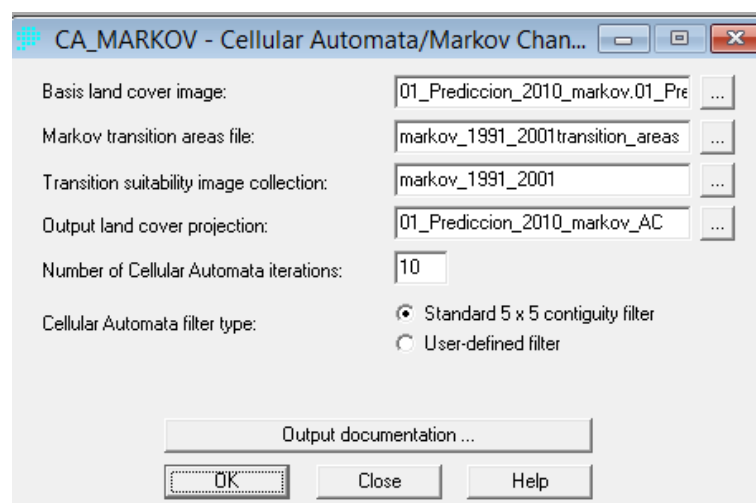
Ilustración 13: Disposición de las celdas



(a) Von Neumann, (b) Moore, (c) Von Neumann Extendido, (d) Moore Extendido

Fuente: Tomado de Ávila, R. 2014

Ilustración 14: Proceso para Cadenas de Markov



Fuente y Elaboración: Propia, 2015

### 2.6.2.3. Evaluación multicriterio – EMC

Surgen de la necesidad de contar con herramientas que apoyen los procesos de planificación y la toma de decisiones. Este modelo considera la capacidad del territorio para acoger un determinado uso del suelo y no el ritmo temporal de éste. Permite definir reglas de transición generando un mapa de aptitud en base a objetivos y criterios previamente establecidos (Paegelow et al., 2003; Gómez Delgado y Barredo, 2005).

Las técnicas de EMC han demostrado ser muy eficaces en la construcción del modelo óptimo, ya que facilitan la determinación de la aptitud o capacidad que presenta el territorio para el desarrollo de una determinada actividad, ya que permiten combinar criterios ambientales, sociales y económicos. Esta técnica es muy usada en la asignación de uso del suelo, localización de instalaciones no deseables, zonificación de corredores ambientales y áreas

naturales, urbanizaciones y grandes áreas industriales y comerciales (Gómez Delgado, M. *et al*, 2010).

El desarrollo metodológico de este modelo es obtener la capacidad del territorio, definiendo técnicas, criterios, factores y variables territoriales significativas que apoyen a llegar al o los objetivos que es la capacidad del territorio.

El concepto de capacidad, se basa en los conocimientos básicos del ordenamiento territorial, que es la aptitud o grado de adaptación del medio a los requerimientos del objeto para el que es evaluado, las restricciones, son los factores incompatibles con el objeto; y el de impacto, los efectos negativos que pueden derivarse de su implantación (Gómez Orea, 1994).

Es necesario definir la estructura metodológica que permita definir secuencialmente los criterios de restricción, aptitud e impacto. Identificar los factores que miden estos criterios y determinar las variables territoriales adecuadas para medir y puntuar factores y criterios, que definen las “reglas de decisión” o “juicios de valor”.

Objetivos de la evaluación: consiste en definir los criterios, factores y variables que se requieren para lograr el objetivo. Para nuestro estudio se busca identificar áreas con **capacidad o aptitud** para: “a. Conservación, b. Agrícola, c. Pecuario, d. Forestal y e. urbano”.

Los criterios; se centra en establecer razones adecuados para efectuar la valoración del territorio y las variables concretas para su medida. Cada criterio debe contener un factor.

Para desarrollar este modelo se determinó los siguientes **factores**: “a. cobertura vegetal y uso del suelo; b. pendientes, c. clases agrológicas; d. distancia a vías; e. distancia a redes eléctricas; f. distancia a red de agua potable; g. distancia a red de alcantarillado”

Las **restricciones** identificadas fueron: “a. parques nacionales; b. bosque protectores; c. espacios naturales protegidos; d. márgenes de protección de cauces de agua; e. zonas de riesgo”.

**Matriz de evaluación de factores:** a cada uno de los factores y por cada aptitud, se aplica una matriz que en las filas se coloca las condiciones de cada factor y en las columnas las capacidades, con valor de 0 a 100.

**Ponderación:** Jerarquizar cada factor e ingresar una ponderación por cada capacidad, mediante el método por comparación por pares de Saaty

**Restricciones:** rasterizar y normalizar cada capa de las restricciones que serán incorporadas al final.

Luego de haber realizado todos los pasos anteriores, es necesario aplicar técnicas que nos permitan determinar la aptitud del territorio. Para ello se realizan dos técnicas: Suma Lineal Ponderada – SLP.

#### **2.6.2.4. La técnica de Sumatoria Lineal Ponderada – SLP,**

Nos permite jerarquizar cada una de las capas de información, definir los pesos En este trabajo se utilizan dichos métodos para valorar, ponderar y agregar los factores, así como para obtener los mapas de aptitud.

La media ponderada ordenada se basa en la suma lineal ponderada pero añade un segundo conjunto de pesos, los pesos de orden, que controlan la forma en la que los factores de ponderación son agregados. Los factores de ponderación indican la importancia relativa de cada factor/criterio en la aptitud para un determinado uso. Los pesos de orden no se aplican a un factor específico, sino que son aplicados a cada píxel en función de la puntuación de cada factor. El peso de orden 1 es asignado al factor que para ese píxel presenta la menor puntuación, el peso 2 al siguiente más bajo y así sucesivamente. Estos pesos controlan el grado de compensación entre criterios y, por lo tanto, el grado de riesgo que se asume en las decisiones. Para una evaluación en la que intervengan 3 factores, ordenados de menor a mayor puntuación, unos pesos de orden (1, 0, 0) impiden la compensación y representan la situación de máxima aversión al riesgo, por el contrario, unos pesos (0, 0, 1) equivalen al operador OR. Si los pesos son iguales (0,33, 0,33, 0,33) el resultado sería el mismo que el de la WLC.

Pero se puede emplear cualquier otra combinación de estos pesos que sume 1, lo que implicará un grado intermedio de compensación entre criterios y aversión al riesgo.

Para la asignación espacial de múltiples usos conflictivos del suelo IDRISI dispone de la herramienta MOLA (*Multi-Objective Land Allocation*), que implementa un procedimiento heurístico en el cual los valores de aptitud para cada objetivo (uso del suelo) se representan en un eje, en el cual se sitúa el punto ideal de cada objetivo

La asignación de la mejor superficie X (ha) para el objetivo 2 se consigue moviendo la línea de decisión desde la parte inferior a la superior hasta capturar las celdas *raster* necesarias para alcanzar esa superficie. El mismo procedimiento es utilizado para la asignación de las celdas correspondientes al objetivo 1. En la zona de conflicto la asignación del objetivo de

cada celda se resuelve trazando la línea que separa los puntos más cercanos a cada objetivo. El grado de inclinación de esta línea dependerá de la ponderación de cada objetivo. Cuando el número de objetivos es superior a dos cada alternativa es asignada a un uso (objetivo) a través de un plano definido en el espacio multivariante de los objetivos. El ángulo que forma el plano viene dado por la ponderación de cada objetivo. Este algoritmo reclasifica iterativamente los mapas de aptitud para realizar una primera asignación, busca las zonas de conflicto y las asigna basándose en la regla de mínima distancia al punto ideal.

### 2.6.2.5. La técnica del Análisis de Punto Ideal - API

El análisis de punto ideal es otra técnica de evaluación multicriterio: compensatoria y aditiva, de fácil implementación en datos raster (Barredo, 1996), que basa su cálculo en la distancia desde cada alternativa (celda) al punto ideal. Las alternativas (celdas raster) más cercanas al punto ideal serán las más aptas para el uso evaluado, mientras que las más distantes serán las más desfavorables. La distancia a cada alternativa al punto ideal se obtiene a través de la ecuación:

$$L_p = \left[ \sum_{j=1}^n w_j |e_{ij} - 1|^p \right]^{1/p}$$

#### Donde:

$L_p$ : Distancia euclidiana entre la alternativa  $i$  (**celda  $i$** ) y el punto ideal de aptitud.

$w_j$ : Peso del factor  $j$ .

$e_{ij}$ : Valor normalizado de la alternativa  $i$  en el factor  $j$ .

1: Valor del punto ideal para factores normalizados entre 0 y 1.

$p$ : Métrica utilizada

A medida de  $p$  aumenta adquiere mayor importancia relativa las desviaciones de los factores individuales. Para los cálculos en el presente estudio se empleó un valor de  $p$  igual a 2 (distancia euclidiana), que supone una compensación parcial entre los factores de evaluación.

Por tanto la ecuación anterior, se escribirá de la siguiente manera:

$$L_2 = \left[ \sum_{j=1}^n w_j |e_{ij} - 1|^2 \right]^{1/2}$$

Ahora bien, para convertir los valores de distancia al punto ideal en el mapa de aptitud final, donde 1 representa la máxima aptitud y 0 la mínima (Santé, 2014) los valores resultantes son normalizados con la siguiente expresión:

$$a_i = \frac{\text{máx } L - L}{\text{máx } L - \text{mín } L}$$

**Donde:**

$a_i$ : Aptitud de la alternativa  $i$  y  $L$  distancia al punto ideal.

### 3. CAPITULO III: RESULTADOS

#### 3.1. Clasificación digital de las imágenes satélites de los años 1991 y 2001

Para la clasificación de las categorías de cobertura vegetal y uso del suelo de cantón Cuenca se identificó nueve categorías de cobertura para las dos imágenes, tratando de ser lo más generalizadas que faciliten su interpretación y su análisis de cambio.

Una vez realizada la clasificación digital por el método supervisado, a través del clasificador de mínima distancia, aplicado el filtro de mayoría, efectuada la reclasificación de las coberturas de páramo, vegetación leñosa, suelo descubierto y retiradas las nubes, se obtiene el mapa de cobertura vegetal y uso del suelo del cantón Cuenca de los años 1991 y 2001, con ocho categorías: (a) agua; (b) pastos y cultivos; (c) páramo; (d) suelo descubierto; (e) vegetación leñosa; (f) vegetación herbácea; (g) vegetación leñosa nativa; (h) suelo urbano.

Las zonas con existencia de nubes fueron excluidas del análisis para evitar errores de omisión comisión, pero la superficie es considerada para ser empatada con el total del cantón. Para la clasificación de las imágenes se realizó una combinación de bandas RGB 453, que facilita la discriminación de las diferentes coberturas vegetales del suelo descubierto y cuerpos de agua. De igual manera hubo problemas de discriminación entre la categoría de paramo, suelo sin vegetación y vegetación herbácea; para discriminar mejor se realizó una revisión manual de estas tres categorías a las cuales se les corrigió en ambas imágenes.

##### 3.1.1. Cobertura vegetal y uso del suelo 1991

De acuerdo al año 1991 la cobertura que mayor dominancia presente es la de páramo con 35,6% del total del territorio cantonal, seguido de vegetación herbácea con un 19,5%, vegetación leñosa nativa con un 11,5% y vegetación leñosa con un 6,5%, la categoría de pastos y cultivos presenta un 6,2% y el suelo urbano con un porcentaje del 0,4%; pudiendo concluir que existe una intervención relativamente baja dentro del cantón. Ver mapa No. 3.



Tabla 7: Categorías de cobertura y uso del suelo al año 1991

CODIGO	Cobertura vegetal y uso	Hectáreas	Porcentaje
0	Nubes	69.214,3	18,9%
1	Agua	2.046,2	0,6%
2	Pastos y cultivos	22.796,1	6,2%
3	Paramo	130.461,3	35,6%
4	Suelo descubierto	3.300,3	0,9%
5	Vegetación leñosa	23.780,0	6,5%
6	Vegetación herbácea	71.489,3	19,5%
7	Vegetación leñosa nativa	42.143,1	11,5%
8	Suelo urbano	1.531,3	0,4%
<b>Total</b>		<b>366.761,9</b>	<b>100%</b>

Fuente y Elaboración: Propia, 2015

### 3.1.2. Cobertura vegetal y uso del suelo 2001

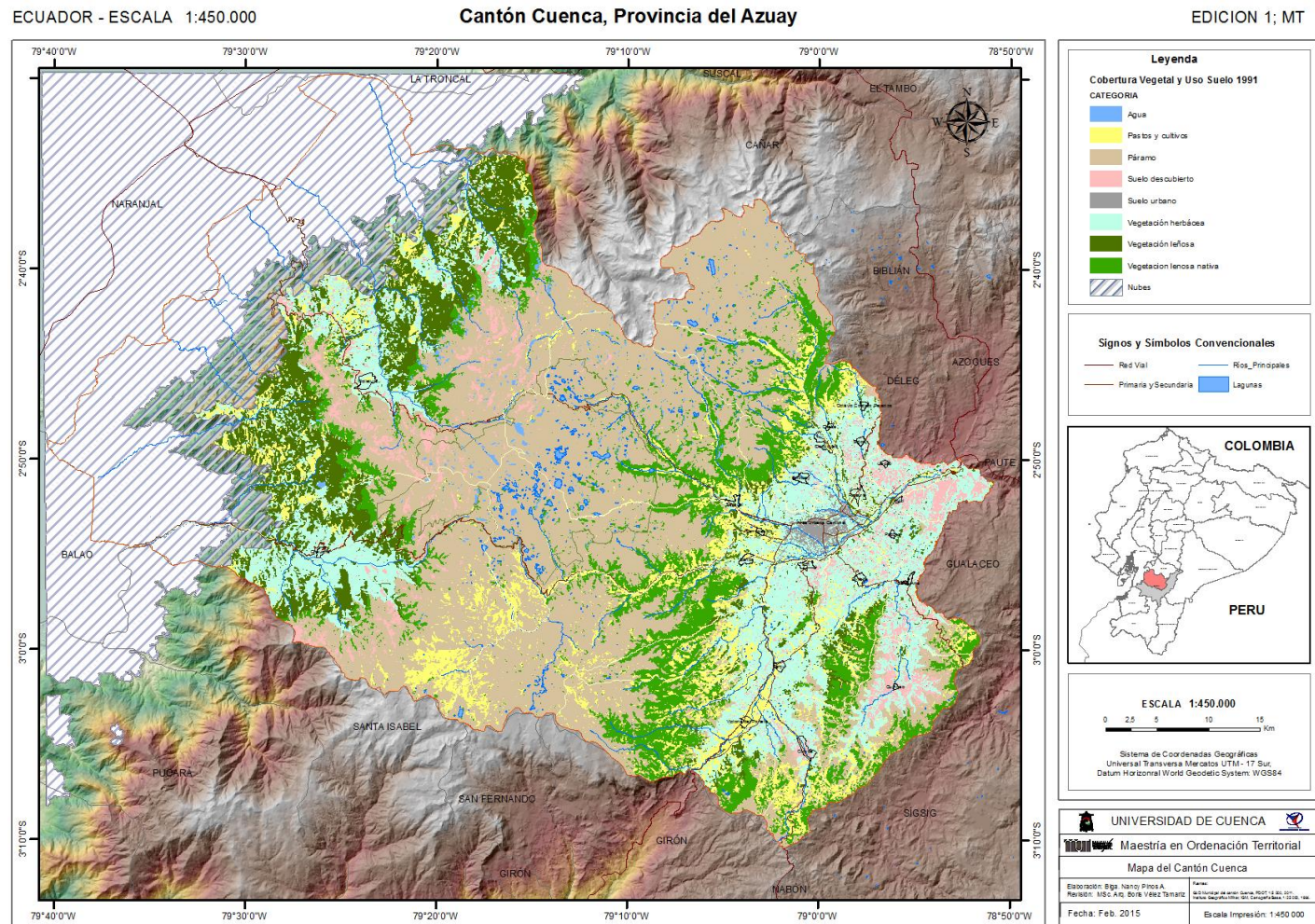
La cobertura vegetal del año 2001 presenta un 32,8% de páramo, seguido de pastos y cultivos con el 19,3%; vegetación herbácea con un 13,2%; vegetación leñosa nativa con un 8,3% y vegetación leñosa con el 5,3%, el suelo urbano tiene un porcentaje del 0,6%. Ver mapa No. 4.

Tabla 8: Categorías de cobertura y uso del suelo al año 2001

CODIGO	Cobertura vegetal y uso	Hectáreas	Porcentaje
0	Nubes	69.214,7	18,9%
1	Agua	2.087,1	0,6%
2	Pastos y cultivos	70.639,8	19,3%
3	Paramo	120.383,2	32,8%
4	Suelo descubierto	3.756,7	1,0%
5	Vegetación leñosa	19.601,7	5,3%
6	Vegetación herbácea	48.389,8	13,2%
7	Vegetación leñosa nativa	30.432,7	8,3%
8	Suelo urbano	2.256,2	0,6%
<b>Total</b>		<b>366.761,9</b>	<b>100%</b>

Fuente y Elaboración: Propia, 2015

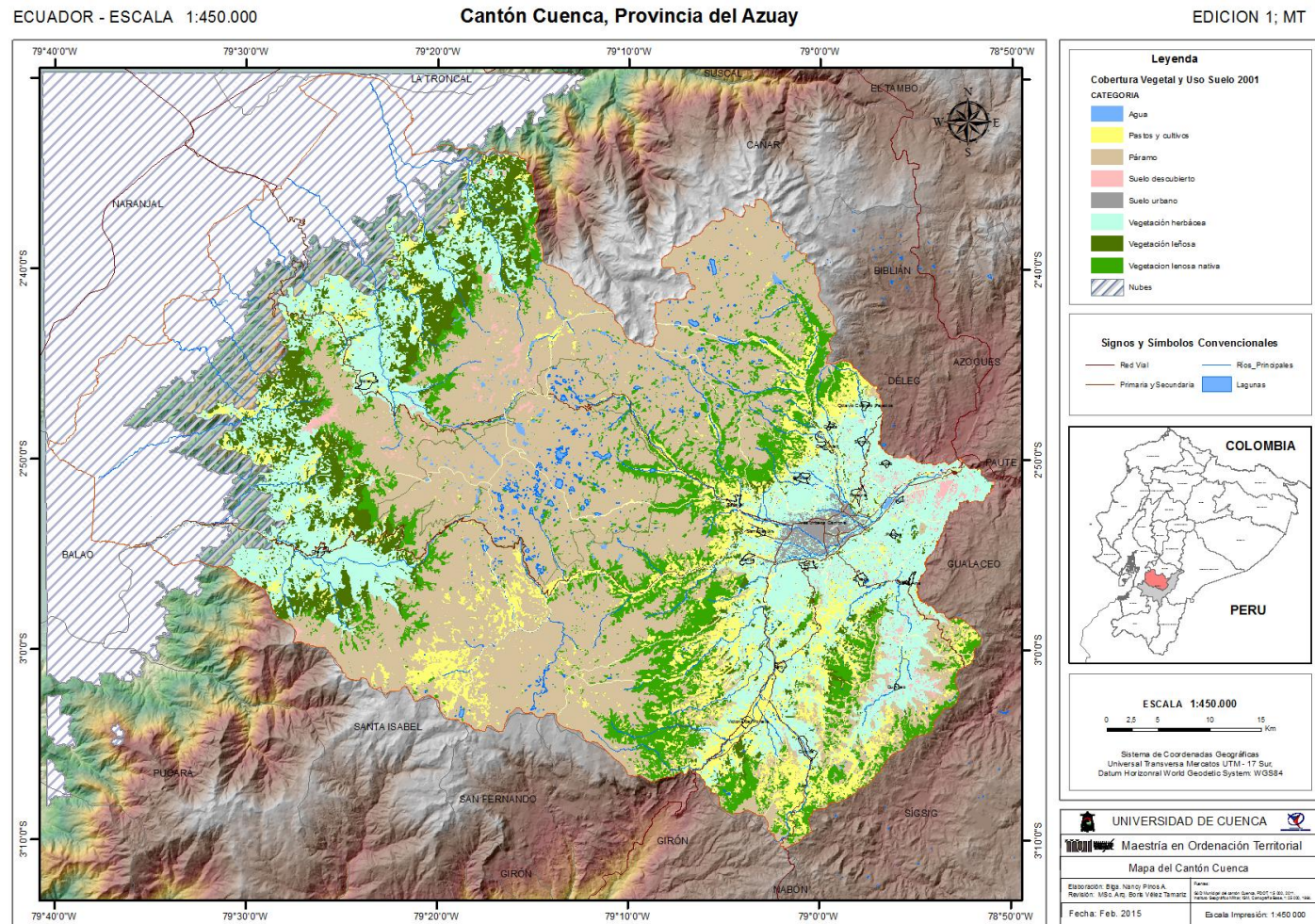
Mapa 3: Mapa de la cobertura y uso del suelo al año 1991



Fuente y Elaboración: Propia, 2015



Mapa 4: Mapa de la cobertura y uso del suelo al año 2001



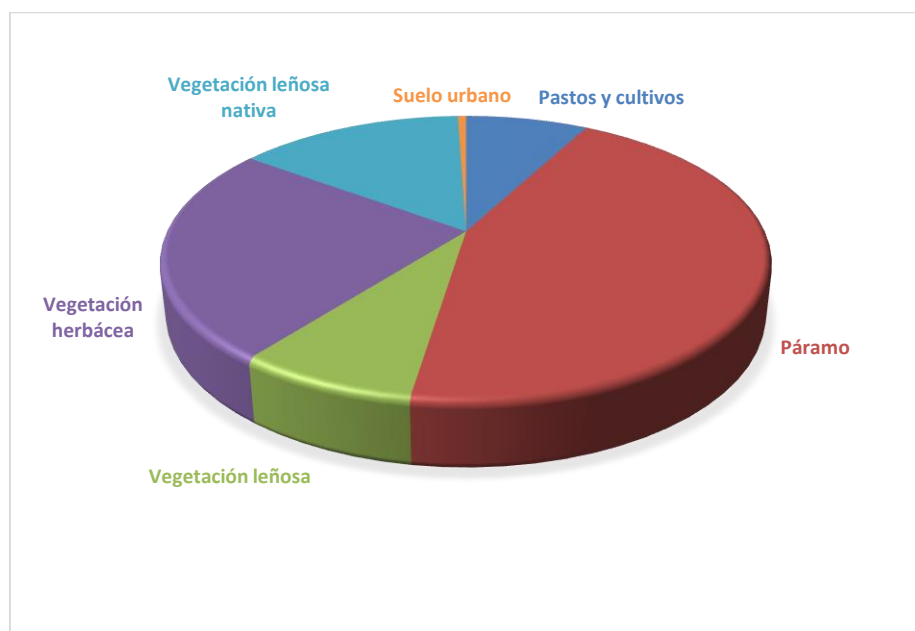
Fuente y Elaboración: Propia, 2015

### 3.2. Análisis de cambio de cobertura y uso del suelo

Una vez clasificadas las imágenes satélites y obtenido el mapa de cobertura vegetal y uso del suelo de los años 1991 y 2001, con la ayuda de módulo *Land Change Modeler – LCM*, de IDRISI SELVA, se realizó el procedimiento de intersección de modo que las categorías de cada fecha se juntaran y se determina el cambio de cobertura.

Como muestra la ilustración siguiente, el 35,6% de territorio del cantón Cuenca corresponde al ecosistema páramo, áreas dedicadas a la conservación; la vegetación herbácea presenta un 19,5% y pertenece a vegetación pionera en la franja montañosa ubicada alrededor de la ciudad; la vegetación leñosa nativa con el 11,5% incluye los bosque altoandinos, que a diferencia de la vegetación leñosa que corresponde a arbustos, matorrales o chaparro que se ubica en las estribaciones de la cordillera occidental; el área de pastos y cultivos que incluyen parcelas de cultivos de ciclo corto y anuales, también se encuentran en esta categoría zonas de pasto; el área urbana con un 0,4% del total cantonal, hay que recalcar que la cobertura de nubes presenta un 18,9%.

Ilustración 15: Ocupación de los usos del suelo para el año 1991, en porcentajes.

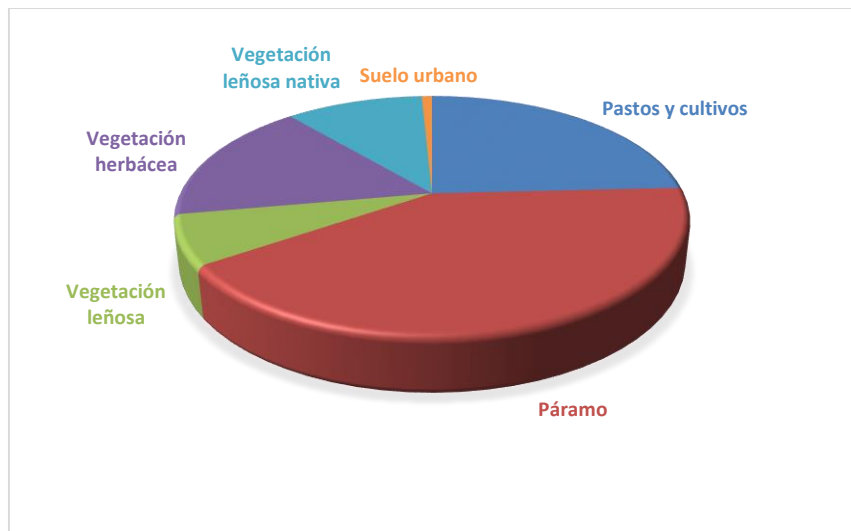


Fuente y Elaboración: Propia, 2015

Para el año 2001 la superficie de paramo se ha reducido a un 32,8%, la misma tendencia presenta la vegetación leñosa nativa con 8,3%, vegetación leñosa con el 5,3%,

La categoría de pastos y cultivos presenta un incremento al 19,3% al igual que el suelo urbano al 0,3%

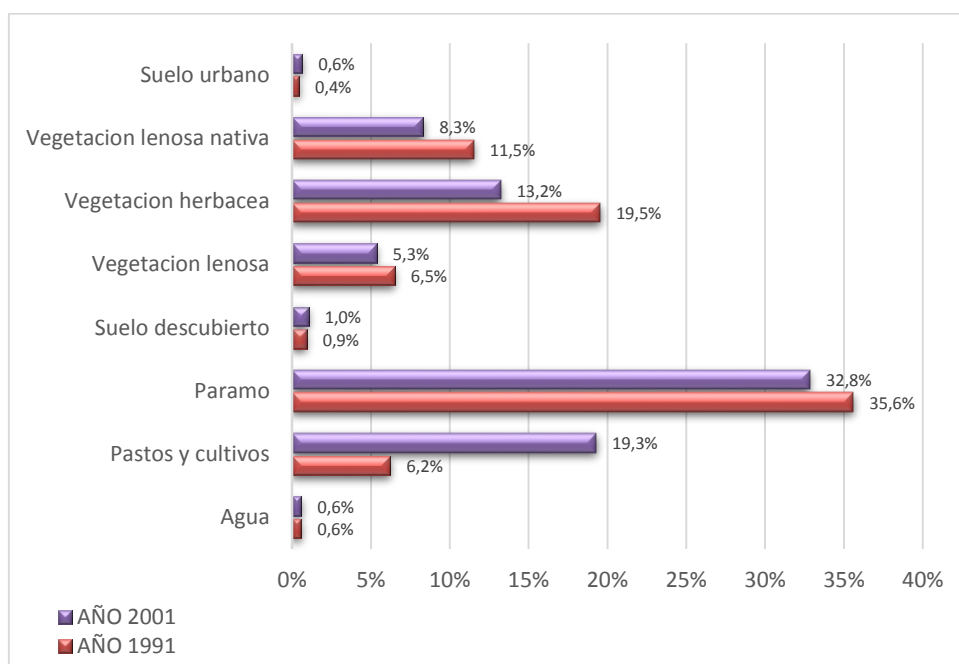
Ilustración 16: Ocupación de los usos del suelo para el año 2001, en porcentajes.



Fuente y Elaboración: Propia, 2015

Para observar de mejor manera los diferentes procesos anotados anteriormente se presenta en la siguiente ilustración, en la que se detalla la evolución que ha experimentado el cantón Cuenca en el periodo de estudio.

Ilustración 17: Evolución de los diferentes uso del suelo en porcentaje entre 1991 y 2001.



Fuente y Elaboración: Propia, 2015

Se puede observar el crecimiento de la categoría de pastos y cultivos casi se ha triplicado en 10 años de diferencia; presentando unas 47 mil hectáreas de cambio de uso; el decrecimiento de las categorías correspondientes a coberturas naturales como vegetación leñosa y herbácea con un total de 49 mil hectáreas que evidencian el proceso de transición a otras coberturas; y un crecimiento de la área urbana con una 724 hectáreas.

### 3.3. Tasa Anual de Cambio (TAC) para el cantón Cuenca

La estimación de la tasa anual de cambio se calculó a partir de la superficie de cada categoría, aplicando la fórmula descrita anteriormente; expresa la mayor o menor intensidad de las dinámicas de cambio en las coberturas de suelo en el cantón entre el periodo de los años 1991 y 2001, se observa que la categoría de vegetación herbácea es la más alta con un valor negativo de -3,8%, seguida de vegetación leñosa nativa con -3,2%, vegetación leñosa con -1,9%.

Tabla 9: Tasa de cambio por cobertura en el cantón Cuenca entre 1991 y 2001

n=10 años		S <sub>1</sub> (Año 1991)		S <sub>2</sub> (Año 2001)		S (%)
Código	Cobertura	Superficie en hectáreas	Porcentaje	Superficie en hectáreas	Porcentaje	Tasa Anual de Cambio
1	Agua	2.046,2	0,6%	2.087,1	0,6%	0,2%
2	Pastos y cultivos	22.796,1	6,2%	70.639,8	19,3%	12,0%
3	Paramo	130.461,3	35,6%	120.383,2	32,8%	-0,8%
4	Suelo descubierto	3.300,3	0,9%	3.756,7	1,0%	1,3%
5	Vegetación leñosa	23.780,0	6,5%	19.601,7	5,3%	-1,9%
6	Vegetación herbácea	71.489,3	19,5%	48.389,8	13,2%	-3,8%
7	Vegetación leñosa nativa	42.143,1	11,5%	30.432,7	8,3%	-3,2%
8	Suelo urbano	1.531,3	0,4%	2.256,2	0,6%	4,0%
<b>Total</b>		<b>366.761,9</b>	<b>100%</b>	<b>366.761,9</b>	<b>100%</b>	

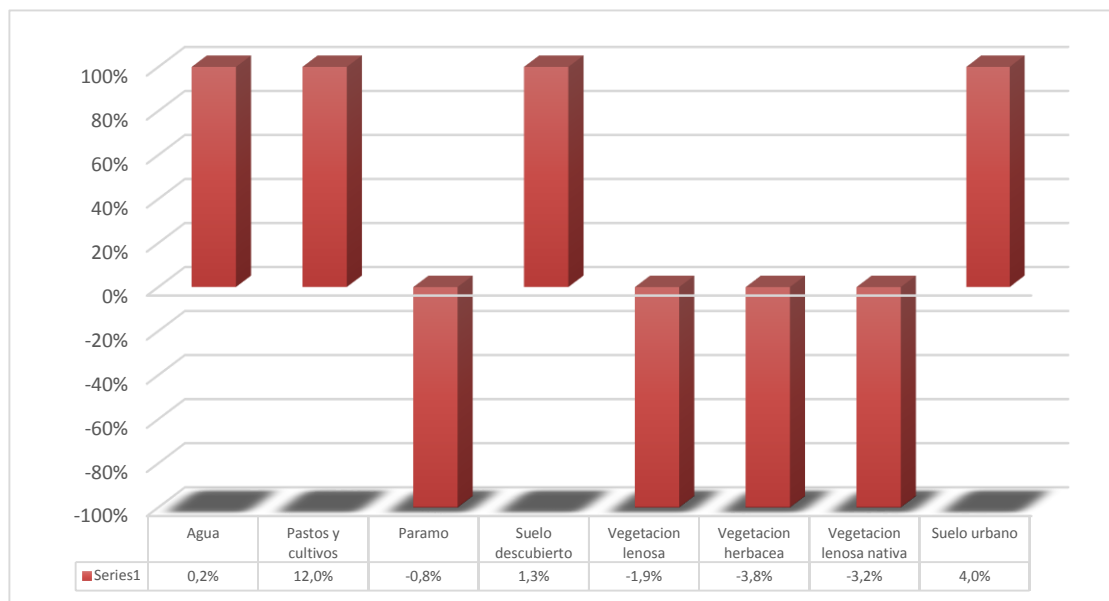
Fuente y Elaboración: Propia, 2015

La tabla anterior muestra que el total de cobertura natural (páramo, vegetación leñosa y herbácea), presenta una pérdida de 49.066,3 hectáreas, que corresponden a -2% hectáreas por año; en el año 1991 tenían un total de 267.873,7 hectáreas, para el año 2001 se reducen a 218.807,4 hectáreas, lo que nos indica que la mayoría de cambios se dio en estas coberturas.

La categoría de pasto y cultivos es la mayor crecimiento presenta, en 1991 con 22.796,1 ha y para el año 2001 se incrementa a 70.639,8 ha, dando una tasa de cambio del 12% anual, es decir que la transición se dio a esta cobertura.

Las categorías de cobertura de suelo no vegetal, es decir, agua, suelo descubierto y suelo urbano, presentaban para 1991 un total de 6.877,8 ha y en el 2001 presenta 8.100 ha, con una tasa de cambio del 1,6% anual.

Ilustración 18: Tasa de cambio por año de la cobertura y uso del suelo en el cantón Cuenca



Fuente y Elaboración: Propia, 2015

### 3.4. Dinámica del proceso de cambio de la cobertura y uso del suelo

La matriz de tabulación cruzada que se muestra en la siguiente tabla, permite observar las categorías de uso del suelo que han manifestado cambio y hacia que categorías han transicionado, así como la persistencia que han experimentado, tanto en hectáreas como en porcentajes con respecto al total.

A pesar de que se ha realizado una corrección previa en las categorías analizadas, puede detectarse en la matriz algunos cambios incongruentes, como el agua que pasa a ser otras categorías. Los mayores cambios se pueden observar en las categorías de paramo y vegetación herbácea que sufren un cambio a pastos y cultivos y suelo urbano.



Tabla 10: Matriz de tabulación cruzada entre los años 1991 y 2001 en hectáreas y porcentaje

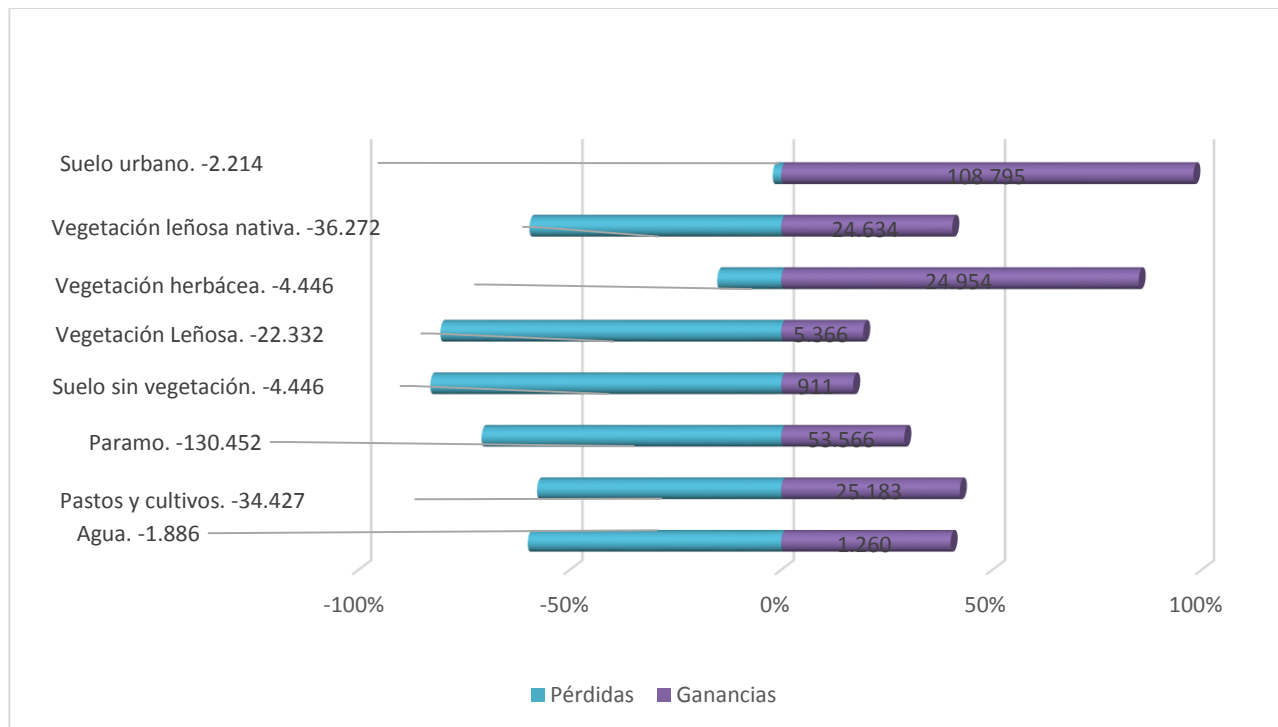
		AÑO 2001								
Categorías de cobertura vegetal y uso del suelo		Agua	Pastos y cultivos	Páramo	Suelo sin vegetación	Vegetación Leñosa	Vegetación herbácea	Vegetación leñosa nativa	Suelo urbano	Total
AÑO 1991	Agua	9 0,0%	257 0,1%	943 0,3%	8 0,0%	52 0,0%	280 0,1%	256 0,1%	89 0,0%	1.895,3
	Pastos y cultivos	135 0,0%	2.622 0,9%	11.472 3,9%	97 0,0%	631 0,2%	3.404 1,1%	3.114 1,0%	13.088 4,4%	34.562,5
	Paramo	591 0,2%	13.665 4,6%	39.354 13,3%	423 0,1%	2.756 0,9%	14.864 5,0%	13.598 4,6%	45.792 15,4%	131.043,3
	Suelo sin vegetación	17 0,0%	392 0,1%	1.437 0,5%	10 0,0%	79 0,0%	426 0,1%	390 0,1%	1.711 0,6%	4.462,7
	Vegetación Leñosa	82 0,0%	1.894 0,6%	6.942 2,3%	59 0,0%	324 0,1%	2.060 0,7%	1.885 0,6%	9.169 3,1%	22.413,6
	Vegetación herbácea	232 0,1%	5.368 1,8%	19.679 6,6%	166 0,1%	1.083 0,4%	4.891 1,6%	5.342 1,8%	26.939 9,1%	63.698,9
	Vegetación leñosa nativa	154 0,1%	3.558 1,2%	13.045 4,4%	110 0,0%	718 0,2%	3.871 1,3%	2.963 1,0%	12.008 4,0%	36.425,8
	Suelo urbano	49 0,0%	49 0,0%	49 0,0%	49 0,0%	49 0,0%	49 0,0%	49 0,0%	1.923 0,6%	2.262,2
Total		1.269,3	27.804,8	92.920,4	921,1	5.690,0	29.844,6	27.596,8	110.717,6	296.764,5

**Fuente y Elaboración:** Propia, 2015

En la siguiente ilustración se analizan las pérdidas y ganancias entre el periodo 1991 y 2001, imagen extraída del proceso de Land Change Modeler –LCM, los mayores cambios se han dado en el suelo sin vegetación, vegetación leñosa, páramo y pastos y cultivos.

Las mayores pérdidas se dan en suelo sin vegetación y vegetación leñosa y nativa, páramo, mientras que las mayores ganancias se pueden observar en el suelo urbano y vegetación herbácea

Ilustración 19: Ganancias y pérdidas registradas para cada uno de los usos del suelo en el cantón Cuenca.



Fuente y Elaboración: Propia, 2015

Las categorías de cobertura natural son las que mayores transformaciones presentan hacia otros usos. En el siguiente mapa se presenta las categorías que tienen pérdida en su superficie durante este periodo de tiempo, sin embargo, la persistencia que presentan es mucho más alta.

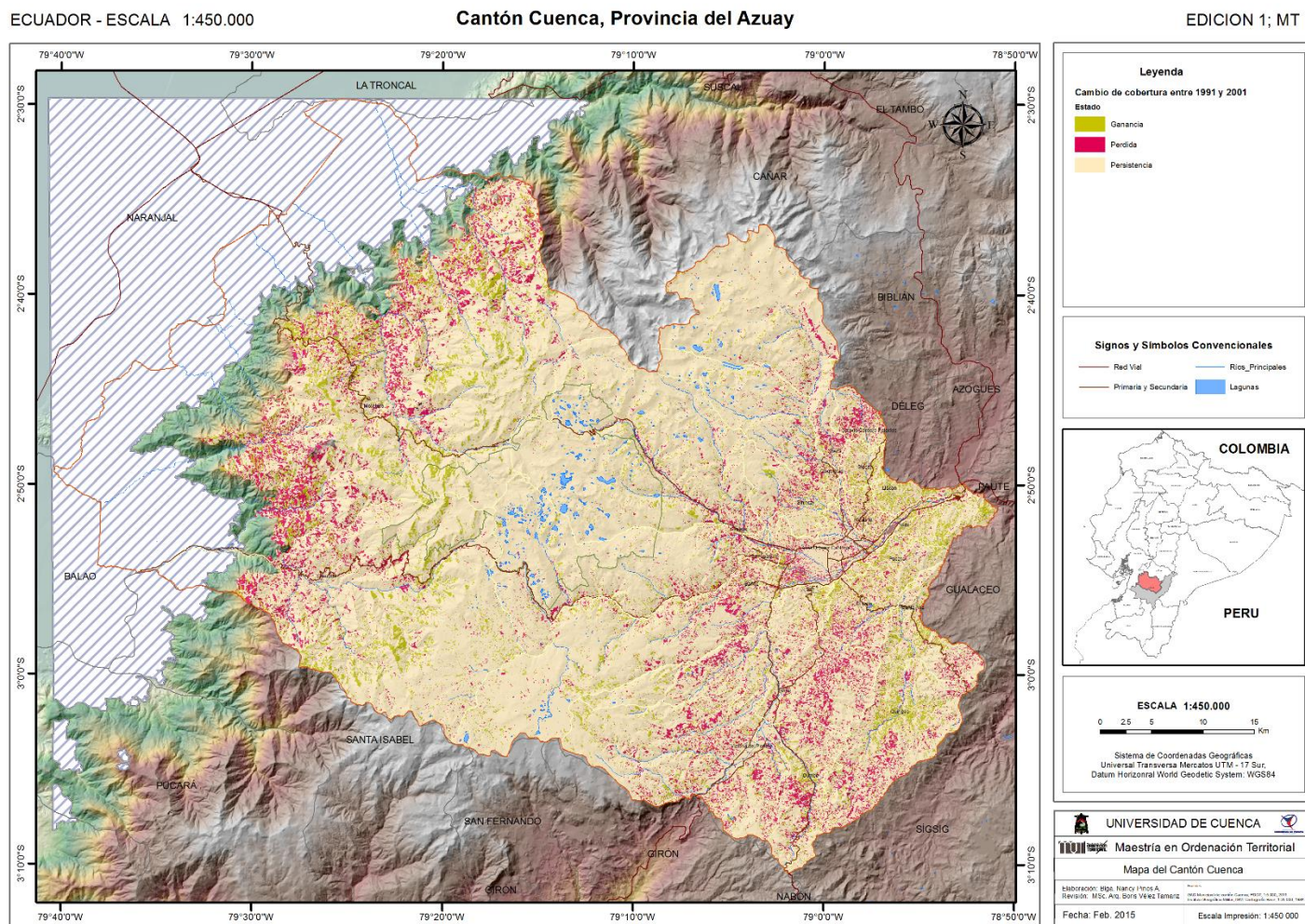
En la siguiente tabla se indica el porcentaje de persistencia, pérdidas y ganancias del uso del suelo, el 18,9% faltante corresponde a la superficie cubierta por nubes.

Tabla 11: Superficie del cantón Cuenca que ha sufrido cambios en el uso del suelo

Estado de cambio	Superficie (ha)	Porcentaje
Persistencia	245.463	66,9%
Ganancia	25.765	7,0%
Pérdida	26.319	7,2%
	366.761,9	81,1%

Fuente y Elaboración: Propia, 2015

Mapa 5: Mapa de Ganancias, Pérdidas y Persistencia de las categorías de uso del suelo en el cantón Cuenca.



Fuente y Elaboración: Propia, 2015

Una de las ventajas del módulo Land Change Modeler –LCM, es que se puede espacializar los resultados de cambio de cobertura del suelo

Tabla 12: Transición de categorías entre 1991 a 2001 en el cantón Cuenca

Transición de categorías entre 1991 al 2001	Superficie (ha)	Porcentaje
Agua a Bosque natural	598,21	1,15%
Bosque natural a Pastos y cultivos	1.075,21	2,06%
Bosque natural a Paramo	4.887,53	9,38%
Paramo a Bosque natural	4.452,08	8,55%
Paramo a Pastos y cultivos	3.010,16	5,78%
Pastos y cultivos a Bosque natural	724,51	1,39%
Pastos y cultivos a Paramo	2.353,34	4,52%
Pastos y cultivos a Vegetación leñosa	808,88	1,55%
Pastos y cultivos a vegetación herbácea	3.420,44	6,57%
Suelo sin vegetación a Paramo	4.289,12	8,23%
Suelo sin vegetación a Vegetación herbácea	7.249,41	13,92%
Vegetación herbácea a Pastos y cultivos	5.868,32	11,27%
Vegetación herbácea a Suelo sin vegetación	621,10	1,19%
Vegetación herbácea a Suelo urbano	589,01	1,13%
Vegetación herbácea a Vegetación leñosa	1.869,23	3,59%
Vegetación leñosa a Pastos y cultivos	1.106,07	2,12%
Vegetación leñosa a Vegetación herbácea	9.161,78	17,59%
<b>Total</b>	<b>52.084,42</b>	<b>100,00%</b>

Fuente y Elaboración: Propia, 2015

En la tabla anterior podemos observar que la transición mas alta es la de vegetación leñosa a vegetación herbácea, y de vegetación herbácea a pastos y cultivos; esto nos lleva a una conclusión de cambio de uso del suelo a actividades productivas.

Las transiciones de agua a bosque o de pastos y cultivos a páramo corresponde a errores en la interpretación de los mapas de cobertura en el tiempo inicial, pues este tipo de recuperaciones nunca se dan en un tiempo tan corto como el que estamos analizando. Estos errores se dan a pesar de las correcciones que se realizaron al inicio del proceso del análisis multitemporal.





### 3.5. Simulación de escenarios de uso del suelo a futuro en el cantón Cuenca.

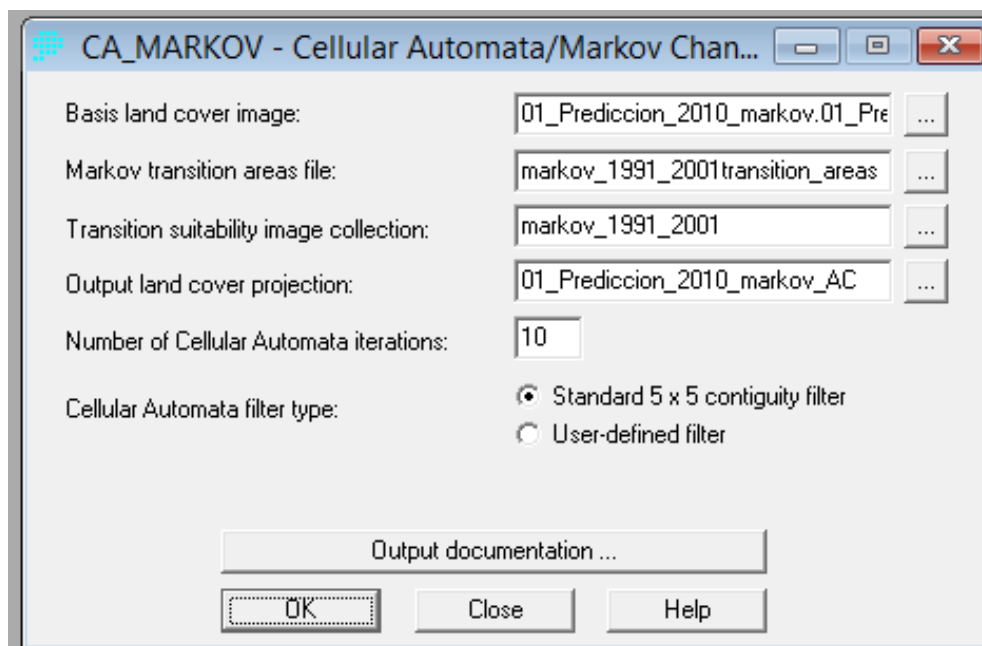
Para la construcción de los modelos espaciales de simulación de usos del suelo, se partió de los mapas de cobertura vegetal y uso del suelo de las dos fechas analizadas -1991 y 2001. Los usos del suelo juegan un relevante papel en la localización de los usos del suelo a futuro; esto se debe a que la probabilidad de que un cambio de uso del suelo ocurra en una determinada localización depende de la existencia previa de ese uso del suelo. (Gallardo, 2013).

Para este proceso se utilizó los modelos de simulación de Cadenas de Markov, Automatas celulares de Markov, evaluaciones multicriterio y objetivo; la meta fue construir un mapa de tendencia al año 2010 y 2030.

#### 3.5.1. Modelo de simulación al año 2010

A partir de las imágenes de 1991 y 2001 se realizó la predicción para el año 2010, la misma que comparada con la capa de cobertura vegetal y uso del suelo del año 2010 que se tiene interpretada en base a una imagen Rapid Eye, la misma que fue reclasificada en base a las categorías ya identificadas anteriormente y convertida a formato raster con el mismo tamaño de pixel de las imágenes Landsat para poder ser comparadas.

Ilustración 20: Proceso de construcción del modelo de predicción al 2010 en el software IDRISI



Fuente y Elaboración: Propia, 2015

En base a la información se obtiene la siguiente tabla de probabilidad de cada categoría al año 2010.

Tabla 13: Matriz de probabilidad de cambio 1991 al 2010

Matriz de Proceso de cambio		2001							
		Agua	Pastos y cultivos	Paramo	Suelo sin vegetación	Vegetación Leñosa	Vegetación herbácea	Vegetación leñosa nativa	Suelo urbano
1991	Agua	0,6482	0,0000	0,1226	0,0018	0,0285	0,0151	0,1838	0,0000
	Pastos y cultivos	0,0006	0,7596	0,0780	0,0018	0,0263	0,1077	0,0248	0,0011
	Paramo	0,0029	0,0229	0,9378	0,0015	0,0000	0,0000	0,0349	0,0000
	Suelo sin vegetación	0,0005	0,0132	0,2729	0,2302	0,0024	0,4779	0,0000	0,0029
	Vegetación Leñosa	0,0023	0,0337	0,0000	0,0047	0,6682	0,2910	0,0000	0,0001
	Vegetación herbácea	0,0009	0,1071	0,0000	0,0133	0,0357	0,8320	0,0000	0,0111
	Vegetación leñosa nativa	0,0022	0,0294	0,1308	0,0013	0,0000	0,0000	0,8364	0,0000
	Suelo urbano	0,0000	0,0030	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

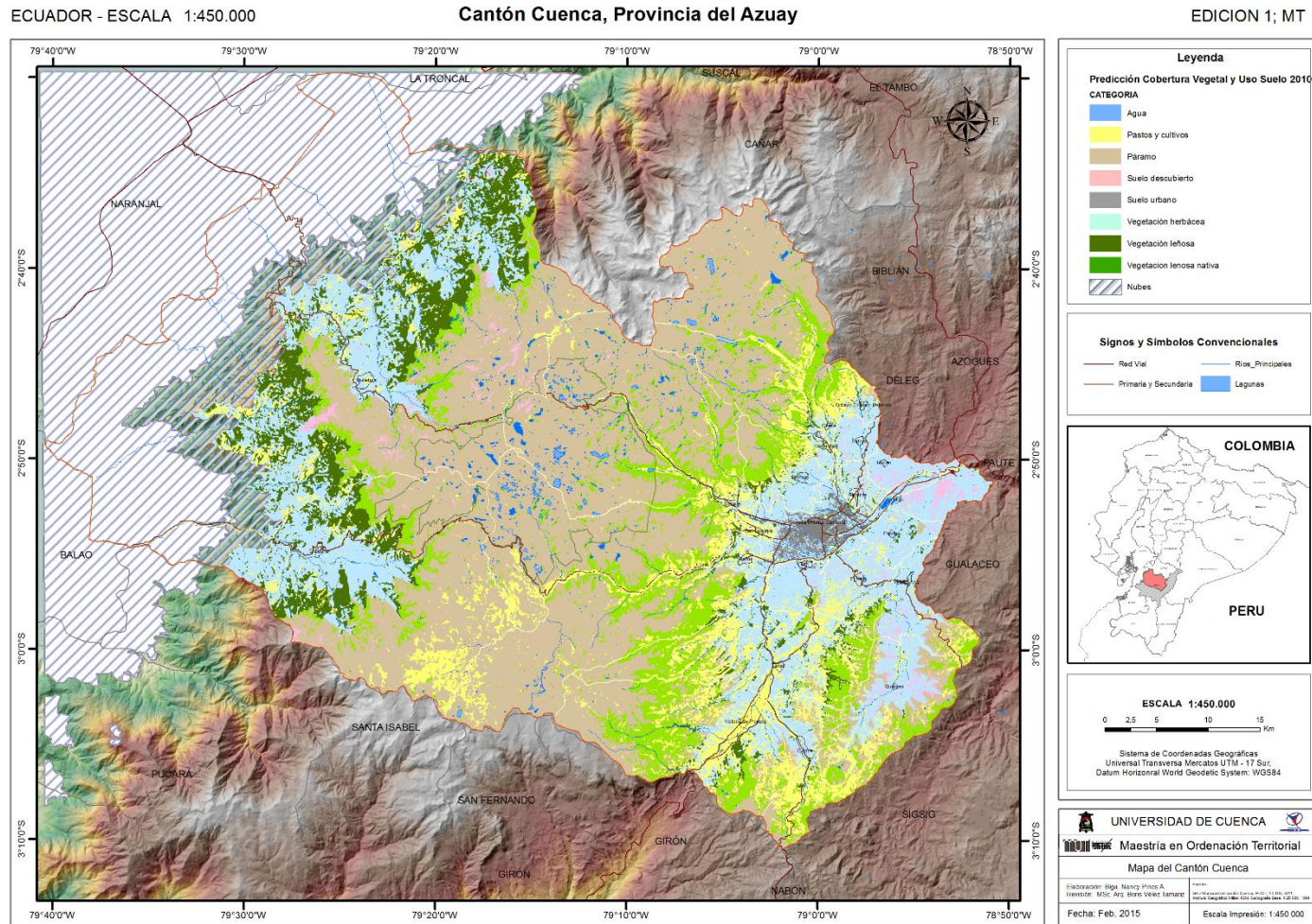
Fuente y Elaboración: Propia, 2015

De acuerdo a la dinámica de cambio analizada anteriormente, la probabilidad de transición al año 2010 son espacializados con el modelo de Autómatas celulares de Markov

El mapa de probabilidad permite determinar las zonas del territorio que son susceptibles a transformarse a otra categoría, en un tiempo relativamente cercano, analizando en base al historial entre el año 1991 y 2001 que determinan la tendencia de cambio.



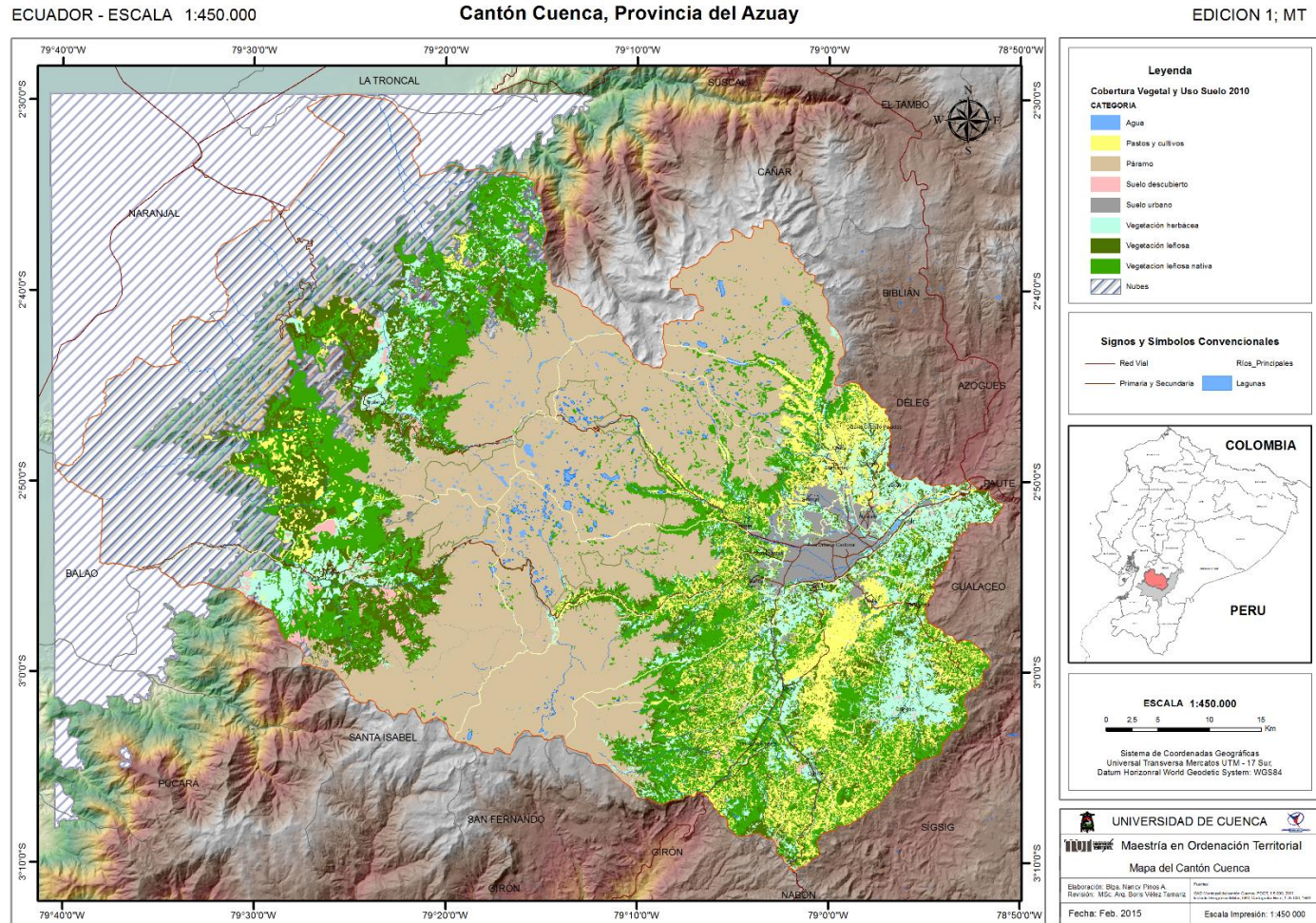
Mapa 7: Predicción de uso del suelo de cantón Cuenca al año 2010



Fuente y Elaboración: Propia, 2015



Mapa 8: Mapa de la cobertura vegetal y uso del suelo del cantón Cuenca al 2010 - Imagen Rapid Eye.



Fuente GADM Cantón Cuenca, Imágenes Rapid Eye, 2010  
Elaboración: Propia, 2015

Podemos observar que la tendencia sigue siendo la misma, la categoría de vegetación herbácea con probabilidad de cambiar a pastos y cultivos y suelo urbano, al igual que la vegetación leñosa y el páramo.

### 3.5.2. Modelo de simulación al año 2030

Para la construcción del mapa al 2030, se realizó el modelo de igual manera con las cadenas de Markov y los autómatas celulares de Markov, este modelado se decidió hacer como un modelo óptimo, es decir, se incluyen variables que influyen en la probabilidad de cambio.

Para ello se identificó variables independientes que podrían influir en el proceso de transición para un periodo de 29 años.

Previo a la proyección al año 2030, se identificaron variables que influirían en el modelo de predicción de cambio del uso del suelo. Determinando previamente la capacidad de uso del suelo para las actividades de conservación, actividades productivas como agrícolas, pecuarios y forestales y el urbano. Para el análisis de las variables se optó por determinar la capacidad de acogida del territorio para lo cual es necesario obtener el mapa de aptitud. En este proceso se utilizó el método del análisis multicriterio y multiobjetivo, mediante las técnicas de la Sumatoria Lineal Ponderada - SPL y Análisis al Punto Ideal – API. Para ello es necesario determinar las variables de influencia, las mismas que deberán ser valoradas y normalizadas para aplicar las técnicas antes mencionadas.

### 3.5.3. Variables de análisis (influencia de variables)

Esta fase consiste en la obtención y análisis de información que pudiera servir de apoyo para la elaboración de los escenarios y establecer las posibles causas que influyen en el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo. Se refiere a información física, social y biótica que debe ser mapeada para su posterior análisis.

La información secundaria utilizada para el presente trabajo se enlista a continuación:

- Mapa de pendientes
- Mapa de Aptitud agrológica
- Mapa del Patrimonio Natural – PANE
- Mapa de Áreas Protegidas
- Mapa de Áreas de Protección Municipal
- Mapa de márgenes de protección de cauces de ríos, quebradas y cuerpos de agua

- Mapa de Riesgos
- Red vial
- Red de Agua Potable
- Red de Alcantarillado
- Red de Energía Eléctrica.

### **3.5.4. Técnicas de evaluación Multi Criterio para la aptitud de uso del suelo**

El objetivo es construir escenarios de aptitud para uso y cobertura del suelo a partir de técnicas de Evaluación Multi Criterio - EMC, lo que nos permite identificar la aptitud del suelo para diferentes usos, para deducir la capacidad de acogida como elemento de planificación territorial, determinando la aptitud del suelo para actividades o uso de conservación, agrícola, pecuaria, forestal y urbano.

En base a los objetivos planteados, nos encontramos en el caso de evaluación multobjetivo, con objetivos conflictivos por cuanto compiten la ubicación de la capacidad de acogida entre agrícola, pecuario y forestal, mientras que son opuestos el uso de conservación y urbano.

Para el análisis de este modelo se partió de la cartografía de cobertura y uso del suelo de año 2010,

#### **3.5.4.1. Criterios: factores para aptitud del suelo, a ser empleados en el cantón Cuenca**

Para el territorio cantonal se han establecido cinco niveles de uso (Gómez 2013): conservación, agrícola, pecuario, forestal y urbano. En cada nivel de uso se determinan factores que mejor condición presentan para una determinada actividad.

En la siguiente tabla se expone los criterios y los factores que se identifican para las diferentes aptitudes de uso en conservación, agrícola, pecuario y forestal.

Tabla 14: Criterios y factores para determinar la capacidad de uso en conservación, agrícola, pecuario y forestal.

Criterio	Factores			
	Conservación	Agrícola	Pecuario	Forestal
Cobertura vegetal y uso del suelo	Zonas ambientalmente sensibles	Zonas de uso agrícola	Zonas de uso pecuario	Zonas de uso forestal
Topografía del terreno (Pendiente porcentaje)	Susceptibilidad a la erosión	Condiciones favorables para actividades agrícolas	Condiciones favorables para actividades pecuarias	Condiciones favorables para actividades forestales
Clases agrológicas	Aptitud de conservación	Aptitud para actividades agrícolas	Aptitud para actividades pecuarias	Aptitud para actividades forestales
Altitud	Preservación de ecosistemas			

**Fuente y Elaboración:** Propia, 2015

Cada criterio está influenciado por un factor que permitirá determinar la capacidad o aptitud para los usos anteriormente enunciados.

Tabla 15: Criterios y factores para uso determinar la capacidad de uso urbano

Criterio	Factor
Cobertura vegetal y uso del suelo	Zonas adecuadas para uso urbano
Topografía del terreno (Pendiente porcentaje)	Aptitud de asentamientos humanos en pendientes inferiores al 30%
Proximidad a carreteras	Accesibilidad
Proximidad a asentamientos humanos	Expansión urbana
Proximidad a servicio de agua potable	Dotación de servicio de agua potable
Proximidad a servicio de alcantarillado	Eliminación de aguas residuales

**Fuente y Elaboración:** Propia, 2015

A continuación se indica las condiciones óptimas de los factores: uso suelo, pendiente en porcentaje, clases agrológicas, altitud, distancia a carreteras por cada nivel de uso del suelo (Conservación, agrícola, pecuario, forestal y urbano).

Para el uso de suelo se partió de la cartografía de cobertura vegetal y uso del suelo del año 2010, ya que tiene una escala muy amplia 1:25000. Es así que se tiene 14 categorías de cobertura, solo para el análisis de capacidad de acogida.

Tabla 16: Matriz de criterio de capacidad de acogida según uso de suelo.

Clase	Cobertura	Conservación	Agrícola	Pecuario	Forestal	Urbano
1	Arbustos					
2	Área Cultivada					
4	Área urbana continua					
5	Área urbana discontinua					
6	Bosque Natural					
8	Cuerpos de agua					
9	Humedales					
11	Páramo de pajonal					
12	Páramo sobre roca desnuda					
13	Pastizal					
3	Área Quemada					
15	Suelo Degradado					
7	Caminos					
14	Sombra					
10	Nubes					

Fuente y Elaboración: Propia, 2015

La misma matriz se aplica para el criterio de pendiente en porcentaje.

Tabla 17: Matriz de criterio de capacidad de acogida según la topografía del terreno (Pendiente porcentaje)

Clase	Pendiente (%)	Conservación	Agrícola	Pecuario	Forestal	Urbano
1	0 - 5					
2	5 - 15					
3	15 - 30					
4	30 - 50					
5	50 - 70					
6	> 70					

Fuente y Elaboración: Propia, 2015

Ahora según el criterio de clases agrológicas las mismas que contienen ocho categorías que se describen previamente.

- **CLASE I:** en esta clase se encuentran los suelos apropiados para un uso agrícola intensivo o con capacidad de uso muy elevada. Los suelos de esta clase no tienen limitaciones que restrinjan su uso. Son apropiados para cultivar sin métodos especiales. Son suelos llanos con pendientes de 0 a 2% y sin problemas de erosión o muy pequeños. Son suelos profundos, generalmente bien drenados y fáciles de



trabajar. Tienen una buena capacidad de retención de agua, están provistos de nutrientes y responden a la fertilización. Estos suelos poseen un clima favorable para el crecimiento de muchos cultivos comunes.

- **CLASE II:** En esta clase se encuentran los suelos apropiados para un uso agrícola intensivo o con capacidad de uso elevada. Los suelos de esta clase tienen algunas limitaciones que reducen los cultivos posibles de implantar o requieren algunas prácticas de conservación. Son suelos buenos, que pueden cultivarse mediante labores adecuadas, de fácil aplicación, pendientes de (2 - 5%), profundidad efectiva del suelo de 0.50 – 1.0 m de profundidad, pocas piedras y rocas sobre la superficie. Los suelos pueden ser usados para cultivos agrícolas, forestales o pastos.
- **CLASE III:** En esta clase se incluyen los suelos susceptibles de utilización agrícola moderadamente intensiva. Los suelos de esta clase tienen importantes limitaciones en su cultivo. Son medianamente buenos. Pueden utilizarse de manera regular, siempre que se les aplique una rotación de cultivos adecuada o un tratamiento pertinente. Se encuentran situados sobre pendientes (5 – 12%) moderadas, pueden presentar cierta cantidad de piedras. Su fertilidad es más baja. Las limitaciones que poseen restringen con frecuencia las posibilidades de elección de los cultivos o el calendario de laboreo y siembra. Requieren sistemas de cultivo que proporcionen una adecuada protección para defender al suelo de la erosión.
- **CLASE IV:** En esta clase se encuentran los suelos que tienen posibilidades de utilización para uso agrícola restringido. Son suelos apropiados para cultivos ocasionales o muy limitados con métodos intensivos. Estos presentan limitaciones muy severas que restringen la elección del tipo de cultivo o requieren un manejo muy cuidadoso y costoso.
- En algunos casos, tienen limitaciones debido a la presencia de pendientes pronunciadas (12 – 25%) y, por tanto, susceptibles de que sobre ellos se produzca una erosión severa. Son suelos de pequeño espesor, con excesiva humedad o encharcamiento, baja retención de agua, con factores climáticos severos, elevada pedregosidad y/o rocosidad, baja fertilidad y elevada salinidad.
- **CLASE V:** En esta clase se encuentran los suelos que son adecuados para soportar vegetación permanente, no son apropiados para cultivo y las limitaciones que poseen restringen su uso a pastos, masas forestales y mantenimiento de la fauna silvestre. Pendientes planas (0 – 5%), suelos muy pedregosos. No permiten el cultivo por su carácter encharcado, pedregoso o por otras causas. La pendiente es casi horizontal, no son susceptibles de erosión. El pastoreo debe ser regulado para evitar la destrucción de la cubierta vegetal.



- **CLASE VI:** Pendientes del 25 – 50%. Suelos muy pedregosos uso de maquinaria y riesgo de erosión. Los suelos de esta clase deben emplearse para el pastoreo o la silvicultura y su uso entraña riesgos moderados. Se hallan sujetos a limitaciones permanentes, pero moderadas, y son inadecuados para el cultivo. Su pendiente es fuerte.
- **CLASE VII:** Pendientes del (50 -70%), profundidad de 0.12 – 0.25 m, suelos tienen muchas piedras y rípios. Estos suelos se hallan sujetos a limitaciones permanentes y severas cuando se emplean para pastos o silvicultura.
- **CLASE VIII:** Los suelos de esta clase no son aptos ni para silvicultura ni pastos. Fuertes pendientes del 70%. Deben emplearse para uso de la fauna silvestre, para esparcimiento o para usos hidrológicos.

Tabla 18: Matriz de criterio de capacidad de acogida según clases agrológicas

Clase	Clases Agrológicas	Conservación	Agrícola	Pecuario	Forestal	Urbano
1	I					
2	II					
3	III					
4	IV					
5	V					
6	VI					
7	VII					
8	VIII					

**Fuente y Elaboración:** Propia, 2015

Según el criterio de altitud tenemos la siguiente matriz.

Tabla 19: Matriz de criterio de capacidad de acogida según altitud del terreno

Clase	Altitud	Conservación	Agrícola	Pecuario	Forestal	Urbano
1	≤2800 m s.n.m.					

**Fuente y Elaboración:** Propia, 2015

Para la aptitud de uso del suelo urbano se identificó los siguientes criterios adicionales.

- **Distancia a carreteras:** Calculo de la distancia euclidiana a partir de las vías de primer, segundo y tercer orden del cantón Cuenca. La fuente de información es el PDOT del cantón Cuenca 2011.

- **Distancia a sistema de agua potable:** Cálculo de distancia euclidiana a partir de la red de distribución de agua potable, líneas de conducción para tratamiento y la ubicación de plantas de tratamiento. La fuente de información es ETAPA EP, 2014.
- **Distancia a sistema de alcantarillado:** Cálculo de distancia euclidiana a partir de la red de alcantarillado sanitario, pluvial y combinado, más la ubicación de interceptores. La fuente de información es ETAPA EP, 2014.
- **Distancia a puntos de carga eléctrica (redes eléctricas de uso residencial).** Cálculo de distancia euclidiana a puntos de carga de energía eléctrica. A los puntos de carga se conectan los medidores de energía. Para este tema se seleccionó los puntos de carga de uso residencial registrados hasta el abril.2014. La fuente de información es la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, 2014.

### 3.5.4.2. Matriz de evaluación

Ahora se realiza la matriz de evaluación de los factores y criterios por cada uno de las aptitudes que se está analizando. La valoración va de 0 a 100; siendo 100 completamente apto o compatible con el uso del suelo y el valor de 0, ningún tipo de compatibilidad.

En la tabla continua, podemos observar que las coberturas de bosque natural, humedales, cuerpos de agua paramo de pajonal son las más óptimas para el uso de conservación, es decir tienen una alta capacidad de acogida para este tipo de uso.

Tabla 20: Matriz de evaluación del factor de cobertura vegetal y uso del suelo

Clase	Cobertura	Conservación	Agrícola	Pecuario	Forestal	Urbano
		Nuevos valores				
1	Arbustos	75			100	
2	Área Cultivada		100	75	25	25
4	Área urbana continua					100
5	Área urbana discontinua					100
6	Bosque Natural	100				
8	Cuerpos de agua	100				
9	Humedales	100				
11	Páramo de pajonal	100				
12	Páramo sobre roca desnuda	90				
13	Pastizal		25	100	100	50
3	Área Quemada					

15	Suelo Degradado	90
7	Caminos	
14	Sombra	
10	Nubes	

**Fuente y Elaboración:** Propia, 2015

El mismo análisis se realiza con el factor de topografía del terreno, obteniendo la siguiente tabla.

Tabla 21: Matriz de evaluación del factor de topografía del terreno (Pendiente porcentaje)

Clase	Pendiente (%)	Conservación	Agrícola	Pecuario	Forestal	Urbano
		Nuevos valores				
1	0 - 5		100	100		100
2	5 - 15		100	100		100
3	15 - 30		85	90		100
4	30 - 50	75	75	80	75	
5	50 - 70	90			100	
6	> 70	100				

**Fuente y Elaboración:** Propia, 2015

Ahora la matriz con el factor de clases agrológicas, tenemos:

Tabla 22: Matriz de evaluación del factor de clases agrológicas

Clase	Clase Agrológica	Conservación	Agrícola	Pecuario	Forestal	Urbano
		Nuevos valores				
1	I		100	100		
2	I-II		100	100		
3	II		100	100		
4	III		75	90		
5	IV		50	75		
7	V			50	50	
8	VI	50		25	75	
9	VII	75		10	100	
10	VIII	100				
6	SIN USO AGROPECUARIO					

**Fuente y Elaboración:** Propia, 2015

Para la aptitud de conservación, a más de los criterios antes mencionados, se establecieron el **criterio de proximidad a vías**, bajo la condición de que mientras más alejado se encuentre de la vías presenta mejores condiciones para la conservación.

Para la aptitud de uso urbano adicionalmente se identificó los siguientes criterios:

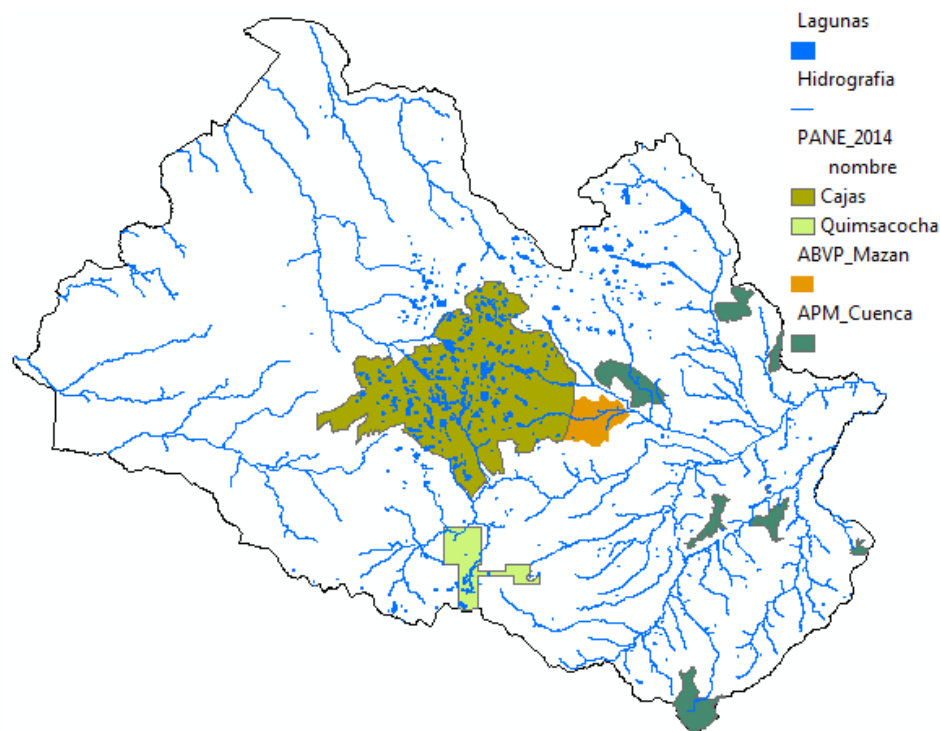
- *Proximidad a la vía*, para lo cual se calculó la distancia a vías y la mayor aptitud son aquellos lugares más cercanos a la vía.
- *Proximidad a redes de agua potable*, la condición es que mientras mayor es la cercanía a las redes de agua potable, mayor es la aptitud a suelo urbano.
- *Proximidad a red de alcantarillado*, la condición es que tienen mayor aptitud a suelo urbano las áreas que se encuentran más cercanas a la red de alcantarillado.
- *Proximidad a red eléctrica de uso residencial*, con este criterio se considera que mientras más cerca está a los puntos de carga de servicio de electricidad para uso residencial mayor es la condición para el uso urbano.

#### **3.5.4.3. Restricciones o limitaciones para la determinación de uso del suelo del cantón Cuenca**

Las restricciones identificadas han sido tomadas del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Cuenca, 2014, y corresponden a los siguientes temas:

- Patrimonio de Áreas Naturales del Estado: Parque Nacional Cajas y el Área Recreacional de Quimsacocha.
- Área de Bosque y Vegetación Protectora de Mazán.
- Áreas Protegidas Municipales. En el cantón Cuenca existen 10 áreas con potencial a ser declaradas como áreas protegidas municipales, que ocupan 5 933 ha.
- Cursos de agua y lagunas

Ilustración 21: Restricciones zonas de conservación



Fuente y Elaboración: Propia, 2015

#### 3.5.4.4. Normalización de factores

Dentro de la metodología de jerarquización de Saaty, es necesario realizar la normalización de los factores, que consiste en transformar el rango de valores de los atributos entre 0 y 1, es decir a la misma escala para facilitar su interpretación y ponderación en el análisis multicriterio.

Para la normalización de los factores se empleó la siguiente expresión:

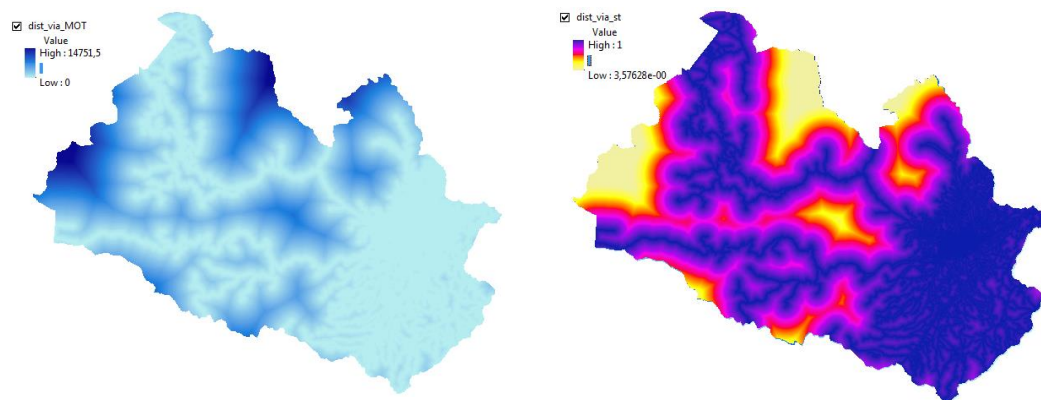
$$m_i = \frac{x_i - \min x_i}{\max x_i - \min x_i}$$

Esta expresión asegura que el peor valor coincidirá con el mínimo (valor 0) y el mejor con el máximo (valor 1).

Aplicando la fórmula para el factor de vías tenemos:

$$\text{Vías: } 1 - (\text{"dist\_via\_MOT"} / 14751.5)$$

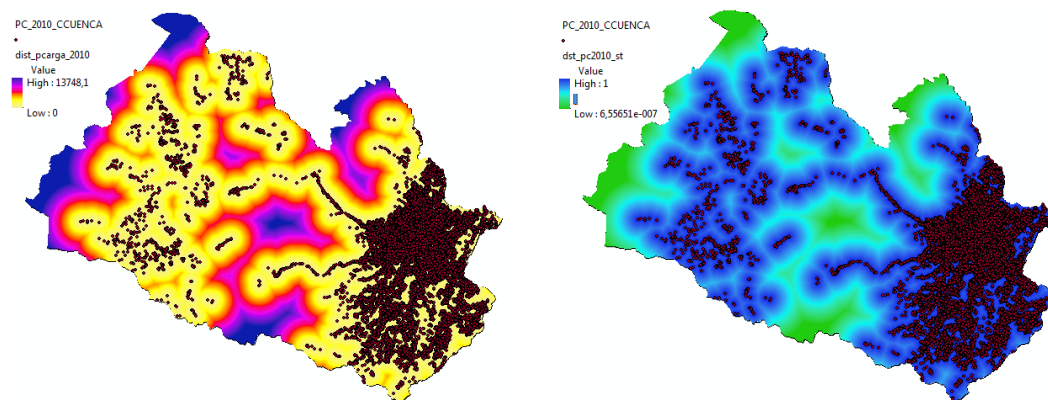
Ilustración 22: Proceso de normalización (0 – 1) de la capa de vías



Fuente y Elaboración: Propia, 2015

Para el factor de Distancia a asentamientos humanos:  $1 - (\text{"dist\_pcarga\_2010"} / 13748.1)$

Ilustración 23: Proceso de normalización (0 – 1) de la capa de asentamientos humanos

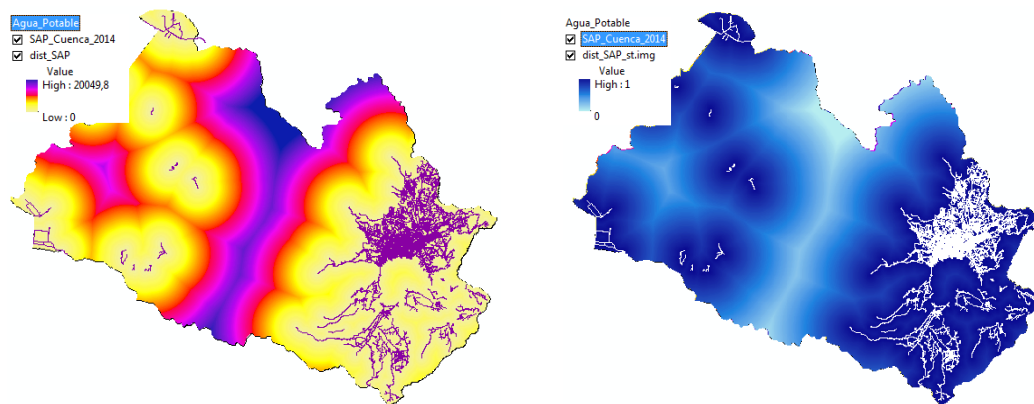


Fuente y Elaboración: Propia, 2015

Aplicando al formula en la capa de Distancia a sistema de agua potable (SAP):  $1 - (\text{"dist\_sap"} / 20049.8)$



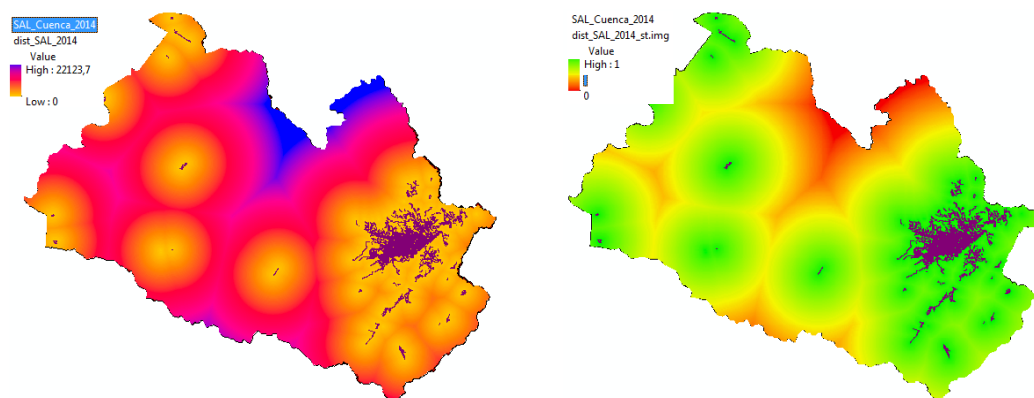
Ilustración 24: Proceso de normalización (0 – 1) de la capa de red de agua potable



Fuente y Elaboración: Propia, 2015

En la capa de Distancia a sistema de Alcantarillado SAL:  $1 - (\text{"dist\_SAP\_2014"} / 22123,7)$

Ilustración 25: Proceso de normalización (0 – 1) de la capa de red de alcantarillado

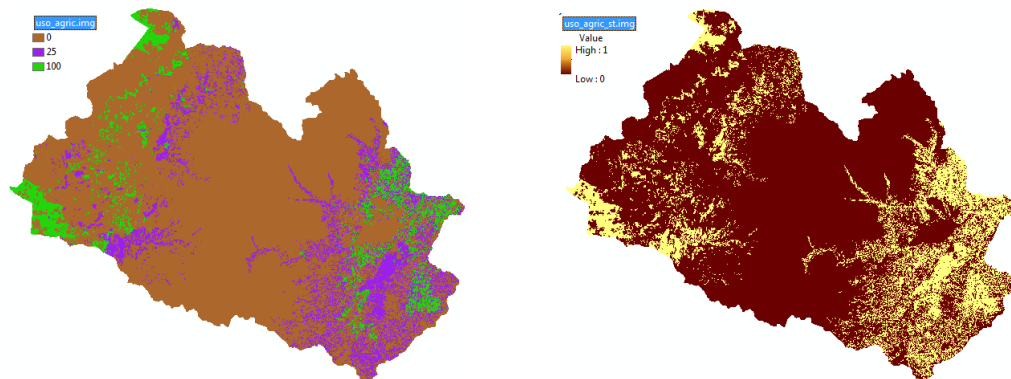


Fuente y Elaboración: Propia, 2015

El procedimiento se realiza con factores de uso agrícola, teniendo:

Uso agrícola estandarizado:  $(\text{Float}(\text{"uso\_agric.img"}) / 100)$

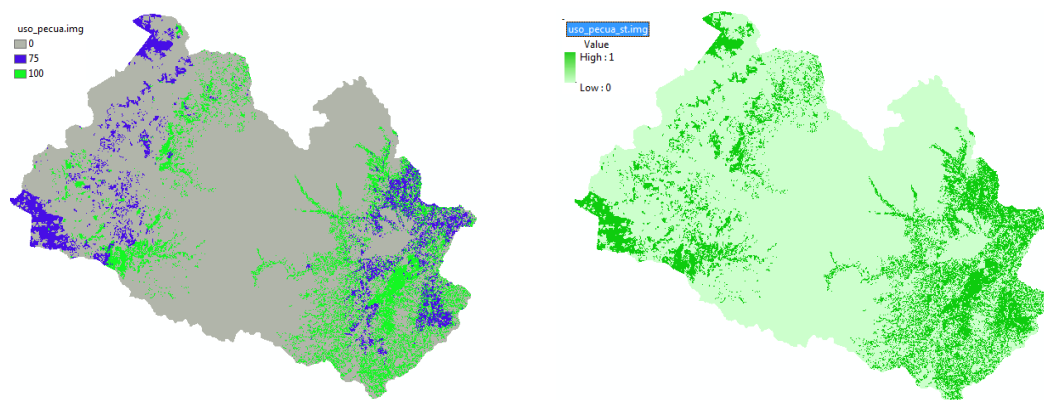
Ilustración 26: Proceso de normalización (0 – 1) de la capa de uso agrícola



Fuente y Elaboración: Propia, 2015

Para la capa de Uso pecuario estandarizado:  $(\text{Float}(\text{"uso\_pecua.img"}) / 100)$

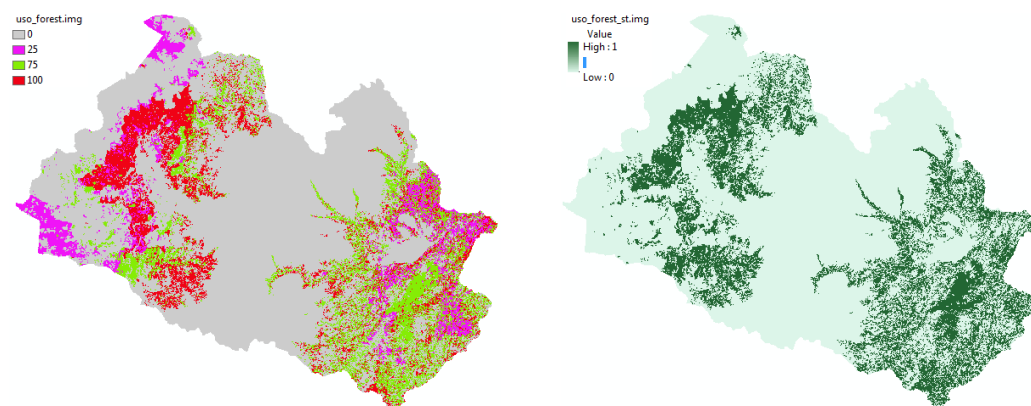
Ilustración 27: Proceso de normalización (0 – 1) de la capa de uso pecuario



Fuente y Elaboración: Propia, 2015

Para la capa de uso forestal estandarizado:  $(\text{Float}(\text{"uso\_forest.img"}) / 100)$

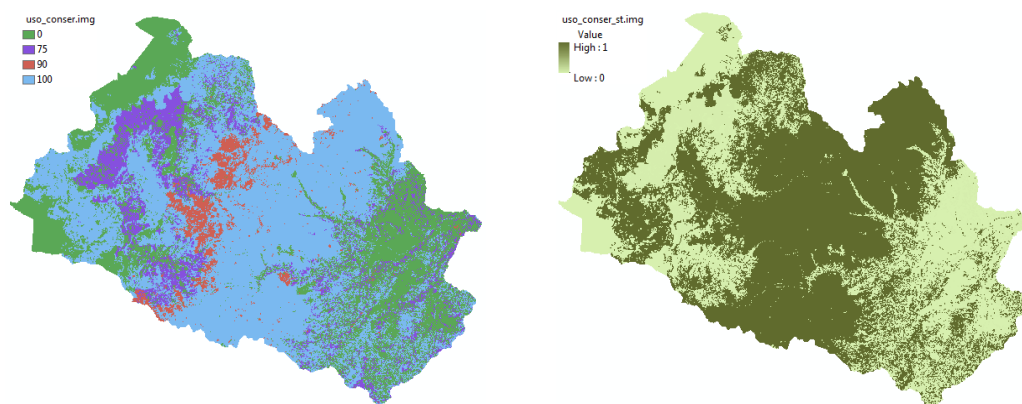
Ilustración 28: Proceso de normalización (0 – 1) de la capa de uso forestal



**Fuente y Elaboración:** Propia, 2015

En la capa de uso conservación estandarizado:  $(\text{Float}(\text{"uso\_conser.img"}) / 100)$

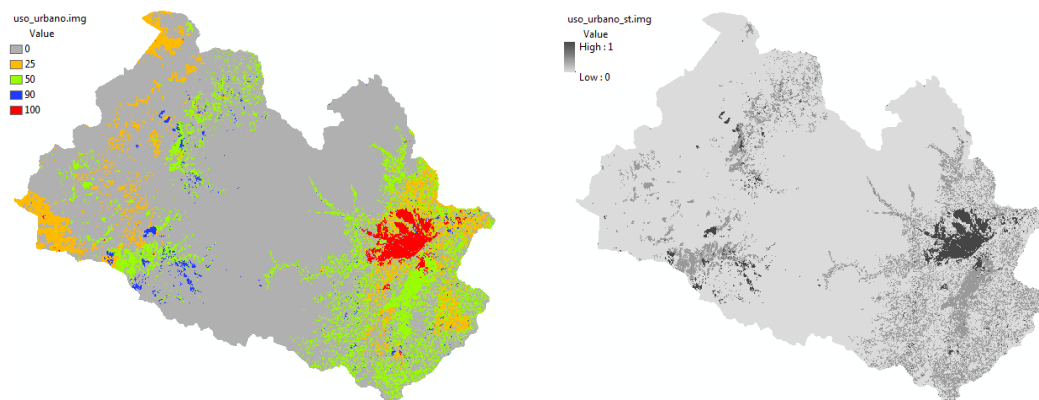
Ilustración 29: Proceso de normalización (0 – 1) de la capa de conservación



**Fuente y Elaboración:** Propia, 2015

Y para la capa de uso urbano estandarizado:  $(\text{Float}(\text{"uso\_urbano.img"}) / 100)$

Ilustración 30: Proceso de normalización (0 – 1) de la capa de uso urbano



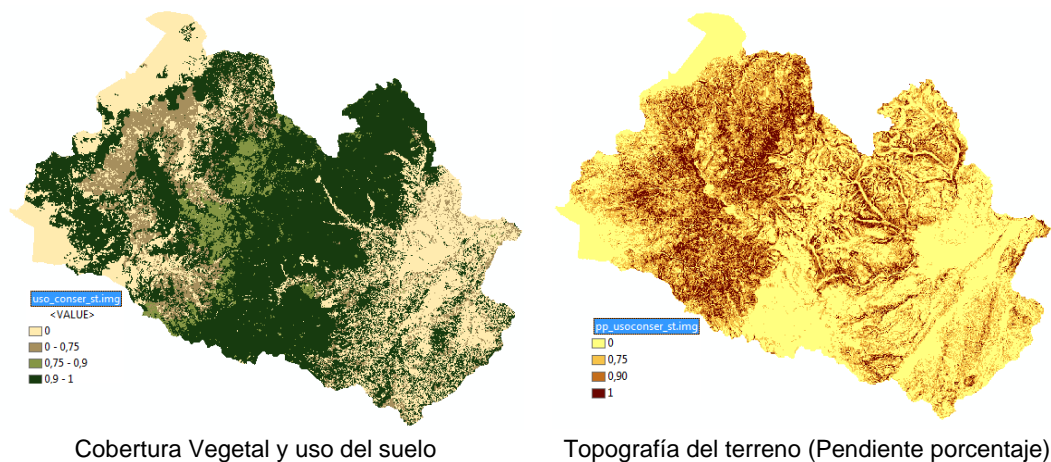
Fuente y Elaboración: Propia, 2015

Una vez realizada el análisis de los diferentes factores para cada uso de suelo, su matriz de evaluación, ponderación, restricción y su normalización podemos realizar el cálculo de la capacidad de acogida para cada uso del suelo con los siguientes resultados.

#### a. Factores para determinar aptitud de uso para conservación

A continuación se detalla los factores identificados para determinar la aptitud de uso para conservación

Ilustración 31: Factores para determinar la aptitud de uso para conservación



Cobertura Vegetal y uso del suelo

Topografía del terreno (Pendiente porcentaje)

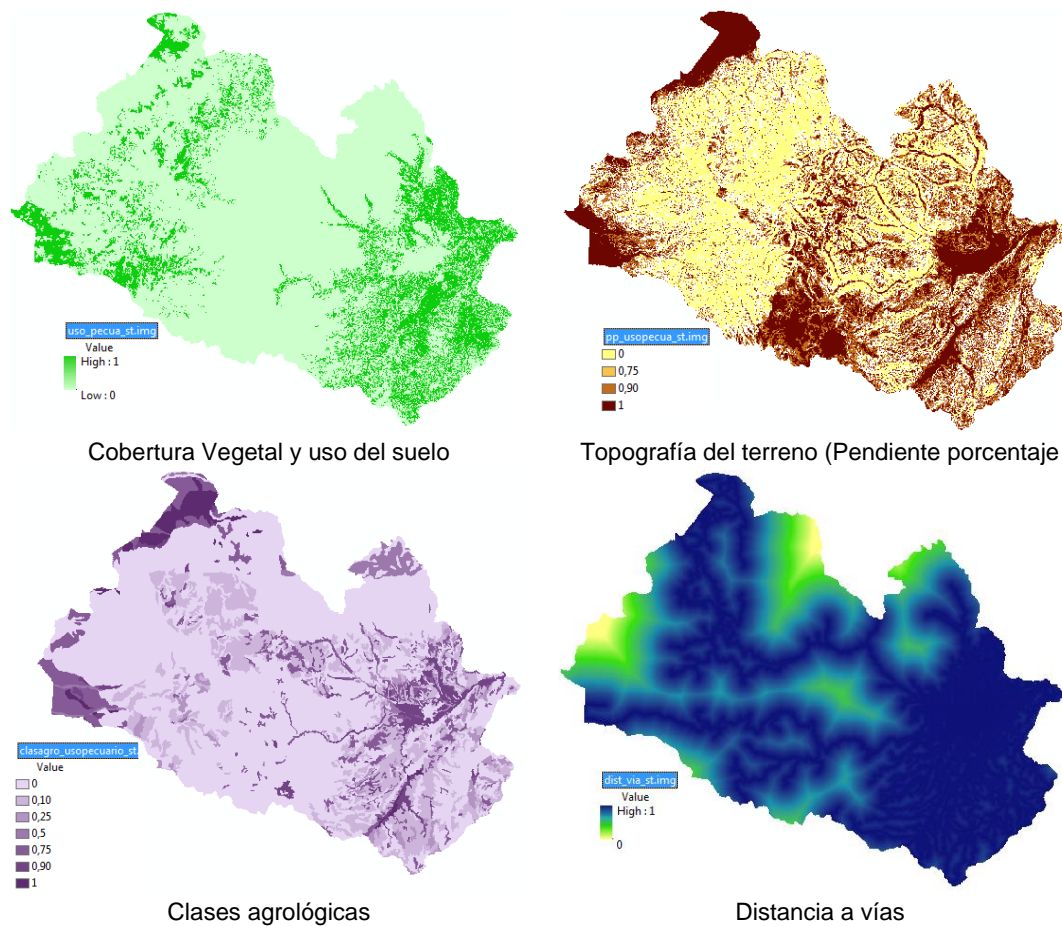




### c. Factores para determinar aptitud de uso pecuario

Para la aptitud de uso pecuario se tiene los siguientes factores:

Ilustración 33: Factores para determinar la aptitud de uso para uso pecuario



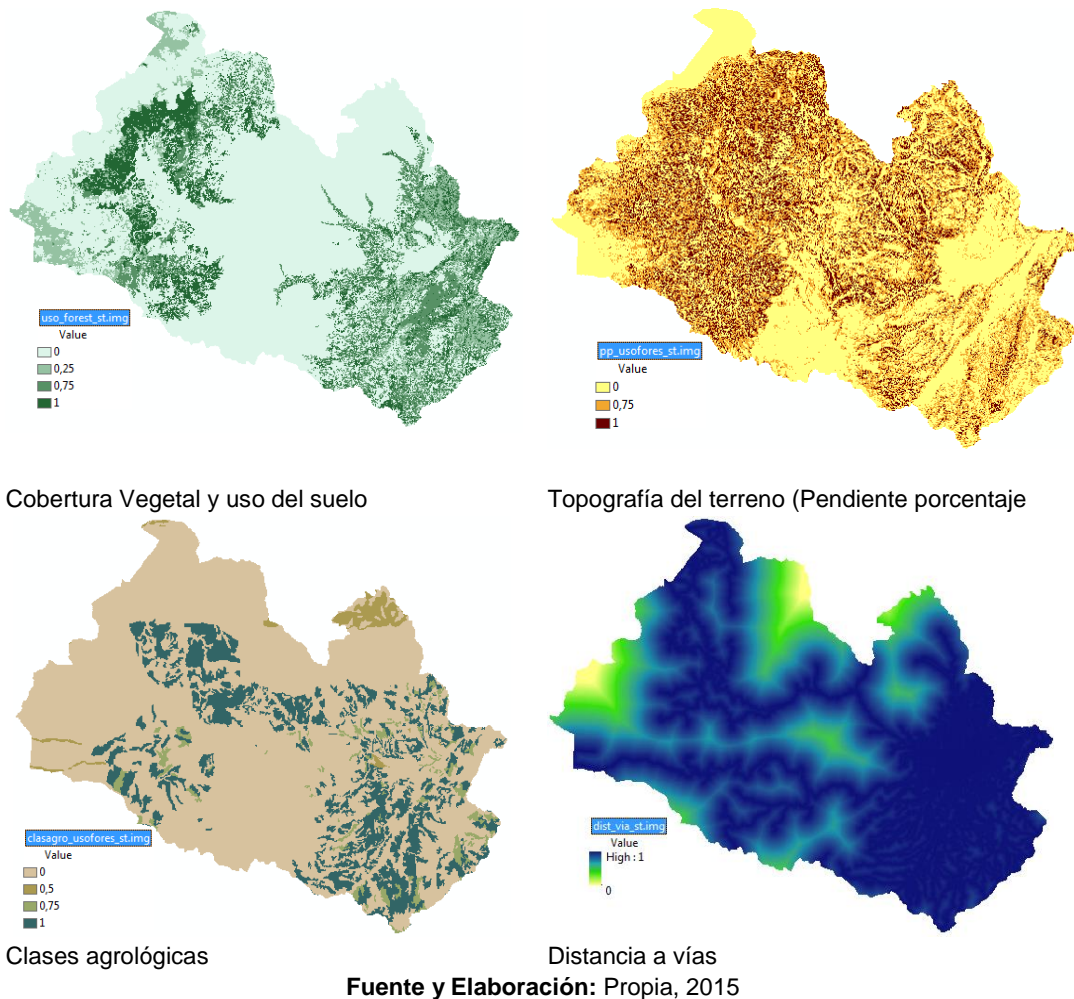
Fuente y Elaboración: Propia, 2015



#### d. Factores para determinar aptitud de uso forestal

Los factores para la aptitud de uso forestal son los siguientes:

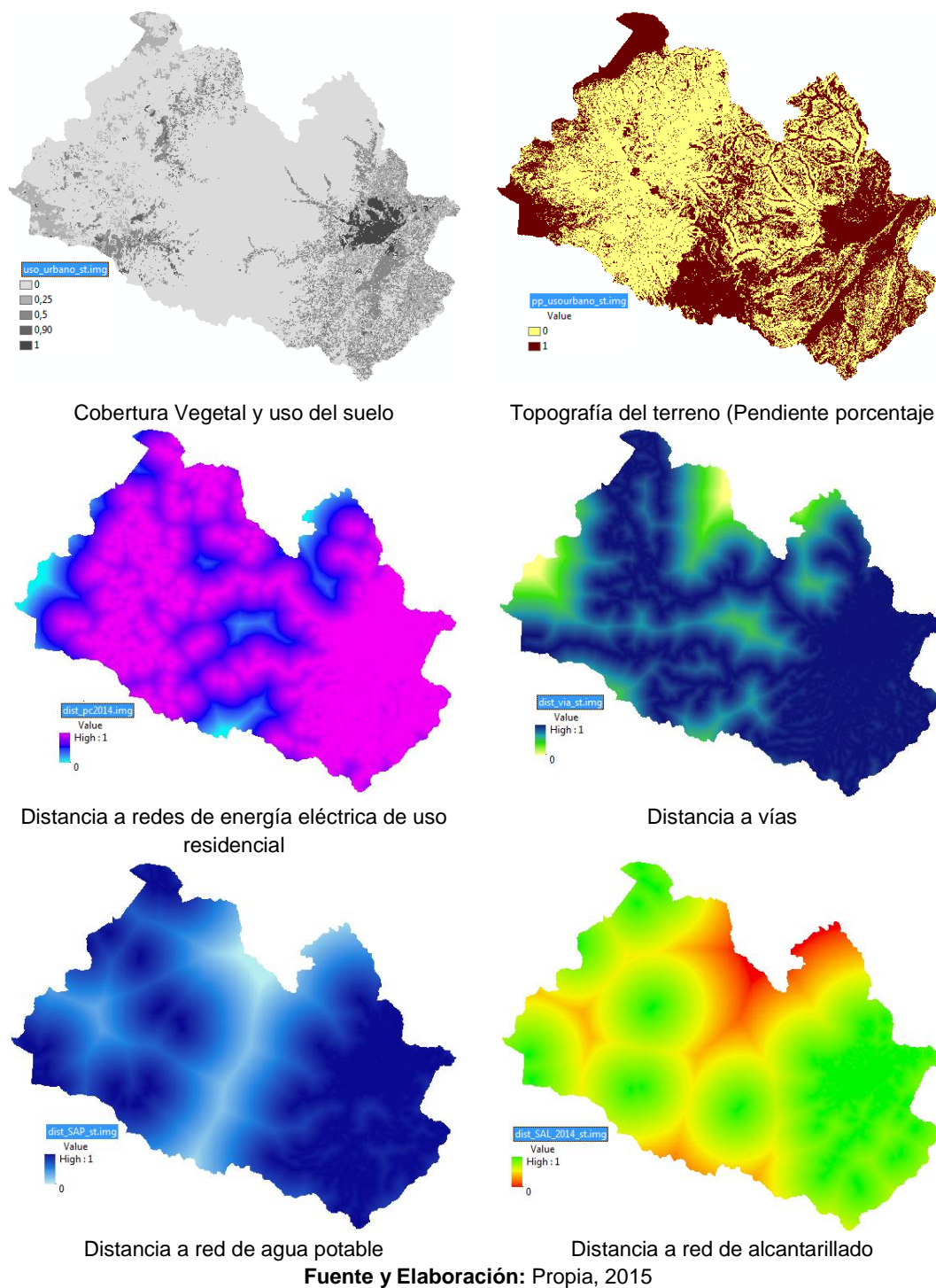
Ilustración 34: Factores para determinar la aptitud de uso para uso forestal



**e. Factores para determinar aptitud de uso urbano:**

El resultado para la aptitud el suelo urbano se tiene los siguientes factores:

Ilustración 35: Factores para determinar la aptitud de uso para uso urbano



### 3.5.4.5. Ponderación de factores (pesos)

Para continuar con la determinación de la capacidad de acogida en conservación, agrícola, pecuaria, forestal y urbana, es necesario definir la ponderación de criterios por orden de preferencias. Para la estimación de los pesos de cada factor, se empleó el método por comparación por pares de Saaty, en la cual se establece una matriz cuadrada en la cual las filas y columnas están definidas por el número de factores a ponderar. (Gómez, M., 2005). El valor correspondiente al Radio de consistencia debe ser cercano a 0 para que sea aceptable. En la siguiente matriz se definió la ponderación de cada uno de los factores de acuerdo a su prioridad en base a la capacidad de uso.

Para la capacidad de uso en conservación tenemos las siguientes ponderaciones.

Tabla 23: Ponderación de factores para determinar la aptitud de uso de conservación:

Clases	1	2	3	4	Valor
1	1				0,5650
2	1/3	1			0,2622
3	1/5	1/3	1		0,1175
4	1/7	1/5	1/3	1	0,0553

1 Uso Conservación; 2 Pendientes para conservación; 3 Clases agrológicas conservación; 4 Distancia a vías conservación.

Radio de consistencia: 0,04 - Aceptable

**Fuente y Elaboración:** Propia, 2015

La ponderación en los usos de suelo agrícola, pecuario y forestal se unificó ya que los criterios de priorización son idénticos, teniendo los mismos pesos para cada uno de estos tres factores.

Tabla 24: Ponderación de factores para determinar la aptitud de uso agrícola, pecuario y forestal:

Clases	1	2	3	4	Valor
1	1				0,2926
2	2	1			0,4155
3	1/2	1/2	1		0,1849
4	1/3	1/3	1/2	1	0,1070

1 Uso: agrícola, pecuario y forestal; 2 Pendiente para uso agrícola, pecuario y forestal; 3 Clases agrológica: agrícola, pecuario y forestal; 4 Distancia a vías: agrícola, pecuario y forestal.

Radio de consistencia: 0,03 - Aceptable

**Fuente y Elaboración:** Propia, 2015

Los valores de ponderación para el factor de uso urbanos son los siguientes:

Tabla 25: Ponderación de factores para determinar la aptitud de uso urbano:

Clases	1	2	3	4	5		Valor
1	1						0.0255
2	3	1					0.0990
3	2	1/2	1				0.1670
4	1	1/5	1/2	1			0.0456
5	1	1/3	1/3	1/2	1		0.3983
6	1	1/3	1/3	1/2	1/2	1	0.2647

1 Cobertura vegetal y uso del suelo; 2 Topografía del terreno (Pendiente porcentaje); 3 Proximidad a red eléctrica de uso residencial; 4 Proximidad a la vía; 5 Proximidad a la red de agua potable; 6 Proximidad a la red de alcantarillado.

Radio de consistencia: 0,01 - Aceptable

**Fuente y Elaboración:** Propia, 2015

Una vez que se han definido los criterios, se pueden combinar a través de una regla de decisión para conseguir una evaluación multicriterio y por lo tanto un modelo de decisión.

#### 3.5.4.6. Aplicación de técnicas multicriterio para determinar la aptitud de suelo

Para el cálculo de la aptitud del suelo se emplearon técnicas compensatorias, específicamente la técnica aditiva sumatoria lineal ponderada y la técnica de análisis al punto ideal.

#### 3.5.5. Técnica Suma Lineal Ponderada – SLP

Este método es el más empleado en los procesos de evaluación multicriterio, por ser intuitivo y de fácil aplicación en los sistemas de información geográfica. La obtención del nivel de adecuación de cada alternativa se halla sumando el resultado de multiplicar el valor de cada criterio por su peso (Gómez M., 2005):

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j v_{ij}$$

Donde

$r_i$ : es el nivel de adecuación de la alternativa  $i$ .

$w_j$ : es el peso del criterio  $j$

$v_{ij}$ : es el valor ponderado de la alternativa  $i$  en el criterio  $j$ .

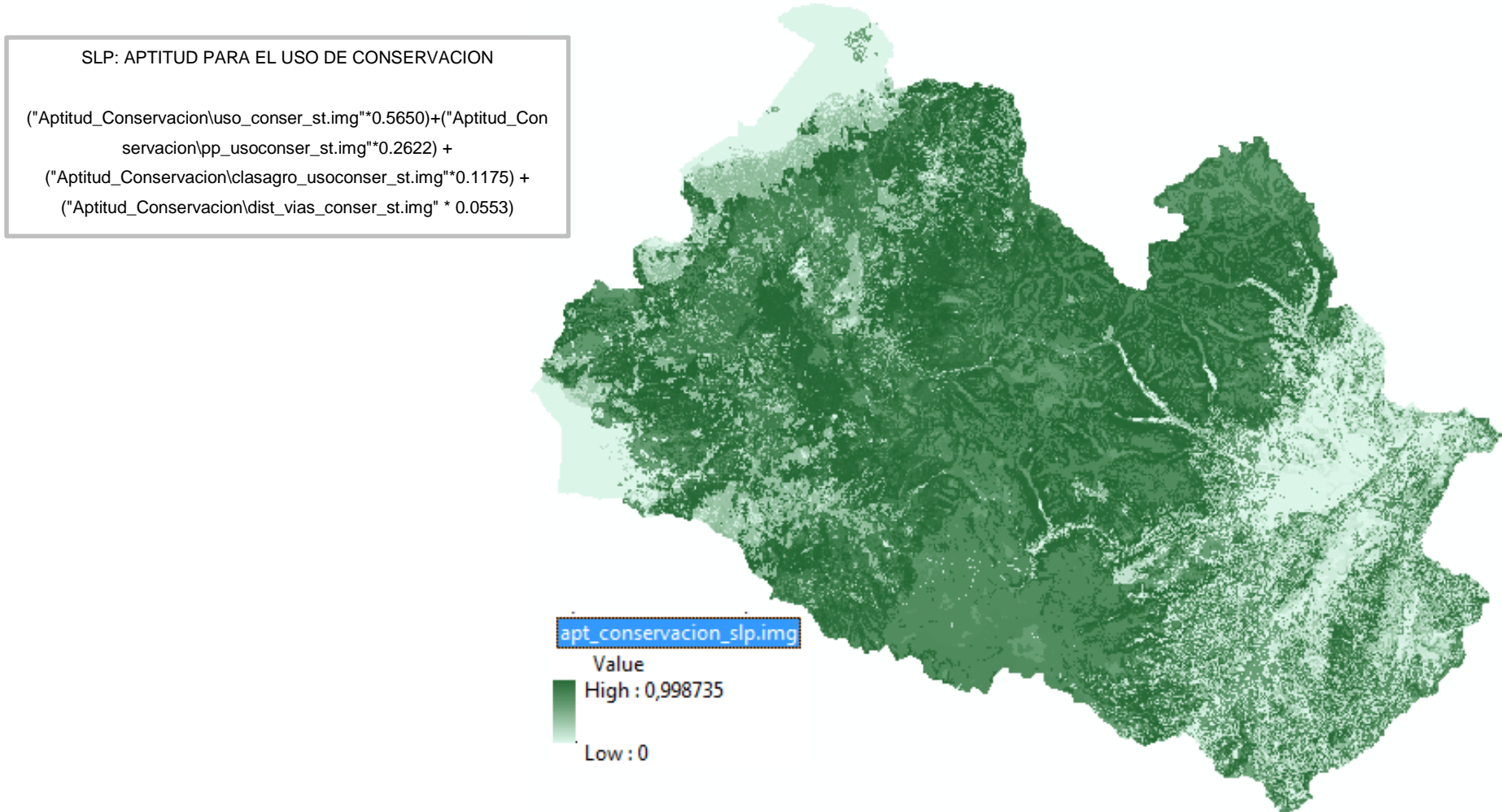
## **Generación de mapas de aptitud empleando el método de Evaluación Multi Criterio – EMC con la técnica Suma Lineal Ponderada - SLP.**

A continuación se indican los resultados de aplicar el método de EMC, con la técnica de la Suma lineal ponderada para la obtención de la aptitud para el uso de conservación, agrícola, pecuario, forestal y urbano.

Con el apoyo del software IDRISI y ArcGis, se aplicó la ecuación mencionada anteriormente y se tiene los siguientes resultados para cada uno de las aptitudes del suelo.



Mapa 9: Aptitud para uso de conservación con la técnica Suma Lineal Ponderada -SLP



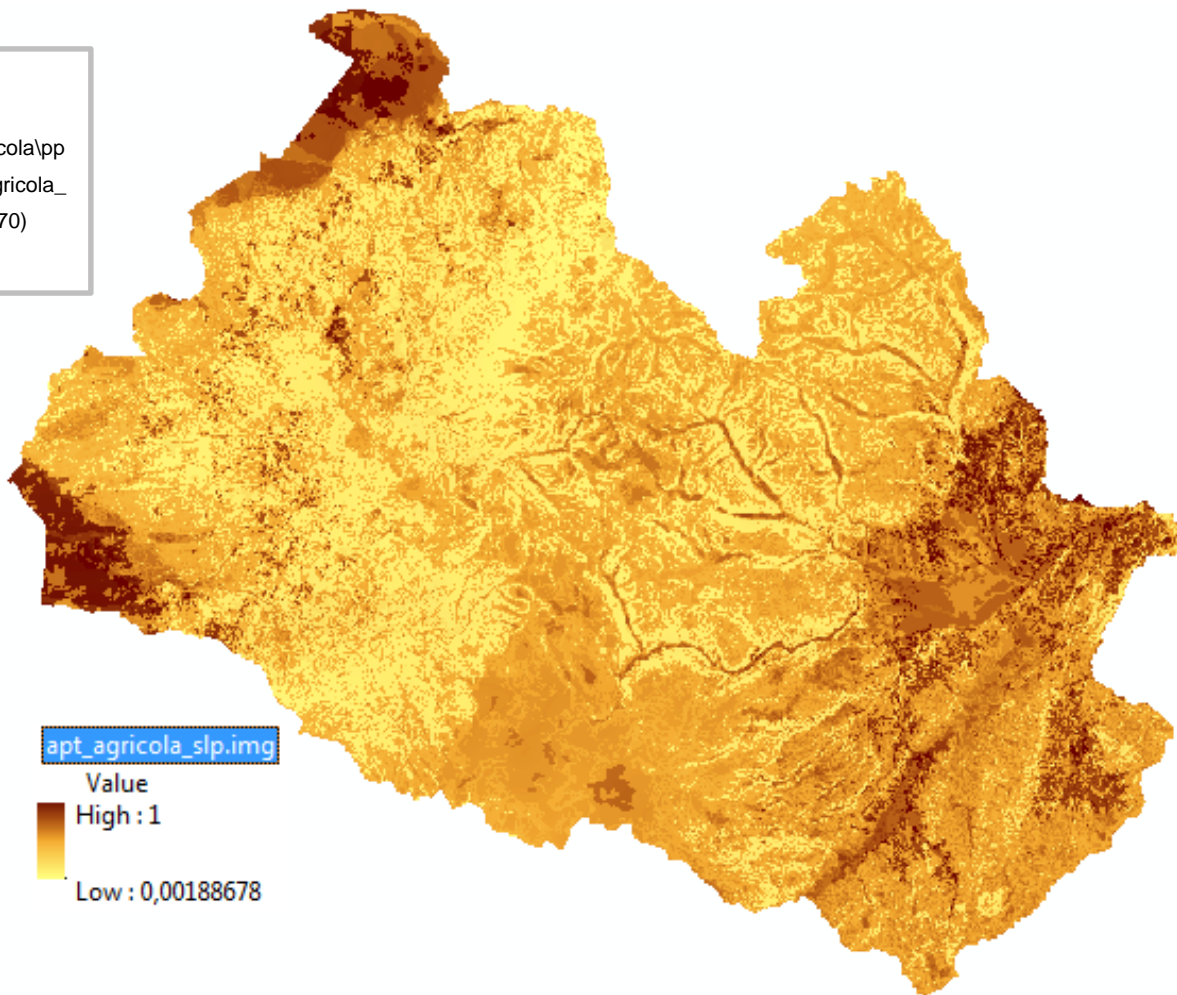
Fuente y Elaboración: Propia, 2015



Mapa 10: Aptitud para uso agrícola con la técnica Suma Lineal Ponderada -SLP

SLP: APTITUD PARA EL USO AGRICOLA

("Aptitud\_Agricola\uso\_agric\_st.img"\*0.2926)+("Aptitud\_Agricola\pp\_usoagri\_st.img"\*0.4155)+("Aptitud\_Agricola\clasagro\_usoagricola\_st.img"\*0.1849)+("Aptitud\_Agricola\dist\_via\_st.img"\*0.1070)

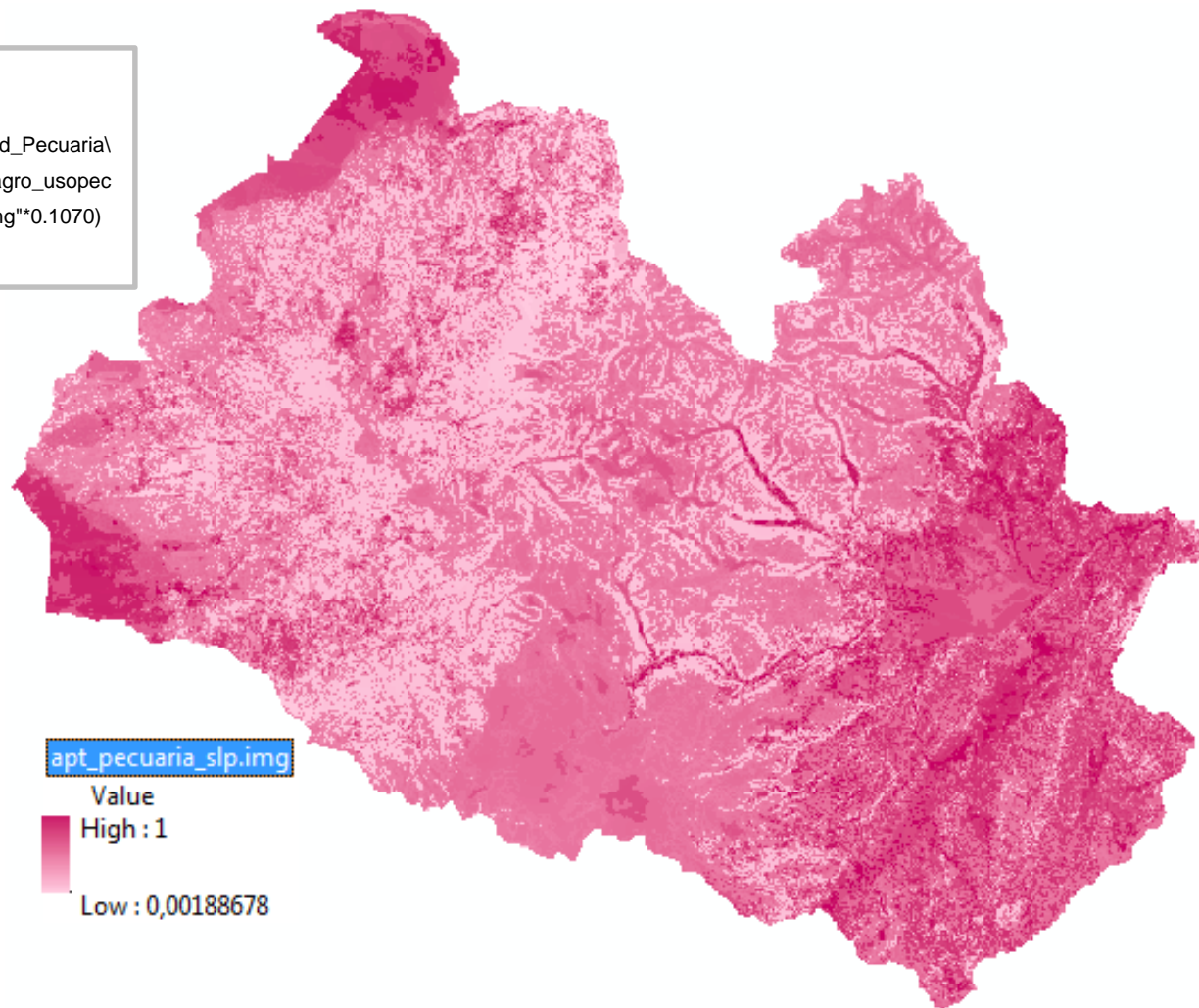


Fuente y Elaboración: Propia, 2015

Mapa 11: Aptitud para uso pecuario con la técnica Suma Lineal Ponderada -SLP

SLP: APTITUD PARA EL USO PECUARIO

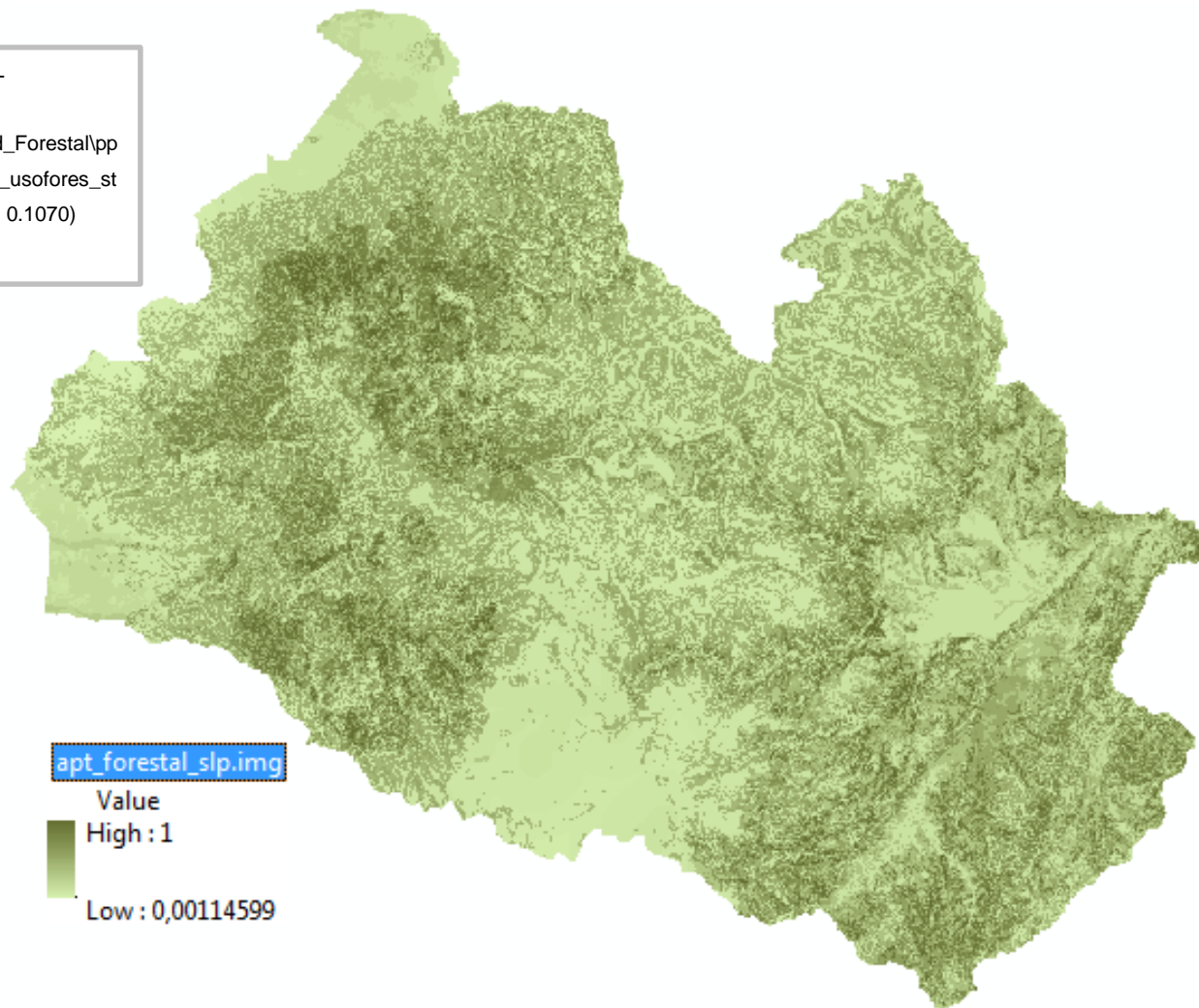
$(\text{"Aptitud\_Pecuarialuso\_pecua\_st.img"} * 0.2926) + (\text{"Aptitud\_Pecuarialpp\_usopecua\_st.img"} * 0.4155) + (\text{"Aptitud\_Pecuarialclasagro\_usopecuario\_st.img"} * 0.1849) + (\text{"Aptitud\_Agricola\dist\_via\_st.img"} * 0.1070)$



Fuente y Elaboración: Propia, 2015

Mapa 12: Aptitud para uso forestal con la técnica Suma Lineal Ponderada -SLP

SLP: APTITUD PARA EL USO FORESTAL

$$(\text{"Aptitud\_Forestal\uso\_forest\_st.img"} * 0.2926) + (\text{"Aptitud\_Forestal\pp\_usofores\_st.img"} * 0.4155) + (\text{"Aptitud\_Forestal\clasagro\_usofores\_st.img"} * 0.1849) + (\text{"Aptitud\_Agricola\dist\_via\_st.img"} * 0.1070)$$


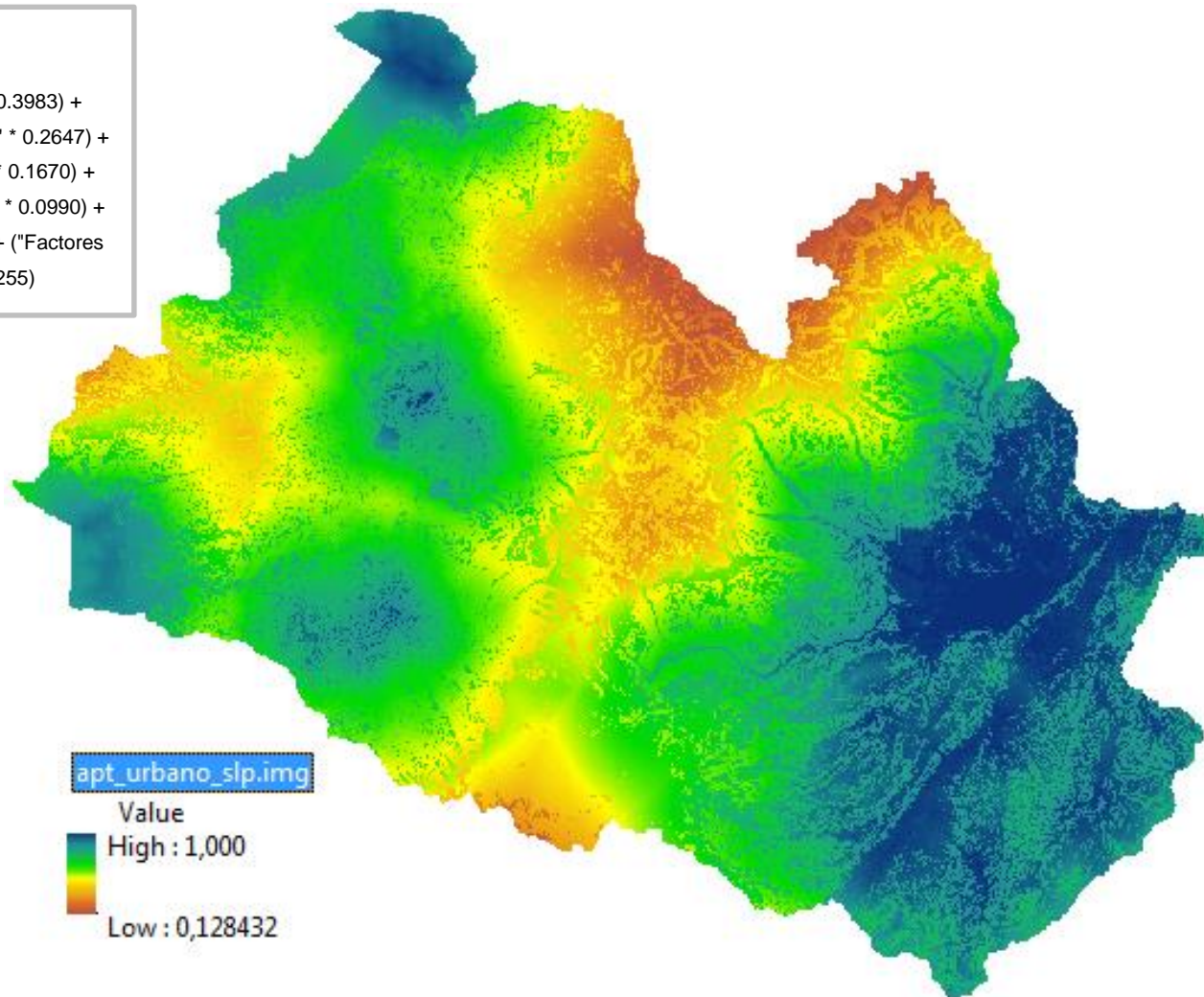
Fuente y Elaboración: Propia, 2015



Mapa 13: Aptitud para uso urbano con la técnica Suma Lineal Ponderada -SLP

SLP: APTITUD PARA EL USO URBANO

("Factores Aptitud\_Uso\_Urbano\dist\_SAP\_st.img" \* 0.3983) +  
("Factores Aptitud\_Uso\_Urbano\dist\_SAL\_2014\_st.img" \* 0.2647) +  
("Factores Aptitud\_Uso\_Urbano\dist\_pc2014\_st.img" \* 0.1670) +  
("Factores Aptitud\_Uso\_Urbano\pp\_usourbano\_st.img" \* 0.0990) +  
("Factores Aptitud\_Agricola\dist\_via\_st.img" \* 0.0456) + ("Factores  
Aptitud\_Uso\_Urbano\uso\_urbano\_st.img" \* 0.0255)



Fuente y Elaboración: Propia, 2015

### 3.5.6. Técnica del Análisis de Punto Ideal - API

El análisis de punto ideal es otra técnica de evaluación multicriterio: compensatoria y aditiva, de fácil implementación en datos raster (Barredo, 1996), que basa su cálculo en la distancia desde cada alternativa (celda) al punto ideal. Las alternativas (celdas raster) más cercanas al punto ideal serán las más aptas para el uso evaluado, mientras que las más distantes serán las más desfavorables. La distancia a cada alternativa al punto ideal se obtiene a través de la ecuación:

$$L_p = \left[ \sum_{j=1}^n w_j |e_{ij} - 1|^p \right]^{1/p}$$

Donde:

$L_p$ : Distancia euclidiana entre la alternativa  $i$  (**celda  $i$** ) y el punto ideal de aptitud.

$w_j$ : Peso del factor  $j$ .

$e_{ij}$ : Valor normalizado de la alternativa  $i$  en el factor  $j$ .

1: Valor del punto ideal para factores normalizados entre 0 y 1.

$p$ : Métrica utilizada

A medida de  $p$  aumenta adquiere mayor importancia relativa las desviaciones de los factores individuales. Para los cálculos en el presente estudio se empleará un valor de  $p$  igual a 2 (distancia euclidiana), que supone una compensación parcial entre los factores de evaluación.

Por tanto la ecuación anterior, se escribirá de la siguiente manera:

$$L_2 = \left[ \sum_{j=1}^n w_j |e_{ij} - 1|^2 \right]^{1/2}$$

Ahora bien, para convertir los valores de distancia al punto ideal en el mapa de aptitud final, donde 1 representa la máxima aptitud y 0 la mínima (Santé, 2014) los valores resultantes son normalizados con la siguiente expresión:

$$a_i = \frac{\text{máx } L - L}{\text{máx } L - \text{mín } L}$$

Donde:

$a_i$ : Aptitud de la alternativa  $i$  y  $L$  distancia al punto ideal.

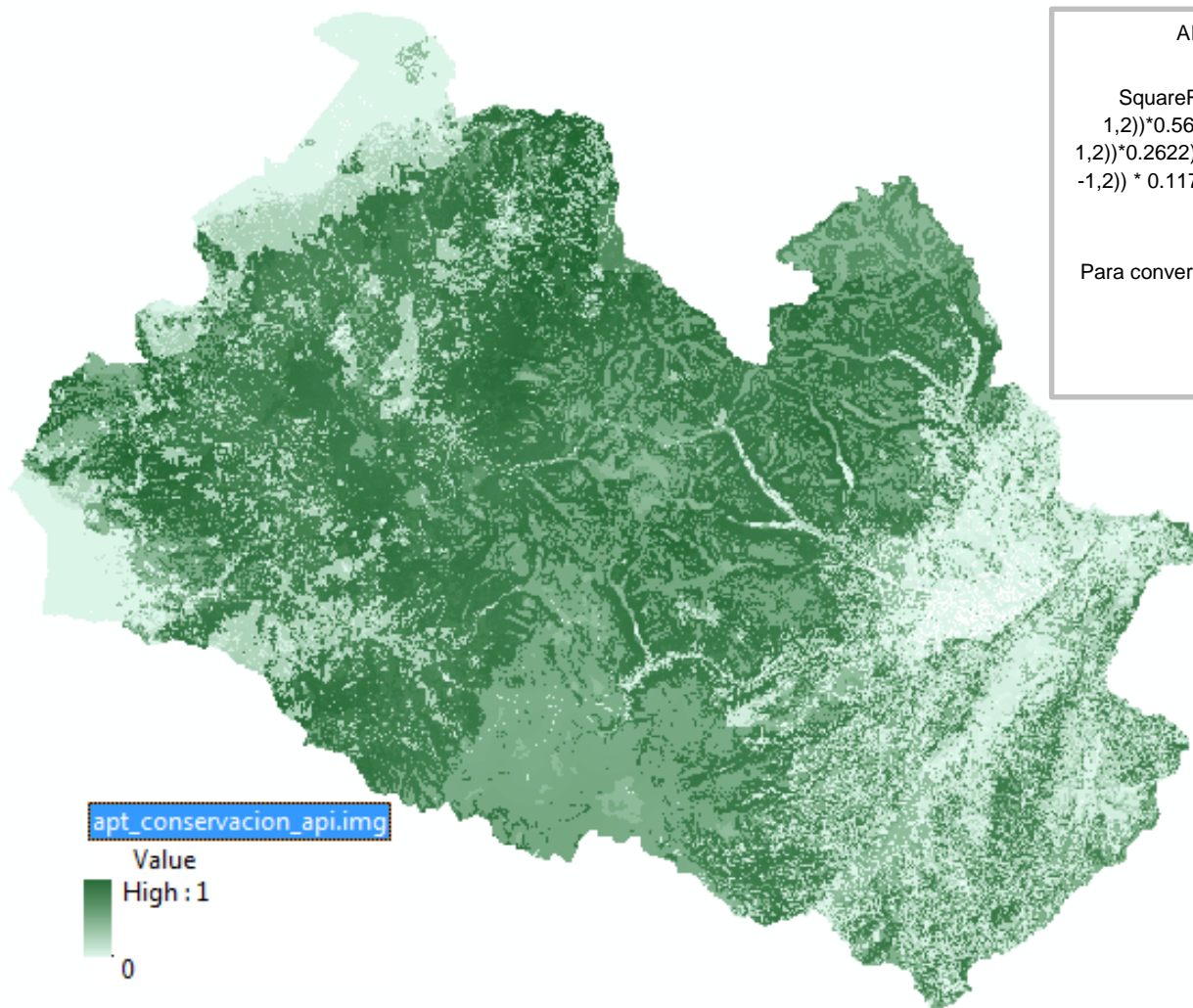
## **Generación de mapas de aptitud empleando el método de Evaluación Multi Criterio-EMC con la técnica de Análisis al Punto Ideal API.**

A continuación se indican los resultados de aplicar la metodología de EMC con la técnica de Análisis al Punto Ideal para la obtención de la aptitud para el uso de conservación, agrícola, pecuario, forestal y urbano.

Al igual que con la técnica anterior con el apoyo del software IDRISI y ArcGis, se aplicó la ecuación mencionada anteriormente y se tiene los siguientes resultados para cada uno de las aptitudes del suelo.



Mapa 14: Aptitud para uso de conservación con la técnica de Análisis del Punto Ideal - API



apt\_conservacion\_api.img

Value  
High : 1  
0

API: APTITUD PARA EL USO DE CONSERVACION

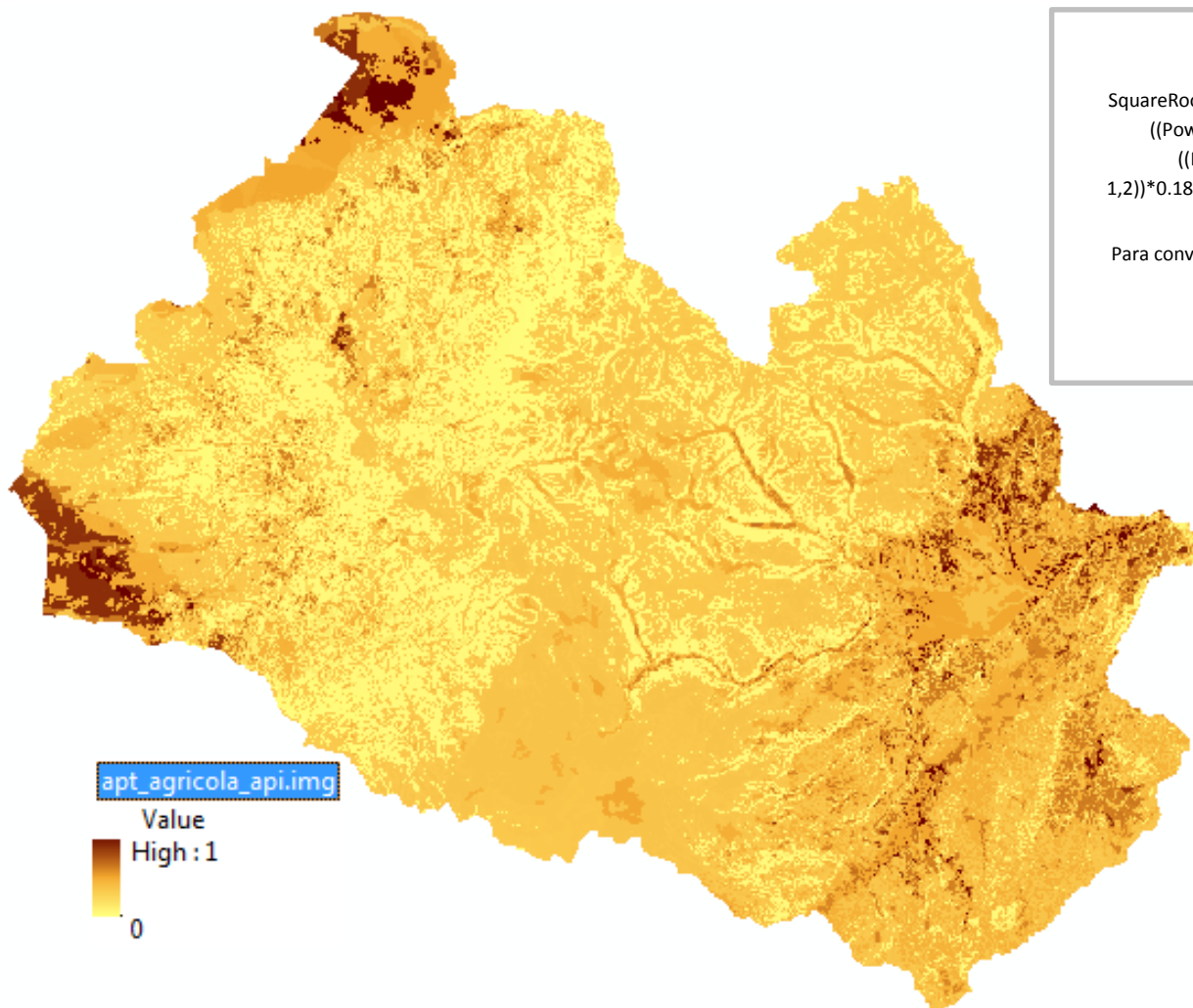
$$\text{SquareRoot}(((\text{Power}(\text{"Aptitud\_Conservacion\uso\_conser\_st.img"}-1,2))^0.5650)+(\text{Power}(\text{"Aptitud\_Conservacion\pp\_usoconser\_st.img"}-1,2))^0.2622)+(\text{Power}(\text{"Aptitud\_Conservacion\clasagro\_usoconser\_st.img"}-1,2))^0.1175)+(\text{Power}(\text{"Aptitud\_Conservacion\dist\_vias\_conser\_st.img"}-1,2))^0.0553))$$

Para convertir los valores de distancia en un mapa de aptitud, se aplica la siguiente expresión

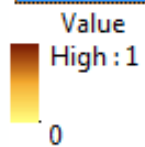
$$(1-\text{"rastercalc"}) / (1-0.00538005)$$

Fuente y Elaboración: Propia, 2015

Mapa 15: Aptitud para uso agrícola con la técnica de Análisis del Punto Ideal - API



apt\_agricola\_api.img



API: APTITUD PARA EL USO DE AGRÍCOLA

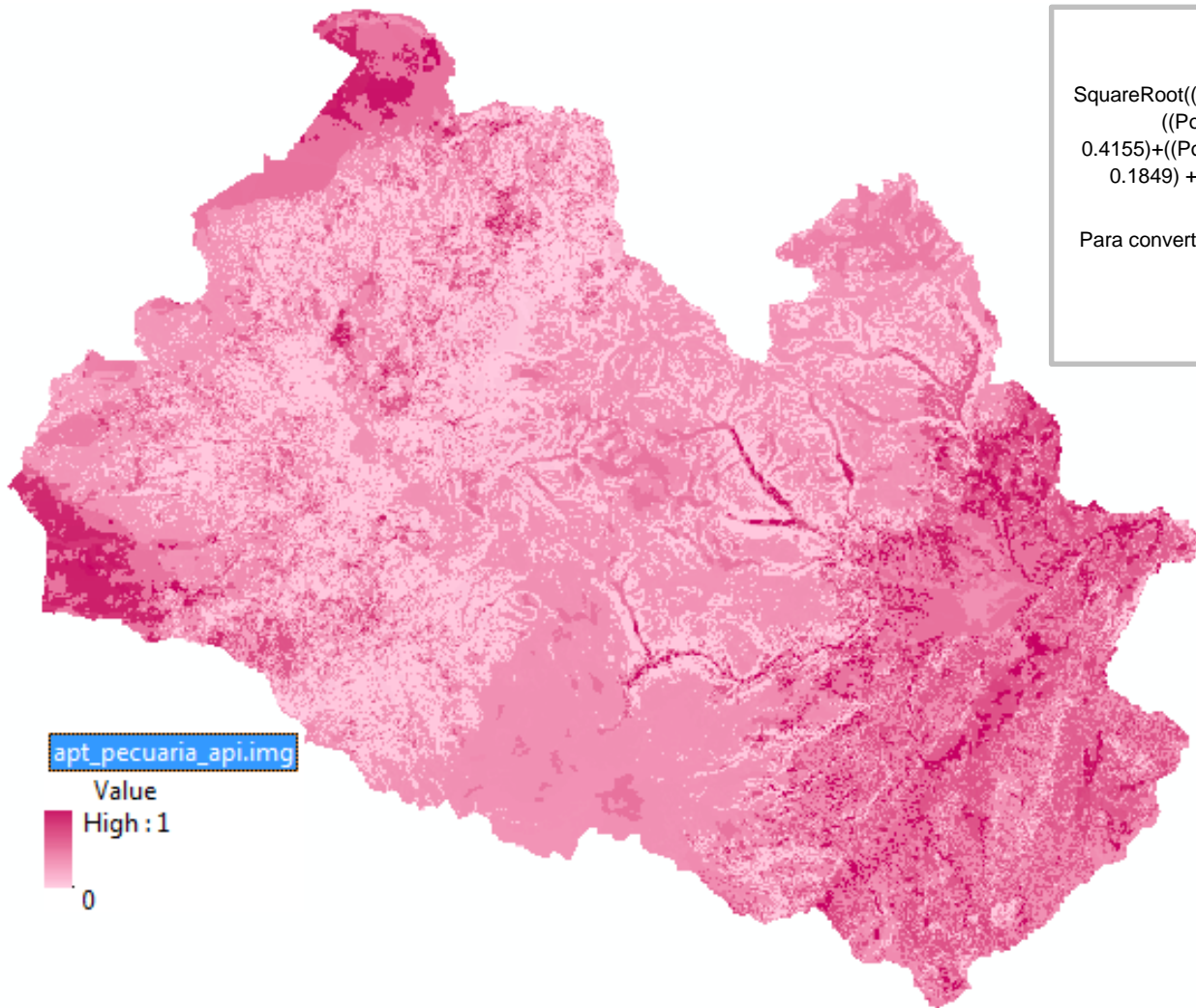
$$\text{SquareRoot}(\left(\left(\text{Power}(\text{"Aptitud\_Agricola"}\backslash\text{uso\_agric\_st.img"}-1,2)\right)*0.2926\right) + \left(\left(\text{Power}(\text{"Aptitud\_Agricola"}\backslash\text{pp\_usoagri\_st.img"}-1,2)\right) * 0.4155\right) + \left(\left(\text{Power}(\text{"Aptitud\_Agricola"}\backslash\text{clasagro\_usoagricola\_st.img"}-1,2)\right)*0.1849\right)+\left(\left(\text{Power}(\text{"Aptitud\_Agricola"}\backslash\text{dist\_via\_st.img"}-1,2)\right) * 0.1070\right))$$

Para convertir los valores de distancia en un mapa de aptitud, se aplica la siguiente expresión

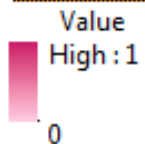
$$(0.998128-\text{"rastercalc102"}) / 0.998128$$

Fuente y Elaboración: Propia, 2015

Mapa 16: Aptitud para uso pecuario con la técnica de Análisis del Punto Ideal - API



apt\_pecuaria\_api.img



API: APTITUD PARA EL USO DE PECUARIA

$$\text{SquareRoot}(((\text{Power}(\text{"Aptitud\_Pecuaria\uso\_pecua\_st.img"}-1,2))^{\ast}0.2926) + ((\text{Power}(\text{"Aptitud\_Pecuaria\pp\_usopecua\_st.img"}-1,2))^{\ast}0.4155)+((\text{Power}(\text{"Aptitud\_Pecuaria\clasagro\_usopecuario\_st.img"}-1,2))^{\ast}0.1849) + ((\text{Power}(\text{"Aptitud\_Agricola\dist\_via\_st.img"}-1,2))^{\ast}0.1070))$$

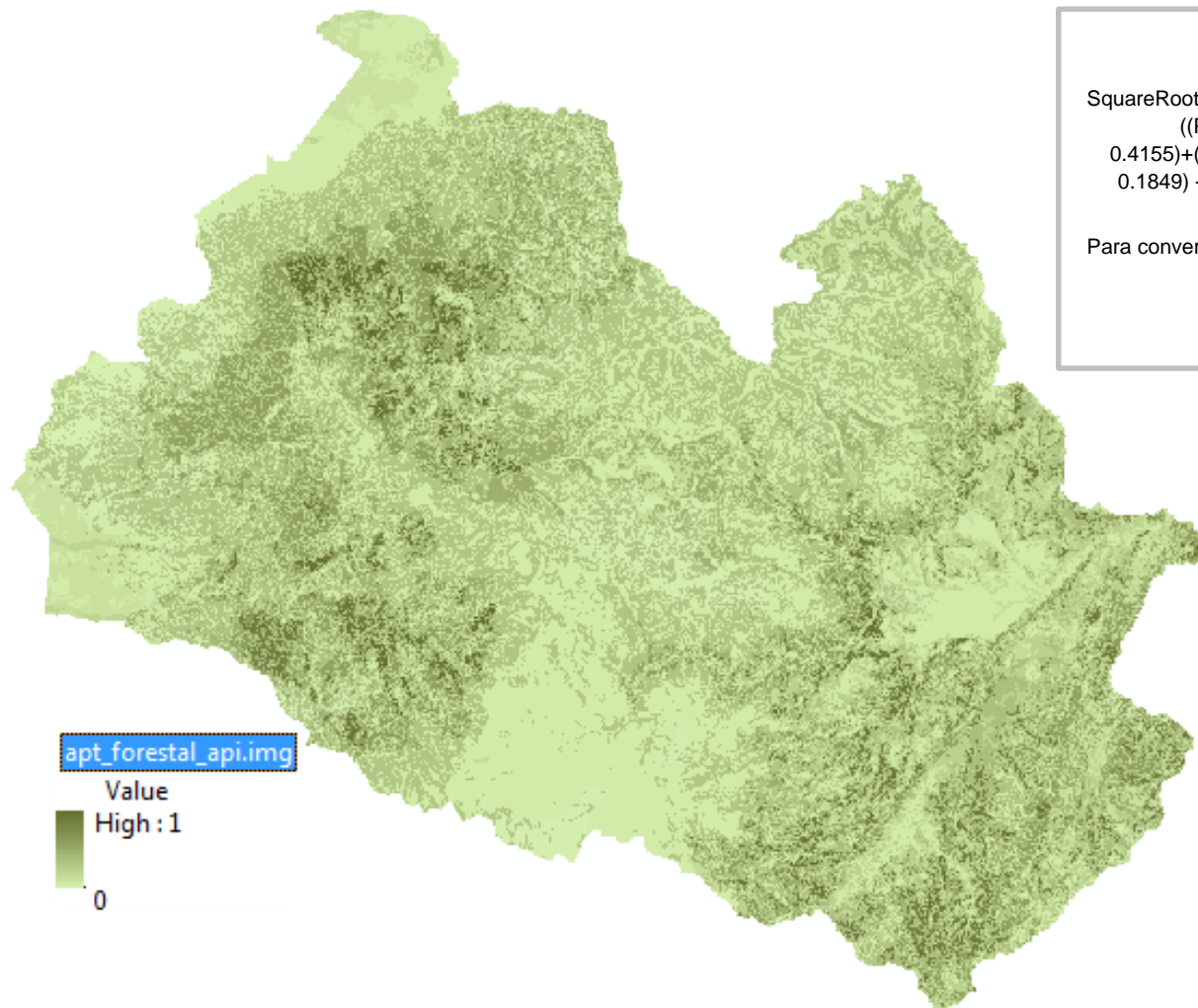
Para convertir los valores de distancia en un mapa de aptitud, se aplica la siguiente expresión

$$(0.998128-\text{"rastercalc102"}) / 0.998128$$

Fuente y Elaboración: Propia, 2015



Mapa 17: Aptitud para uso forestal con la técnica de Análisis del Punto Ideal - API



apt\_forestal\_api.img

Value  
High : 1  
0

API: APTITUD PARA EL USO DE FORESTAL

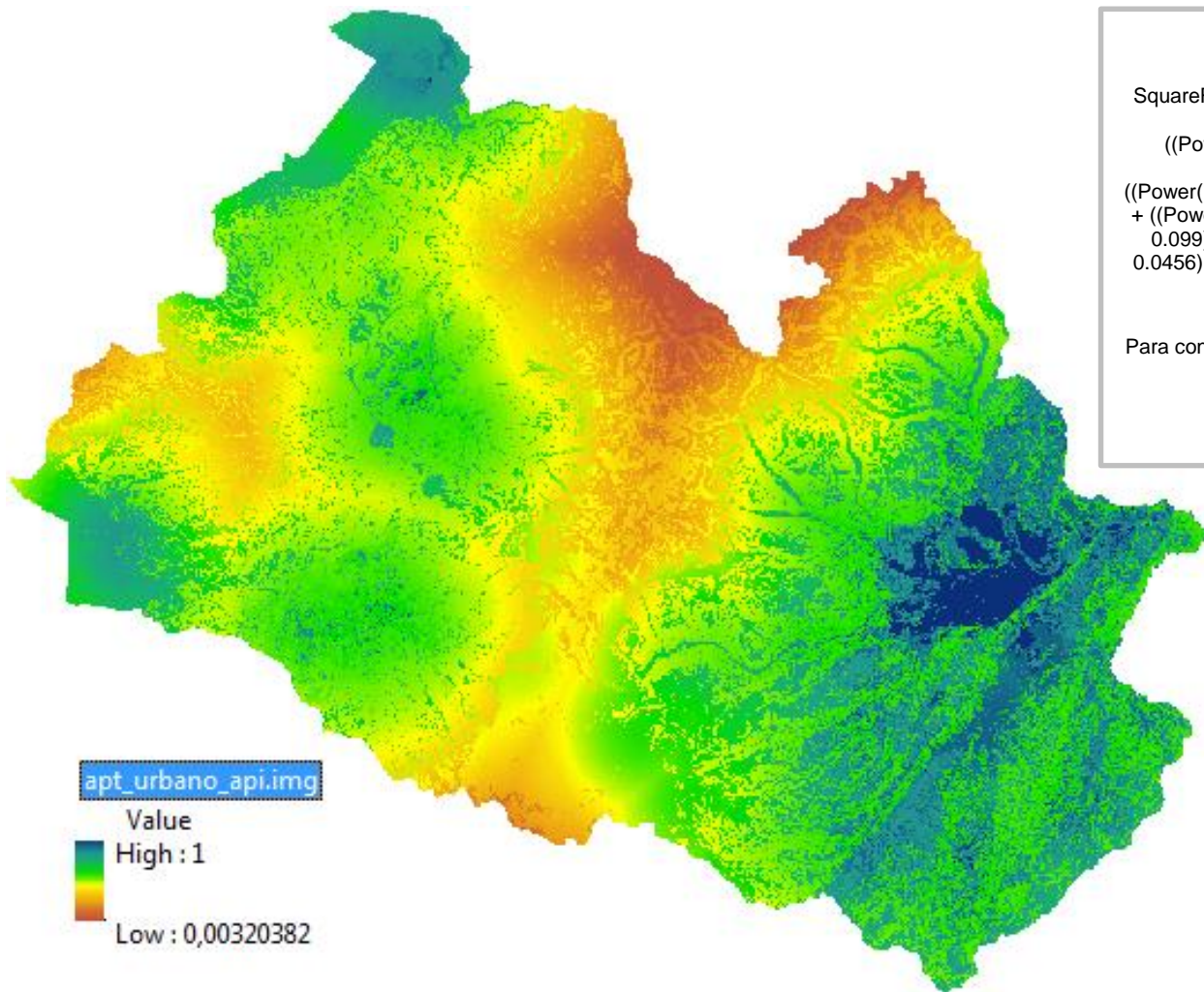
$$\text{SquareRoot}(((\text{Power}(\text{"Aptitud\_Forestal\uso\_forest\_st.img"}-1,2))^*0.2926) + ((\text{Power}(\text{"Aptitud\_Forestal\pp\_usofores\_st.img"}-1,2))^*0.4155)+((\text{Power}(\text{"Aptitud\_Forestal\clasagro\_usofores\_st.img"}-1,2))^*0.1849) + ((\text{Power}(\text{"Aptitud\_Agricola\dist\_via\_st.img"}-1,2))^*0.1070))$$

Para convertir los valores de distancia en un mapa de aptitud, se aplica la siguiente expresión

$$(0.998859-\text{"rastercal"}) / 0.998859$$

Fuente y Elaboración: Propia, 2015

Mapa 18: Aptitud para uso urbano con la técnica de Análisis del Punto Ideal - API



apt\_urbano\_api.img

Value

High : 1

Low : 0,00320382

API: APTITUD PARA EL USO DE URBANO

$$\text{SquareRoot}(\left(\left(\text{Power}(\text{"Factores\_Aptitud\_Uso\_Urbano\_dist\_SAP\_st.img"}-1,2)\right) * 0.3983\right) + \left(\left(\text{Power}(\text{"Factores\_Aptitud\_Uso\_Urbano\_dist\_SAL\_2014\_st.img"}-1,2)\right) * 0.2647\right) + \left(\left(\text{Power}(\text{"Factores\_Aptitud\_Uso\_Urbano\_dist\_pc2014\_st.img"}-1,2)\right) * 0.167\right) + \left(\left(\text{Power}(\text{"Factores\_Aptitud\_Uso\_Urbano\_pp\_usourbano\_st.img"}-1,2)\right) * 0.099\right) + \left(\left(\text{Power}(\text{"Factores\_Aptitud\_Agricola\_dist\_via\_st.img"}-1,2)\right) * 0.0456\right) + \left(\left(\text{Power}(\text{"Factores\_Aptitud\_Uso\_Urbano\_uso\_urbano\_st.img"}-1,2)\right) * 0.0255\right))$$

Para convertir los valores de distancia en un mapa de aptitud, se aplica la siguiente expresión

$$(0.886287 - \text{"rastercalc109"}) / 0.886287$$

Fuente y Elaboración: Propia, 2015



### 3.5.7. Determinación de la capacidad de acogida del territorio empleando técnicas de Evaluación Multi Objetivo - EMO

La Evaluación Multi Objetivo EMO está relacionada de manera directa con las técnicas de Evaluación Multi Criterio EMC, ya que los insumos para operar una EMO son los resultados de aptitud construidos a partir de las técnicas de EMC.

Para determinar la capacidad de acogida del territorio, se emplearán los mapas de aptitud para uso de conservación, agrícola, pecuario, forestal y urbano obtenidos a partir de la aplicación de las técnicas: compensatoria aditiva - Suma Lineal Ponderada y de la técnica compensatoria de punto ideal – Análisis de Punto Ideal.

La evaluación multiobjetivo a ser empleada es la “Localización de Tierras Multi Objetivo” abreviado como MOLA por sus siglas en inglés de *Multi-Objective Land Allocation*.

#### 3.5.7.1. Ponderación de mapas de aptitud

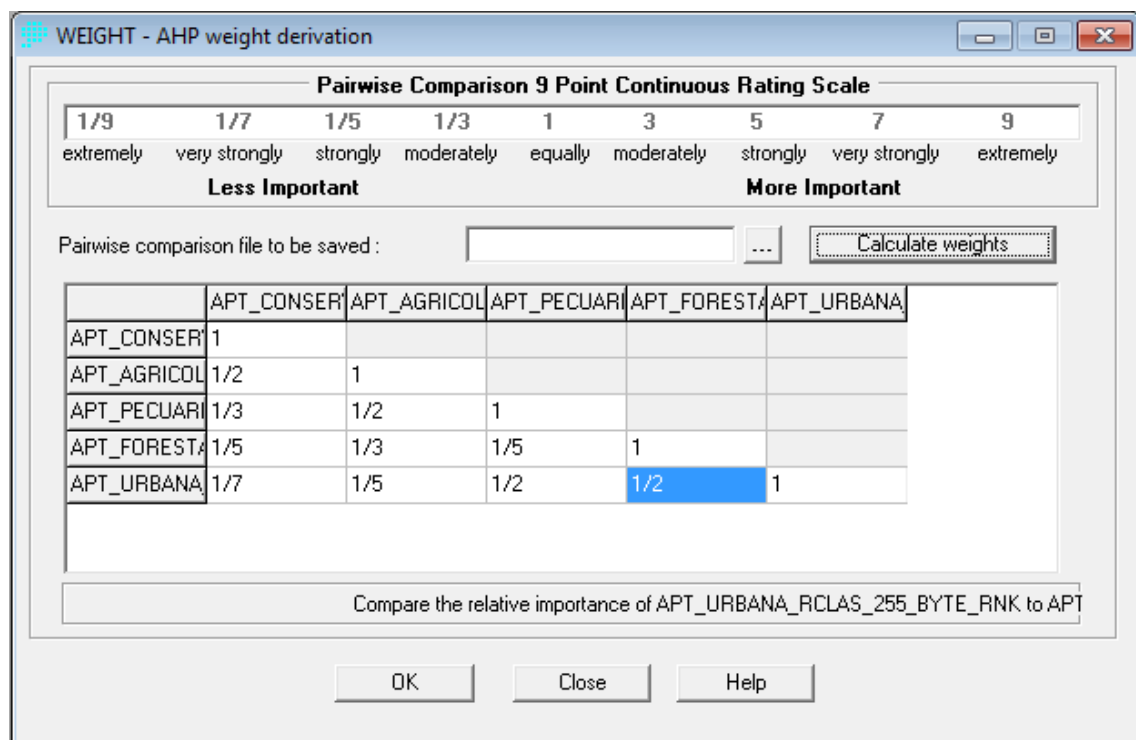
La capacidad de acogida del territorio se determinó para los usos de conservación, agrícola, pecuario, forestal y urbano por lo tanto la información de entrada corresponde a los mapas de aptitud de los mencionados usos.

A este punto los mapas de aptitud constituyen factores del análisis multiobjetivo que permitió obtener la capacidad de acogida del territorio, por lo que fue necesario ponderar los pesos de los factores. A continuación se indica la ponderación de factores para determinar la capacidad de acogida del territorio:

- **Pesos para MOLA**

A continuación se establecen los pesos para cada uno de los factores

Ilustración 36: Proceso para ingresar pesos - API



Fuente y Elaboración: Propia, 2015

Con la definición de esos pesos se tiene los siguientes valores.

El factor de pesos es:

- APT\_CONSERVACION\_RCLAS\_255\_BYTE\_RNK : 0.4312
- APT\_AGRICOLA\_RCLAS\_255\_BYTE\_RNK : 0.2562
- APT\_PECUARIA\_RCLAS\_255\_BYTE\_RNK : 0.1801
- APT\_FORESTAL\_RCLAS\_255\_BYTE\_RNK : 0.0757
- APT\_URBANA\_RCLAS\_255\_BYTE\_RNK : 0.0568

Radio de consistencia = 0.05 - Aceptable

El análisis EMO a través de MOLA requiere como dato de entrada la superficie a ser asignada a cada uso y esto convertido a número de píxeles (celdas).

Tabla 26: Superficie a asignar a los usos del suelo por aptitud

Superficie del cantón Cuenca:	366 533 ha (3 665´ 329 646, 14 m <sup>2</sup> ) Incluido la superficie cubierta por nubes.
Superficie de un píxel de 30m x 30m:	0,09 ha
Número de píxeles en el cantón Cuenca:	4´072 589 píxeles

**Fuente y Elaboración:** Propia, 2015

Para establecer la superficie de uso a ser asignado, se tomó como base los mapas de cobertura vegetal y uso del suelo del año 2010, así como las categorías de ordenación del PD y OT del 2011 y se establecieron los valores para asignar la superficie a los usos de suelo. Cabe recalcar que esta técnica aún no se ha realizado la eliminación de las zonas cubiertas por nubes.

De esta manera se establecen los números de celdas para cada tipo de aptitud, tomando como referencia los porcentajes de superficie ocupados en el mapa de cobertura vegetal del año 2010.

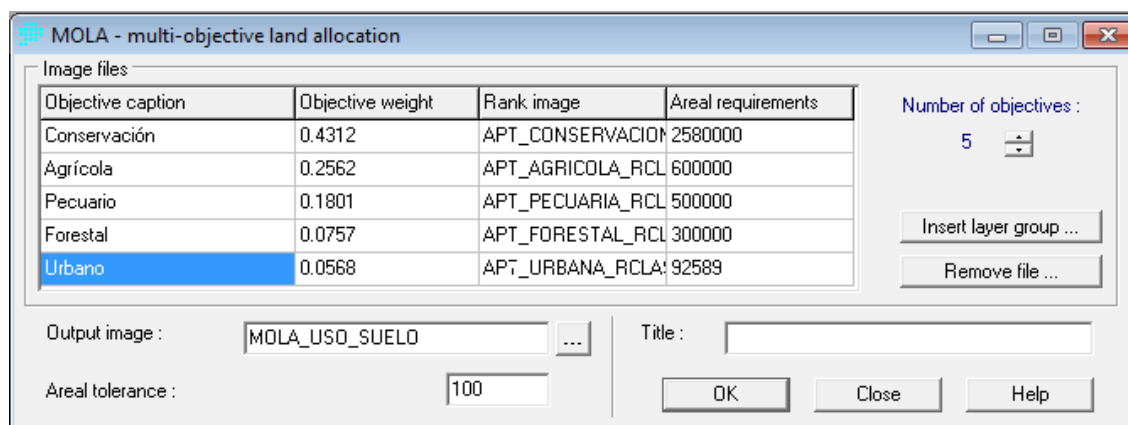
Tabla 27: Superficie asignada para cada aptitud para uso

Uso	Porcentaje	Numero de celdas
Conservación	0,50	2580000
Agrícola	0,20	600000
Pecuario	0,15	500000
Forestal	0,13	300000
Urbano	0,02	92589
<b>TOTAL</b>	<b>1,00</b>	<b>4072589</b>

**Fuente y Elaboración:** Propia, 2015

Se ingresa los datos al módulo MOLA de IDRISI SELVA para realizar el cálculo respectivo.

Ilustración 37: Ingreso de los datos en el módulo MOLA de IDRISI SELVA



Objective caption	Objective weight	Rank image	Areal requirements
Conservación	0.4312	APT_CONSERVACION	2580000
Agrícola	0.2562	APT_AGRICOLA_RCL	600000
Pecuario	0.1801	APT_PECUARIA_RCL	500000
Forestal	0.0757	APT_FORESTAL_RCL	300000
Urbano	0.0568	APT_URBANA_RCLA	92589

Number of objectives : 5

Output image : MOLA\_USO\_SUELO

Areal tolerance : 100

**Fuente y Elaboración:** Propia, 2015

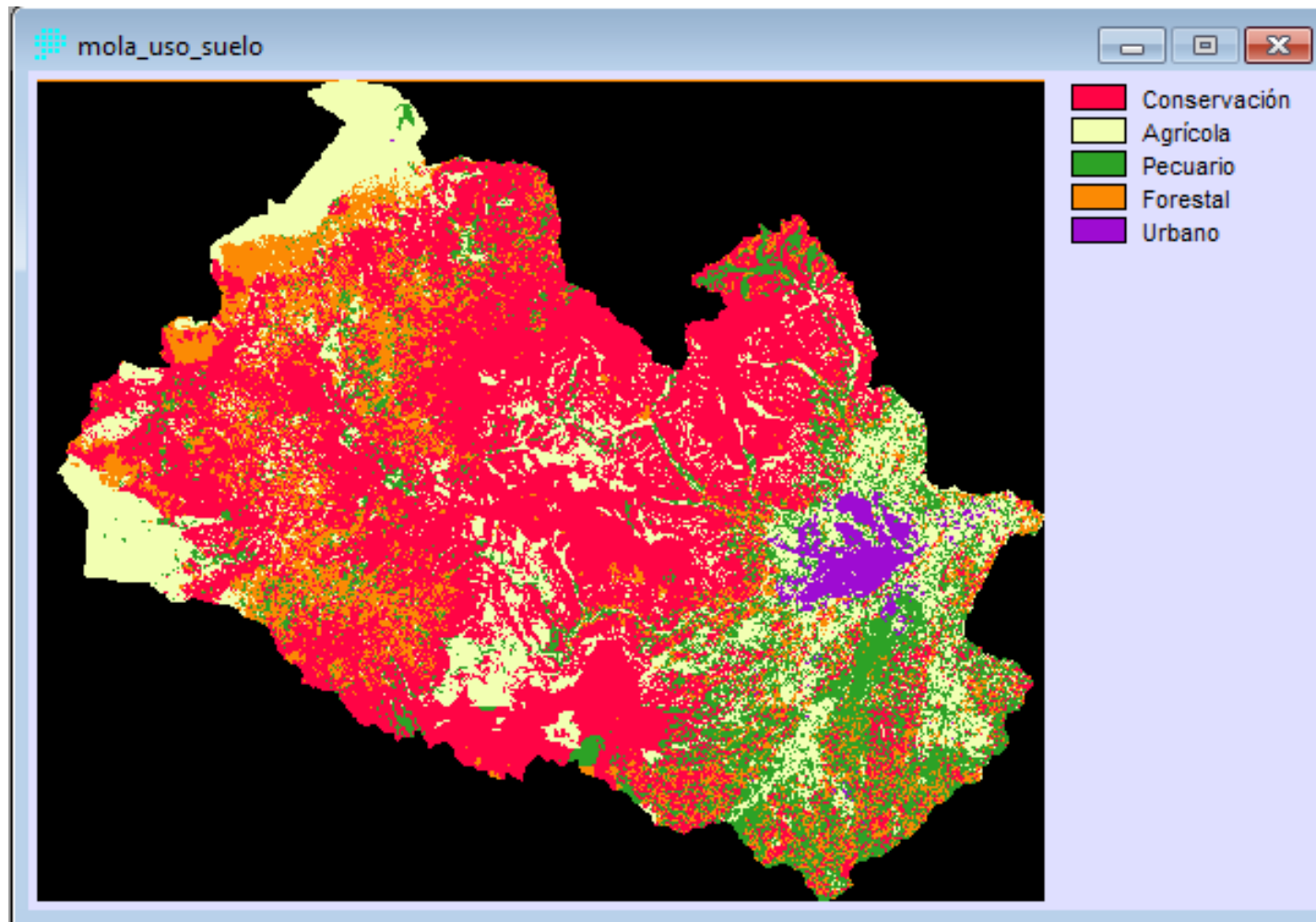
Determinados los valores de ponderación para cada uno de los factores, así como la superficie a ser asignada, se aplicó el Análisis Multi Objetivo aplicando la técnica MOLA en Idrisi.

Cabe indicar que se obtuvieron dos mapas de capacidad de acogida, uno construido con los mapas de aptitud obtenidos tras aplicar la técnica EMC - Suma Lineal Pondera y un segundo modelo de capacidad de acogida empleando los mapas de aptitud tras aplicar el Punto Ideal.

Este es el resultado de la definición del número de celdas y los valores ponderados con la técnica EMC - Suma Lineal Pondera – SLP.

Ahora se construye el mapa con los de capacidad de acogida con la técnica SLP

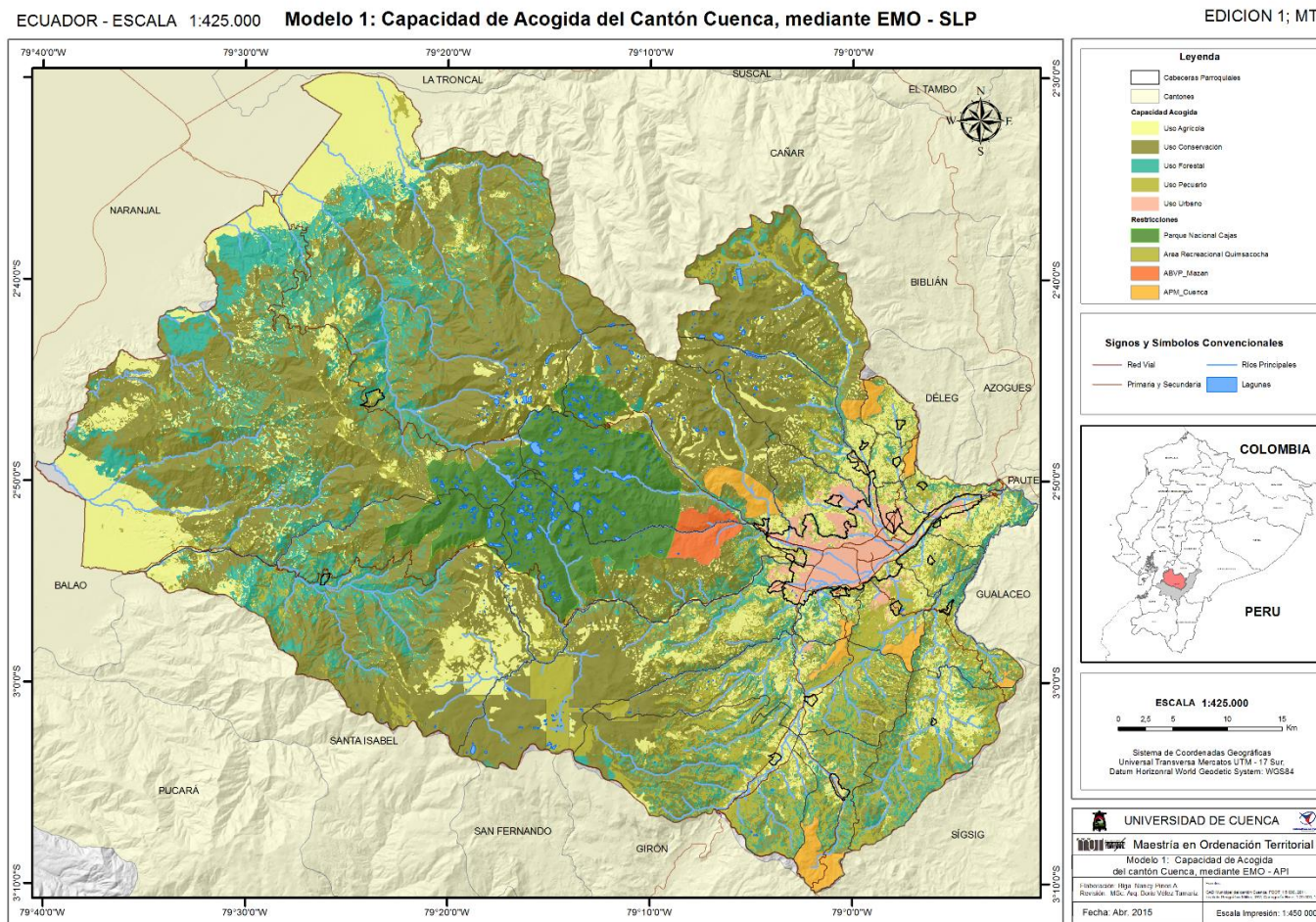
Ilustración 38: Aptitud del uso del suelo en conservación, agrícola, pecuario, forestal y urbano, aplicando la técnica EMO - Suma Lineal Ponderada



Fuente y Elaboración: Propia, 2015



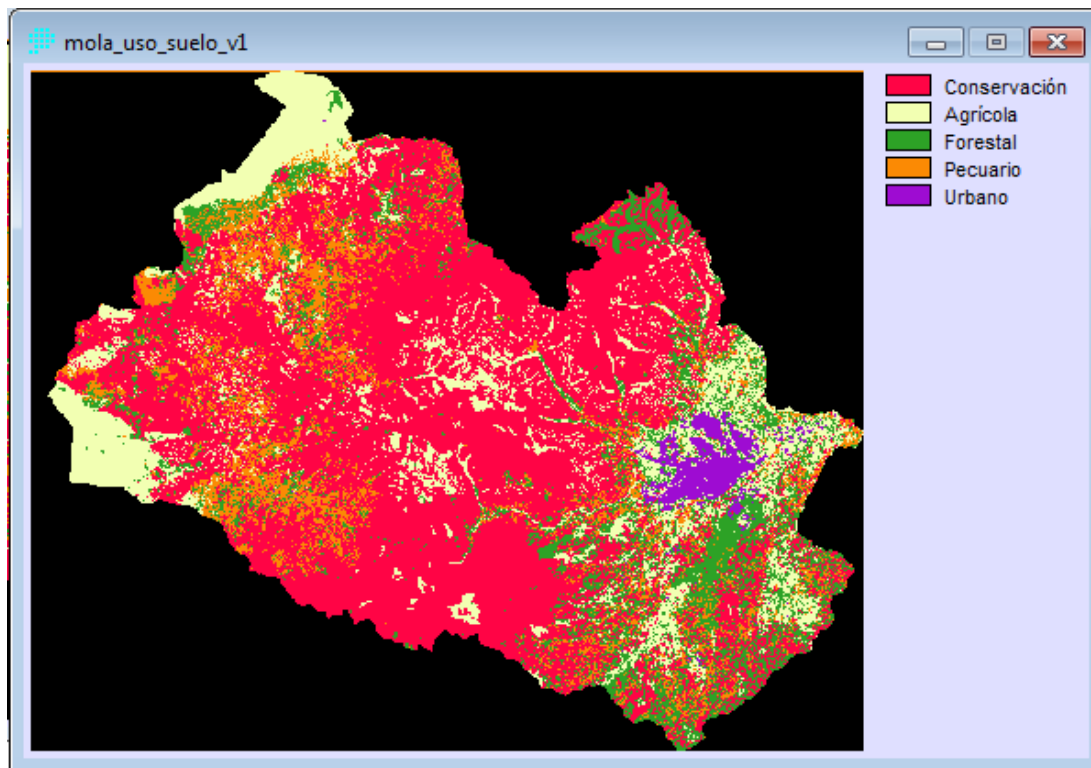
Mapa 19: Aptitud del uso del suelo en conservación, agrícola, pecuario, forestal y urbano, aplicando la técnica EMO - Suma Lineal Ponderada



Fuente y Elaboración: Propia, 2015

Ahora se construye el mapa con los de capacidad de acogida con la técnica API

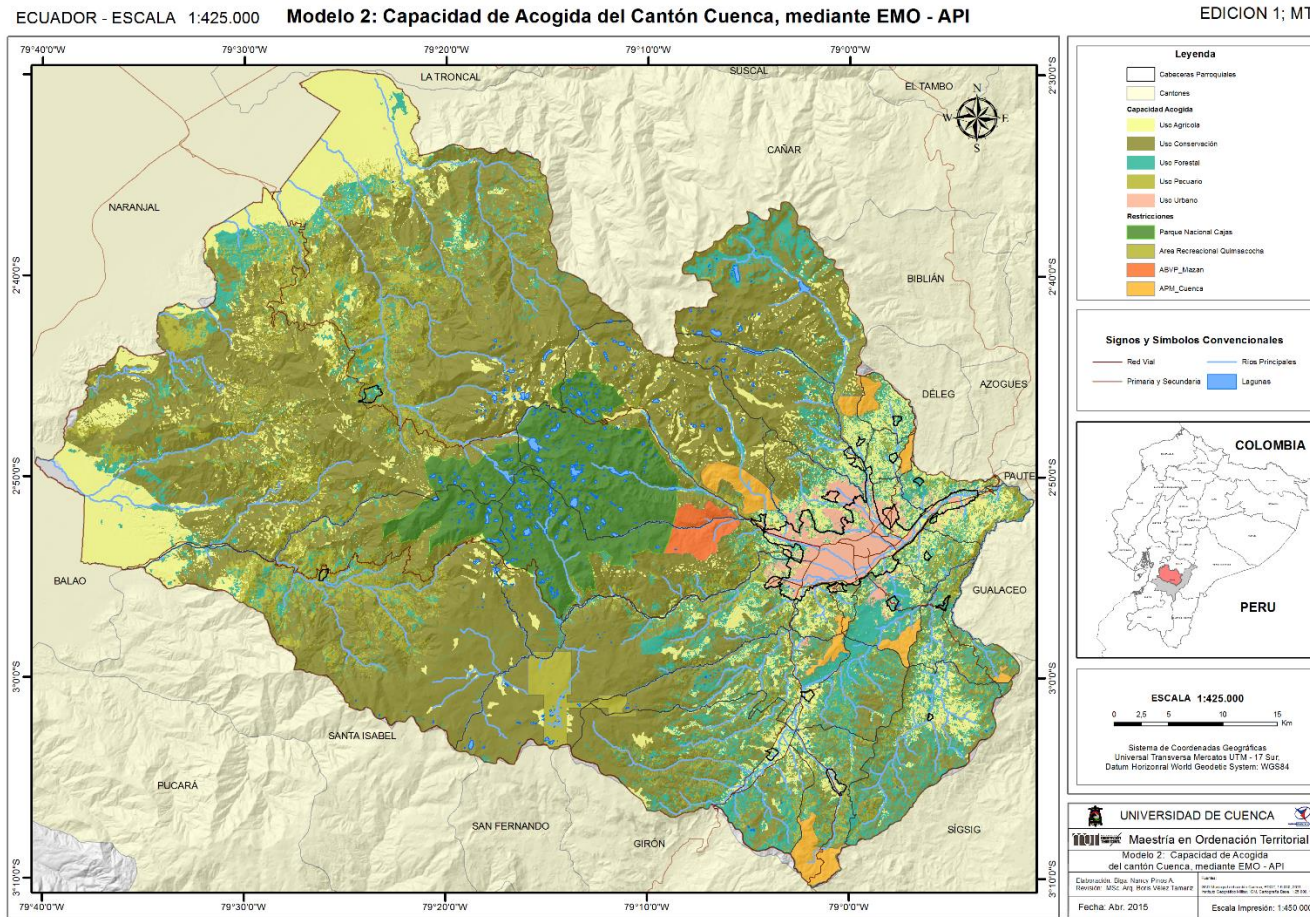
Ilustración 39: Aptitud del uso del suelo en conservación, agrícola, pecuario, forestal y urbano, aplicando la técnica EMO – Análisis del Punto Ideal - API



Fuente y Elaboración: Propia, 2015



Mapa 20: Aptitud del uso del suelo en conservación, agrícola, pecuario, forestal y urbano, aplicando la técnica EMO – Análisis del Punto Ideal – API.



Fuente y Elaboración: Propia, 2015

En la siguiente tabla podemos revisar las áreas de acuerdo a los parámetros ingresados en cada técnica para la capacidad de acogida del territorio.

Tabla 28: Diferencia en el resultado de la capacidad de acogida con las dos técnicas aplicadas Suma Lineal Ponderada SLP y Análisis al Punto Ideal API

Capacidad de Acogida	Modelo 1 SLP		Modelo 2 API	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
Capacidad para uso Conservación	153.490,0	41,9	173.506,5	47,3
Capacidad para uso Agrícola	61.218,6	16,7	53.424,6	14,6
Capacidad para uso Pecuario	48.875,3	13,3	37.353,5	10,2
Capacidad para uso Forestal	45.707,1	12,5	45.024,8	12,3
Capacidad para uso Urbano	7.152,9	2,0	7.153,1	2,0
<b>Restricciones</b>				
Parque Nacional Cajas	29.389,4	8,0	29.389,4	8,0
Área Nacional de Recreación Quimsacocha	3.204,3	0,9	3.204,3	0,9
ABVP Mazán	2.395,9	0,7	2.395,9	0,7
Áreas Protegidas Municipales	5.942,7	1,6	5.942,7	1,6
Cuerpos de Agua (lagunas)	1.157,0	0,3	1.157,0	0,3
Márgenes de Protección	7.989,0	2,2	7.989,0	2,2
<b>TOTAL</b>	<b>366.522,1</b>	<b>100</b>	<b>366.540,9</b>	<b>100</b>

Fuente y Elaboración: Propia, 2015

Comparando los resultados de las dos técnicas aplicadas para la construcción del mapa de capacidad de acogida para los usos de suelo en conservación, agrícola, pecuario, forestal y urbano para el cantón Cuenca, podemos observar que la técnica del Análisis del punto ideal modela mayor territorio para uso de conservación que la técnica de Suma Lineal Ponderada, pero en ambos casos se mantiene la misma tendencia con respecto a los porcentajes de los diferentes usos del suelo.

Esta información construida, sirvió de insumo para la elaboración para el mapa al año 2030, para el cual, se incorporó el resultado obtenido con la técnica de Análisis del Punto Ideal, ya que es el que mejor se ajusta a la realidad del territorio.

En la primera simulación al 2010 sirvió para obtener datos de modelado de cambio de cobertura del suelo y validar la certeza de esa proyección.

En la siguiente tabla se observa las áreas de transición (Markov) en los periodos de simulación para obtener el escenario al 2030.

Tabla 29: Probabilidad de cambio del uso del suelo al año 2030

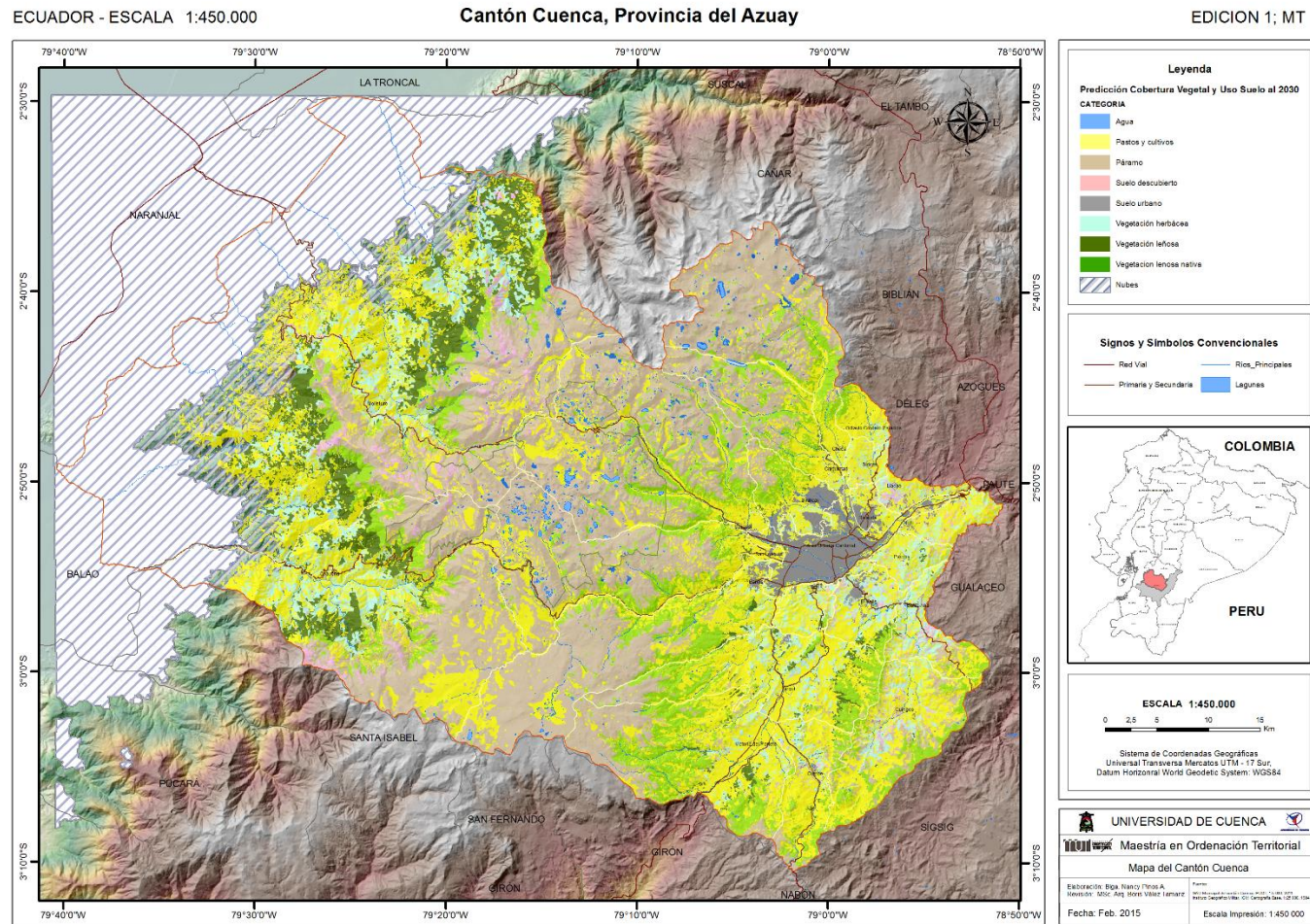
		2030							
	Matriz de Proceso de cambio	Agua	Pastos y cultivos	Paramo	Suelo sin vegetación	Vegetación Leñosa	Vegetación herbácea	Vegetación leñosa nativa	Suelo urbano
2010	Agua	0,2511	0,0288	0,3094	0,0026	0,0383	0,0484	0,3208	0,0006
	Pastos y cultivos	0,0021	0,4551	0,1883	0,0049	0,0509	0,2347	0,0573	0,0060
	Paramo	0,0061	0,0555	0,8356	0,0019	0,0019	0,0087	0,0901	0,0001
	Suelo sin vegetación	0,0025	0,1259	0,3216	0,0188	0,0358	0,4553	0,0236	0,0161
	Vegetación Leñosa	0,0038	0,1330	0,0142	0,0102	0,3032	0,5216	0,0042	0,0099
	Vegetación herbácea	0,0020	0,2173	0,0309	0,0131	0,0702	0,6279	0,0079	0,0307
	Vegetación leñosa nativa	0,0048	0,0672	0,3335	0,0018	0,0023	0,0103	0,5800	0,0000
	Suelo urbano	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000

Fuente y Elaboración: Propia, 2015

A primera vista podemos observar que la cobertura de páramos continúa su tendencia de cambio a cobertura sin vegetación. La cobertura de pastos y cultivos permanecen en crecimiento incorporando áreas de paramo y vegetación leñosa y herbácea. Se puede observar que el tendencial al 2030 enuncia la intervención en zonas de protección a pesar de las restricciones con las que el territorio cuenta, el área urbana tiene un avance en pequeñas zonas donde se podría presumir de una consolidación, pero hay que considerar la categoría de pastos y cultivos viene acompañada de una vivienda aislada y ésta categoría tiene el mayor crecimiento dentro del territorio proyectado al futuro.



Mapa 21: Modelo predictivo al 2030 del cambio de uso del suelo del cantón Cuenca



Fuente y Elaboración: Propia, 2015

### 3.6. Validación de los modelos

De acuerdo a varios expertos en este tema, no existe técnicas de simulación que sea una más recomendada que otra, más bien la aplicación depende de la información con la que cuenta y del contexto del territorio donde se va aplicar, por lo tanto no existe modelos erróneos o aceptables.

La validación se hizo comparando el resultado modelado al año 2010 con el mapa de uso de suelo al año 2010, previo un proceso de ajuste en su nomenclatura y tamaño de la celda, los resultados de predicción fueron muy similares tanto para el proyectado como para el real. Se utilizó el índice Kappa para la validación de los modelos, es un método estadístico y verifica la cantidad de celdas de cada categoría. El valor es 0.84, el cual valida el modelo ocupado en esta investigación.

#### 3.6.1. Comparación de los diferentes escenarios realizados

Al realizar la comparación entre las métodos de construcción de escenarios con las diferentes técnicas que se han utilizado en esta investigación, podemos manifestar que entre los escenarios tendenciales existen semejanzas en los resultados globales que se obtienen, es decir, la tendencia es la misma, el cambio de las coberturas con vegetación natural pasan a ser de uso antrópico, es decir a actividades agrícolas y ganaderas; la zonas de áreas urbanas presentan la misma dinámica de tendencia a incrementar.

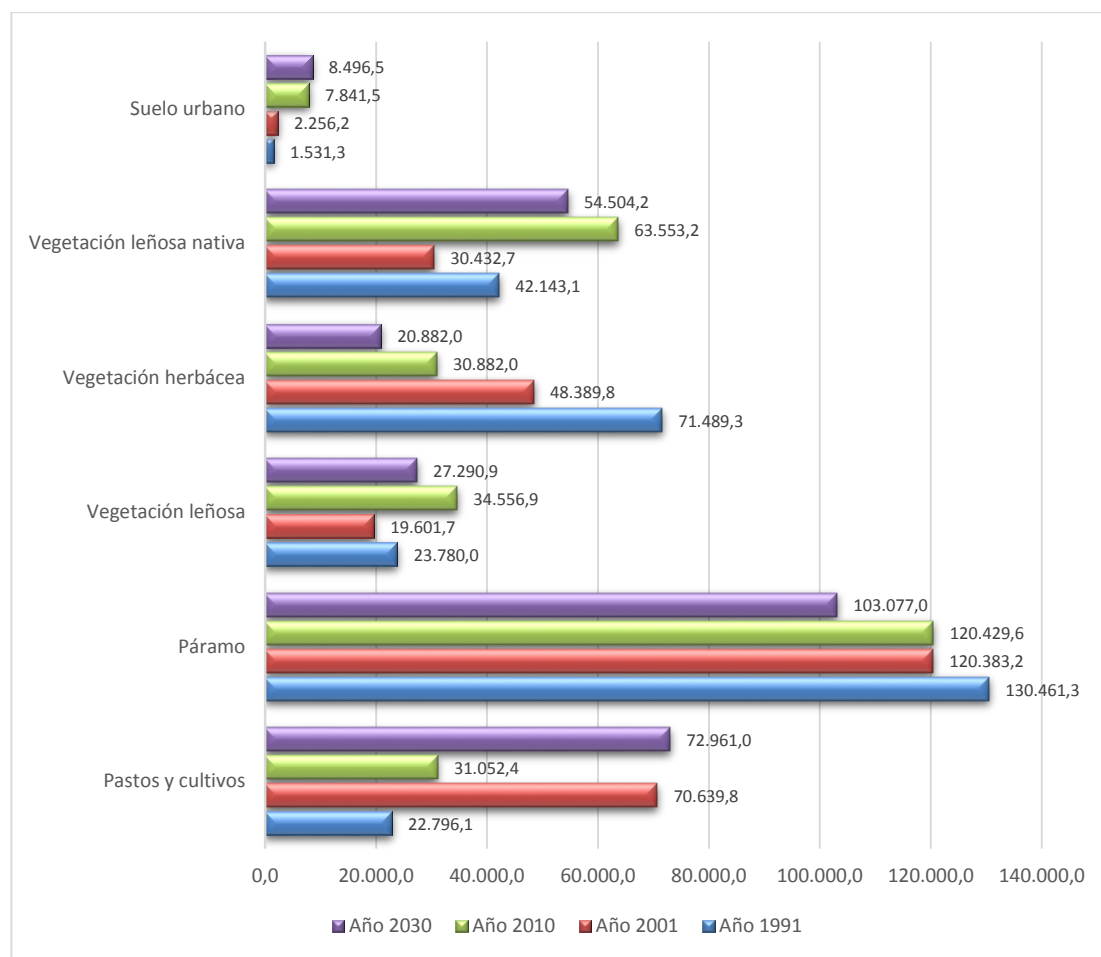
Vale aclarar que los modelos para la construcción de escenarios futuros parten de los análisis históricos que realiza el modelo matemático, el uso de las cadenas de markov y autómatas celulares, son las más adecuadas para la construcción de escenarios de tendencia, en ambos se visibiliza procesos de deforestación, acelerado crecimiento urbano y el incremento de áreas para uso agrícola y ganadero, generando las incompatibilidades.

Con los modelos óptimos el análisis sigue siendo un tanto irreal, pues mientras éstos muestran la aptitud del suelo, la tendencia sigue afectando de manera muy drástica los recursos con los que cuenta el territorio.

A más de esto es necesario tener las claridades para establecer modelos que respalden las políticas del ordenamiento, si bien actualmente el cantón Cuenca, presenta un porcentaje de uso del suelo con actividades agrícolas, una disminución de su cobertura vegetal natural, y un desordenado crecimiento de su área urbana, hay que considerar las limitaciones que el territorio posee, tanto para el desarrollo urbanizaciones como de actividades productivas, como la pendiente mayor a 30% que limita el desarrollo de vivienda y una pendiente mayor al

50% que restringe las actividades agro productiva, además el cantón tiene un amplio porcentaje de su territorio en áreas de protección con alto valor ecológico haciéndolo un cantón con vocación para la conservación por lo que es necesario establecer las variables que intervienen en el desarrollo de la formulación de los escenarios.

Ilustración 40: Dinámica de cambio de superficie en las categorías de uso del suelo en 1991, 2001, 2010 y 2030



Fuente y Elaboración: Propia, 2015

## 4. CAPITULO IV: CONCLUSIONES

### 4.1. Conclusiones

- A las imágenes satélites se les realizó las correcciones radiométricas y geométricas para contar con las características aceptables para este tipo de análisis.
- Las diferentes metodologías para el análisis de cambio de uso de suelo que se aplicó a las imágenes, nos dieron resultados con valores muy similares a la realidad territorial del cantón.
- En el análisis de cambio de uso del suelo en el cantón demuestra la tendencia de crecimiento de la categoría de pastos y cultivos y el área urbana. Y se ve la disminución de las coberturas naturales a zonas intervenidas.
- Las zonas próximas al área urbana son las que mayor proceso de cambio presentan y las que tienen más probabilidad de cambio a una cobertura no natural.
- Para la determinación de la capacidad de acogida se analizaron variables sobre todo de infraestructura y servicios, ya que se la información a la que se tiene acceso. Variables sociales o económicas no están disponibles a una escala local.
- Las variables más relevantes para la determinación de las áreas urbanas corresponden a red vial, la red de agua potable, red de alcantarillado y servicio eléctrico, ya que delimitan de mejor manera las áreas óptimas para este uso.
- La determinación del mapa de capacidad de acogida o aptitud del suelo, requiere de una metodología muy detallada y laboriosa, pero nos permite obtener información a una escala más grande.
- Se debe recalcar que el ordenamiento territorial es una rama multidisciplinaria, a los modelos construidos en esta investigación se le puede incorporar más variables que influyan en el territorio.
- Para la predicción de los cambio de las coberturas de uso del suelo en el cantón Cuenca, entre 1991 y 2001, se utilizó varios métodos como las cadenas de Markov, que realiza un análisis de las coberturas en dos periodos de tiempo, generan un historial de cambio en cada categoría, luego se realizó el modelo de predicción con los Autómatas Celulares de Markov que en base al historial obtenido previamente, aplica un modelo lineal de tendencia.
- El módulo de Land Change Modeler de Idrisi, facilita el análisis de cambio para el año 2010 y 2030; ya que a más de generar las tablas de probabilidad de cambio, genera mapas que facilitan la interpretación de donde se realizan esos cambios, haciendo más fácil la interpretación de los mismos.
- El módulo Land Change Modeler, permite incorporar las restricciones para la simulación de cambio de la cobertura del suelo.

- La construcción de escenarios futuros permite evidenciar el efecto que puede provocar ciertas modificaciones en los uso del suelo.
- Para la formulación de los escenarios se utilizó información secundaria de fuentes oficiales, y el uso de los sistemas de información geográfica fueron vitales para realizar los respetivos análisis propuestos.
- La construcción de los escenarios son muy susceptibles de sugerencias por parte del investigador, por lo que pueden ser manipulables y eso influya en que no sea muy prácticos para su aplicación. Existen metodologías planteadas y los insumos dependen del objetivo que se establezca, pero la fortaleza de estos análisis esta en obtener e interpretar la información de una manera lógica y objetiva, que facilite la formulación de políticas públicas que mejoren la dinámica del territorio de una forma equitativa y bajo el enfoque de las políticas nacionales.
- El resultado de estos escenarios aún están muy lejos de ser considerados por las autoridades como insumo en su gestión y planificación.



## 5. CAPITULO V: RECOMENDACIONES

### 5.1. Recomendaciones

- Para facilitar la aplicación de las metodologías planteadas en esta investigación es recomendable utilizar mapas de cobertura de suelo analizados con la misma metodología, categorías, criterios y escalas, esto permitirá una mayor certeza en los resultados.
- Los modelos empleados para la construcción del historial de cambio de uso del suelo, así como la generación de los escenarios, son bastante asimilables y con un rango de confianza aceptable.
- En otras investigaciones se podría utilizar otros métodos de simulación de cambios, para así contar con una mayor disponibilidad de información con otros modelos de probabilidad de cambio.
- La obtención de la información de las categorías de transición al usar un modelo de cruce de variables es recomendable reclasificarlas y manejar tres o máximo cuatro variables, lo que facilitará el análisis de cada una de las categorías de uso del suelo.
- El proceso de análisis de predicción y cambio de coberturas requiere conocimientos avanzado en el manejo de herramientas como los SIGs, ya que el desarrollo de esta investigación, requirió indagar a más profundidad el manejo de los programas usados.
- La validación de los modelos solo pudieron hacerse con métodos de geomática, ya que se debería esperar un lapso de 10 años para verificarlo en campo.
- La construcción del modelo tendencial nos indica que para conseguir un ordenamiento de las actividades económicas en el territorio se deben plantear otros modelos así como el normativo, y de esta manera por analizar como repercutiría esos factores en el modelo.
- El objetivo la construcción de escenarios en los cambios de los usos del suelo es anticiparse a las consecuencias para apoyar la toma de decisiones en política públicas y gestión del territorio.
- El resultado de la aplicación de estos métodos depende de la calidad y fiabilidad de la información con la que se cuenta y su escala de la misma.
- Se puede replicar esta metodología en los planes de ordenamiento territorial, ya que muchos de ellos no consideran necesario el desarrollo de estas técnicas por cuanto requieren de personal especializado.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Avila, R. (2014), "*Direccionalidad del crecimiento poblacional e identificación de sectores futuros desabastecidos de servicios básicos para la toma de decisiones en ordenamiento territorial*", Tesis de Maestría en Geomática con mención en ordenamiento territorial, universidad del Azuay.
- Barredo Cano, J. I. (1996): *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Madrid, Ed. RA-MA.
- Baquero, F.; Sierra, R.; L. Ordóñez, M. Tipán, L. Espinoza, M. B. Ribera y P. Soria. (2004). "*La Vegetación de los Andes del Ecuador. Memoria explicativa de los mapas de vegetación: potencial y remanente a escala 1:250.000 y del modelamiento predictivo con especies indicadoras*". EcoCiencia / CESLA / Corporación EcoPar / M AG SIGAGRO / CDC - Jatun Sacha / División Geográfica - I G M. Quito.
- Banco Interamericano de Desarrollo – BID (2014) Informe final del Estudio CE 3, "*Crecimiento urbano de la ciudad de Cuenca*", GADM del cantón Cuenca.
- Brown, D.G., P. Goovaerts, A. Burnicki, and M. Li. (2002). "*Stochastic simulation of land-cover change using geostatistics and generalized additive models*". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 65:1051-1061.
- Buzai, G.D., Baxendale, C.A., 2006. "*Análisis Socioespacial con Sistemas de Información Geográfica*". Editorial GENEPA. Buenos Aires, Argentina. 397 pp.
- Buzai, G.D. (2007). *Actualización de cálculos y distribuciones espaciales a través de cadenas de Markov y autómatas celulares: Pérdida de suelos en el área metropolitana de Buenos Aires* – 2001. En: Matteucci, S.D. (Ed.) *Panorama de la Ecología de Paisajes en Argentina y Países Sudamericanos*. Ediciones INTA. Buenos Aires. pp. 433-450.
- Bosque, J. (2001). "*Planificación y gestión del territorio. De los SIG a los Sistemas de ayuda a la decisión espacial (SADE). El Campo de las Ciencias y las Artes*", 138, 137-174.
- Camacho Olmedo, M.T., Molero Melgarejo, E. y Paegelow, M. (2010): "*Modelos geomáticos aplicados a la simulación de cambios de usos del suelo. Evaluación del potencial de cambio*". En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de

Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 658-678. ISBN: 978-84-472-1294-1.

Cárdena s, A., (2005), "*Prognosis espacial y análisis multitemporal de cambio de cobertura vegetal y uso del suelo del cantón Baños (1991 - 2004), Tasas de cambio*", EcoCiencia, Quito, Ecuador, 2005.

Clavero, I., Santos, M., Navarro, R., Guerrero, J.J., Cáceres, F. Moreira, J.M. (2010): *2Implementación de un sistema de escenarios futuros sobre el mapa de usos de suelo de Andalucía*". En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 759-776. ISBN: 978-84-472-1294-1.

GADM Cuenca, (2011). "*Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Cuenca. Cuenca*", Ecuador.

GAD Municipal Cuenca, (2014) "*Ordenanza: "Reforma, Actualización, Complementación y Codificación de la Ordenanza que Sanciona el Plan de Ordenamiento Territorial del Cantón Cuenca, Determinaciones para el Uso y Ocupación del Suelo Urbano"*", Municipio de Cuenca.

Chuvieco, E. (2000): "*Fundamentos de Teledetección Espacial*", 3ra. Edición revisada. Madrid. RIALPI Ciencia, 568 pág.

Chuvieco, E. (2007): "*Teledetección Ambiental, La Observación de la Tierra desde el espacio*", 3ra. Edición. Madrid. Ariel Ciencia, 586 pág.

Diforpa, (2007). "*Proyecto Diversidad Forestal de la Cuenca del Paute (DIFORPA)*", Universidad del Azuay.

Gallardo Beltrán. M. (2014). Tesis Doctoral: "*Cambios de usos de suelo y simulación de escenarios en la Comunidad de Madrid*". Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Geografía e Historia. Departamento de Geografía Humana.

Gómez Delgado, M. y Barredo Cano, J. I. (2005). "*Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio aplicados al ordenamiento del territorio*". Paracuellos de Jarama, Editorial Ra-Ma, 2º Edición.

- Gómez Orea, D., Gómez Villarino, A. (2013). “*Ordenación del Territorio*”. Madrid. Ed. Mundi Prensas. 3° Edición.
- Glosario, (2006). “*Sistemas y análisis de la información geográfica, manual de autoaprendizaje con ArcGIS*”, RA-MA Editorial, Madrid, Pág. 884
- Mejía, V. (2014). “*El Proceso de urbanización en Cuenca, Ecuador*”. Tesis Master Universitario en Gestión, Valoración Urbana. Universidad Politécnica de Cataluña. 88 pág.
- Ministerio del Ambiente (2007) “*Estimación de la Tasa de Deforestación del Ecuador continental*”, Ministerio del Ambiente.
- Moreno Jiménez. (2006). “*Sistemas y análisis de la información geográfica, manual de autoaprendizaje con ArcGIS*”, RAMA Editorial, Madrid, Pág. 4
- Moreno Santillan, R. (2013). “*Cálculo de la tasa de deforestación anual en el periodo 2001-2011 en la provincia de Tambopata con imágenes de NDVI (MODIS) DE MODIS, mediante relación de ajuste de recta*”. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE
- Paegelow, M., Camacho Olmedo, M. T. y Menor Toribio, J. (2003): “*Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje*”, GeoFocus (Artículos), nº 3, 2003, p. 22-44. ISSN: 1578-5157.
- Pinilla, C. (1995): “*Elementos de Teledetección*”. Madrid. RAMA, 313 pág.
- Rubio Blanco. D. (2012). Tesis Doctoral: “*Diseño de un modelo metodológico para la fase de prospectiva en los estudios de ordenamiento territorial y su aplicación a algunos casos centroamericanos*”. Departamento de Proyectos y Planificación Rural. Escuela Técnica superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid.
- Ruiz, V., Savé, R., Herrera, A. 2013. Análisis multitemporal del cambio de uso del suelo, en el Paisaje Terrestre Protegido Miraflores Moropotente Nicaragua, 1993 – 2011. Ecosistemas 22(3):117-123. Doi.: 10.7818/ECOS.2013.22-3.16.
- SENPLADES- 2013. República del Ecuador, Plan Nacional de Desarrollo. Plan Nacional del Buen Vivir 2013 - 2017: Construyendo un Estado Plurinacional e Intercultural. Quito: Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. 519 p

Universidad Santiago de Compostela. *Curso de Doctorado. Análisis Territorial. Planificación de usos del suelo.* URL: [<http://laborate.usc.es/files/analisis-territorial-planificacion-usos-de-suelo-apuntes-curso-doctorado.pdf>]

Universidad Santiago de Compostela. (2014). *Practica 1: Aplicación de regresión logística, Cadenas de Markov y autómatas celulares para la simulación del cambio de uso del suelo.* Convenio ECUIDTI – MASTERRA.

Universidad Santiago de Compostela. (2014). *Practica 3: Evaluación de la aptitud de la tierra para usos específicos mediante técnicas de evaluación multicriterio.* Convenio ECUIDTI – MASTERRA.

Universidad Santiago de Compostela. (2014). *Practica 4: Diseño de mapas de usos del suelo mediante evaluación multicriterio y algoritmos de optimización espacial.* Convenio ECUIDTI – MASTERRA.

Tello, E., R. Garrabou, X. Cussó y J. Olarieta. (2008). Una interpretación de los cambios de uso del suelo desde el punto de vista del metabolismo social agrario. La comarca catalana del Vallés, 1853-2004. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica* 7: 97-115.

Salvatierra, C. (2000). Análisis de la cobertura vegetal y el uso de la tierra con el uso de sensores remotos en la Mojana, Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi

Sarría Pablo, Y., Becerra Lois, F., (2006). Un estudio prospectivo aplicado al ordenamiento del territorio de la provincia Cienfuegos. *Gestión Ambiental y Sostenibilidad. Revista Gestipolis.* Online URL: [<http://www.gestipolis.com/canales6/ger/estudio-de-ordenamiento-territorial.htm>]