

ANÁLISIS, MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN ESPACIAL DEL
CAMBIO DE COBERTURA DEL SUELO, ENTRE LAS AREAS
NATURALES Y LAS DE ORIGEN ANTRÓPICO EN LA
PROVINCIA DE NAPO (ECUADOR), PARA EL PERÍODO 1990
- 2020

Tesis de Maestría presentada por
JORGE RENE HURTADO PIDAL

Ante la Facultad de Ingeniería de la
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA
para optar al Grado Académico de

MAGÍSTER EN GEOMÁTICA

Director de Tesis: Ing. Jorge Sisti.
Codirector: Ing. Leandro Soto.

Jurados de Tesis:
MSc. Miriam Presutti.
Dra. Analía Argerich.
Mg. Ing. Guillermo Jelinski.

La Plata, 2 de Julio de 2014

para mis amados padres...

INDICE GENERAL

RESUMEN	8
CAPITULO I. INTRODUCCION.	9
1.1. JUSTIFICACIÓN. (PROYECTO)	9
1.2. IMPORTANCIA. (MODELACIÓN).....	9
1.3. OBJETIVOS.....	10
1.4. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.	11
CAPITULO II. ANTECEDENTES.	12
2.1. BREVE SÍNTESIS DE LOS ESTUDIOS Y PROYECTOS SOBRE “COBERTURA DEL SUELO” Y “CAMBIO DE COBERTURA DEL SUELO”, EN EL ECUADOR.	12
2.2. BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS ÁREAS NATURALES Y LAS DE ORIGEN ANTRÓPICO EN LA PROVINCIA DE NAPO (ECUADOR).....	14
2.3. MODELACIÓN DEL CAMBIO DE COBERTURA DEL SUELO – TEORÍA Y TÉCNICAS (GENERALIDADES).....	21
CAPITULO III. METODOLOGÍA	28
3.1. ANÁLISIS DEL REQUERIMIENTO DE LA INFORMACIÓN Y SOFTWARE.....	29
3.2. ELABORACIÓN DE UN MAPA DE COBERTURA DEL SUELO DEL AÑO 1990.	32
3.3. ANALISIS DEL CAMBIO DE COBERTURA DEL SUELO, ENTRE LAS COBERTURAS DE ORIGEN NATURAL Y AQUELLAS DE ORIGEN ANTROPICO EN LA PROVINCIA DE NAPO PARA EL PERÍODO 1990 – 2002.	47
3.4. ELABORACIÓN DEL MAPA DE PROBABILIDAD DE PRESENCIA DE LAS COBERTURAS DE TIPO ANTRÓPICO	51
3.5. MODELAMIENTO, VALIDACIÓN Y SIMULACION DEL CAMBIO DEL TIPO DE COBERTURA DEL SUELO (NATURALES Y ANTROPICAS) PERÍODO 1990 – 2020 EN LA PROVINCIA DE NAPO.....	63
CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	76
4.1. DESCRIPCIÓN DEL MAPA DE COBERTURA DEL SUELO DEL AÑO 1990 DE LA PROVINCIA DE NAPO.	76

4.2.	ANÁLISIS DEL MODELO DE PROBABILIDAD DE PRESENCIA DE COBERTURAS DE TIPO ANTRÓPICO.....	78
4.3.	ANÁLISIS DEL MODELO CA_MARKOV, PARA SIMULACIÓN DEL TIPO DE COBERTURA EN NAPO PARA AÑO 2008.	80
4.4.	COMPARACIÓN ENTRE MODELOS; PROBABILIDAD (REGRESIÓN) Y CA_MARKOV (TRANSICIÓN).....	82
4.5.	ANÁLISIS DE LOS MAPAS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN CON CA_MARKOV PARA 2015 Y 2020.	84
4.6.	ANÁLISIS DEL CAMBIO ENTRE ÁREAS NATURALES Y ÁREAS ANTROPIZADAS, EN EL PERÍODO 1990 - 2020.	89
CAPITULO V. CONSIDERACIONES FINALES		92
5.1.	CONCLUSIONES.....	92
5.2.	RECOMENDACIONES.....	93
5.3.	BIBLIOGRAFÍA	95
5.4.	GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	100
5.5.	LISTA DE ANEXOS.....	103
5.5.1.	Composición de mapas de cobertura del suelo (áreas naturales y antropizadas) para los años 1990, 2008 y 2020 (Formato A3, escala 1:600.000)	103
5.5.2.	Composición de mapas de cambio de cobertura del suelo, para los períodos 1990 – 2008 y 2008 - 2020 (Formato A3, escala 1:600.000)	103

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la provincia de Napo en Ecuador y en Sudamérica.....	11
Figura 2. Bosque Primario (ligeramente intervenido) – Sector Guacamayos.	14
Figura 3. Páramo de Pajonal y/o Arbustivo - Reserva Antisana (Sector La Mica).	15
Figura 4. Páramo Almohadillas – Reserva Antisana.....	15
Figura 5. Nieve (Vista del Volcán Antisana).	16
Figura 6. Cuerpos de Agua; Lagunas y Ríos.....	16
Figura 7. Suelo desnudo. Arenales en la reserva Antisana.	17
Figura 8. Bosque Secundario – Provincia Napo zona de Cosanga.	18
Figura 9. Sistema Silvopastoril – Provincia Napo zona de Baeza.....	18
Figura 10. Pastos – Provincia Napo zona de Archidona.....	19
Figura 11. Cultivos de Yuca	19
Figura 12. Coberturas de la Provincia de Napo.	20
Figura 13. Representación del sistema de AC en el espacio bidimensional.	26
Figura 14. Modelo conceptual del análisis, modelamiento y simulación de cambio de cobertura del suelo en la Provincia de Napo (1990-2020).	28
Figura 15. Información geográfica recopilada (y modificada) de diferentes fuentes.	30
Figura 16. Portal de descarga de imágenes del USGS.	32
Figura 17. Composición R4G5B3 de las imágenes TM descargadas.	33
Figura 18. Una de las bandas de la imagen TML5N4 en la zona de Tena con efecto “sal y pimienta” que aparecen como “puntos blancos”.	34
Figura 19. Proceso para corregir ruido de las imágenes.....	35
Figura 20. Una de las bandas de la imagen antes y después de la corrección del ruido.....	35
Figura 21. Imágenes cortadas con los cuadrantes que componen la Provincia de Napo.	36
Figura 22. Imagen TML4N1 tiene 9 bandas. La banda 7 corresponde a la altitud.	37
Figura 23. Recolección de firmas con la técnica del pixel semilla.	39
Figura 24. Evaluación previa en la recolección de firmas con perfiles espectrales.....	39
Figura 25. Extracto de la pantalla de resultados de la evaluación de separabilidad de la imagen TML4N3.....	40
Figura 26. Firmas diferentes.	40
Figura 27. Firmas superpuestas.	41
Figura 28. Firmas parecidas.	41
Figura 29. Resultado de la clasificación supervisada de las imágenes.	42
Figura 30. Diagrama de procesos para la edición de la clasificación supervisada.....	42
Figura 31. Mapa final de cobertura del suelo de la provincia de Napo año 1990.....	44
Figura 32. Mapa de compatibilidad de tipo de cobertura del suelo.	45
Figura 33. Modelo cartográfico para el análisis de cambio de cobertura del suelo 1990-2002.	47
Figura 34. Modelo entidad relación del análisis de cambio de cobertura.	48
Figura 35. Mapa de cobertura del suelo del año 1990 y la clasificación de las coberturas en natural o antrópico.....	48
Figura 36. Mapa de cobertura del suelo del año 2002 y la clasificación de las coberturas en natural o antrópico.....	49
Figura 37. Mapa de cambios entre el año 1990-2002.....	49

Figura 38. Modelo lógico – cartográfico del mapa de probabilidad de presencia de coberturas de tipo antrópico.	51
Figura 39. Modelo entidad relación de las tablas alfanuméricas para el modelo de probabilidad. ...	52
Figura 40. Generación de puntos de presencias y ausencias para la RLM.	53
Figura 41. Variables independientes de la modelación.....	55
Figura 42. Proceso de extracción de las variables independientes.	55
Figura 43. Ingreso de Datos en SPSS para hacer la RLM.....	56
Figura 44. Resultados de la RLM en SPSS.	56
Figura 45. Mapa de idoneidad de coberturas antrópicas.....	58
Figura 46. Mapa de cobertura del suelo de la provincia de Napo (año2008), elaborado por el Ministerio del Ambiente del Ecuador.	59
Figura 47. Pantalla de resultados obtenidos de ROC.....	60
Figura 48. Grafico de ROC obtenido a partir del mapa de probabilidad y el mapa de referencia (línea curva azul). Y Grafico ROC de una distribución aleatoria (línea recta marrón).....	61
Figura 49. Modelo lógico cartográfico para el modelamiento, validación y simulación del cambio de tipo de cobertura del suelo en la Provincia de Napo (1990-2002).....	63
Figura 50. Pantalla del modulo CA_MARKOV.	64
Figura 51. Modulo MARKOV con las coberturas de NAPO.	65
Figura 52. (a)Mapa de tipos de cobertura del año 1990 y (b) Mapa de tipos de cobertura del año 2002. Reclasificados en 1 (antrópico) y 2 (natural), utilizados para el modulo MARKOV.....	66
Figura 53. (a) Matriz de probabilidad de transición y (b) Matriz de áreas de transición.	67
Figura 54. Mapa simulado de tipo cobertura del suelo en la Provincia de Napo – 2008. “ca_markov_napo2008”	68
Figura 55. Mapa de cobertura del suelo año 2008, reclasificado en coberturas antrópicas (1) y naturales (2). El mismo usado para la curva ROC.	69
Figura 56. Estadísticos de evaluación del modelo nulo (2002 vs 2008).	70
Figura 57. Estadísticos de validación del modelo CA_MARKOV.	71
Figura 58. Matrices de Probabilidad y de Áreas de Transición al 2015 y 2020.	73
Figura 59. Mapa del escenario futuro (2015) del tipo de cobertura; antrópico (1), natural (2).	74
Figura 60. Mapa del escenario futuro (2020) del tipo de cobertura; antrópico (1), natural (2).	74
Figura 61. Porcentaje de las Coberturas en Napo 1990.	76
Figura 62. Representación de las coberturas por porcentaje de ocupación.	77
Figura 63. Estadístico de Wald. Salida de SPSS.....	79
Figura 64. Comparación de coberturas (2008) entre el modelo CA_MARKOV y la “Realidad”.	81
Figura 65. Umbral de menor distancia a al punto ideal en la curva ROC (RLM – MAE2008)	82
Figura 66. Áreas dentro del mejor umbral en el modelo de RLM.	83
Figura 67. Tabulación cruzada; RLM (filas) vs CA_MARKOV (columnas).....	84
Figura 68. Simulaciones 2015 y 2020 de tipo de cobertura en Napo.....	85
Figura 69. Mapa de tipo de cobertura simulado a 2020 con áreas protegidas y subcuencas dentro de Napo.....	86
Figura 70. Mapa de tipo de cobertura simulado a 2020 con las zonas susceptibles de deslizamientos e inundaciones.....	87
Figura 71. Análisis de transiciones entre 1990 y 2008.	89
Figura 72. Análisis de transiciones entre 2008 y 2020.	90

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de la información geográfica recopilada (y modificada).	31
Tabla 2. Características de las imágenes descargadas del “USGS - Global Visualization Viewer”	32
Tabla 3. Coberturas identificadas en cada cuadrante para la clasificación.	38
Tabla 4. Leyenda para la reclasificación y simplificación de coberturas.	43
Tabla 5. Áreas y porcentajes de compatibilidad e incompatibilidad.	46
Tabla 6. Porcentajes de cambio entre coberturas para los años 1990 – 2002.	50
Tabla 7. Características de las variables independientes consideradas.	53
Tabla 8. Tabla de contingencia. Número de píxeles que corresponden al umbral de 50%.	60
Tabla 9. Resumen comparativo de estadísticos kappa entre los modelos CA_MARKOV y nulo.	71
Tabla 10. Periodos de análisis y simulación para calibración y generación de escenarios futuros.	72
Tabla 11. Porcentajes de las Coberturas del Suelo en Napo 1990.	76
Tabla 12. Resumen de la clasificación de presencias en SPSS y de la Curva ROC en SIG.	80
Tabla 13. Umbral con menor distancia al punto ideal en la tabla de valores de la curva ROC	83
Tabla 14. Áreas de cada tipo de cobertura en los mapas simulados 2015 y 2020.	84
Tabla 15. Transiciones entre 1990 y 2008 (18 años) en Napo.	90
Tabla 16. Transiciones entre 2008 y 2020 (12 años) en Napo.	90

RESUMEN

Se recopiló una base de datos geográfica, con cartografía básica y temática, sobre la provincia de Napo (Ecuador), en la que se destacan los mapas de cobertura del suelo de los años 2002 y 2008. Como primer producto se elaboró un mapa de cobertura del suelo del año 1990 a partir de imágenes del sensor TM, (Landsat 4 y 5). Posteriormente se realizó un modelo de probabilidad de presencia de coberturas de tipo antrópico, usando la técnica de regresión logística multivariada; se evaluó el modelo con la curva ROC (Relative Operating Characteristic) y se determinó un alto poder de predicción en el modelo (AUC 0.89), distinguiendo además, que la distancia a centros poblados y a vías de comunicación son las variables más influyentes para la presencia de coberturas antrópicas. Se utilizó el mapa resultante del modelo de probabilidad como entrada en un modelo de transición de coberturas que combina Autómatas Celulares y Cadenas de Markov, entre otros aspectos, simulando un mapa de tipo de coberturas (natural o antrópico) para el año 2008. Se evaluó este mapa simulado, comparándolo con uno de referencia, a partir de índices kappa, y se obtuvo un porcentaje de concordancia general de 93%, lo cual es un buen indicador. Una vez que se ha contado con un modelo que permitía hacer simulaciones con el grado de confianza necesario, se realizaron simulaciones para los años 2015 y 2020. En estos escenarios de tipo de cobertura, se puede ver una clara presión hacia los bosques de la rivera del Rio Napo en un futuro, y también en aquellos cercanos a los principales centros poblados como Tena especialmente. Sin embargo, las áreas protegidas muestran un estado de conservación “natural” en las simulaciones, y esto se debe a sus condiciones de inaccesibilidad, en cuanto a falta de infraestructura vial, y a sus condiciones ambientales especiales. Por último, se verificó que la tasa de deforestación (cambio de natural hacia antrópico) en el período 1990 – 2008 fue de 4661 ha/año y en el período 2008 – 2020 sería de 3550 ha/año, indicando que la tendencia en el tiempo muestra en el mejor de los casos una disminución o por lo menos una estabilización de los procesos de deforestación.

CAPITULO I. INTRODUCCION.

1.1. JUSTIFICACIÓN. (PROYECTO)

La provincia de Napo (Ecuador) presenta un clima muy variado y por ende coexisten múltiples ecosistemas que van desde el páramo hasta la llanura amazónica, los cuales están asociados a coberturas vegetales muy diversas, ricas en endemismo y biodiversidad (el 80% del territorio de la provincia está constituido por áreas protegidas). Sin embargo, esta gran riqueza ecosistémica se ve amenazada por los procesos antrópicos que se llevan a cabo en el territorio, ya sean éstos productivos o de ocupación del suelo, y cuya dinámica a lo largo del tiempo se conoce poco o nada, razón por la cual asume significativa importancia el desarrollo de una metodología para modelar el proceso de cambio entre las áreas naturales y aquellas de origen antrópico. A tales efectos, se pretende clasificar las coberturas del suelo y analizar sus etapas de transición desde aquellas de origen natural como el páramo, los bosques templados, o el bosque tropical, hacia coberturas de tipo agroforestal, de pastos o de cultivos, y también viceversa, en caso de presentarse zonas en proceso de regeneración. Asimismo, se considera necesario evaluar aquellas variables más trascendentes a la hora de modelar la ocupación del suelo, para determinar cuáles son las más predominantes en esos procesos de cambio o deforestación. El modelo que se propone, servirá como una herramienta de gestión al proporcionar información valiosa en los procesos de planificación territorial, especialmente cuando se requiera la simulación de escenarios futuros de cobertura del suelo. Por otra parte, los resultados alcanzados serán de utilidad en estudios de variaciones climáticas para el mejoramiento de modelos del cambio global.

1.2. IMPORTANCIA. (MODELACIÓN)

Muchos de los modelos de cambio de uso de suelo, están ligados a estudios del ciclo global del carbono o impulsados por la búsqueda de las causas y consecuencias del cambio climático, pérdida de biodiversidad o modelamiento del paisaje (Lambin, 2003).

En las dos últimas décadas se han incrementado las investigaciones relacionadas con el análisis y modelamiento del cambio en el uso del suelo, principalmente los referidos al proceso de deforestación en países tropicales (Kaimowitz y Angelsen, 1998).

El foco principal en el esfuerzo de la modelación, esta dado por la identificación de los factores físicos y socioeconómicos que determinan o condicionan la presión sobre el cambio de uso del suelo en un territorio determinado (Henríquez, 2006). En general los esfuerzos de analizar y modelar los procesos de cambio de uso del suelo se orientan a responder los siguientes interrogantes: ¿por qué ocurre el cambio de uso del suelo?, ¿dónde?, ¿cuándo ocurre el cambio?. Estos tres interrogantes fundamentales, son abordados a través de metodologías apoyadas en el uso de sensores remotos y análisis estadístico espacial (Sandoval, 2003).

1.3. OBJETIVOS.

1.3.1. Objetivo General.

Analizar, modelar y simular el cambio de cobertura entre áreas naturales y áreas de origen antrópico¹, para determinar zonas ya deforestadas y aquellas susceptibles a la deforestación en la provincia de Napo, para el período 1990 – 2020.

1.3.2. Objetivos Específicos.

1. Identificar y analizar el cambio de cobertura del suelo entre 1990 y el año 2002 en la provincia de Napo (Ecuador).
2. Estimar la probabilidad de cambio a partir del modelamiento (regresión) de variables, tanto ambientales como de tipo antrópico.
3. Modelar y simular el cambio de cobertura para el año 2008 con Autómatas Celulares y Cadenas de Markov con la posterior validación del modelo a partir del mapa de cobertura del año 2008 generado con sensores remotos.
4. Simular el cambio de cobertura del suelo y determinar las zonas susceptibles a la deforestación, para el año 2015 y 2020, a partir del modelo de cambio de cobertura del suelo.
5. Generar la cartografía de cambio de cobertura del suelo para el período 1990 – 2020.

¹ Nos referimos como áreas naturales para este estudio a páramos, bosques primarios o secundarios y áreas antropizadas a las coberturas como la silvopastoril, agroforestal, cultivos, zonas urbanas entre otras.

1.4. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.

El estudio contempla la provincia de Napo en la *Región Amazónica Ecuatoriana* (RAE), que se extiende entre las coordenadas: 77°43' de longitud Oeste y 0°36' de latitud Sur, abarcando un área de 12.534 km² (alcanzando un máximo de 140km N-S y 150 km O-E, aproximadamente) en un rango altitudinal comprendido entre los 260 y 5692 msnm.



Figura 1. Ubicación de la provincia de Napo en Ecuador y en Sudamérica.

Fuente: Elaboración Propia.

CAPITULO II. ANTECEDENTES.

2.1. BREVE SÍNTESIS DE LOS ESTUDIOS Y PROYECTOS SOBRE “COBERTURA DEL SUELO” Y “CAMBIO DE COBERTURA DEL SUELO”, EN EL ECUADOR.

Es importante mencionar los principales esfuerzos por mapear la Cobertura del Suelo (CS) y estudiar así también, el Cambio de Cobertura del Suelo (CCS), a través de diferentes proyectos llevados a cabo en Ecuador por parte del gobierno central con el Ministerio del Ambiente o con instituciones como el Centro de Levantamientos de Recursos Naturales por Sensores Remotos (CLIRSEN) que han realizado este tipo de trabajos. También en esta tarea se han involucrado los Gobiernos Autónomos Descentralizados como el Gobierno Provincial de Napo que en conjunto con ONG's han trabajado para tal fin.

2.1.1. Mapas de “Cobertura del Suelo” realizados en Ecuador.

En cuanto a mapeo de la Cobertura del Suelo (CS) que abarque la provincia de Napo hay varias experiencias y a diferentes escalas, entre ellas se puede citar:

- **Mapa de Cobertura Vegetal y Uso del Suelo de Ecuador (2002).** Escala 1:250.000, elaborado por el CLIRSEN² (Centro de Levantamiento de Recursos Naturales por Sensores Remotos).
- **Mapas de Cobertura y Uso de la Tierra (CUT) (1990, 2000 y 2008).** Escala 1:50.000 (2008) a 1:100.000 (2000 y 1990). Ministerio del Ambiente. Programa Socio Bosque. Proyecto Mapa Histórico de Deforestación del Ecuador.
- **Mapa de Cobertura Vegetal y Uso del Suelo de Napo (2010³).** Escala 1:50.000, elaborado por el Gobierno Provincial de Napo (GPN).

2.1.2. Estudios de “Cambio de Cobertura del Suelo” realizados en Ecuador.

En lo que respecta a estudios del Cambio de Cobertura del Suelo (CCS) se puede mencionar:

- **Estudio multitemporal del nororiente del Ecuador.** Para los años 1990, 2008 y proyección 2030, publicado por The Nature Conservancy (2009), escala 1:50.000, en este estudio se utilizó un modelo de selección discreta (logit⁴) para estimar la probabilidad de cambio de vegetación natural a usos agrícolas o pecuarios.

² En la actualidad IEE (Instituto Ecuatoriano Espacial).

³ Se publico en 2010 pero las imágenes utilizadas corresponden al año 2008 aproximadamente.

⁴ Modelos basados en regresión.

- **Estudio multitemporal de cobertura de suelo de la reserva de Biósfera Sumaco.** La misma que se encuentra en gran parte dentro de la provincia de Napo, elaborado por el Proyecto Gran Sumaco en el año 2008. El Proyecto Protección Gran Sumaco es una iniciativa del Ministerio del Ambiente para contribuir con la conservación del Parque Nacional Sumaco Napo-Galeras y el desarrollo de la zona de apoyo de la Reserva de Biosfera Sumaco, y es asistido por el KfW Bankgroup, la GTZ, y el DED.
- **Efectos de la construcción de una carretera sobre la cobertura boscosa.** Trabajo de Fredi Tandazo del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) de Costa Rica. Aunque está localizado fuera de la provincia de Napo, corresponde a una zona de la RAE en la provincia de Morona Santiago, donde se consideró un período de 20 años (1987-2007), y se elaboraron escenarios de proyecciones futuras de cambio de uso de suelo, utilizando cadenas de Markov.
- **Mapa de Deforestación Histórica del Ecuador.** Su objetivo principal es desarrollar y validar una metodología para construir el escenario histórico de deforestación (1990-2008), permitiendo establecer tasas y patrones de deforestación a nivel nacional como herramientas para manejo de bosques, servicios ambientales y estudios de cambio climático principalmente. Este es sin duda el proyecto más importante a nivel nacional que se ha realizado para estudiar el CCS. Este proyecto es desarrollado por el Programa Socio Bosque del Ministerio del Ambiente de Ecuador.

2.2. BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS ÁREAS NATURALES Y LAS DE ORIGEN ANTRÓPICO EN LA PROVINCIA DE NAPO (ECUADOR).

Es importante conocer las coberturas que existen en la Provincia de Napo y que sirvieron de referencia para hacer el Mapa de Cobertura del Suelo del año 1990⁵ (que se hizo para este trabajo y que se muestra más adelante). Dichas coberturas se han clasificado por su “origen” ya sea este natural o antrópico y a continuación se describen.

2.2.1. Áreas Naturales.

- **Bosque Primario (Ligeramente intervenido).**

Vegetación arbórea o arbustiva, en diferente altitud y distribución, así como grado de humedad, considerada como producto de la interacción del clima y suelo de una micro-región, en la que no han influido sensiblemente otros factores para su establecimiento. Se desarrolla generalmente en zonas bajas, de pie de monte, de estribaciones y montañosas de altura, con características fisonómicas diferentes una de otra acorde a su altitud y composición florística.



Figura 2. Bosque Primario (ligeramente intervenido) – Sector Guacamayos.

Fuente: Fotografía tomada por el autor.

⁵ También sirvieron de referencia para el Mapa de Cobertura Vegetal y Uso del Suelo de Napo (2010) realizado por el Gobierno Provincial de Napo. Además se usaron para clasificar, en natural o antrópico, las leyendas de los Mapas de Cobertura del Suelo utilizados en este trabajo.

- **Páramos de Pajonal y/o Arbustivo.**

El páramo es un ecosistema tropical de montaña que habitualmente se desarrolla por encima del área del bosque y tiene su límite en las nieves perpetuas. Su rango de altitud es entre 3200 y 4200 msnm. En cuanto a factores climáticos la precipitación es bimodal entre 900 y 1300 mm/año, su temperatura es menor a 10°C y presentan una alta irradiación y evapotranspiración. Además se caracterizan por la ausencia de árboles grandes, en cambio hay un dominio de la vegetación herbácea.



Figura 3. Páramo de Pajonal y/o Arbustivo - Reserva Antisana (Sector La Mica).

Fuente: Fotografía tomada por el autor.

- **Páramo de Almohadillas.**

Son asociaciones de: *Wesneria nubigena*, *Hypochaeris sessiliflora* y *Draba sp.* En esta formación se acumulan grandes cantidades de agua (actúan como esponjas), lo que contribuye a mantener la humedad y la formación de cuencas hidrográficas primarias.



Figura 4. Páramo Almohadillas – Reserva Antisana.

Fuente: Fotografía tomada por el autor.

- **Nieve**

En la provincia de Napo esta cobertura pertenece al Volcán Antisana. El Volcán Antisana tiene algunos glaciares que son objeto de estudio como indicadores del cambio climático.



Figura 5. Nieve (Vista del Volcán Antisana).
Fuente: Fotografía tomada por el autor.

- **Cuerpos de Agua (Lagunas y Ríos).**

En la zona de páramo hay una cantidad muy importante de lagunas; una de ellas es la Mica que proporciona abastecimiento de agua para la ciudad de Quito. Los Ríos también son muy numerosos siendo el más importante el Río Napo que es uno de los afluentes del Amazonas.

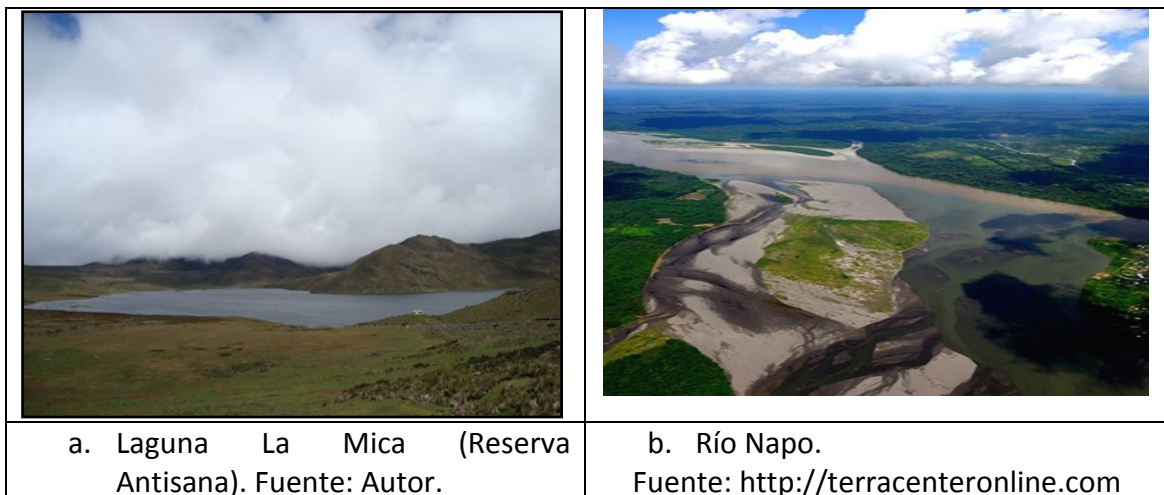


Figura 6. Cuerpos de Agua; Lagunas y Ríos.

- **Suelos desnudos, arenales y rocas.**

Comprende todos los eriales como son: rocas, arena y arcilla. En la zona de páramos encontramos algunos arenales, también en la zona de cordillera se advierte la presencia de suelos desnudos por la manifestación de grandes deslizamientos de tierra; además los islotes de arena que se forman en los ríos como el Napo (figura 6b) son parte de estas coberturas.



Figura 7. Suelo desnudo. Arenales en la reserva Antisana.

Fuente: Fotografía tomada por el autor.

2.2.2. Áreas de Origen Antrópico.

- **Bosque Secundario.**

Áreas de vegetación arbórea con diferentes niveles de influencia antropogénica y de sucesión vegetal, distribuidas desde la zona baja hasta las estribaciones de cordillera, en la que se incluyen otros tipos de vegetación pionera, cuyas especies cambian en dependencia de la altitud. Esto generalmente ocurre en zonas donde ha existido un cambio total de la cobertura vegetal y se ha regenerado naturalmente, presenta características fisonómicas típicas de estos ecosistemas alterados.



Figura 8. Bosque Secundario – Provincia Napo zona de Cosanga.

Fuente: Fotografía tomada por el autor.

▪ **Silvopastoril**

Es un sistema de uso de la tierra donde las leñosas de aptitud forestal crecen en asociación con hierbas de valor forrajero en un arreglo espacial y temporal con interacciones ecológicas entre sus componentes. Los sistemas agroforestales, incluyendo a los sistemas silvopastoriles, son sistemas de uso de la tierra diversificados y multi-estratificados en los cuales los cultivos arbóreos son explotados en asociación, planificada o no, con cultivos agrícolas anuales o pastos, de manera simultánea o secuencial (Montagnini, 1992). Los sistemas silvopastoriles asocian el componente arbóreo a las forrajeras o permiten la integración con animales y, cuando incorporan también cultivos temporales, son llamados sistemas agrosilvopastoriles.



Figura 9. Sistema Silvopastoril – Provincia Napo zona de Baeza.

Fuente: GPN.

- **Pastos**

Se encuentran alrededor de las principales vías de comunicación, son un producto de la ampliación de la frontera agrícola – ganadera, de tipo expansiva que evidencia el cambio rápido de cobertura del suelo y que posee pocos años de aprovechamiento por la pérdida rápida de nutrientes y desgaste del suelo. Los pastos suelen estar descubiertos o asociados con árboles.



Figura 10. Pastos – Provincia Napo zona de Archidona.

Fuente: Fotografía tomada por el autor.

- **Cultivos**

Generalmente se presentan en las zonas bajas y medias como asociaciones de cultivos de zona cálida en parcelas menores a 1ha (a veces mayores), estas parcelas conforman las denominadas chacras. En la chacra se siembran yuca, plátano, maíz, arroz, fréjol, maní, papa china y camote entre otras, que contribuyen a la dieta familiar y se asocian con cacao, junto con frutales y maderables para uso doméstico y para la venta. Esta actividad productiva es realizada por la población indígena.



Figura 11. Cultivos de Yuca

Fuente: <http://www.agricultura.gob.ec>

A manera de resumen, el mapa de la siguiente figura muestra la ubicación de estas coberturas en la Provincia de Napo.

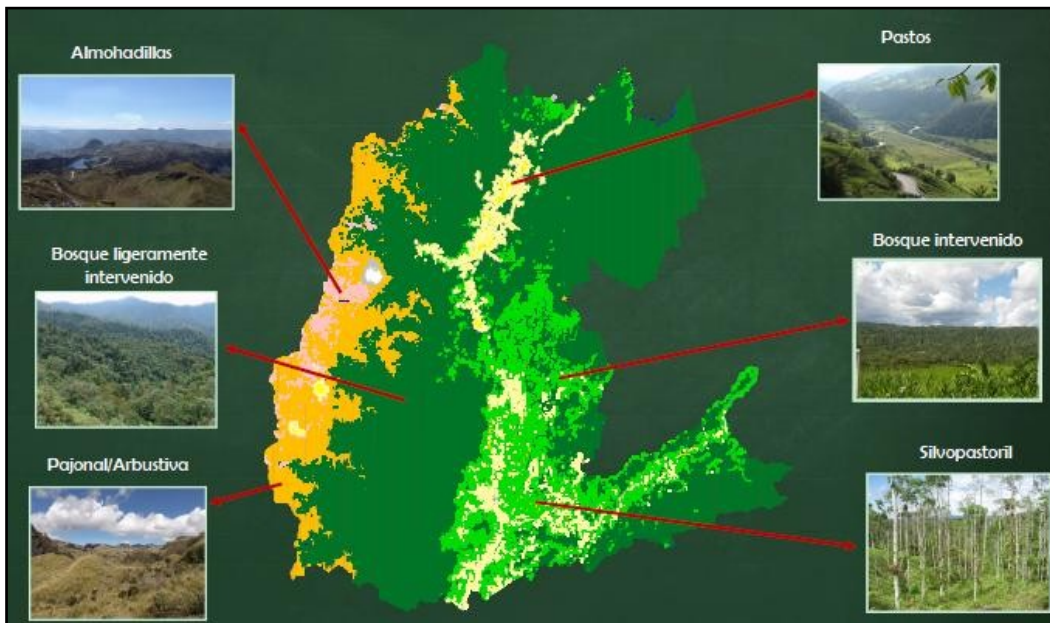


Figura 12. Coberturas de la Provincia de Napo.

Fuente: GPN.

2.3. MODELACIÓN DEL CAMBIO DE COBERTURA DEL SUELO – TEORÍA Y TÉCNICAS (GENERALIDADES).

Dos aproximaciones prevalecen en la modelación de patrones espaciales de los cambios de uso del suelo: (a) Modelos basados en regresión, y (b) Modelos en base a transición espacial.

Los primeros establecen relaciones entre un amplio rango de variables predictivas y las probabilidades de cambio de cobertura del suelo (CCS). Debido a la naturaleza espacial de muchas de las variables de entrada, la integración con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) es esencial ya que permite un manejo y análisis espacialmente explícito de los datos asociados al modelo (Qi y Wu, 1996). Por tanto la modelación estadístico-espacial del cambio de cobertura del suelo (CCS), se deriva de la combinación y uso de técnicas cartográficas, sistemas de información geográfica y modelos estadísticos multivariantes. Su objetivo principal es identificar la magnitud y distribución espacial del cambio, proyectar y desplegar cartográficamente su probabilidad de ocurrencia en el futuro cercano, bajo el supuesto que las técnicas de manejo del suelo continuarán siendo similares al pasado cercano (Sandoval y Oyarzun, 2003).

Por otro lado, los modelos basados en transición espacial comprenden, principalmente, las técnicas estocásticas basadas en el método de Cadenas de Markov y Autómatas Celulares (AC) (Zhou y Liebhold, 1995; Pontius y Malanson, 2005). Estos modelos asumen explícitamente que las áreas vecinas influyen en la probabilidad de transición del área o celda central. Los AC incorporan reglas simples acerca de los efectos de adyacencia espacial que gobiernan la dinámica del sistema y que dan lugar a patrones de comportamientos emergentes que son usualmente más complejos que aquellos generados por simples modelos de equilibrio (Henríquez, 2006).

2.3.1. Algunos Modelos y Software Utilizados para el CCS.

- **CA_MARKOV**

Este modelo está implementado en el software IDRISI (ClarkLabs). Se basa en las cadenas de Markov propuestas por el matemático ruso Andrei Markov en 1907. Estos modelos (también llamados markovianos) se hicieron espacialmente explícitos cerca del año 1990, cuando empezaron a integrar el componente de autómatas celulares permitiendo que la probabilidad de transición de un pixel esté en función de los pixeles vecinos (Cabral y Zamyatin, 2006).

Así, el módulo CA_MARKOV de IDRISI permite hacer predicciones de cobertura del suelo considerando la contigüidad espacial (autómatas celulares), la probabilidad de presencia de las coberturas (EMC y/o Regresión Logística) y la probabilidad de

transición de las coberturas de un estado a otro en diferentes épocas (cadenas de Markov).

Más adelante, se menciona con mayor detalle en qué consisten las *cadenas de markov* que sirvieron para realizar las matrices de áreas de transición, la *regresión logística* que sirvió para elaborar los mapas de idoneidad y las reglas de *autómatas celulares* que usa el modelo también.

▪ **GEOMOD**

También está implementado en el software IDRISI. Geomod es un modelo más simple y más reciente, que usa cantidades (de área o píxeles que van a cambiar) especificadas por el operador (en lugar de la matriz de transición de markov) y un mapa de idoneidad (probabilidad de presencia) para simular el cambio de una sola categoría a otra usando una relación lineal entre los periodos de tiempo del inicio y el final (Cabral y Zamyatin, 2006). Geomod asume persistencia en el fenómeno que se está modelando, por ejemplo, si un píxel está clasificado como antrópico en 1990 se mantendrá antrópico en 2008. Esta situación es diferente respecto a los modelos markovianos y a la realidad de los procesos de cambio de cobertura del suelo en Napo, ya que por ejemplo, un sistema silvopastoril, después de ser abandonado y si no existiera intervención humana, podría convertirse en un bosque secundario al cabo de unos 10 años, es decir los procesos de regeneración vegetal son una realidad que no se puede obviar en los bosques tropicales. Sin embargo en un proceso de crecimiento urbano si puede cumplirse esta regla ya que un área que es urbana en un tiempo dado, al cabo de unos pocos años es poco probable que deje de serlo.

▪ **LCM (Land Change Modeler)**

Disponible en el software IDRISI, el modulo Land Change Modeler (LCM) integra tanto el análisis de los datos, especialmente la noción de cambio de ocupación/ usos del suelo (LUCC budget, Pontius et al., 2004), la modelización propiamente dicha y las aplicaciones anexas en materia de ecología de paisaje y biodiversidad, así como implicaciones en la ordenación y gestión territorial. La modelización espacio-temporal prospectiva está dividida en dos fases: la de elaboración de los modelos de potencial de transición y la puesta en práctica de la predicción y/o obtención de escenarios (Camacho et al., 2010).

Haciendo una breve comparación con el anterior modelo citado, se puede advertir que tanto CA_MARKOV como LCM son módulos esencialmente diferentes pero complementarios en algunas cuestiones. CA_MARKOV distribuye la superficie estimada para cada categoría mediante los correspondientes mapas de aptitud (o idoneidad) de localización (tantos como categorías), que pueden ser elaborados mediante un modelo numérico, mientras que LCM describe, caracteriza y modeliza las transiciones entre las categorías. Para ello, ambos procedimientos establecen relaciones entre variables explicativas de distinta naturaleza (drivers) y las categorías

de cobertura de suelo o las transiciones, aunque utilizando métodos diferentes, es decir, evaluación multicriterio o regresión logística en CA_MARKOV, como ya se ha señalado, y redes neuronales en LCM (Camacho et al., 2010).

- **CLUE (Change of Land Use and its Effects at Small Scale)**

CLUE es un software de modelización gratuito, basado en un método probabilístico de tipo regresión logística. El modelo CLUE, es un modelo explícito, especialmente para el cambio de cobertura de suelo y sus efectos, cuyo objetivo es hacer un espaciamiento de las multicapas y la descripción cuantitativa de los cambios de uso de la tierra. Los resultados de éste análisis se incorporan a un modelo dinámico, que describe los cambios de cobertura del suelo. Además, con el seguimiento que hace de los cambios de cobertura del suelo en el pasado, permite también, analizar los posibles cambios de cobertura del suelo en un futuro. La metodología de CLUE se basa en el análisis de los sistemas de uso de la tierra como sistemas complejos multi-nivel y opera con los sistemas de cobertura del suelo en la interfaz de múltiples sistemas sociales y ecológicos (www.cluemodel.nl).

2.3.2.Regresión Logística (RL).

La RL es una técnica estadística multivariante que nos permite estimar la relación existente entre una variable dependiente no continua, en particular dicotómica y un conjunto de variables independientes continuas o no. El análisis de regresión logística multivariante (RLM) tiene la misma estrategia que el análisis de regresión lineal múltiple, el cual se diferencia esencialmente del análisis de regresión logística porque la variable dependiente es continua; en la práctica el uso de ambas técnicas tienen mucha semejanza, aunque sus enfoques matemáticos son diferentes.

La variable dependiente o respuesta no es continua, sino discreta (generalmente toma valores 1,0). Las variables explicativas pueden ser cuantitativas o cualitativas; y la ecuación del modelo no es una función lineal de partida, sino exponencial; si bien, por sencilla transformación logarítmica, puede finalmente presentarse como una función lineal.

Por tanto al aplicar un modelo de RL, en lugar de construir un modelo de regresión para estimar los valores reales de la variable de interés, se construye una función basada en el cálculo de la probabilidad que la variable de interés adopte el valor del evento previamente definido, de la manera siguiente:

$$Y = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right) \quad \text{[Ecuación 1]}$$

Tras realizar una serie de transformaciones matemáticas se puede deducir que:

$$p = \frac{1}{1+e^{-\text{modelo de regresión}}} \quad [\text{Ecuación 1.1}]$$

En definitiva lo que se pretende mediante la RLM es expresar la probabilidad de que ocurra el evento en cuestión, como función de ciertas variables, que se presumen relevantes o influyentes. En la bibliografía referida al CCS (cambio de cobertura del suelo), a estas variables explicativas o influyentes se las conoce como *drivers*. La técnica de regresión logística por la naturaleza de su variable dependiente ha sido usada en el campo de la medicina, psicología, ciencias ambientales y otras.

2.3.3. Cadenas de Markov.

Las cadenas de Markov son una herramienta para analizar el comportamiento y el gobierno de determinados tipos de procesos estocásticos, esto es, procesos que evolucionan de forma no determinística (CCS) a lo largo del tiempo en torno a un conjunto de estados. Una cadena de Markov, por tanto, representa un sistema que varía su estado a lo largo del tiempo, siendo cada cambio una transición del sistema. Dichos cambios no están predeterminados, aunque si lo está la probabilidad del próximo estado en función de los estados anteriores, probabilidad que es constante a lo largo del tiempo (sistema homogéneo en el tiempo).

Si en un modelo basado en cadenas de Markov a partir del cual la distribución espacial de los usos y/o coberturas del suelo analizados en el tiempo t es resultado de la situación en un momento anterior $t-1$, significa que la probabilidad de que ocurra un evento se encuentra relacionada a dicho evento en un estado anterior (Buzai, 2005).

La metodología de análisis espacial implica tener dos mediciones temporales⁶ t_1 y t_2 . A partir de ellas se genera una matriz de probabilidades de cambio (**P**). Multiplicando esta matriz de probabilidades por el número de píxeles de cada categoría en t_2 , se obtienen las áreas (o número de píxeles) para cada categoría estimadas para t_3 . Es así que la matriz **P** es central en el proceso de transición, ya que las probabilidades de cambio de una categoría a otra han sido medidas a lo largo de un período y resultan de utilidad para extrapolar el cálculo hacia un período en el futuro.

Si el estado de un sistema (tomado de Buzai, 2005) puede ser definido como:

$$\mathbf{X}(t)=[x_1,x_2,x_3,\dots,x_n] \quad [\text{Ecuación 2}]$$

Donde x_i representan las proporciones de cada categoría (p.e. píxeles) para el tiempo t , el estado del sistema para el tiempo $t+1$ se logra multiplicando el vector (**x(t)**) por la matriz de probabilidad (**P**) de cambios de la forma:

$$\mathbf{X}(t+1) = \mathbf{X}(t) \cdot \mathbf{P} \quad [\text{Ecuación 2.1}]$$

Y de esta forma continuaría hacia los momentos t_1, t_2, \dots, t_n

⁶ Para fines de esta tesis se toma 1990 (t_1) y 2002 (t_2) para validación del modelo en 2008 (t_3) en una primera fase.

$$\mathbf{X}(t+2) = \mathbf{X}(t+1) \cdot \mathbf{P} = \mathbf{X}(t) \cdot \mathbf{P}^2 \quad [\text{Ecuación 2.2}]$$

$$\mathbf{X}(t+3) = \mathbf{X}(t+2) \cdot \mathbf{P} = \mathbf{X}(t+1) \cdot \mathbf{P}^2 = \mathbf{X}(t) \cdot \mathbf{P}^3 \quad [\text{Ecuación 2.3}]$$

Por lo que el estado del sistema queda definido por:

$$\mathbf{X}(t + k) = \mathbf{X}(t) \cdot \mathbf{P}^k \quad [\text{Ecuación 2.4}]$$

Los cálculos previos dan cuenta de la situación probabilística del cambio temporal, pero no espacial, por tanto, se incluye de forma complementaria el raster de idoneidad de la cobertura y el procedimiento de autómata celular (que se explica a continuación) para ubicar espacialmente los píxeles con mayores probabilidades para ser cambiados de categorías.

2.3.4. Autómatas Celulares (AC).

Los AC fueron inventados en la década de los 50 por Von Neumann como resultado de su estudio sobre construcción de sistemas de complejidad no acotada. La solución que Von Neumann dió a este problema, fue que la construcción de dicho sistema fuese hecha por otro sistema computacional de menor complejidad, que a su vez habría sido construido por otro de menor complejidad, hasta llegar a uno cuya complejidad fuese abordable por el ser humano (Echarche, 2006).

Los autómatas celulares son redes de autómatas simples conectados localmente. Cada autómata simple produce una salida a partir de varias entradas, modificando en el proceso su estado según una función de transición. Por lo general, en un autómata celular, el estado de una célula en una generación determinada depende única y exclusivamente de los estados de las células vecinas y de su propio estado en la generación anterior (Tapia et al., 2008).

Lo fundamental de este tipo de modelos radica en que puede representar fenómenos en los que las variables cambien en forma discreta dependiendo de su estado y no en forma continua en dependencia de una función matemática.

Para plantear un modelo de AC se deben seguir ciertas pautas, entre las que principalmente están las reglas de transición en cada iteración. Es así que el estado de un AC en un tiempo $t+1$ ($\mathbf{E}_{p+1} \mathbf{T}_{ij}$) está en función de su propio estado ($\mathbf{E}_p \mathbf{T}_{ij}$) en el tiempo t y de los estados de todos los elementos ubicados en su vecindad, pudiendo representarse de la siguiente manera (Figura 13):

$$\mathbf{E}_{p+1} \mathbf{T}_{ij} = f(\mathbf{E}_p \mathbf{T}_{ij}, \mathbf{E}_p \mathbf{T}_{i-1,j-1}, \mathbf{E}_p \mathbf{T}_{i-1,j}, \mathbf{E}_1 \mathbf{T}_{i-1,j+1}, \mathbf{E}_1 \mathbf{T}_{i,j-1}, \mathbf{E}_1 \mathbf{T}_{i,j+1}, \mathbf{E}_1 \mathbf{T}_{i+1,j-1}, \mathbf{E}_1 \mathbf{T}_{i+1,j}, \mathbf{E}_1 \mathbf{T}_{i+1,j+1}) \quad [\text{Ecuación 3}]$$

Donde:

- ✓ \mathbf{T}_{ij} representa el AC o celda de la posición i,j en el espacio (Figura 13a)

- ✓ E_p representa el conjunto $[a, b, c, d, \dots, n]$ de estados que puede tomar el AC en el tiempo o iteración p
- ✓ $E_{p+1}T_{ij}$ representa el estado particular de un AC en función del estado de sus vecinos y de las reglas de transición planteadas.

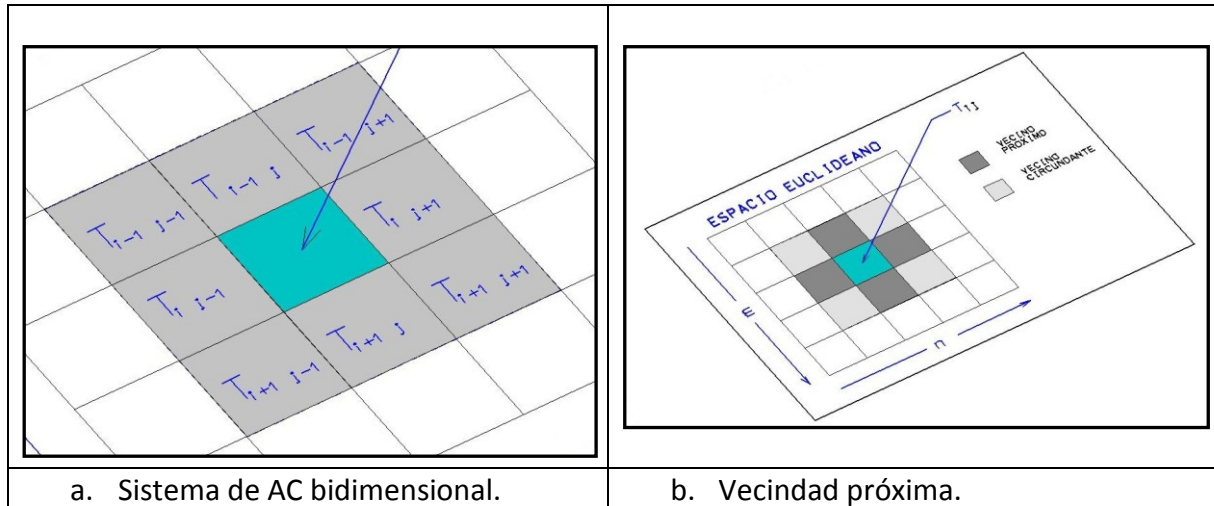


Figura 13. Representación del sistema de AC en el espacio bidimensional.

Fuente: Revista Geoespacial – ESPE, Padilla. O.

Se podría plantear la premisa de que las celdas que se encuentran más próximas tendrán una mayor influencia que las que se encuentran en las diagonales. Es decir un vecino que tenga el mismo estado pero que se encuentre en la diagonal ($T_{i-1, j-1}$, $T_{i-1, j+1}$, $T_{i+1, j-1}$, $T_{i+1, j+1}$) tendrá una regla de transición adicional y diferente a la de un vecino que se encuentre inmediatamente continuo (Figura 13b), en la que se incluirá su estado de vecindad.

▪ Multiagentes.

Una aplicación posterior o desarrollo de los AC corresponde a los “Multiagentes” o MAS (Benenson y Torrens, 2004). Estos corresponden a otro tipo de AC. Lo que caracteriza a los MAS es que pueden ser identificados como elementos que además de poseer todas las características de los AC, tienen movilidad a través del espacio definido para la representación del fenómeno. Esto constituye un aspecto importante para cualquier aplicación geográfica, ya que cada individuo al tener un grado de movilidad también va cambiando su estado con el conjunto de reglas predefinidas para un AC así como en la nueva posición que va tomando (Padilla, 2005).

▪ El Modelo de Vida de Conway

Este modelo fue formulado por Conway y se conoce con el nombre de Modelo de Vida del autor, el cual se define a continuación:

1. Un espacio euclidiano de dos dimensiones es dividido en un arreglo matricial con celdas unitarias cuadradas.
2. Cada celda tendrá dos estados viva o muerta.
3. El estado de cada celda o célula puede cambiar debido a su propio estado y lógicamente también por el estado de sus vecinas. Como está claro, alrededor de la célula central se encuentran ocho células adicionales o vecinas.
4. El estado de cada celda se define en la siguiente iteración, donde se han definido reglas de transición que son aplicadas a cada celda y a sus vecinos. Las reglas de transición se definen a continuación:

Para que la célula este “viva” o “muerta” debe cumplirse que:

- a. Una célula muerta que está rodeada de tres células vivas, cambiará a viva (esto es igual a reproducción).
 - b. Una célula viva permanecerá así si tiene dos o tres células vivas como vecinos.
 - c. Sin embargo, la célula deberá morir en algún momento. Sucederá cuando tenga menos de dos vecinos vivos
5. El tiempo transcurre en forma uniforme y discreta. Cada célula de la matriz cambiará en forma simultánea (Padilla, 2005).

▪ **Geosimulación**

La Geosimulación puede ser definida como el conjunto de métodos que permiten establecer la tendencia del entorno geográfico para lograr escenarios anticipatorios que ayuden a comprender las consecuencias dinámicas de los fenómenos temporales en el espacio. El desarrollo de estas investigaciones pretende representar todo tipo de fenómenos en un modelo espacial de alta resolución, usando software y herramientas de simulación para resolver problemas en el entorno geográfico, generando un híbrido entre los AC y los SIG, los Sistemas Autónomos Geográficos (GAS) (Benenson, 2004). Existen diversas aplicaciones y ejemplos como la representación de flujos de lodo provenientes de una inundación o erupción volcánica, flujos de tránsito en una ciudad, comportamiento de masas en épocas de alta demanda comercial, simulación de hábitat de especies animales, entre otras (Padilla, 2005). En este caso, la aplicación ha sido seleccionada para el estudio del Cambio de Cobertura del Suelo.

CAPITULO III. METODOLOGÍA

Previo al desarrollo de la metodología, se presenta el modelo conceptual que esquematiza el procedimiento seguido:

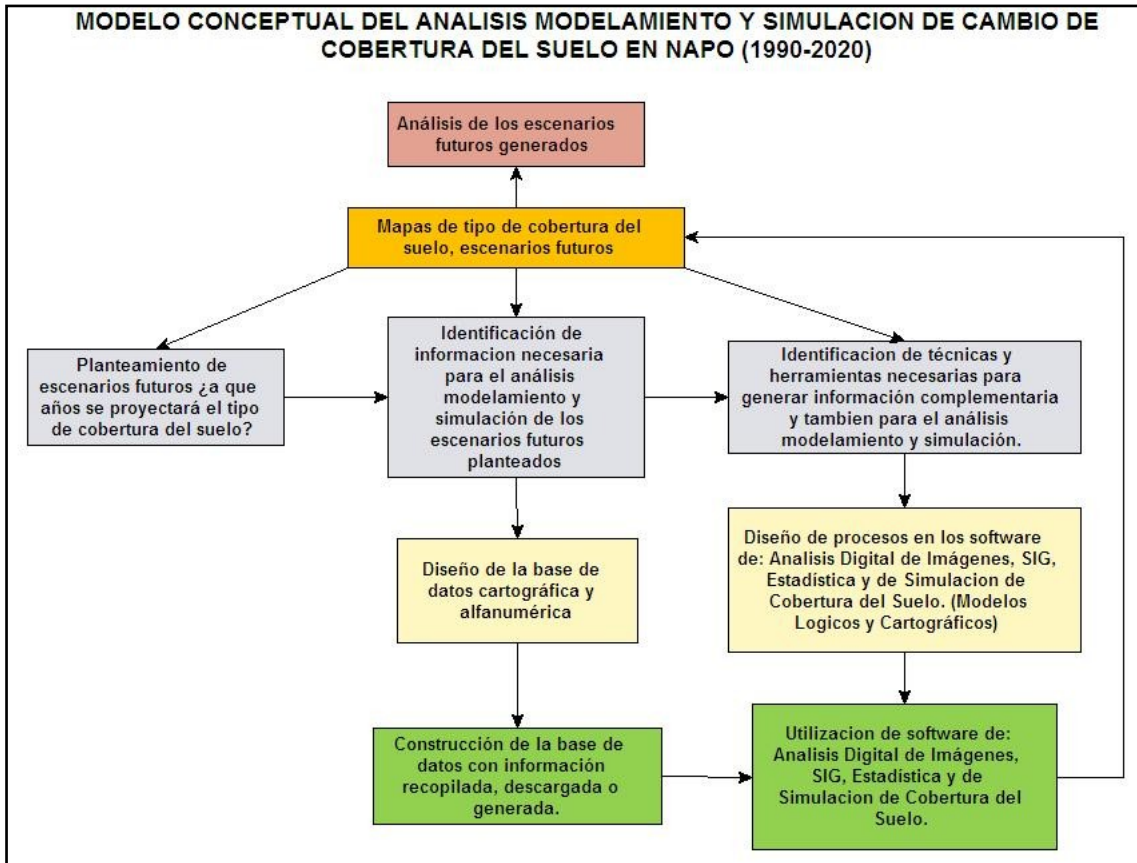


Figura 14. Modelo conceptual del análisis, modelamiento y simulación de cambio de cobertura del suelo en la Provincia de Napo, Ecuador (1990-2020).

El esquema precedente, básicamente señala que a partir de los escenarios que planteamos a futuro, se identifica la información requerida, para construir una base de datos cartográfica que permita ejecutar las metodologías con las herramientas identificadas previamente, a través de un proceso diseñado para tal fin, de esta forma obtenemos los escenarios futuros para ser analizados en una última etapa.

3.1. ANÁLISIS DEL REQUERIMIENTO DE INFORMACIÓN Y SOFTWARE.

La información que se requiere para esta tesis es principalmente de tipo espacial, es decir información geográfica. Por un lado, y como punto de partida, se requiere la división política provincial, además de la información sobre ríos, infraestructura vial y centros poblados, para obtener los *rasters* de distancias que servirán de variables independientes en el modelo de regresión logística multivariada (RLM). También se necesita de topografía a partir de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) para obtener variables como altitud y pendiente que servirán no solo como variables de entrada para la RLM, sino además como pseudobandas en la clasificación supervisada. A partir del MDE se puede obtener también el índice de saturación con un modelo geodinámico como SINMAP. Se necesita de imágenes de satélite de los años 1990's para hacer el mapa de cobertura del suelo y posterior clasificación por tipo de cobertura (antrópica o natural), y para elaborar índices, como el NDVI que se usará en la RLM. Además se necesitan los mapas de cobertura del suelo de los años 2002 y 2008, que servirán para identificar las coberturas antrópicas y naturales y su cambio a lo largo de este tiempo, además de la validación con este último. Otra información importante a considerar, es la de clima, que en este caso se obtuvo de la base World Clim.

Respecto al tipo de software utilizado para los análisis y trabajos concernientes a esta tesis, se pueden citar:

- *Sistemas de Información Geográfica - Convencional*; para gestionar, analizar y elaborar mapas a partir de información geográfica recopilada y generada.
- *Sistemas de Información Geográfica – Modelamiento*; utilizado en los procesos de modelamiento del Cambio de Cobertura del Suelo (CCS).
- *Software de Análisis Digital de Imágenes*; utilizado para elaborar el Mapa de Cobertura de Suelo del año 1990 a partir del procesamiento y clasificación supervisada de Imágenes Landsat (sensor TM).
- *Software de Análisis Estadístico*; para hacer la regresión logística multivariada.

3.1.1. Elaboración de la base de datos geográfica para el proyecto.

Como ya se ha señalado, la gestión de la información geográfica se hizo desde un software de SIG convencional. Para el modelo de datos vector se trabajó principalmente con la estructura tipo *shape* *.shp, y para el modelo de datos raster los formatos fueron *.GRD y *.IMG.

a. Recolección y Evaluación.

La información base de vías, ríos, centros poblados y topografía, además de la información temática de cobertura del suelo de los años 2002 y 2008, fue proporcionada por el Gobierno Provincial de Napo (GPN) para este trabajo y que a su vez ha sido recopilada de diferentes fuentes (como se indica más abajo). Las imágenes satelitales (Landsat TM año 1990 aprox.) se descargaron de internet del portal del USGS (Global Visualization Viewer) como se indica más adelante en la metodología. Los rasters de temperatura media anual y precipitación anual también se descargaron de la base World Clim.



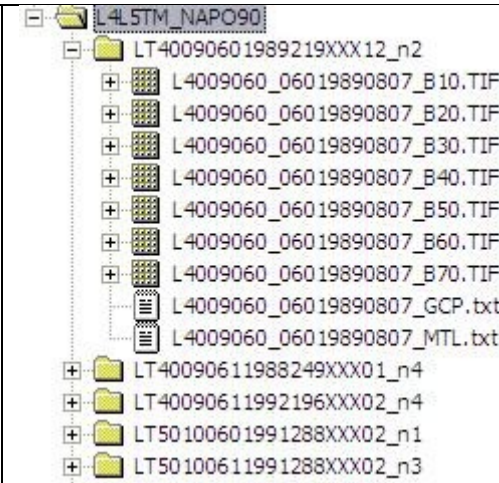
		
<p>a. Base GPN. Cartografía Base y Cobertura del Suelo.</p>	<p>b. Base World Clim. Precip y Temp.</p>	<p>c. Base USGS. Imágenes Landsat años 1990s aprox.</p>

Figura 15. Información geográfica recopilada (y modificada) de diferentes fuentes.

b. Descripción de la información en la base de datos geográfica.

A continuación, se proporciona una tabla descriptiva de las diferentes coberturas y/o imágenes recopiladas y descargadas, donde los acrónimos usados para las instituciones ecuatorianas son:

CLIRSEN: Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales Por Sensores Remotos - Ecuador. Ahora llamado IEE (Instituto Ecuatoriano Espacial).

MAE: Ministerio del Ambiente – Ecuador.

IGM: Instituto Geográfico Militar – Ecuador.

INEC: Instituto de Estadísticas y Censos – Ecuador.

Tabla 1. Características de la información geográfica recopilada (y modificada).

Nombre	Modelo	Tipo/Estructura	Fuente	Base/año	Escala/Tpixel	Autor	Informacion
cobertura2002_inf	vectorial	Poligono - shapefile	GPN	Infoplan - 2002	1:250000	CLIRSEN	Cobertura Del Suelo
cobertura2008_mae	vectorial	Poligono - shapefile	GPN	MAE - 2010	1:50000	MAE	Cobertura Del Suelo
CPOB_250ALM	vectorial	Puntos - shapefile	GPN	Infoplan - 2002	1:250000	IGM	Ubicación de centros poblados
Limite_Napo	vectorial	Poligono - shapefile	GPN	INEC - 2008	1:50000	INEC	Div Política de la Pvcia de Napo
RIOS_250ALM	vectorial	Linea - shapefile	GPN	Infoplan - 2002	1:250000	IGM	Hidrografia
VIAS_50GPS	vectorial	Linea - shapefile	GPN	GPN - 2009	1:50000	GPN	Vialidad
dtm_napo2	raster	unsigned integer / 16 bits / GRID	GPN	GLCF - SRTM / 2000	90m	NASA - GLCF	Elevacion (snmm)
precip_P	raster	unsigned integer / 16 bits / IMAGINE (*.IMG)	Modificado de World Clim	Worl Clim / 2005	1000m	World Clim	Precipitacion Anual
temp_P	raster	singed integer / 16 bits / IMAGINE (*.IMG)	Modificado de World Clim	Worl Clim / 2005	1000m	World Clim	Temperatura Media Anual
LT50100601991288X XX02_n1	raster	unsigned integer / 8 bits / TIFF	USGS	USGS - EROS / 2011	30m	NASA - USGS	7 Bandas Espectrales
LT40090601989219X XX12_n2	raster	unsigned integer / 8 bits / TIFF	USGS	USGS - EROS / 2011	30m	NASA - USGS	7 Bandas Espectrales
LT50100611991288X XX02_n3	raster	unsigned integer / 8 bits / TIFF	USGS	USGS - EROS / 2011	30m	NASA - USGS	7 Bandas Espectrales
LT40090611992196X XX02_n4	raster	unsigned integer / 8 bits / TIFF	USGS	USGS - EROS / 2011	30m	NASA - USGS	7 Bandas Espectrales

Una vez que se ha conformado la base de datos geográfica se procedió a elaborar los productos como el “Mapa de Cobertura del Suelo del año 1990” y a realizar los ejercicios de modelación y posterior simulación.

3.2. ELABORACIÓN DE UN MAPA DE COBERTURA DEL SUELO DEL AÑO 1990.

3.2.1. Descarga de Imágenes Landsat.

Del portal web del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), “USGS Global Visualization Viewer” (Figura 16), se descargaron gratuitamente las 7 bandas en formato GeoTiff y con sistema de coordenadas WGS84, correspondiente a 4 imágenes de los satélites Landsat 4 y Landsat 5, sensor TM (Thematic Mapper), de los años 1989, 1990, 1992.

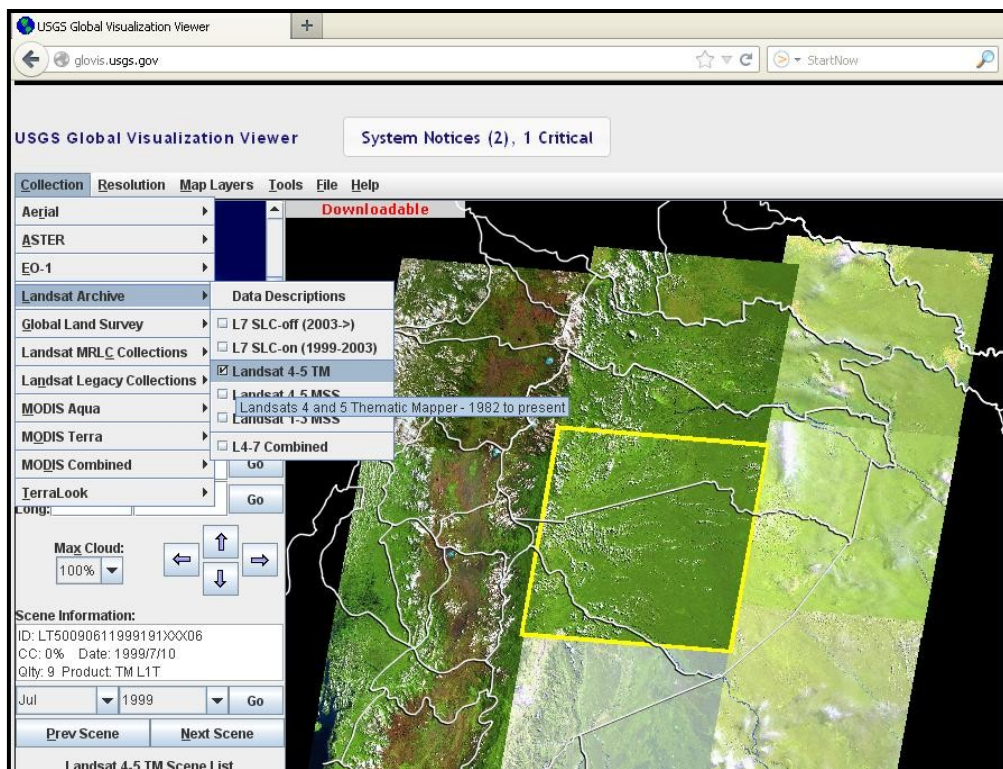


Figura 16. Portal de descarga de imágenes del USGS.

La siguiente tabla resume las características de las imágenes descargadas.

Tabla 2. Características de las imágenes descargadas del “USGS - Global Visualization Viewer”

Nombre_Archivo	Tamaño (MB)	Alias	Satélite	Sensor	Año	Cuadrante
LT50100601991288XXX02	365	TML4N1	Landsat4	TM	1991	N1
LT40090601989219XXX12	384	TML5N2	Landsat5	TM	1989	N2
LT50100611991288XXX02	380	TML4N3	Landsat4	TM	1991	N3
LT40090611992196XXX02	383	TML5N4	Landsat5	TM	1992	N4

En adelante nos referiremos a las imágenes por el “Alias” (nombre asignado), es decir; TML4N1, TML5N2, TML4N3, TML5N4. La figura 17 muestra una composición RGB453 de las imágenes descargadas sin ningún tratamiento.

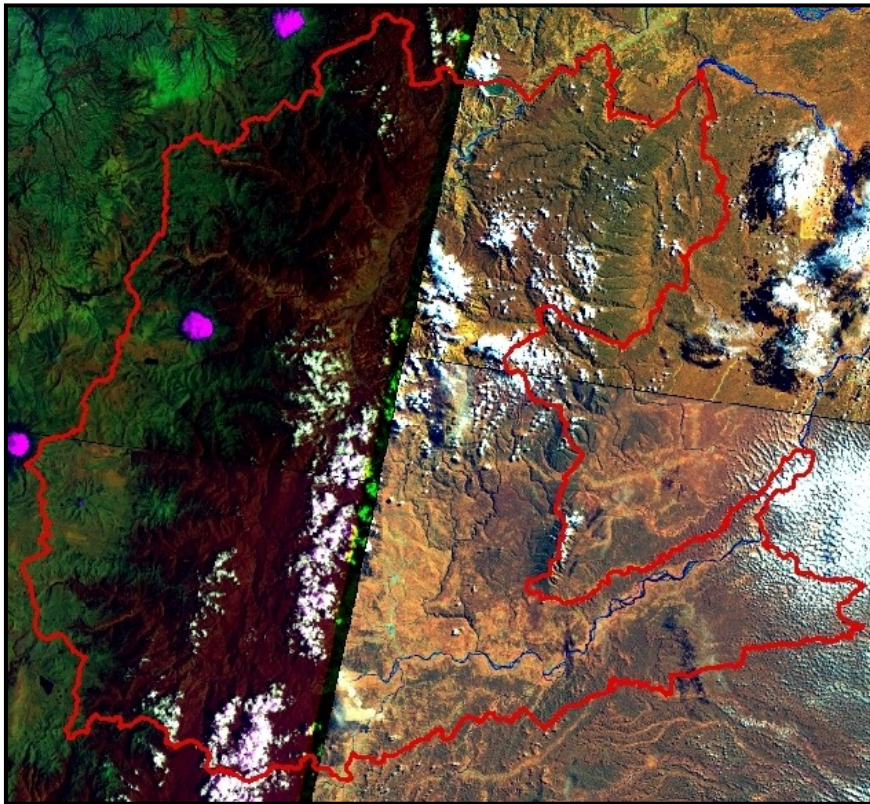


Figura 17. Composición R4G5B3 de las imágenes TM descargadas.

3.2.2. Correcciones de las Imágenes.

Las imágenes descargadas tienen un nivel de procesamiento denominado “Standard Terrain Correction (Level 1T)”, que proporciona una precisión sistemática radiométrica y geométrica mediante la incorporación de puntos de control en tierra (Base de Datos “Global Land Surface 2005”), además del empleo de un modelo de elevación digital (DEM) para la exactitud topográfica, así la precisión de la corrección geométrica del producto, depende de la exactitud de los puntos de control y la resolución de la DEM utilizado (SRTM en este caso). Por tanto, como ya tienen corrección geométrica estos productos, no ha sido necesario hacer una georreferenciación.

Sin embargo, a pesar de que los productos tienen este nivel de procesamiento, a la imagen TML5N4 fue necesario hacerle una corrección radiométrica “cosmética” ya que presentaba un efecto de sal y pimienta, es decir la presencia de píxeles aislados que tienen valores muy diferentes a sus vecinos, (“puntos blancos”), como puede observarse en la Figura 18.

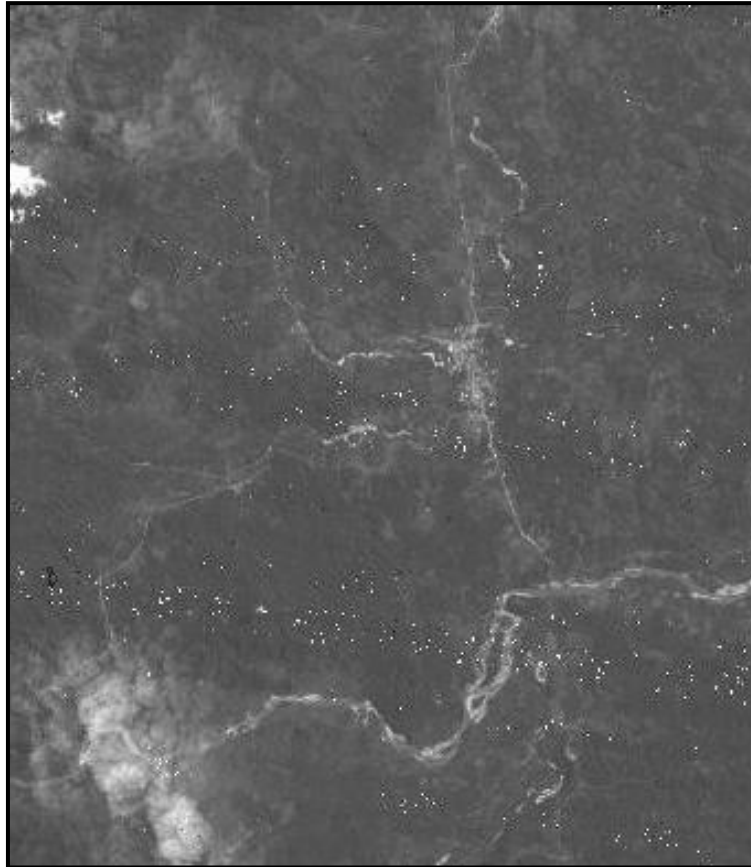


Figura 18. Una de las bandas de la imagen TML5N4 en la zona de Tena con efecto “sal y pimienta” que aparecen como “puntos blancos”.

Corrección radiométrica de la imagen TML5N4.

A cada banda se le hizo un “Neighborhood Statistics” de 5x5 para desviación estándar, a los fines de identificar aquellos pixeles con ruido o puntos aleatorios. Después, se reclasificó esta capa de Neighborhood Statistics en 5 clases (natural breaks), seleccionando con raster calculador aquellos pixeles que pertenecían a las tres primeras clases para que se hagan 0 (cero) las dos últimas clases donde se encontraba el ruido. Esta capa la usamos de máscara y la multiplicamos por la banda correspondiente para que las zonas de ruido se hagan 0 y el resto mantenga su valor original. Exportamos la capa resultante para trabajarla desde ERDAS. En ERDAS se usa la función “Focal Analysis” (Interpreter - Spatial Enhancement) para pasar un filtro (primero de 3x3) que saque la media de aquellos pixeles con valor 0 (sin usar valores de 0), y después otro filtro de 5x5 y si todavía hay valores de 0 se pasa otro más de 7x7. Es importante seguir este orden para que el relleno de ND sea lo más parecido a sus vecinos en lo posible. El siguiente esquema con figuras ilustra el procedimiento seguido hasta obtener la imagen corregida.

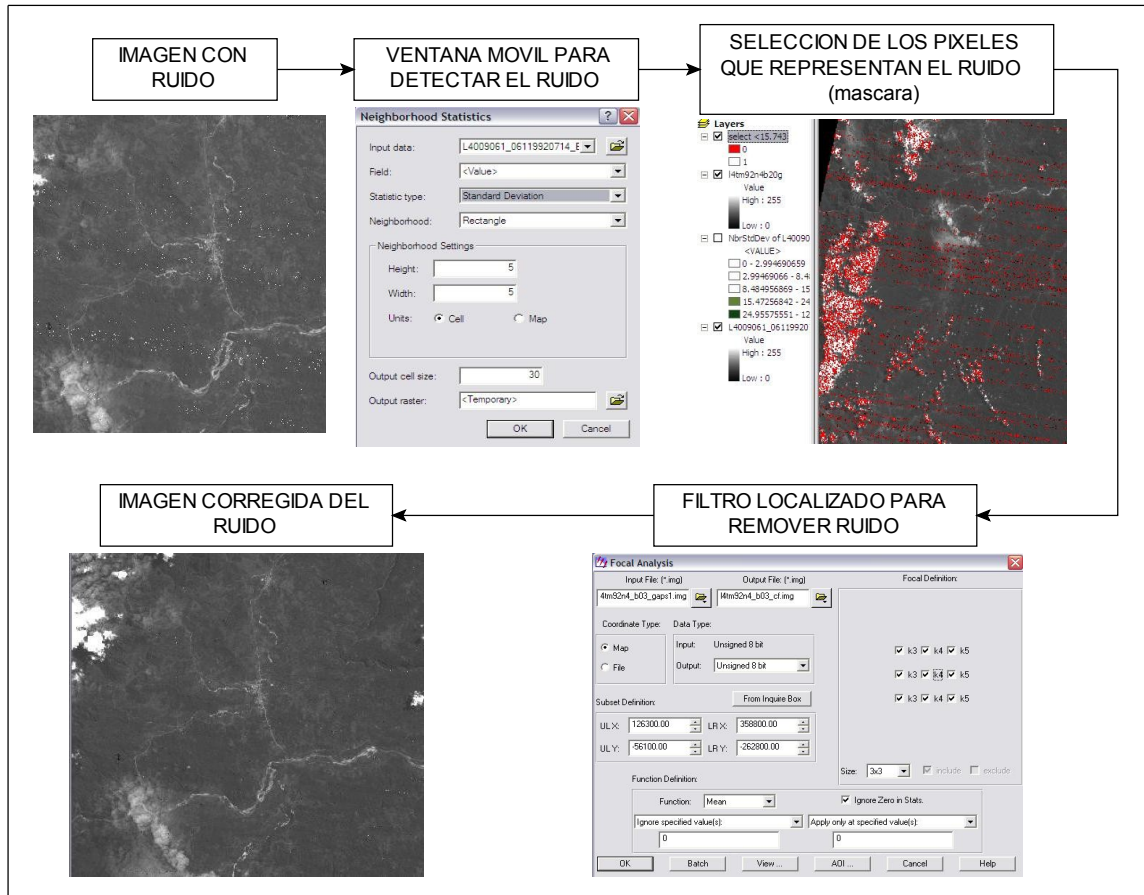


Figura 19. Proceso para corregir ruido de las imágenes.

La siguiente figura resume las tres etapas de procesamiento de la imagen: original, modificada con la máscara y corregida.

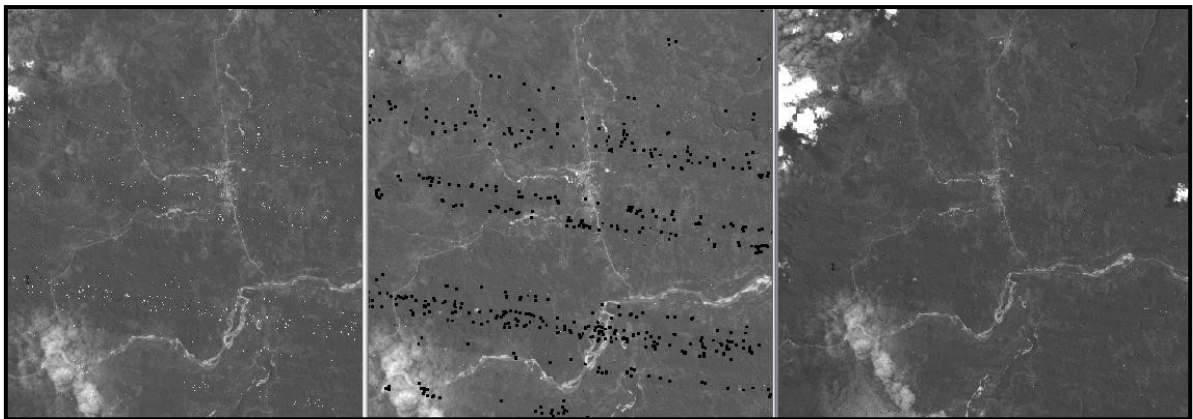


Figura 20. Una de las bandas de la imagen antes y después de la corrección del ruido.

Si bien la imagen no se corrigió del todo, si lo hizo en su mayoría, de tal forma que pudo ser utilizada para la clasificación supervisada.

3.2.3. Clasificación de las Imágenes.

Primero: Corte, Proyección y Composición de 6 bandas.

Previo a los procesos de clasificación, primeramente se hizo la composición de 6 bandas (1,2,3,4,5,7) de las imágenes TM, (exceptuando la 6 de infrarrojo térmico) después se proyectó cada una de las 4 imágenes a la zona UTM 18 Sur que corresponde a la provincia de Napo y por último en esta etapa, se cortó cada imagen con un polígono que coincide con el límite de la provincia (que corta cada una de las 4 imágenes en sus límites) cuidando que quede un área de superposición para asegurar que no se presenten vacíos de información al momento de elaborar el mosaico de las clasificaciones. Los polígonos de corte, N1,N2,N3,N4, así como las imágenes cortadas⁷ se pueden observar en la siguiente figura.

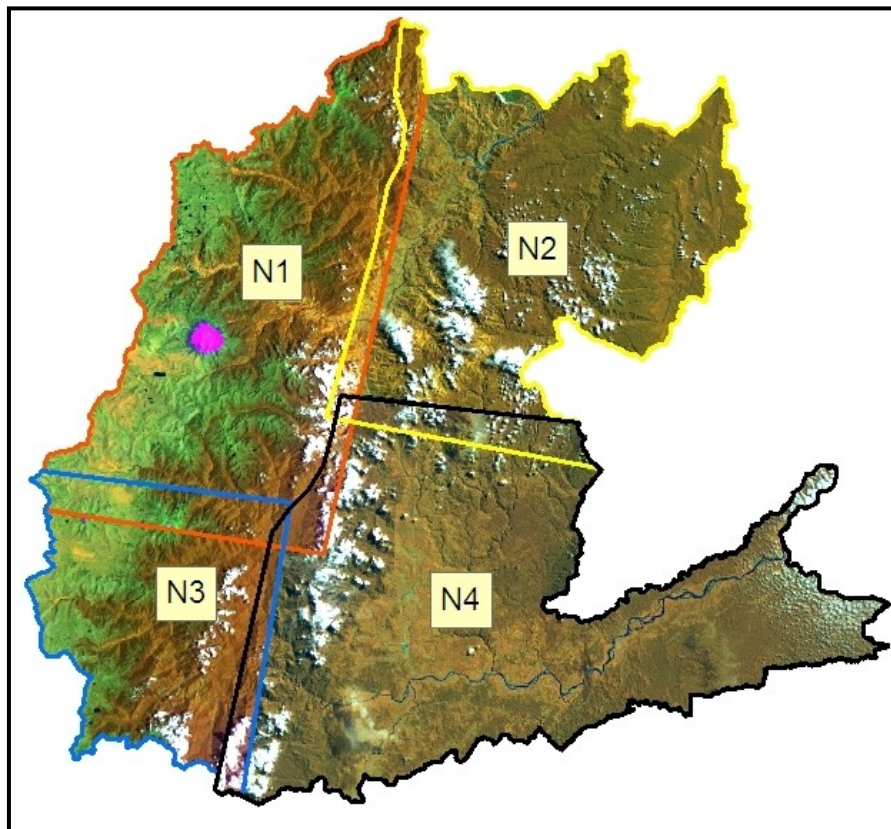


Figura 21. Imágenes cortadas con los cuadrantes que componen la Provincia de Napo.

Segundo: Añadiendo nuevas bandas.

Debido a que los cuadrantes N1 y N3 son zonas muy heterogéneas y con ecosistemas con características geográficas muy particulares, como por ejemplo los páramos que se extienden en las zonas altas (entre 3200 msnm y 4200 msnm aproximadamente) o los

⁷ Para referirnos a las imágenes cortadas, mantenemos el mismo alias que se menciona en la Tabla 2.

bosques templados correspondientes a las estribaciones de cordilleras con pendientes muy fuertes, entre otros ecosistemas, se decidió construir y anexar a las imágenes de los cuadrante N1 (TML4N1) y N3(TML4N3), tres bandas más que corresponden a: una banda de elevaciones (del SRTM90m), una banda de pendientes (derivadas del SRTM90m), y por último una banda mas de NDVI (construido con las bandas 4 y 3 de la misma imagen). Esta modificación de agregar tres bandas más en las imágenes, resultó de gran ayuda en la clasificación, porque la distancia espectral fue mayor en estas bandas⁸, lo que era de esperar, ya que como se dijo, los ecosistemas presentan características muy particulares en estas variables. A continuación, se muestra una captura de pantalla del archivo de imagen (TML4N1) con 9 bandas y la vista previa de la banda 7 de elevación.

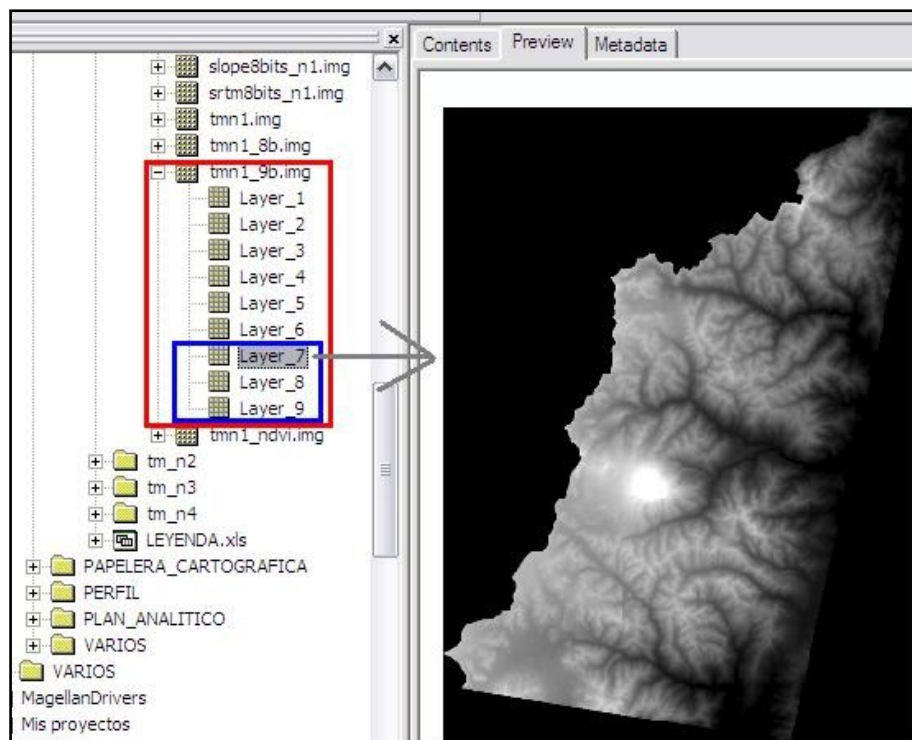


Figura 22. Imagen TML4N1 tiene 9 bandas. La banda 7 corresponde a la altitud.

Tercero: Recolección y evaluación de firmas espectrales.

Una vez preparada cada imagen por cuadrantes (Figura 21) se procedió a recolectar firmas espectrales para clasificarlas por separado con la técnica de “clasificación supervisada” debido a que hay un conocimiento de la zona de estudio por trabajos realizados anteriormente. La recolección de firmas espectrales se hizo para las diferentes coberturas y en los diferentes cuadrantes que componen el mosaico de la provincia de Napo. La tabla 3 muestra las coberturas de referencia usadas en la recolección de firmas para cada cuadrante.

⁸ Más adelante se muestra la evaluación de firmas.

Tabla 3. Coberturas identificadas en cada cuadrante para la clasificación.

COBERTURA/USO (±1990)	ZONA/ CUADRANTE			
	N1	N2	N3	N4
areas quemadas/suelo (organico)	x		x	
bosque secundario o silvopastoril (t1)	x	x		x
bosque secundario o silvopastoril (t2)		x	x	x
bosque primario(t1)	x	x	x	x
cultivos/pastos	x	x	x	x
infraestructura o urbano	x	x		x
lagunas	x		x	
lavas (t1)	x	x		
nieve	x		x	
nubes	x	x	x	x
sombras		x	x	x
bruma		x		x
paramo de pajonal o arbustivo		x	x	
paramos de almodilla	x		x	
pastos/silvopastoril	x	x		
rios	x	x	x	x
suelo desnudo/roca (t1)	x			
suelo desnudo/roca (t2)	x	x	x	x
paramo pajonal			x	
paramo arbustivo			x	
paramo pajonal con almodilla			x	
deslizamiento			x	
paramo pajonal	x			
paramo arbustivo	x			

Se diferencian t1 y t2, porque se presentan diferentes tipos de bosque secundario, ya sea el bosque secundario en la parte andina o de estribación o el bosque secundario en la zona tropical. Hecha esta aclaración, se procede al análisis y explicación de la recolección de firmas.

En cuanto a la metodología para la recolección de firmas, debe considerarse que se realizó con la técnica del “pixel semilla”, que básicamente consiste en identificar un área o polígono que contiene pixeles con determinada semejanza o distancia espectral respecto al pixel seleccionado, el cual se entiende que pertenece a una cobertura conocida. Además de usar el “pixel semilla”, también se usó el perfil espectral del pixel para identificar firmas que correspondan a la misma cobertura y así generar un conjunto de firmas confiables para las diferentes coberturas. La Figura 23 y la Figura 24 muestran respectivamente, una pantalla de personalización para recolectar firmas con la técnica del “pixel semilla” en una cobertura de bosque y un ejemplo de perfil espectral que se obtuvo para esta misma cobertura.

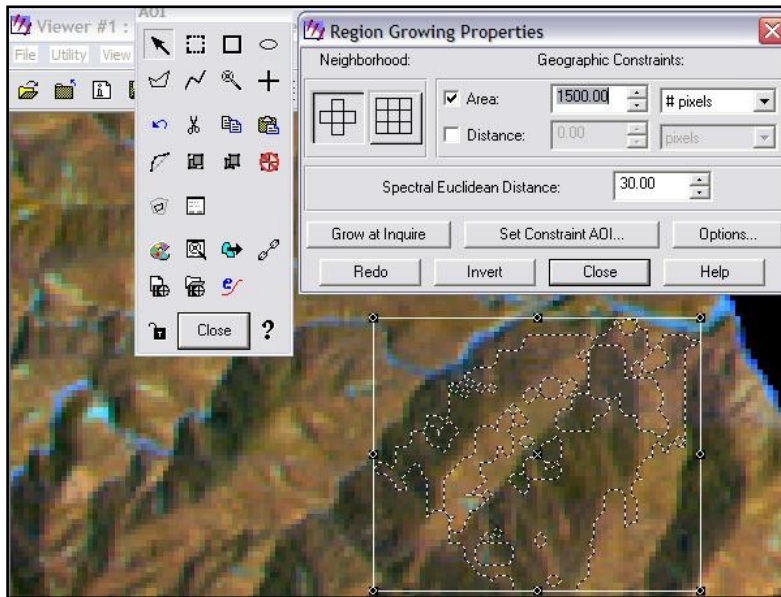


Figura 23. Recolección de firmas con la técnica del pixel semilla.

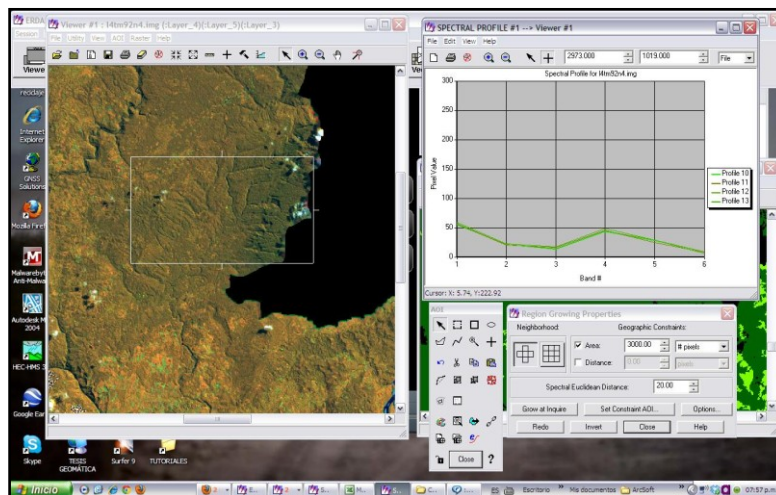


Figura 24. Evaluación previa en la recolección de firmas con perfiles espectrales.

Las firmas espectrales también fueron evaluadas después de ser recolectadas, con dos técnicas básicamente, una que evalúa la “separabilidad entre firmas” calculando la distancia estadística entre firmas, para determinar lo distintas que son las firmas entre sí, y también para determinar el mejor conjunto de bandas que se pueden usar en la clasificación, es decir, en qué bandas las firmas son mas diferentes (Figura 25).

Best Minimum Separability			
Bands	AVE	MIN	Class Pairs:
			1: 2 1: 3 1: 4 1: 5
			1: 9 1:10 1:11 1:12
			1:16 1:17 2: 3 2: 4
			2: 8 2: 9 2:10 2:11
			2:15 2:16 2:17 3: 4
			3: 8 3: 9 3:10 3:11
			3:15 3:16 3:17 4: 5
			4: 9 4:10 4:11 4:12
			4:16 4:17 5: 6 5: 7
			5:11 5:12 5:13 5:14
			6: 7 6: 8 6: 9 6:10
			6:14 6:15 6:16 6:17
			7:11 7:12 7:13 7:14
			8: 9 8:10 8:11 8:12
			8:16 8:17 9:10 9:11
			9:15 9:16 9:17 10:11
			10:15 10:16 10:17 11:12
			11:16 11:17 12:13 12:14
			13:14 13:15 13:16 13:17
			15:16 15:17 16:17
5 8 9	100	28	108 60 126 97
			37 126 143 36
			73 164 59 96
			108 138 101 89

Figura 25. Extracto de la pantalla de resultados de la evaluación de separabilidad de la imagen TML4N3.

En esta evaluación podemos observar que la banda de Infrarrojo Medio (B5) y las bandas añadidas de pendiente (B8) y NDVI (B9) presentan la mayor separación lo cual indica que las bandas añadidas mejoran la clasificación.

La otra técnica usada fue la del “feature space” que consiste en generar una imagen utilizando dos bandas que las grafica en un eje de coordenadas xy, e identifica sobre esta imagen la zona que cubre determinada firma. Las figuras 26, 27 y 28 muestran las tres situaciones encontradas y que sirvió para evaluar las firmas recolectadas.

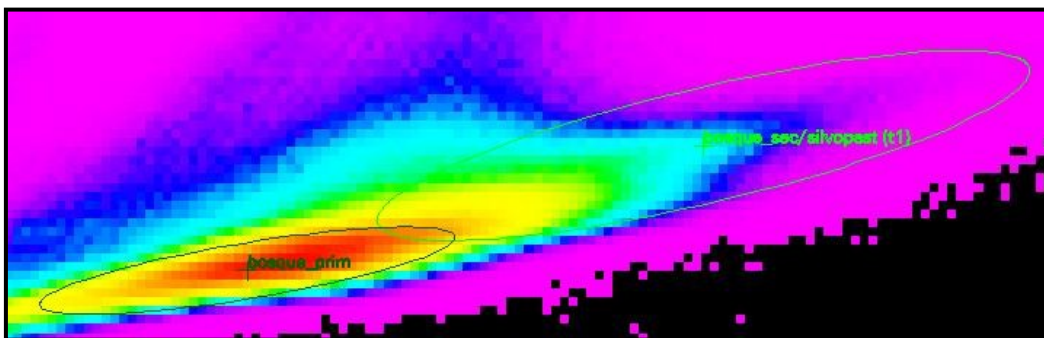


Figura 26. Firmas diferentes.

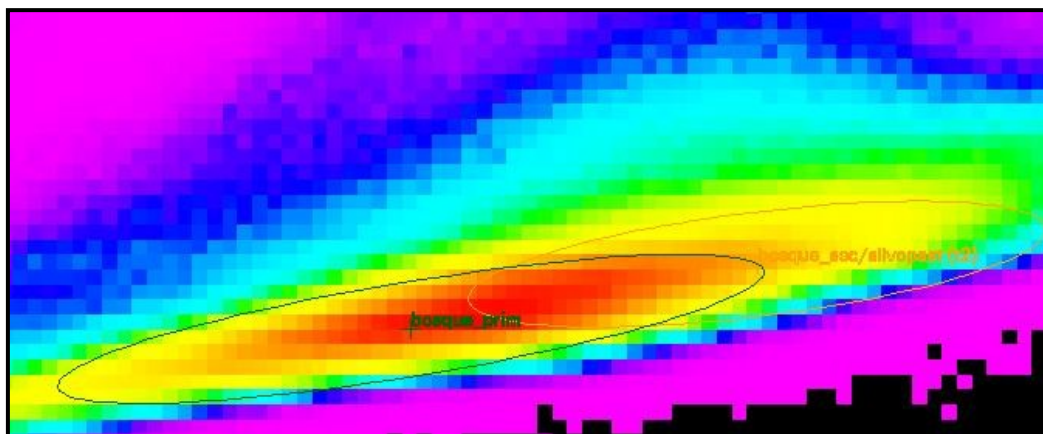


Figura 27. Firmas superpuestas.

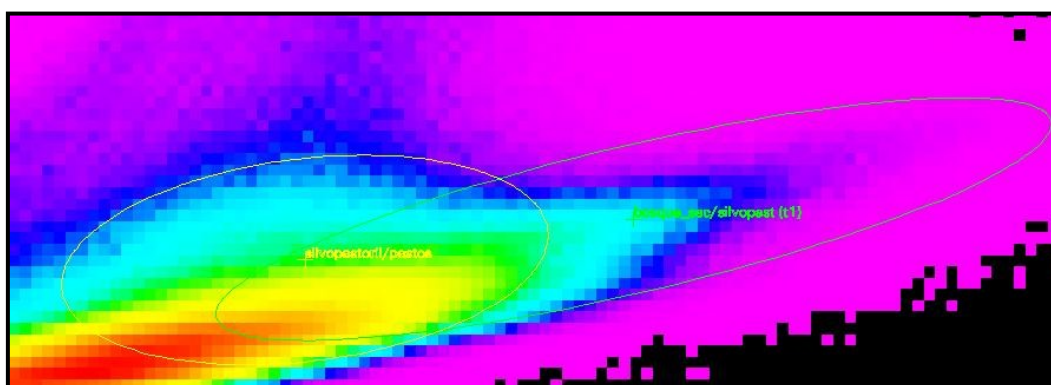


Figura 28. Firmas parecidas.

La primera situación (Figura 26), de firmas diferentes (por ejemplo: bosque primario vs bosque secundario/silvopastoril) indica que las firmas están bien recolectadas ya que no hay mayor superposición entre las elipses, es decir las firmas son diferentes y no habrá confusión en la clasificación. La segunda situación (Figura 27), por ejemplo con estas mismas coberturas (bosque primario vs bosque secundario/silvopastoril), muestra que las firmas se parecen mucho y la superposición de elipses indica que las firmas están mal recolectadas ya que están confundiendo ambas coberturas. En este caso, las firmas debieron ser revisadas. La tercera situación (Figura 28) es de firmas parecidas (bosque secundario o silvopastoril vs silvopastoril o pastos) aquí hay cierta superposición, pero las elipses como se puede ver, son un poco diferentes (la una mas achatada que la otra). En este caso a pesar de ser parecidas las firmas, se las deja como están, porque es normal que se presente esta semejanza ya que ambas firmas pueden contener algo de silvopastoril. Sin embargo, es importante señalar que en la clasificación se incluyó en una misma clase a “silvopastoril/pastos” con “pastos/cultivos” por ser muy parecidas las firmas. Más adelante, en los procesos de edición, se hizo un *recode* o reclasificación para agrupar coberturas, a los fines de simplificar aun más la leyenda.

Cuarto: Clasificación Supervisada.

Una vez obtenidas las firmas, se realizó la clasificación supervisada, cuyos resultados para cada cuadrante pueden observarse a continuación.

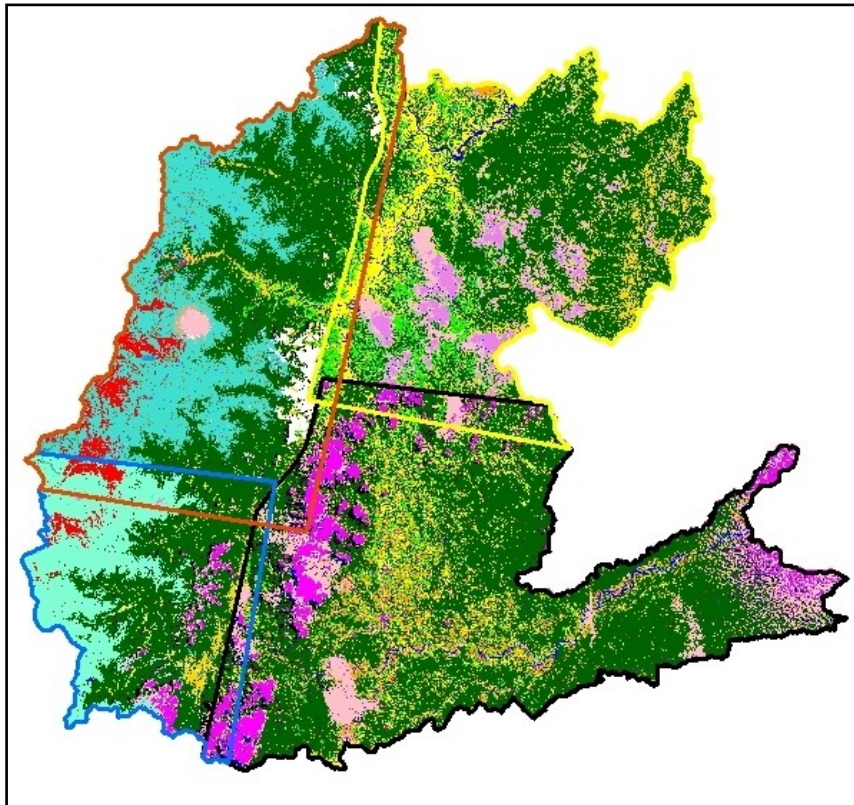


Figura 29. Resultado de la clasificación supervisada de las imágenes.

3.2.4. Procesos de Edición.

Después de la clasificación supervisada fue necesario un proceso de edición para obtener el mapa final. El siguiente diagrama (Figura 30) ilustra los procesos seguidos.

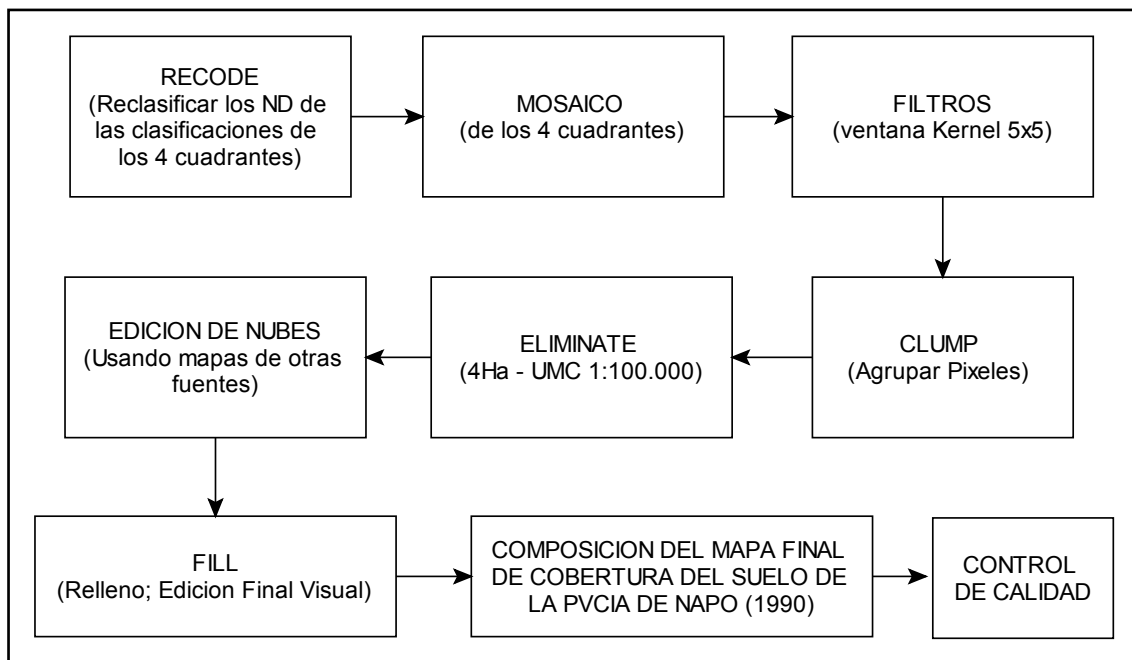










Figura 30. Diagrama de procesos para la edición de la clasificación supervisada.

A continuación se proporciona una explicación breve de los procesos.

a. RECODE

Es un proceso para reclasificar el valor de los ND (niveles digitales) de los píxeles. La Tabla 4 muestra la leyenda simplificada para los procesos de RECODE o reclasificación para hacer el mosaico y continuar con la edición y la Figura 31 muestra el mapa final que corresponde a la cobertura del suelo de la provincia de Napo para el año 1990.

Tabla 4. Leyenda para la reclasificación y simplificación de coberturas.

ND (recode)	COBERTURA/USO (1990)	color_ref	N1	N2	N3	N4
1	Bosque Primario		x	x	x	x
2	Bosque Sec/Silvopast		x	x	x	x
3	Paramo Almoadilla		x		x	
4	Paramo/Pajonal/Arbustivo		x		x	
5	Pastos/Cultivos		x	x	x	x
6	Areas quemadas/Suelo organico		x		x	
7	Suelo desnudo/Arenal/Roca		x		x	x
8	Lavas		x	x		
9	Nieve		x		x	
10	Nubes/bruma/sombras		x	x	x	x
11	Rios/lagunas		x	x	x	x
12	Infraestructura/Urbano		x	x		x

b. MOSAICO.

Se utiliza para unir todas las capas temáticas que surgieron de la clasificación de las imágenes de los cuadrantes.

c. FILTROS.

Este proceso consiste en pasar un filtro (Kernel) de 5X5 para eliminar el efecto de sal y pimienta que es muy característico de los procedimientos de clasificación.

d. CLUMP.

Este comando sirve para hacer agrupaciones de los píxeles, de forma que el sistema las reconozca como un conjunto y no de forma aislada.

e. ELIMINATE.

Este comando sirve para eliminar áreas pequeñas inferiores al detalle que se espera obtener en función de la escala. Si nuestra escala de trabajo es 1:100.000, y la unidad

mínima cartografiable es de 2x2mm (Chuvieco, 2008), las áreas a eliminar serán aquellas inferiores a 4ha.

f. EDICIÓN DE NUBES.

Después de obtener la clase “nubes” (ND 10) Y en base a mapas de cobertura disponibles de ese período se pudo comprobar que la clase “nubes” se encontraba en su mayoría sobre bosque primario, por lo que se reclasificó esta clase a “bosque primario”.

g. FILL.

Es un comando que sirve para rellenar de forma manual aquellas áreas que se identifiquen como otras clases a las asignadas por el proceso de clasificación.

h. COMPOSICION DEL MAPA FINAL.

Con un software de SIG se procede a vectorizar y editar la tabla de atributos para integrarla con otra información de tipo cartográfica. La Figura 31 muestra el mapa resultante de esta etapa.

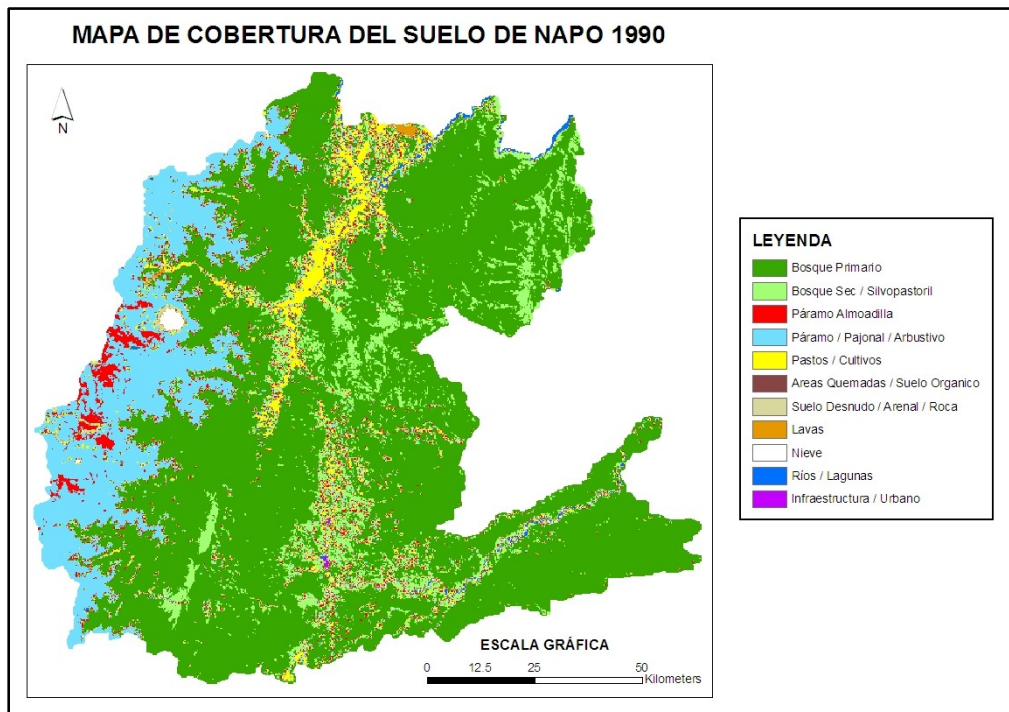


Figura 31. Mapa final de cobertura del suelo de la provincia de Napo año 1990.

i. CONTROL DE CALIDAD.

Para evaluar el mapa de cobertura del suelo para el año 1990 de la Provincia de Napo obtenido de las imágenes del sensor TM, se procedió a compararlo con un mapa de cobertura del suelo que realizó el MAE (Ministerio del Ambiente) para esta misma época. La comparación se realizó con una intersección espacial de los polígonos para evaluar el nivel de concordancia entre ambos mapas, y como las leyendas son diferentes, la comparación se hizo respecto al tipo de cobertura (natural o antrópico)⁹. La Figura 32 muestra el resultado de esta intersección. En la misma se indica el porcentaje de concordancia, las zonas con vacíos de información, ya que el mapa del MAE no está completo por la presencia de máscaras que se presume corresponden a nubes en las imágenes, y por último se indica también las zonas de mayor conflicto de compatibilidad.

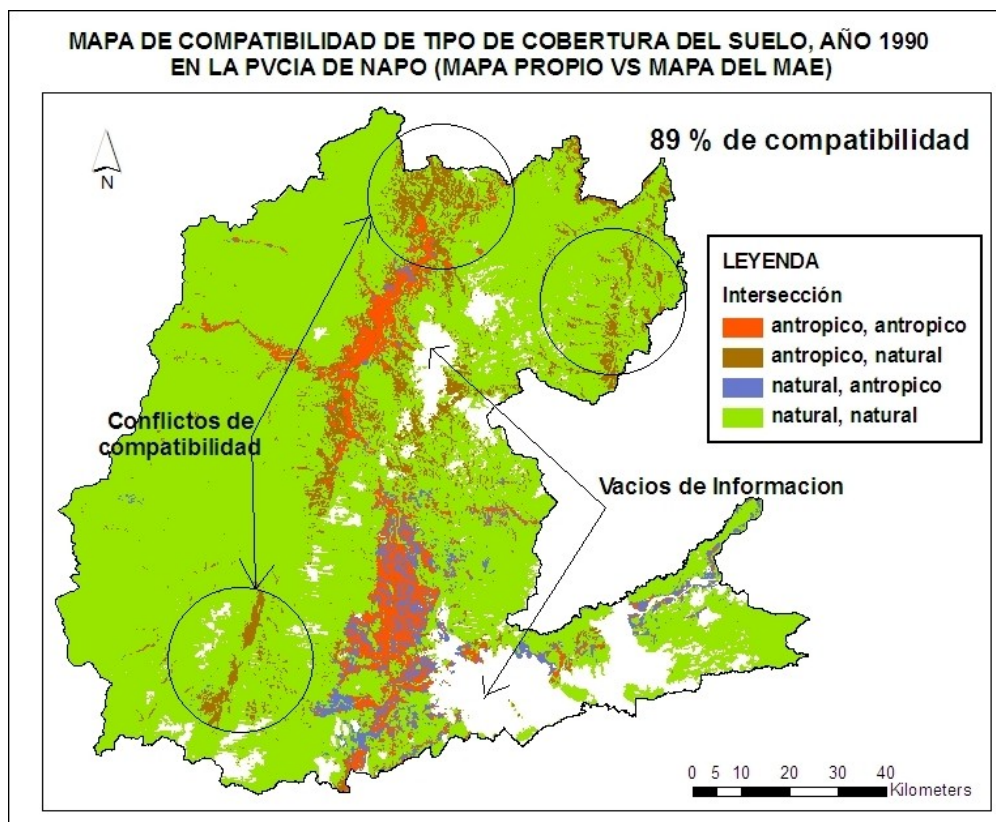


Figura 32. Mapa de compatibilidad de tipo de cobertura del suelo.

La siguiente es una tabla que indica las áreas y porcentajes de compatibilidad e incompatibilidad para cada caso.

⁹ Las tablas que indican qué coberturas son naturales y cuáles antrópicas, se encuentran más adelante.

Tabla 5. Áreas y porcentajes de compatibilidad e incompatibilidad.

Tipo_CobTMS	Tipo_CobMAE	area Km ²	%area
antropico	antropico	575.49874	5.12
antropico	natural	853.27516	7.59
natural	antropico	404.26321	3.60
natural	natural	9405.78350	83.69

Debe aclararse que “Tipo_CobTMS”, es el tipo de cobertura en el mapa elaborado para este trabajo a partir de imágenes del sensor TM (año 1990), y “Tipo_CobMAE”, es el tipo de cobertura en el mapa recopilado del MAE para esta misma fecha.

Como se puede observar, hay una **compatibilidad del 89%** en las áreas de tipo antrópico y naturales, y la incompatibilidad sería del 11%.

Las causas que disminuyen el porcentaje de compatibilidad son dos principalmente. Primero, las zonas de “conflicto de compatibilidad” en la Figura 32, ya que en estas zonas, las coberturas presentan características muy “peculiares” en su respuesta espectral, lo que hace difícil saber a ciencia cierta (debido a la falta de fuentes auxiliares de información sobre las coberturas de estas zonas para este período, ya que solo se cuenta con la interpretación propia y la del MAE) si se trata de bosques degradados, o son bosques primarios, de alguna especie en particular, con características espectrales diferentes al resto. El MAE en su metodología no indica si se hicieron verificaciones *in situ* en las zonas donde se detecta falta de compatibilidad. Cabe mencionar que son zonas inaccesibles, difíciles de llegar, ubicadas en su mayoría en reservas naturales protegidas.

En segundo lugar, otra de las causas de incompatibilidad está dada por las zonas de ausencia de información que el MAE menciona como máscaras. Aquí la presencia de nubes, seguramente fue la causa para no tener la cobertura completa, y justamente por no tener la cobertura completa es que se decidió elaborar un mapa propio.

Debido a las razones anteriormente expuestas se considera que el 89% de compatibilidad permite seguir adelante en este trabajo, utilizando el mapa de cobertura que se ha desarrollado para tal fin.

Por último, en esta etapa se recomienda complementar la evaluación a partir de una generación aleatoria de puntos a manera de muestra y posterior interpretación visual para comprobar el grado de eficiencia en la clasificación digital automática, o también, usar una imagen de mayor resolución espacial. O también ir a campo y verificar *insitu* a qué corresponden estas áreas de incompatibilidad, ya que hay una buena “probabilidad” de que las áreas se hayan mantenido sin alteración desde aquella época (1990) hasta el presente. Sin embargo, y como ya se advirtió, esto último sería muy difícil, por los problemas de inaccesibilidad (vegetación densa, alto nivel de precipitación, fuertes pendientes).

3.3. ANALISIS DEL CAMBIO DE COBERTURA DEL SUELO, ENTRE LAS COBERTURAS DE ORIGEN NATURAL Y AQUELLAS DE ORIGEN ANTROPICO EN LA PROVINCIA DE NAPO PARA EL PERÍODO 1990 – 2002.

El objetivo principal de esta etapa es determinar la magnitud y ubicación de los diferentes tipos de cambio y/o conservación que se han venido dando en la provincia entre las coberturas naturales y aquellas de origen antrópico.

A manera de un modelo lógico, a continuación se indican las operaciones seguidas en el modelo cartográfico.

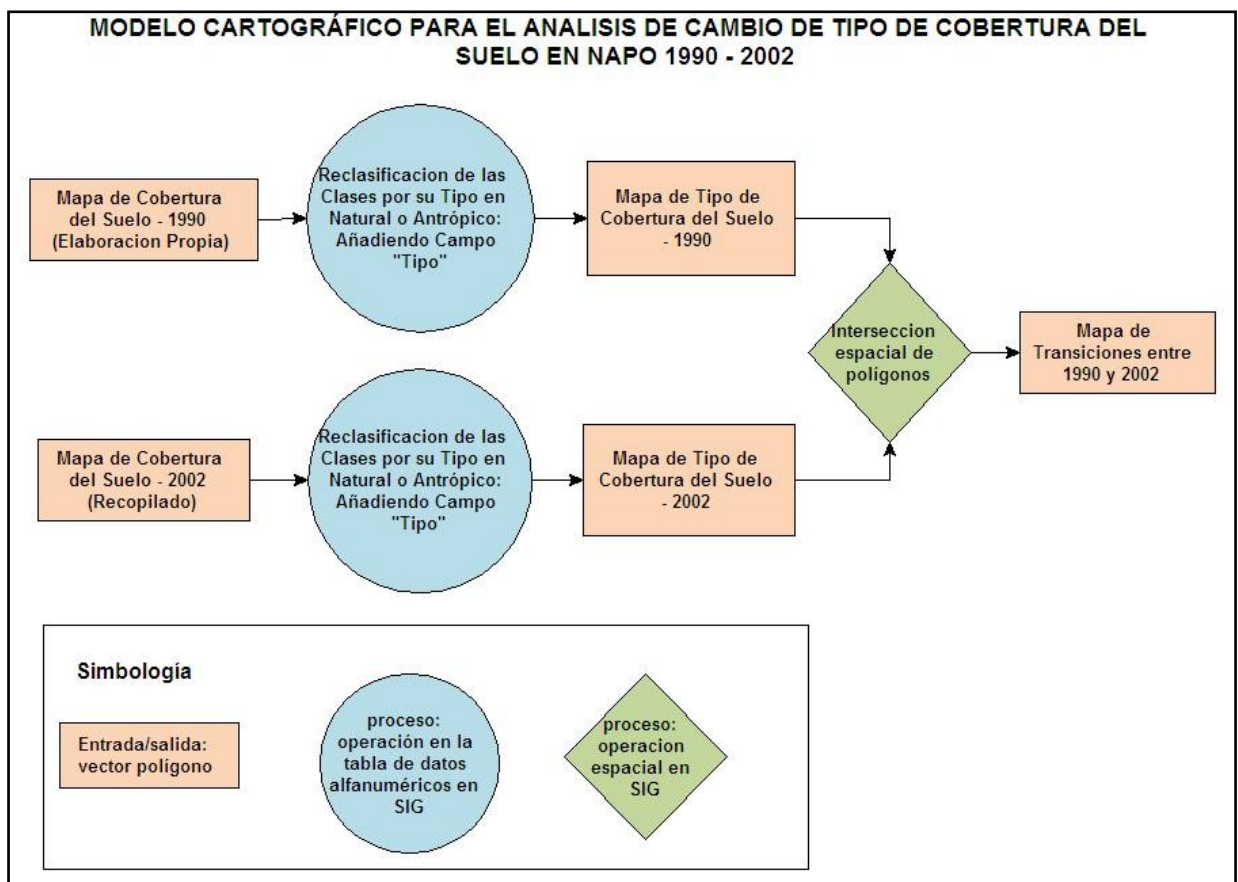


Figura 33. Modelo cartográfico para el análisis de cambio de cobertura del suelo 1990-2002.

Para complementar el modelo cartográfico indicamos el modelo entidad relación de nuestra base cartográfica.

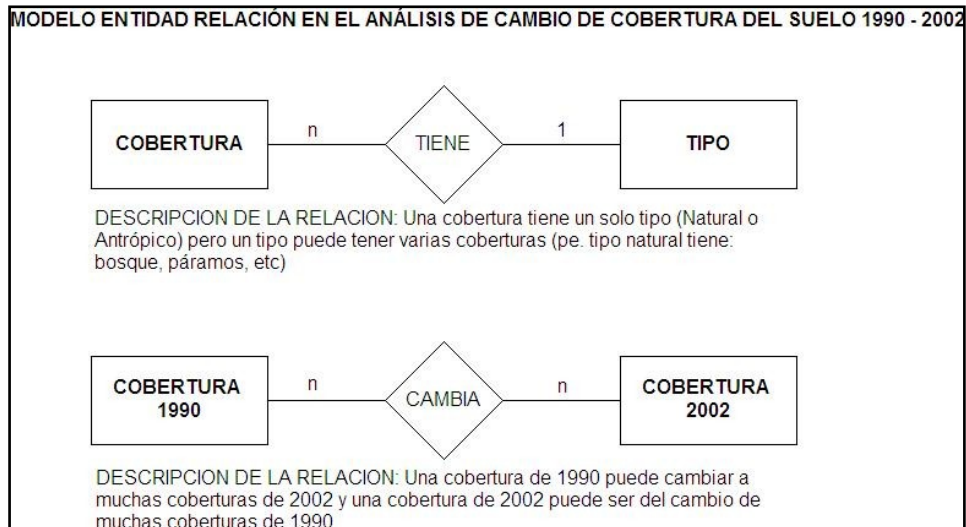


Figura 34. Modelo entidad relación del análisis de cambio de cobertura.

A continuación se desarrolla el modelo cartográfico, es decir cómo se implementa el modelo físico.

La figura que sigue, muestra el mapa de cobertura del suelo del año 1990 que se realizó para este trabajo a partir de imágenes TM. El mismo indica las diferentes coberturas y la clasificación de éstas en natural o antrópicas.

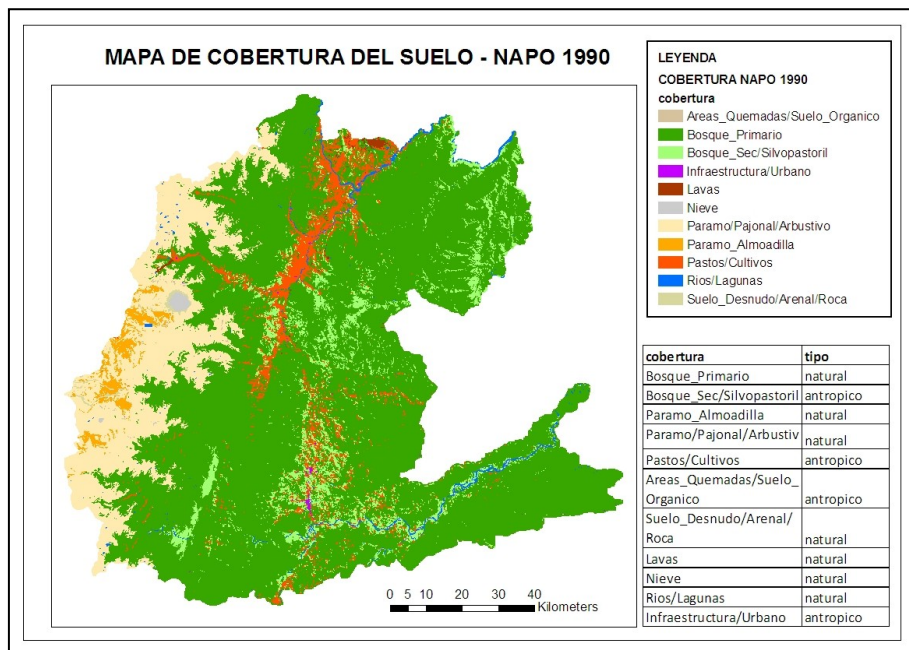


Figura 35. Mapa de cobertura del suelo del año 1990 y la clasificación de las coberturas en natural o antrópico.

De igual forma se procedió a clasificar en coberturas naturales o antrópicas haciendo una generalización de la leyenda del mapa de cobertura del año 2002 (base Infoplan) que se recopiló para este trabajo.

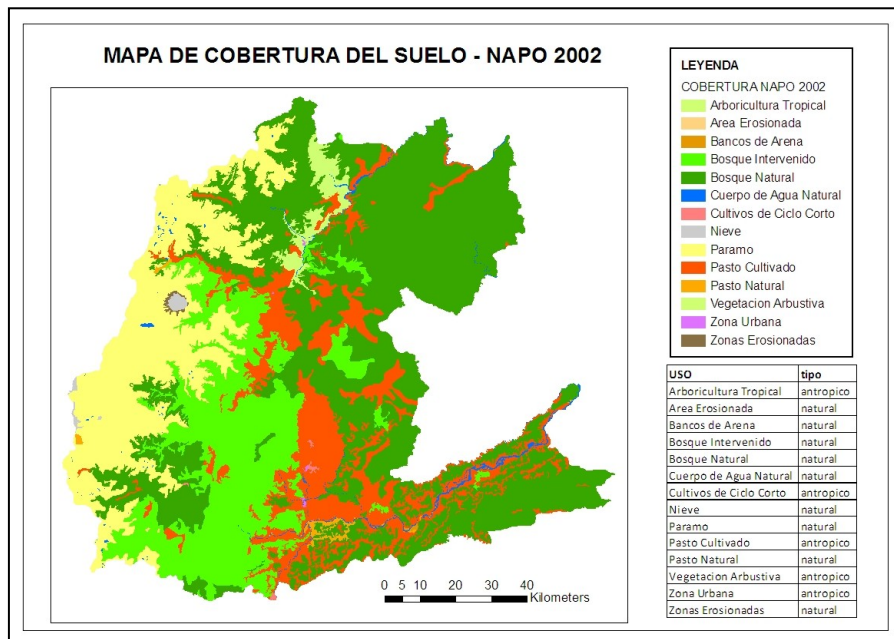


Figura 36. Mapa de cobertura del suelo del año 2002 y la clasificación de las coberturas en natural o antrópicas.

Una vez que se tienen ambos mapas con su leyenda reclasificada ya sea en “natural” o “antrópica” se procede a realizar una intersección entre los polígonos de ambos mapas. El resultado es el siguiente mapa que indica el tipo de cambio sufrido por las coberturas.

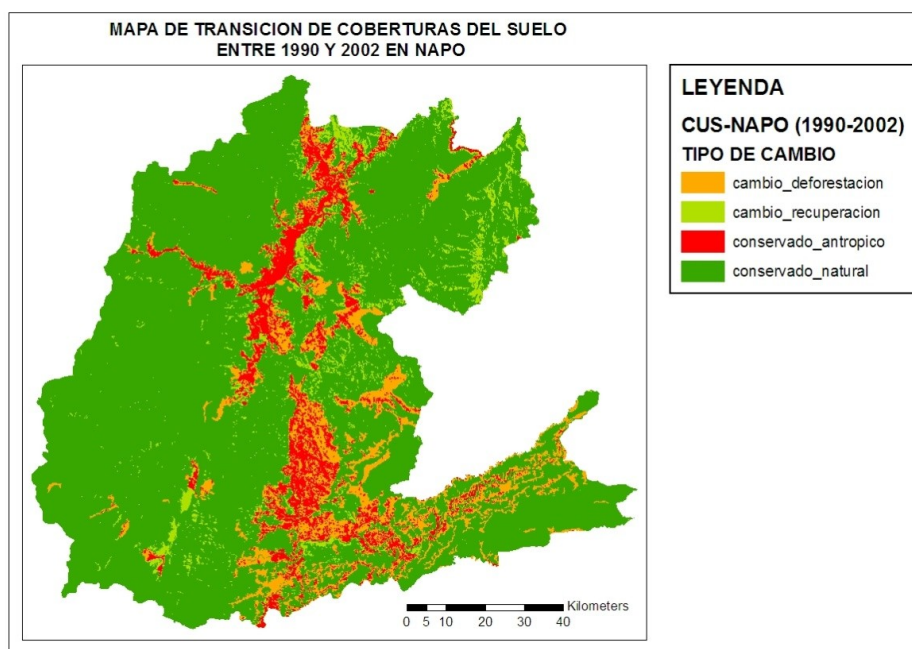


Figura 37. Mapa de cambios entre el año 1990 y el año 2002.

Los cambios señalados en la leyenda del mapa corresponden al tipo de cambio o conservación que tuvieron las coberturas y que se resume en la siguiente tabla con el porcentaje que corresponde a cada uno.

Tabla 6. Porcentajes de cambio entre coberturas para los años 1990 y 2002.

cob1990	cob2002	tipo cambio	porcentaje
natural	natural	conservado natural	78.04
natural	antropico	cambio deforestacion	9.62
antropico	natural	cambio recuperacion	4.69
antropico	antropico	conservado antropico	7.65
TOTAL			100

Breve análisis del cambio de cobertura del suelo (1990-2002)

Las áreas que se han logrado conservar mejor en un estado natural (78%), han sido aquellas que corresponden a las áreas protegidas (Cayambe-Coca, Antisana, Llanganates), las mismas que principalmente se encuentran al occidente de la provincia y comprenden a la zona de páramo y bosque nublado andino. Es importante notar que estas zonas, además de estar protegidas por su estatus legal ambiental, también están favorecidas en su conservación por el hecho de ser inaccesibles debido a las fuertes pendientes que presentan (bosque nublado andino) y a las condiciones climáticas difíciles como las del páramo. Un sector de la llanura amazónica en el sureste de la provincia, también se ha mantenido conservado en este período.

Aquellas áreas que han cambiado de un estado natural al antrópico por la deforestación, son relativamente pequeñas (9.62%). Son áreas que están muy próximas a aquellas que se han mantenido en este periodo en estado antrópico (Zona de Papallacta, Baeza, El Chaco, Archidona y Tena), es decir, forman parte de un proceso de degradación de las coberturas que están cerca de aquellas de tipo antrópico (pastos cultivados y usos silvopastoriles principalmente).

Las áreas que muestran un cambio hacia la recuperación, son las de menor porcentaje (4.69%), y son aquellas que están alejadas de los centros productivos como se puede observar en la Figura 34. Estas zonas están ubicadas principalmente en la parte baja de la reserva Llanganates (suroeste) y en las estribaciones del parque nacional Sumaco (noreste).

Por último, las zonas que se han mantenido en un estado de conservado antrópico son relativamente pequeñas también (7.65%), y corresponden a las principales zonas productivas de la provincia: Papallacta, El Chaco, Baeza, Archidona y Tena.

3.4. ELABORACIÓN DEL MAPA DE PROBABILIDAD DE PRESENCIA DE LAS COBERTURAS DE TIPO ANTRÓPICO

El mapa de probabilidad de presencia de las coberturas de tipo antrópico permite determinar qué zonas del territorio son susceptibles de transformarse a un estado antrópico, es decir si una cobertura en un tiempo t_0 es de tipo natural, qué probabilidad existe de que se transforme a un estado antrópico en un tiempo t_{0+1} , y si es antrópico en t_0 , qué probabilidad existe de que se mantenga en ese estado antrópico en un t_{0+1} , considerando que t_{0+1} no es un tiempo definido sino un futuro relativamente cercano. Lo que se busca es encontrar qué zonas del territorio cumplen las condiciones para que exista una cobertura de tipo antrópica, basándonos en las coberturas de tipo antrópico que ya existen. Con el mismo criterio ya aplicado, se consideran coberturas de tipo antrópica aquellas que han sufrido la intervención humana de forma significativa, y de tipo natural aquellas que han sufrido poco o casi nada de intervención humana.

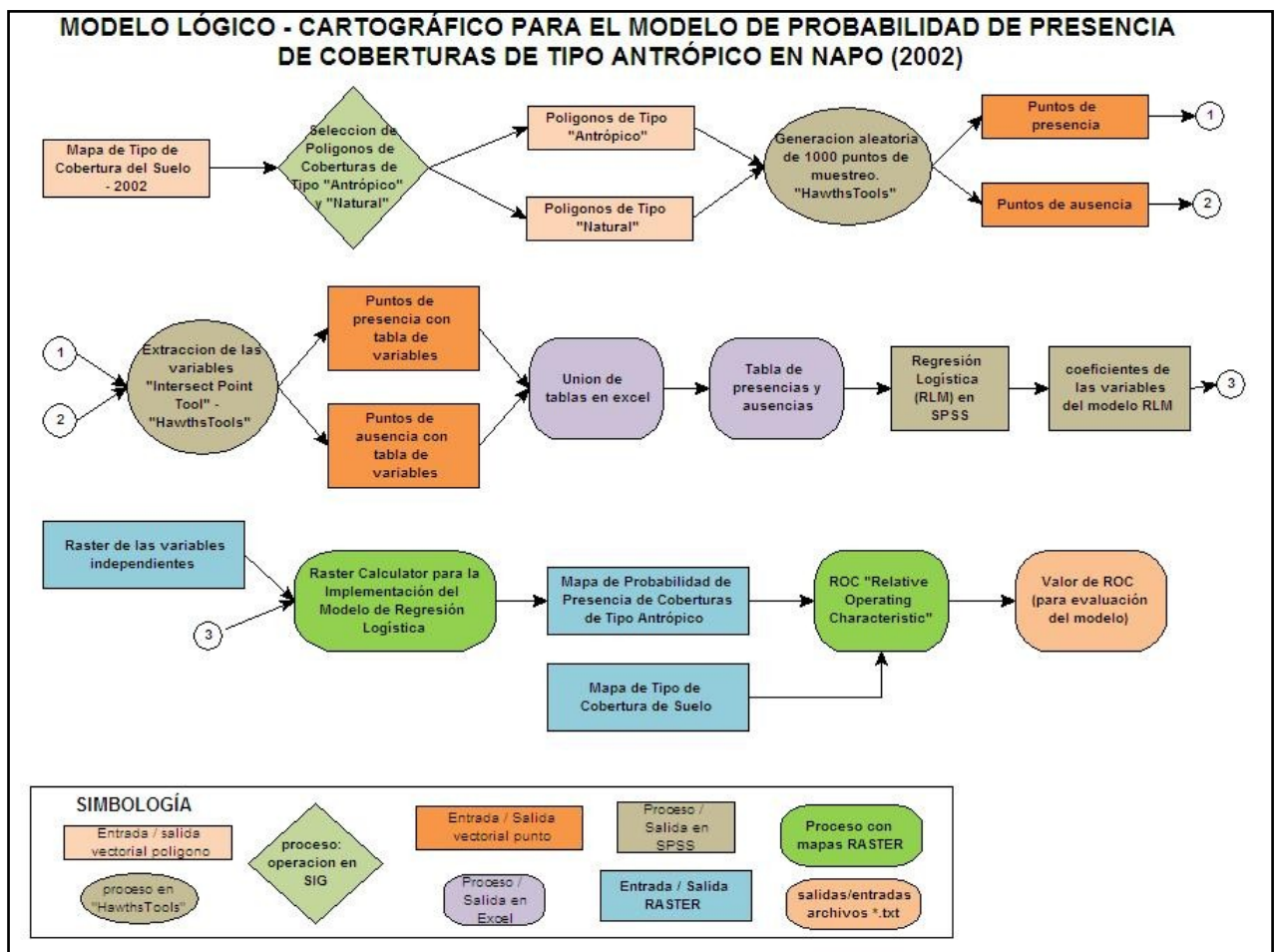


Figura 38. Modelo lógico – cartográfico del mapa de probabilidad de presencia de coberturas de tipo antrópico.

El mapa utilizado para hacer el modelo es el mapa de cobertura del suelo del año 2002 de la base Infoplan, es decir, el año de referencia del mapa de probabilidad de coberturas antrópicas es el 2002 y las variables de entrada al modelo también corresponden a dicho año, por tanto más adelante se usará este mapa como entrada del modelo CA_MARKOV partiendo del año 2002 para la simulación y posterior validación al año 2008.

Los pasos para elaborar el mapa de probabilidad de presencia de coberturas de tipo antrópico a partir de un modelo lógico – cartográfico, se detallan en la Figura38.

Para complementar el modelo cartográfico indicamos el modelo entidad relación de nuestra base cartográfica entre variables del modelo. Y a continuación el modelo físico, es decir cómo se desarrollan los pasos del modelo lógico – cartográfico.

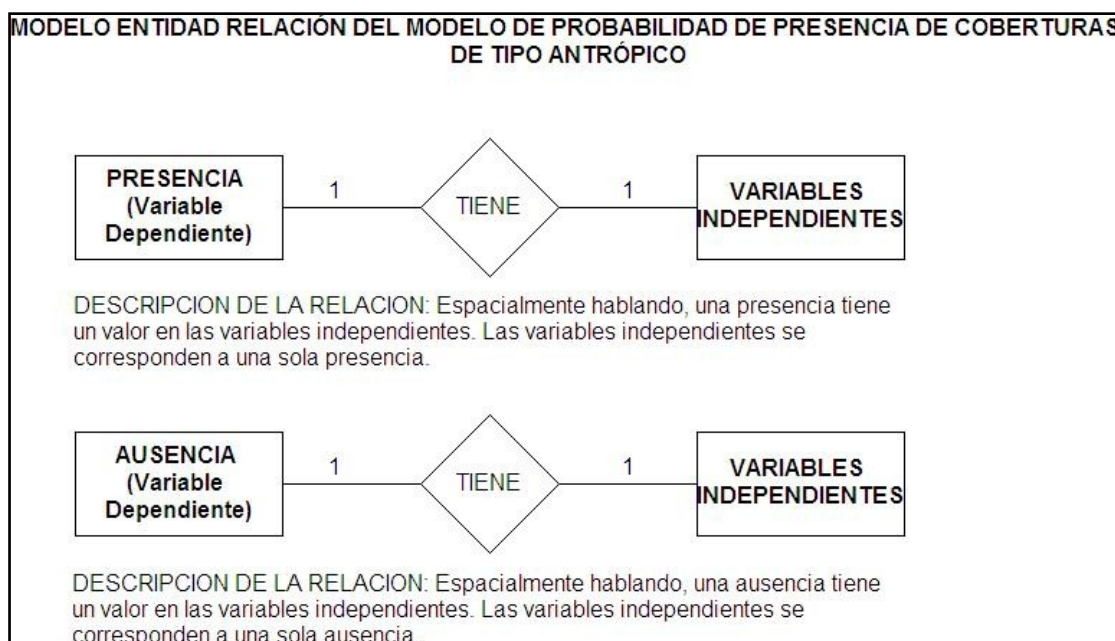


Figura 39. Modelo entidad relación de las tablas alfanuméricas para el modelo de probabilidad.

3.4.1. Generación de presencias y ausencias.

Se realiza un muestreo aleatorio dentro de los polígonos de las coberturas de tipo antrópico (1000 puntos) y natural (1000 puntos) con la herramienta “HawthsTools¹⁰” donde las presencias están dadas por las coberturas antrópicas y las ausencias por las coberturas naturales. La siguiente figura muestra el proceso de generación de los puntos.

¹⁰ Extensión gratuita para ArcGis que ofrece varios módulos de análisis espacial.

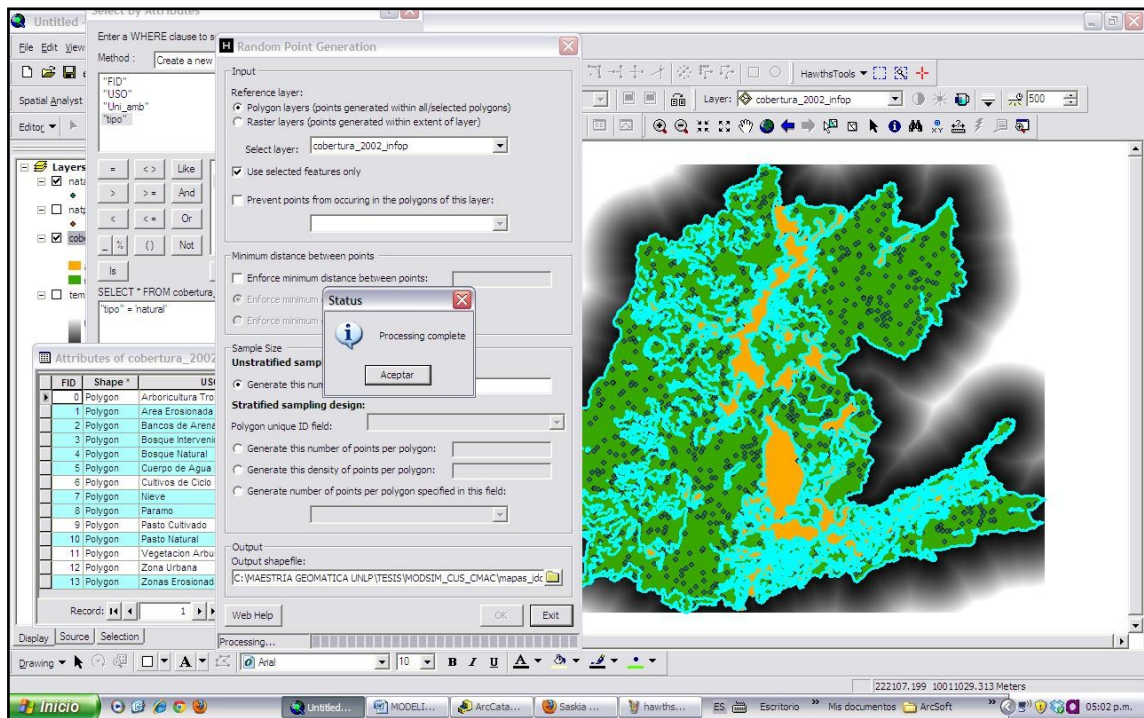


Figura 40. Generación de puntos de presencias y ausencias para la RLM.

3.4.2. Selección de variables independientes para el modelo.

Las variables independientes utilizadas se indican a continuación.

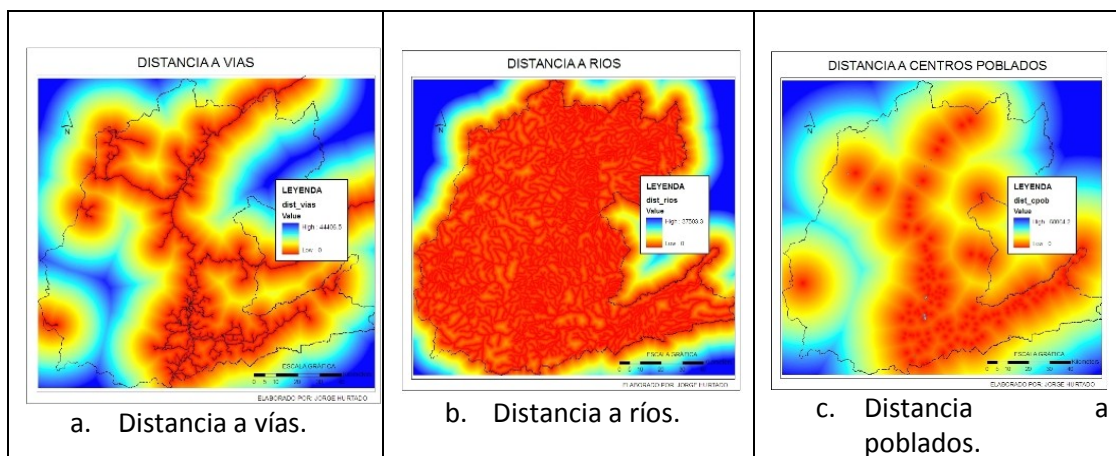
Tabla 7. Características de las variables independientes consideradas.

Nº	Variable	Fuente	Tamaño de celda(m)	Tipo
1	Distancia a Vías	Cartografía de vías (levantamiento GPS)	100	antropica
2	Distancia a Rios	Cartografía de rios.	100	ambiental
3	Distancia a Centros Poblados	Cartografía de centros poblados	100	antropica
4	Altitud	SRTM	90	ambiental
5	Pendiente	SRTM	90	ambiental
6	Saturacion	SRTM	90	ambiental
7	Temperatura	WORLD CLIM	1000	ambiental
8	Precipitacion	WORLD CLIM	1000	ambiental
9	NDVI	TM LandSat (4-5)	30	ambiental

En base a una exhaustiva revisión bibliográfica y debido a la propia naturaleza de las coberturas de tipo antrópico, consideramos como variables independientes a las **distancias tanto a vías como a centros poblados** para tener en cuenta de alguna forma, la influencia de la

presencia humana, y la accesibilidad que tiene en el bosque, ya que estos pueden influir en el CCS (cambio de cobertura del suelo). Sin embargo además de presentarse las condiciones antrópicas favorables a este tipo de cobertura, también deben existir condiciones ambientales que lo favorezcan, es por esto que consideramos la **distancia ríos** ya que de alguna forma ofrece accesibilidad en el territorio por la navegabilidad; la **altitud** porque la ocupación humana y sus actividades agro productivas se asientan en las partes media y baja de las cuencas en Napo, debido a que las partes altas en los páramos son en su gran mayoría reservas protegidas como Cayambe Coca, Antisana y Llanganates. Por otra parte, se estimó que la **pendiente** es importante en este modelo porque las zonas de alta pendiente son más difíciles de acceder y por tanto de cambiar de cobertura; sin embargo no es imposible que ocurra y se ha visto, como por ejemplo en la vía desde Papallacta hasta Baeza y Cosanga, cómo zonas de bosque se han transformado en usos silvopastoriles y pastos. Asimismo se ha considerado la **saturación**, referida a la acumulación del flujo superficial de agua que se puede concentrar en un lugar determinado por la topografía o morfología del terreno, calculando este índice con el modelo Geodinámico SINMAP. Esta variable también se consideró importante porque zonas de alta saturación, con baja pendiente y suelos de texturas finas (condiciones que se dan en la parte baja de la cuenca en la rivera del Napo), conforman terrenos empantanados especialmente en la época más lluviosa. La **temperatura** media anual y **precipitación** acumulada anual, son las variables climáticas del modelo, y se las incluyó para verificar si este fenómeno de CCS podría estar influenciado por dichas variables. Por último, el NDVI o índice normalizado de vegetación que ofrece una medida cuantitativa de la cantidad de biomasa forestal, y que se lo calculó a partir de imágenes del sensor TM de los Landsat 4 y 5, se incluyó desde la perspectiva que se está modelando un proceso de deforestación.

La siguiente figura muestra los mapas que corresponden a las diferentes variables.



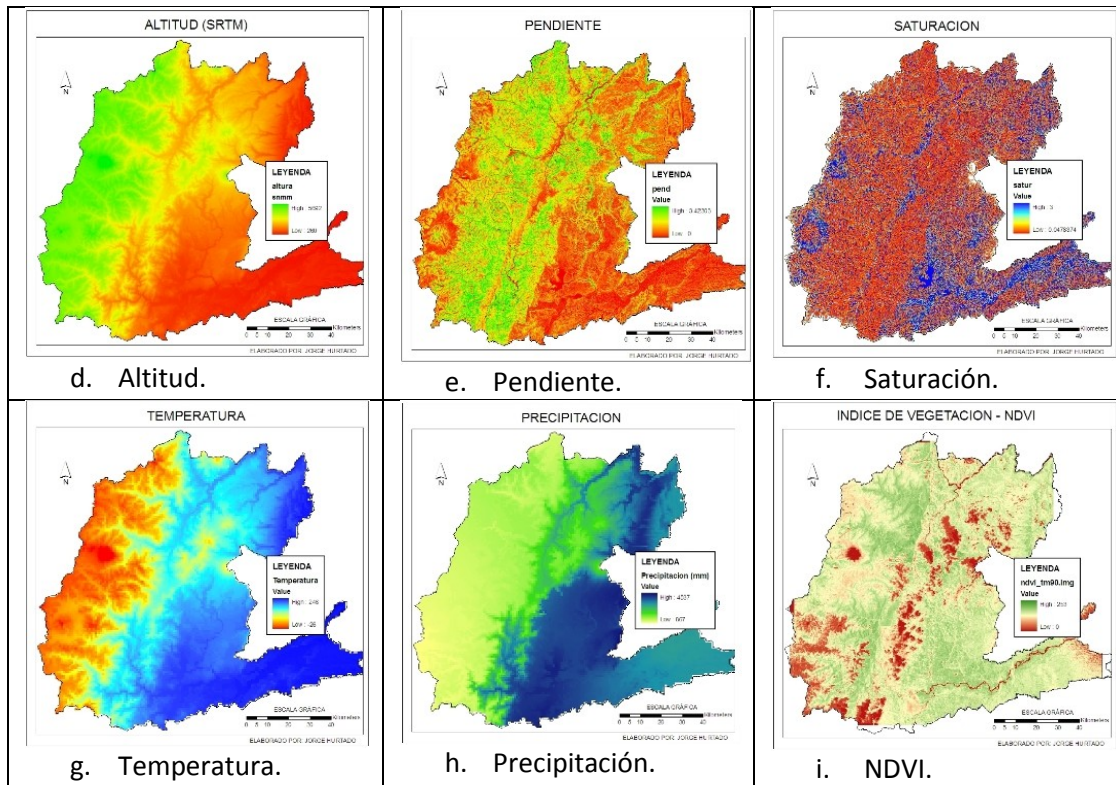


Figura 41. Variables independientes de la modelación.

El paso siguiente consistió en extraer los valores de las variables independientes o explicativas para ser usadas en la RLM. La Figura 42 muestra la utilización de la herramienta “HawthsTools” para extraer los valores de las variables y construir las tablas que se usaron posteriormente en SPSS para el análisis estadístico.

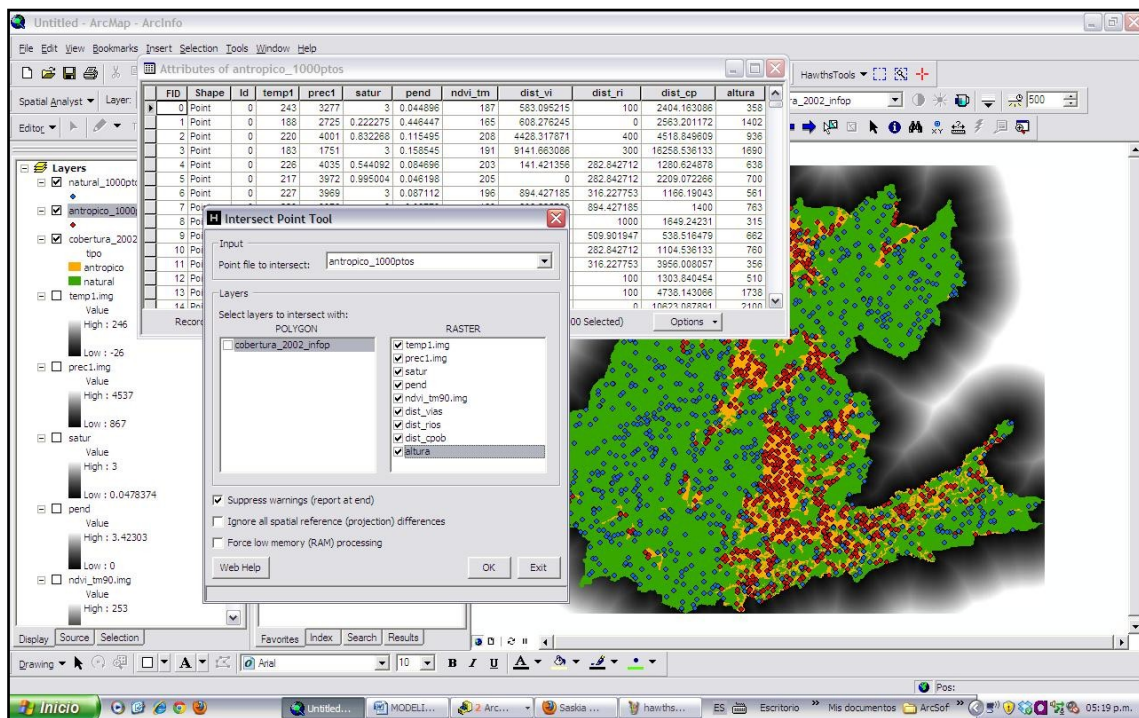


Figura 42. Proceso de extracción de las variables independientes.

3.4.3. Regresión Logística Multivariada con SPSS

Se justifica el uso de la *regresión logística* para elaborar el mapa de probabilidad de presencia de las coberturas de tipo antrópico ya que ésta técnica ha sido utilizada principalmente para modelar el proceso de deforestación ocurrida en bosques tropicales (Chomitz y Gray, 1996).

La regresión logística se hizo en SPSS que es un software de análisis estadístico. La siguiente figura muestra una pantalla del ingreso de datos para la regresión logística



Figura 43. Ingreso de Datos en SPSS para hacer la RLM.

Los coeficientes de las variables y la tabla de clasificación obtenida se muestran en la siguiente figura.

preaus_ant	0	705	295	70.5
	1	170	830	83.0
Porcentaje global				76.8
	temp1	0.007526		
	prec1	-0.000468		
	dist_vi	-0.000104		
	dist_ri	-0.000353		
	dist_cp	-0.000075		
	altura	-0.000482		
	Constante	2.303492		

Figura 44. Resultados de la RLM en SPSS.

La Figura 44 representa una matriz de contingencia con un punto de corte de 50% en el modelo de probabilidad (RLM). Allí se observa que el porcentaje global de correcta clasificación es de 77% para las presencias y ausencias. Lo que se ve en la Figura 44 quiere decir que con un punto de corte en el modelo del 50%, los puntos de presencias que caen dentro son 830 (verdaderos positivos) y los que están afuera de esta área

(verdaderos negativos) son 705. Más adelante con la curva ROC se evalúa el modelo en varios umbrales para tener una idea más acertada de su calidad.

Por último, acerca del modelo de RLM, se puede decir en esta parte, que las 2 variables más importantes para el modelo resultaron ser las 2 antrópicas; distancia a vías y distancia a centros poblados.

3.4.4. Elaboración del mapa con el modelo obtenido.

Si la ecuación general o función logística es:

$$P(Y=1) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha - \beta_1 X_1 - \beta_2 X_2 - \beta_3 X_3 - \dots - \beta_K X_K)}$$

[Ecuación 4]

Donde:

P; probabilidad de presencia.

α ; Constante

$\beta_1, 2, \dots$; Coeficientes

$X_1, 2, \dots$; Variables

Exp; función exponencial (numero e).

Usando los valores de la Figura 39 en la Ecuación 4, el modelo quedaría expresado de la siguiente forma para usarlo en la calculadora raster del SIG:

$$P = 1 / (1 + \text{Exp}(- 2.303492 - (0.007526 * [\text{temp1.img}] + (0.000468 * [\text{prec1.img}] + (0.000104 * [\text{dist_vias}]) + (0.000353 * [\text{dist_rios.img}] + (0.000075 * [\text{dist_cpob.mg}] + (0.000482 * [\text{altura.img}])))$$

El resultado es el siguiente mapa de idoneidad o probabilidad de presencia de coberturas de tipo antrópico (Figura 45).

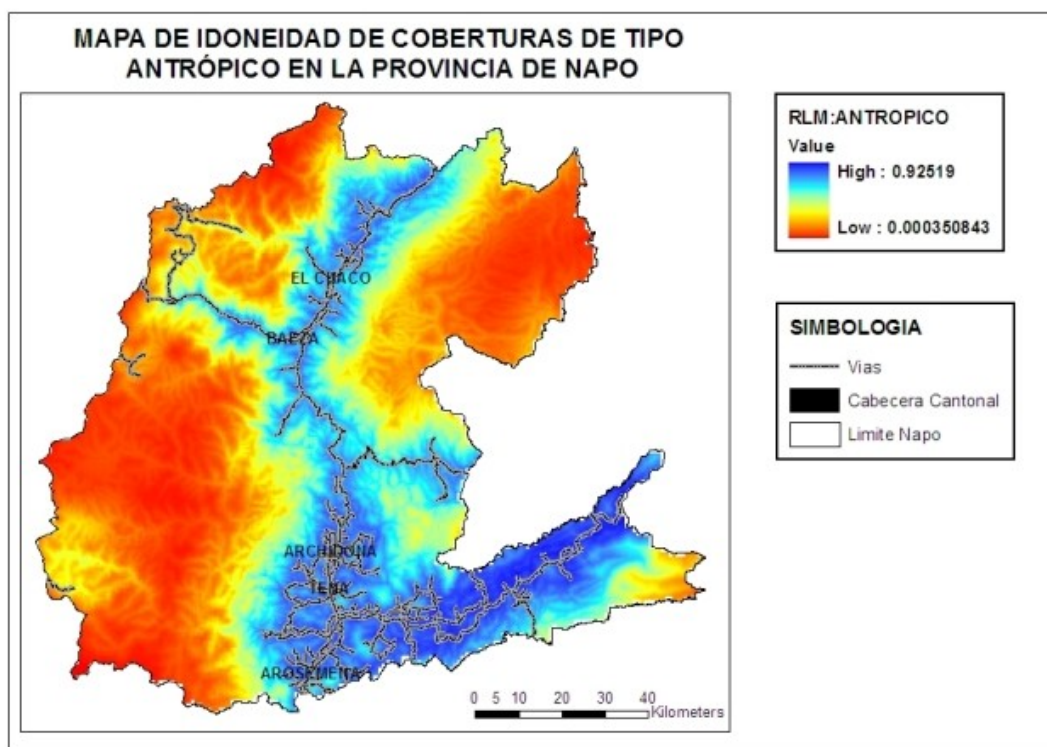


Figura 45. Mapa de idoneidad de coberturas antrópicas.

A partir de este mapa de idoneidad de coberturas antrópicas se construye el mapa de idoneidad de coberturas naturales, ya que es el mismo pero con el rango invertido puesto que es inversamente proporcional, es decir, mientras más idóneo es un territorio para una cobertura antrópica, menos lo será para una natural. Así tenemos los dos mapas de idoneidad que servirán de entrada en el modelo CA_MARKOV como se indica más adelante en este estudio.

3.4.5. Validación con la curva ROC

La curva ROC (Relative Operating Characteristic), es un excelente método para evaluar la validez de un modelo que predice la ubicación de la presencia de una clase (antrópico en nuestro caso), comparando un mapa de idoneidad que representa la probabilidad de presencia de la clase y un mapa de tipo booleano (0 ausencia, 1 presencia) de la presencia actual de la clase. Es decir, en este caso se usa la curva ROC para comparar el mapa de probabilidad modelada, de presencia de coberturas de tipo antrópico (Figura 45) con el mapa de cobertura del suelo del año 2008 (Figura 46) reclasificado en coberturas de tipo antrópico y natural.

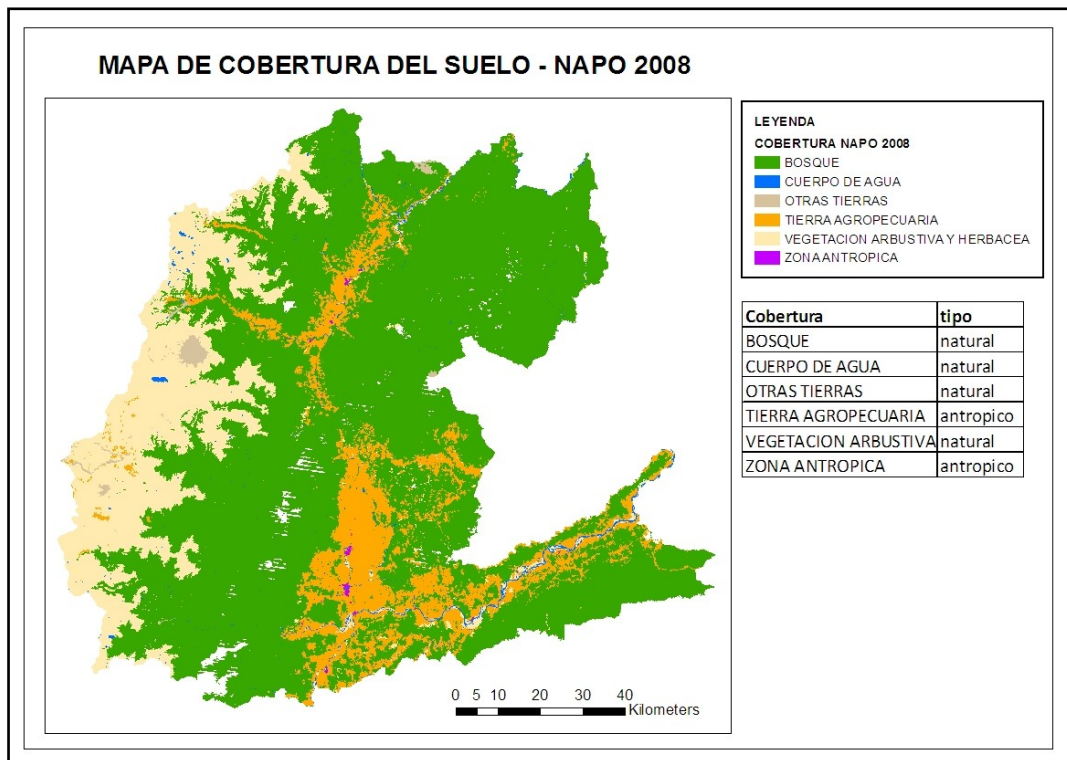


Figura 46. Mapa de cobertura del suelo de la provincia de Napo (año 2008), elaborado por el Ministerio del Ambiente del Ecuador.

Por tanto, con el análisis estadístico de la curva ROC podremos saber si las clases de tipo antrópico del mapa de referencia coinciden con las zonas de alta probabilidad modeladas para esta clase. Dicho análisis se hace para diferentes umbrales de probabilidad.

ROC es un estadístico resumido que se deriva de varias tablas de contingencia¹¹ (tabla 2) de dos por dos, basadas en la comparación del mapa modelado de idoneidad con el mapa de referencia. Cada tabla corresponde a diferentes umbrales en el mapa de idoneidad. Un umbral de 50% en el software usado, significa, que para el test usará el 50% de los píxeles con el valor más alto de probabilidad y los reclasificará a 1 para hacer la comparación.

¹¹ También llamadas tablas de clasificación o de confusión.

Tabla 8. Tabla de contingencia. Número de pixeles que corresponden al umbral de 50%.

TABLA DE CONTINGENCIA UMBRAL=50%		MAPA DE REFERENCIA	
		pixeles que son de la clase de interes (1)	pixeles que no son de la clase de interes (0)
MAPA MODELADO	pixeles que son de la clase de interes (dentro umbral)	150807	469111
	pixeles que no son de la clase de interes (fuera umbral)	4872	615046

El valor de ROC obtenido es **0.89**, como se aprecia en la siguiente captura de pantalla de los resultados obtenidos.

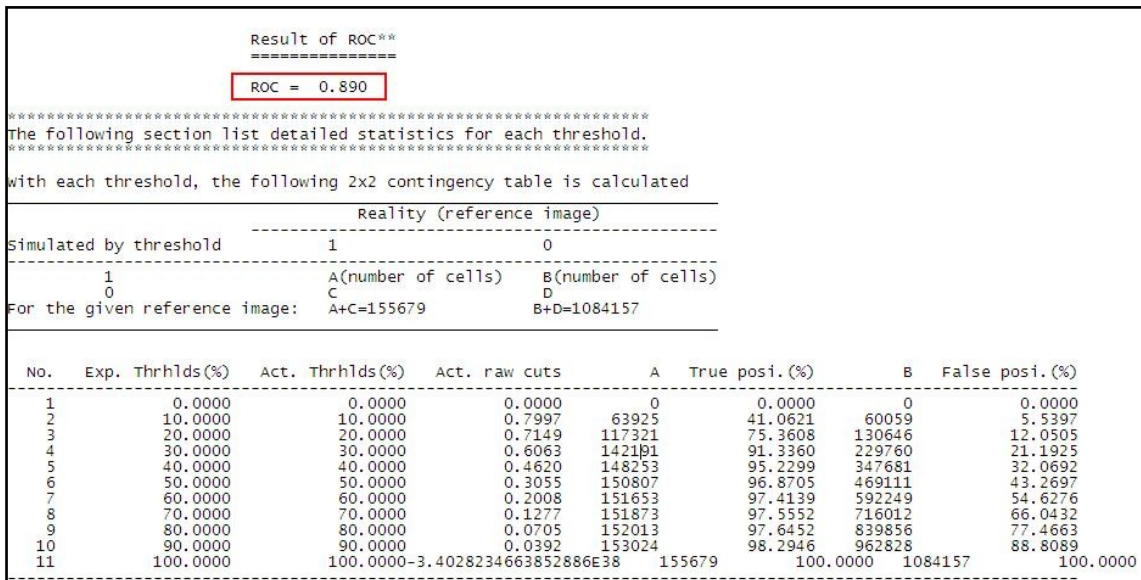


Figura 47. Pantalla de resultados obtenidos de ROC.

La Figura 48 muestra el gráfico de ROC y es producto de unir los puntos obtenidos para cada umbral (resultados de la Figura47), así cada punto tiene como coordenadas en el eje vertical de las Y los porcentajes de verdaderos positivos y en el eje horizontal de las X los porcentajes de los falsos positivos. Los porcentajes están calculados respecto al total de pixeles del mapa de referencia.

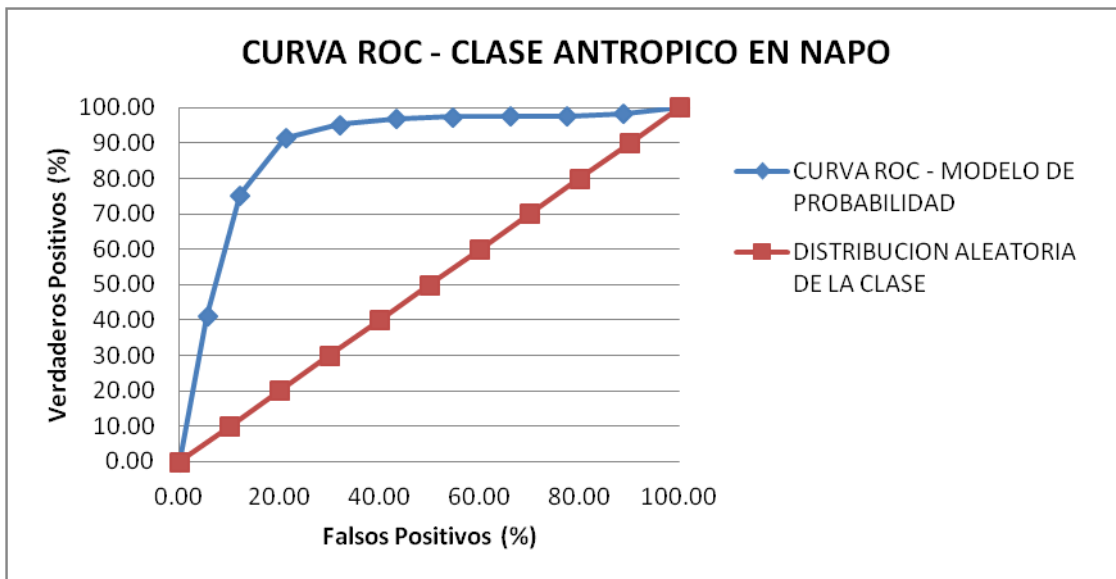


Figura 48. Gráfico de ROC obtenido a partir del mapa de probabilidad y el mapa de referencia (línea curva azul). Y Gráfico ROC de una distribución aleatoria (línea recta marrón).

El estadístico ROC es el área bajo la curva (AUC – area under curve), que conecta los puntos obtenidos con las tablas de contingencia. Se calcula a partir de la siguiente expresión de sumatoria de trapecios.

$$AUC = \sum_{i=1}^n [X_{i+1} - X_i] \times [Y_i + ((Y_{i+1} - Y_i)/2)] \quad \text{[Ecuación 5]}$$

Donde los términos de la ecuación están explicados arriba.

Valores ROC de 1 indican que hay una perfecta concordancia espacial entre el mapa de referencia y el mapa de idoneidad. Valores ROC de 0.5 significan la concordancia que correspondería a la casualidad, es decir, si los valores del mapa de idoneidad fueran asignados a ubicaciones de forma aleatoria, el gráfico de ROC en este caso sería la línea recta marrón de la Figura 48.

En un intento por calificar el valor de ROC obtenido, se utilizó una escala nominal que parte del siguiente criterio.

- De 0 a 50%; sería “muy malo” ya que 50% es aleatorio (línea marrón de la Figura48) y menos de eso sería peor que aleatorio. Por tanto tendría la calificación más baja.

El resto que va de 50 – 100% lo dividimos en 4 partes iguales y quedaría así:

- 50 - 62.2% malo (porque está cerca del umbral de la aleatoriedad).

- 62.5 - 75% regular (considerablemente mejor al aleatorio pero no suficiente).
- 75 - 87.5% bueno (se podría usar el modelo con muchas restricciones)
- 87.5 - 100% muy bueno (alta capacidad de predicción del modelo)

Como el valor de ROC obtenido es de **0.89** podemos concluir que el modelo es “**muy bueno**” para predecir las clases de tipo antrópico en la provincia de Napo, con época de referencia el año 2002 (variables del modelo) y para un futuro relativamente cercano (2008).

3.5. MODELAMIENTO, VALIDACIÓN Y SIMULACION DEL CAMBIO DEL TIPO DE COBERTURA DEL SUELO (NATURALES Y ANTROPICAS) PERÍODO 1990 – 2020 EN LA PROVINCIA DE NAPO.

A manera de un modelo lógico, a continuación se indican las operaciones seguidas en el modelo cartográfico.

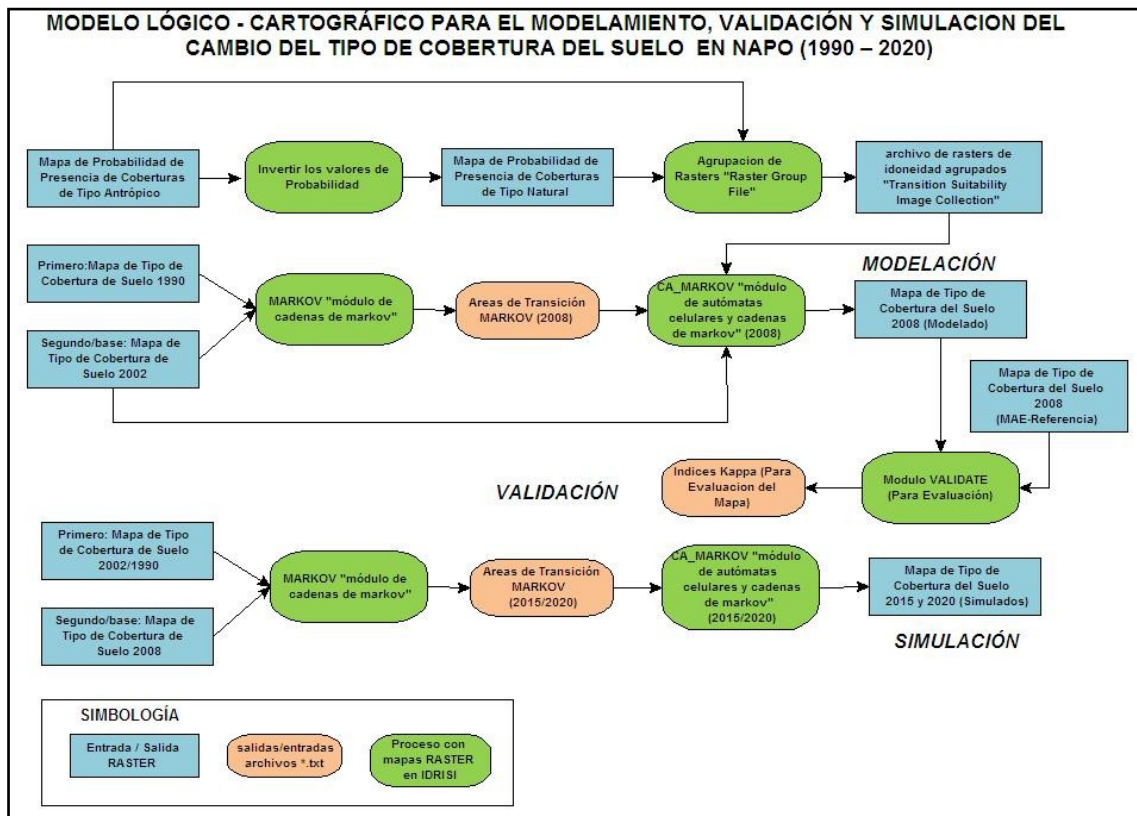


Figura 49. Modelo lógico cartográfico para el modelamiento, validación y simulación del cambio de tipo de cobertura del suelo en la Provincia de Napo (1990-2002)

A continuación se desarrolla este modelo lógico - cartográfico, es decir cómo se implementa el modelo físico.

3.5.1. Modelación del Cambio de Tipo de Cobertura del Suelo.

La modelación del cambio de cobertura del suelo se realizó con el software IDRISI (versión Taiga), utilizando el módulo CA_MARKOV, que como ya se señaló anteriormente, combina técnicas de Autómatas Celulares, Cadenas de Markov, Evaluación Multicriterio y/o Regresión Logística entre otras.

La siguiente figura muestra una pantalla del módulo CA_MARKOV.

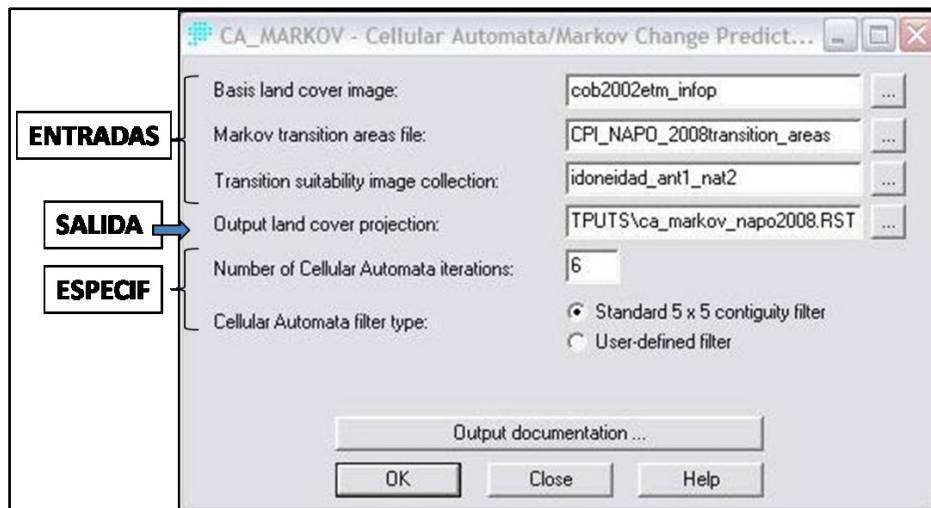


Figura 50. Pantalla del modulo CA_MARKOV.

A continuación se explica de forma general cómo se generaron cada una de las entradas del modelo:

a. Áreas de transición de Markov.

Las áreas de transición (Markov Transition Areas File) se obtuvieron con el módulo MARKOV, este módulo analiza dos mapas de cobertura del suelo (1990 y 2002 para nuestro caso) y obtiene una matriz de probabilidad de transición, una matriz de áreas de transición, entre otros “outputs” o salidas.

La matriz de probabilidad de transición es un archivo de texto que registra la probabilidad que cada categoría de cobertura de suelo (natural y antrópico) tendría para cambiar a cada una de las otras categorías. La matriz de áreas de transición también es un archivo de texto que registra el número de píxeles que se espera que cambien desde y hacia cada una de las categorías de coberturas del suelo, a partir de un número específico de unidades de tiempo; se obtiene multiplicando la matriz de probabilidad por el número de píxeles de cada categoría en el mapa de referencia. En ambos archivos, las filas representan las categorías de cobertura del suelo viejas, mientras que las columnas las nuevas categorías. A continuación se muestra una pantalla del módulo MARKOV.

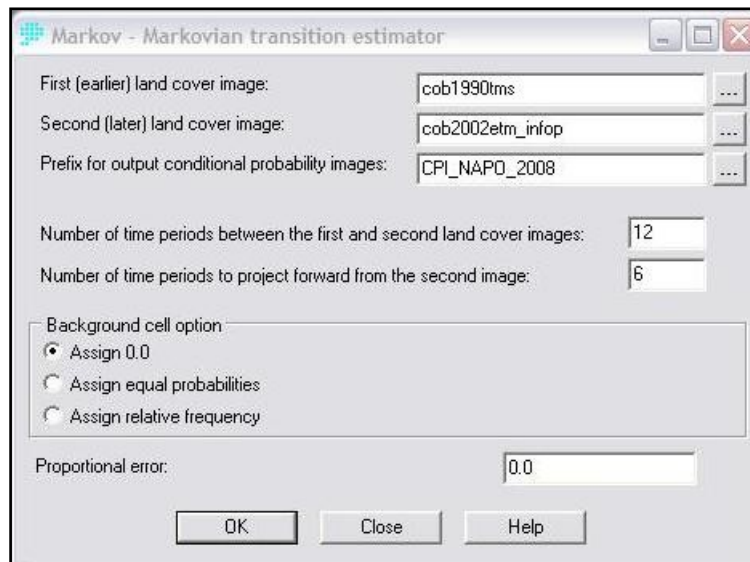


Figura 51. Módulo MARKOV con las coberturas de NAPO.

Sobre las entradas de este módulo “MARKOV”:

- ✓ *Mapa de Cobertura del Suelo año 1990 (cob1990tms)* realizado para este trabajo a partir de las imágenes TMS (Landsat 4 y 5). Las coberturas están reclasificadas en 1 (antrópicas) y 2 (naturales), de acuerdo a la generalización de la leyenda usada para este fin.
- ✓ *Mapa de Cobertura del Suelo año 2002 (cob2002etm_infop)*, el mismo consiste en un “mejoramiento” del mapa de cobertura del año 2002 que se venía usando hasta ahora y que corresponde a la base Infoplan, ya que este mapa era de escala muy pequeña, 1:250.000. Lo que se hizo fue obtener mayor detalle de las coberturas naturales y antrópicas solamente en los cuadrantes N2 y N4¹² a partir de imágenes ETM de Landsat7 del año 2002, con una clasificación no supervisada. Posteriormente se realizaron procesos de edición y superposición con el mapa de referencia (infoplan2002). Cabe señalar que se decidió esta mejoría después de hacer algunos ensayos, ya que se verificó que la escala 1:250.000 del mapa de cobertura del suelo del año 2002 era muy pequeña (poco detalle) y no permitía obtener buenos resultados en esta parte, por tanto fue necesario obtener un mapa de mayor escala (1:100.000) al menos para las partes más críticas del modelo, es decir, donde hay más intervención humana. El aumento de escala en estos sectores permitió obtener mejores resultados en la modelación. También como en el anterior mapa, los ND de las coberturas son 1 (antrópicas) y 2 (naturales).

¹² Ver la división de cuadrantes en la parte que corresponde a la elaboración de Mapa de Cobertura del Suelo de Napo para el año 1990.

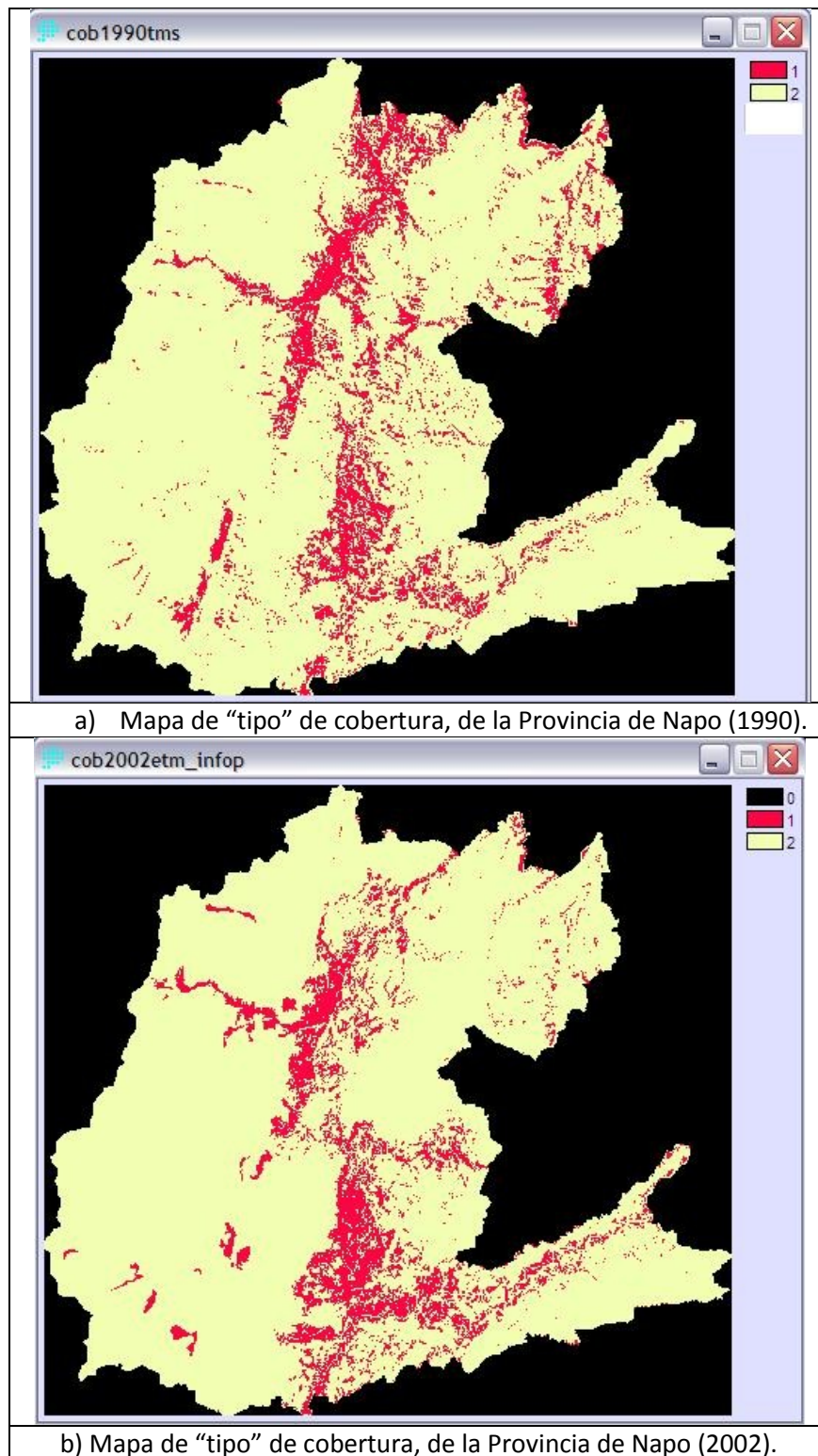


Figura 52. (a) Mapa de tipos de cobertura del año 1990 y (b) Mapa de tipos de cobertura del año 2002. Reclasificados en 1 (antrópico) y 2 (natural), utilizados para el módulo MARKOV.

El número de períodos de tiempo (años) entre el primer mapa (1990) y el segundo mapa (2002) es de 12 años, mientras que el número de períodos de tiempo a proyectar (2008) es de 6 años.

El prefijo para los archivos (matrices en formato texto *.txt) de salida es "CPI_NAPO_2008". Las matrices de probabilidad de transición y de áreas de transición (proyectadas al año 2008) que se obtuvieron son las siguientes:

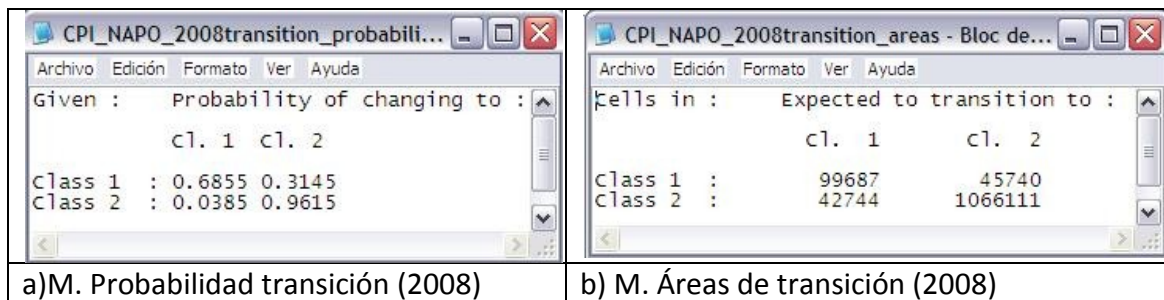


Figura 53. (a) Matriz de probabilidad de transición y (b) Matriz de áreas de transición.

En el módulo CA_MARKOV se utiliza la matriz de áreas de transición.

b. Mapa de cobertura inicial.

El mapa de cobertura inicial para la modelación (Basis Land Cover Image), es el mapa de partida para la proyección y corresponde al mapa de cobertura del suelo (reclasificado en tipo de cobertura 1 y 2) del año 2002 "cob2002etm_infop", que ya se usó como segunda imagen en el módulo MARKOV.

c. Mapas de idoneidad de coberturas antrópicas y naturales.

Estos mapas de idoneidad del tipo de cobertura (Transition Suitability Images) se construyeron a partir de un enfoque inductivo con una regresión logística multivariada (RLM)¹³ y corresponde a los mapas de probabilidad de coberturas antrópicas y naturales. Cabe indicar aquí, que la idoneidad de una cobertura es inversamente proporcional a la idoneidad de la otra, es decir mientras más idóneo es un lugar para coberturas antrópicas menos lo será para las naturales. Una vez que se tienen ambos mapas de idoneidad por requerimiento del módulo hay que re escalarlos de 0 a 255 (8bits). Por último, con estos dos rasters se construye el "raster gropus file" (*.rgf), de los mapas de idoneidad de coberturas antrópicas y naturales.

¹³ La generación los mapas de idoneidad de coberturas se puede realizar con un enfoque inductivo a partir de una regresión logística o con un enfoque deductivo con una Evaluación Multicriterio (Cabral y Zamyatin, 2006).

d. Mapa proyectado al año 2008.

Una vez que se ingresa la información de entrada en el modelo como se ha visto en la Figura 51, donde el número de iteraciones es 6, ya que estamos proyectando desde el año 2002 al 2008, el resultado del modelo es el siguiente mapa (Figura 54), donde 1 es antrópico y 2 natural.

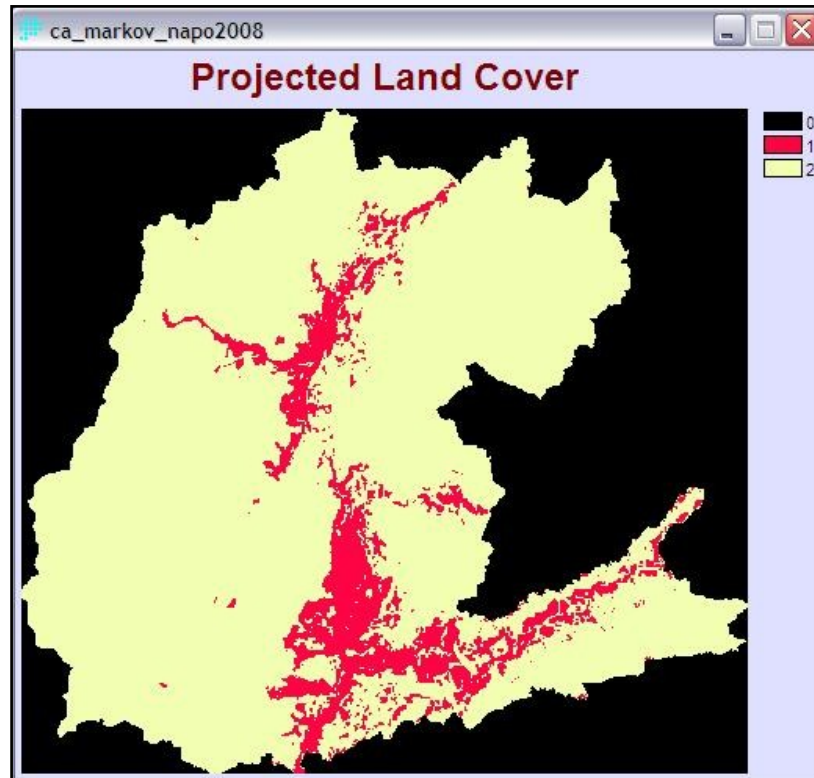


Figura 54. Mapa simulado de tipo cobertura del suelo en la Provincia de Napo – 2008.
“ca_markov_napo2008”

3.5.2. Validación del Modelo.

Un paso importante en el desarrollo de cualquier modelo de predicción de cobertura del suelo, es la validación, para conocer la calidad del modelo y así poder usarlo en las predicciones para escenarios futuros. La validación se hace a partir de la comparación entre el mapa de referencia¹⁴ (Figura 55) y el mapa del modelo (Figura 54). En general la validación se realizó en base a índices kappa.

¹⁴ Cabe indicar que el mapa de referencia del año 2008 es el mapa de cobertura del suelo elaborado por el Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE) escala 50.000 a partir de imágenes ASTER. Las partes oscuras dentro de la provincia corresponden a vacíos de información (*no data*) del mapa original.

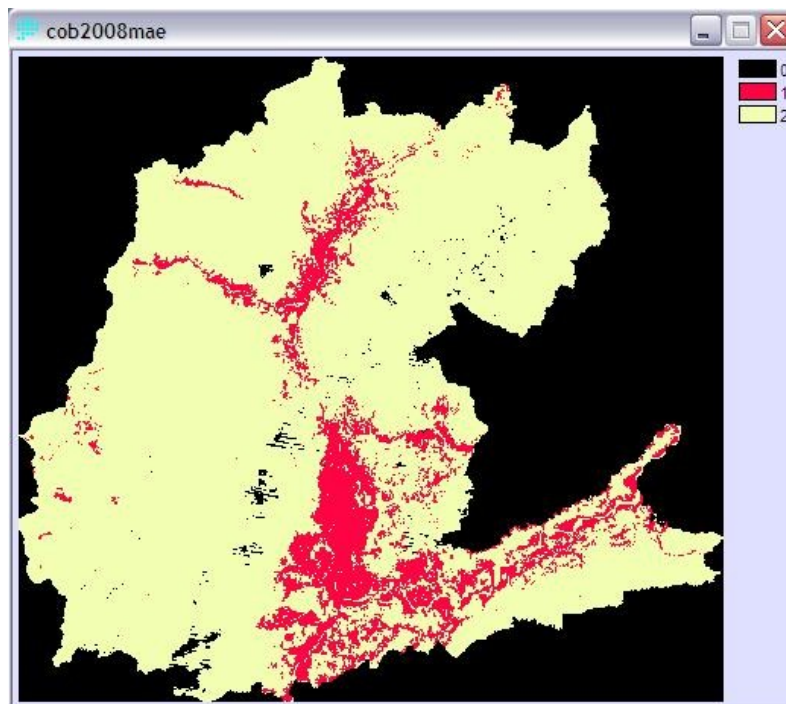


Figura 55. Mapa de cobertura del suelo año 2008, reclasificado en coberturas antrópicas (1) y naturales (2). El mismo es usado para la curva ROC.

Índices Kappa.

El criterio más empleado para validar los modelos de cambio de cobertura están basados en el porcentaje de pixeles clasificados correctamente obtenidos de la comparación entre estos dos mapas. Sin embargo, tener un alto porcentaje de pixeles clasificados correctamente no significa que el modelo tenga un buen poder de predicción (Cabral y Zamyatin, 2006). Se necesita además, por ejemplo, evaluar la calidad respecto a la ubicación de ese cambio.

En esta etapa se usó el módulo VALIDATE, que provee un análisis comparativo en base al “Kappa Index of Agreement” (índice de concordancia kappa¹⁵). Kappa es esencialmente un indicador de la precisión relativa en base al grado de concordancia entre ambos mapas. Sin embargo además del tradicional índice kappa, el módulo VALIDATE calcula otros estadísticos kappa (que se indican más adelante), cada cual con una especial forma de kappa (basado en los trabajos de Pontius, 2002), además del porcentaje de pixeles clasificados correctamente.

Así, el modelo de cambio de tipo de cobertura del suelo se evaluó con 4 estadísticos que son;

¹⁵ También denominado KIA (kappa Index Agreement) o Kstandar.

- *Percent correct (%Correct)*; Es una simple relación entre el número de pixeles clasificados correctamente en el modelo y el numero de pixeles del mapa de referencia.
- *kappa standar (Kstandar)*; Indica el grado de similitud o concordancia entre una mapa de referencia y el mapa del modelo en términos generales.
- *kappa for no information (Kno)*; Es una variación del Kstandar (kappa index agreement) indica la concordancia total en términos de cantidad y ubicación.
- *kappa for location (Klocation)*; Indica la habilidad del modelo para predecir la ubicación del cambio.

Los dos primeros %correct y Kstandar son ampliamente usados en estudios de sensores remotos pero son insuficientes para comparar dos mapas porque fallan en evaluar patrones, cantidades y ubicación de cambios, por esto es importante utilizar las variantes de kappa.

Valores de kappa igual a 1 indican un modelo perfecto (perfecta concordancia) y 0 cuando la predicción del modelo es equivalente a la casualidad.

Para tener una referencia, primeramente se calcularon los estadísticos kappa en un modelo nulo, es decir usando como mapa de referencia el que se ha denominado “cob2008mae” y como mapa a comparar el de comienzo de la simulación “cob2002etm_infop” (Figura 52), los resultados se muestran a continuación.

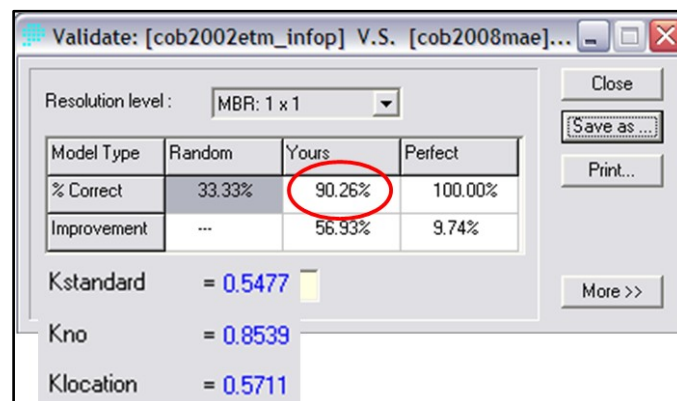


Figura 56. Estadísticos de evaluación del modelo nulo (2002 vs 2008).

Posteriormente se calcularon los estadísticos kappa, usando como mapa a comparar el de la Figura 54 “ca_markov_napo2008” que es resultado del modelo CA_MARKOV. La siguiente figura es una pantalla de la salida (resumen) después de correr el modulo VALIDATE.

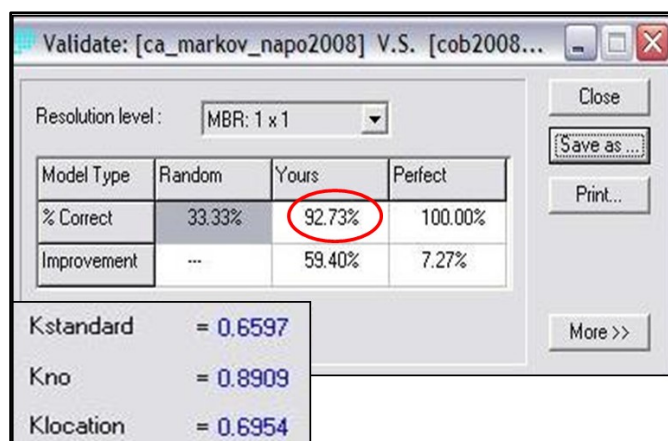


Figura 57. Estadísticos de validación del modelo CA_MARKOV.

Los resultados con el mapa que deriva de la modelación (Figura 57) son mejores que los resultados anteriores con el modelo nulo, lo que indica que el modelo construido predice mejor que un modelo nulo. Sin embargo, de forma general se podría decir que los resultados de la validación son buenos pero se los podría mejorar aún más. A continuación se proporciona una tabla comparativa de los kappa de ambos modelos.

Tabla 9. Resumen comparativo de estadísticos kappa entre los modelos CA_MARKOV y nulo.

	CA_MARKOV	Nulo (2002 vs 2008)
%correcto	92.73	90.26
Kstandar	65.97	54.77
Kno	89.09	85.39
Klocation	69.54	57.11

En general, la falta de ajuste del modelo a la realidad, que no es mucha pero existe, se puede deber a muchos factores como son: mapa de idoneidad inadecuado para modelar la deforestación, por ejemplo los drivers considerados son incorrectos o insuficientes, o la escala de las variables (espacial y/o temporal) no es la correcta, insuficiente precisión en la clasificación de las imágenes de satélite, o escala de los mapas de cobertura muy pequeña para la modelación. Respecto a los mapas de idoneidad haciendo el test de validación con el índice ROC, se verificó que es un modelo de excelente calidad considerando la escala de las variables de entrada, aunque se lo podría mejorar, y en cuanto a la clasificación de las imágenes (TMs 1990) por los procedimientos seguidos y evaluaciones realizadas en el proceso se puede decir que el mapa de cobertura del año 1990 es de muy buena calidad ya que se lo hizo exclusivamente para este trabajo, pero no podemos asegurar lo mismo para los mapas de los años 2002 (Infoplan) y 2008 (MAE) ya que estos no se han hecho para el estudio sino que fueron recopilados de fuentes oficiales y por tanto se espera (pero no se sabe a ciencia cierta) que tengan alta calidad. Lo que sí se puede asegurar, es que la escala del mapa del año 2002 (1:250.000) puede estar afectando al modelo, ya que tiene

menor escala que los otros: 1:100.000 y 1:50.000 para los mapas de los años 1990 y 2008 respectivamente.

Por último se concluye en esta parte, que los estadísticos kappa para el mapa obtenido con la modelación “ca_markov_napo2008” son satisfactorios respecto al modelo nulo, el hecho de tener un porcentaje de pixeles clasificados correctamente de 92.73%¹⁶, indica un alto grado de concordancia. Asimismo el Kno (0.89) es alto lo que indica una concordancia o grado de similitud total muy buena, a lo que sumamos el hecho de saber que este tipo de modelos de cambio de cobertura del suelo son difíciles de calibrar (Clarke et al., 1997; Yeh et al., 2003; White et al., 2000). Por estas razones, consideramos que el modelo es válido para hacer las simulaciones de escenarios futuros, pero no sería aplicable para períodos de tiempo muy grandes.

3.5.3. Simulación de escenarios futuros para los años 2015 Y 2020.

Por las razones ya mencionadas se decidió hacer las simulaciones para los años 2015 y para el año 2020, es decir, 7 años y 12 años respectivamente a partir del mapa de referencia de 2008. Inicialmente se había considerado hacer la simulación para el año 2030, sin embargo debido a la calidad del modelo obtenido no tendría sentido hacerlo a tan largo plazo.

La siguiente tabla resume los períodos de análisis para obtener las áreas de transición (Markov) y los períodos de simulación para obtener los escenarios, tanto para validación (2008) y futuros (2015, 2020).

Tabla 10. Periodos de análisis y simulación para calibración y generación de escenarios futuros.

NºSIM	INICIO_REF	FIN_REF	ANALIS (años)	SIMULAC	PROY (años)	OBSERVAC
1	1990	2002	12	2008	6	Para calibracion y validacion
2	2002	2008	6	2015	7	Simulacion de escenario futuro
3	1990	2008	18	2020	12	Simulacion de escenario futuro

De acuerdo a la Tabla 10, los campos “INICIO_REF” y “FIN_REF” son los años de referencia para analizar la transición de las coberturas, el campo “SIMULAC” indica el año al cual se va a proyectar las coberturas.

¹⁶ Esto se corrobora haciendo un crosstab (tabulación cruzada) de ambos mapas.

La primera simulación es al año 2008 y sirvió para la las pruebas de validación del modelo de cambio de cobertura del suelo. La Figura 47 indica las matrices respectivas de esta simulación y la Figura 48 el resultado de la misma.

La segunda y tercera simulación es para generar los escenarios futuros. Las matrices tanto de probabilidad de transición como de áreas de transición, que se obtuvieron con el modulo MARKOV, son las siguientes.

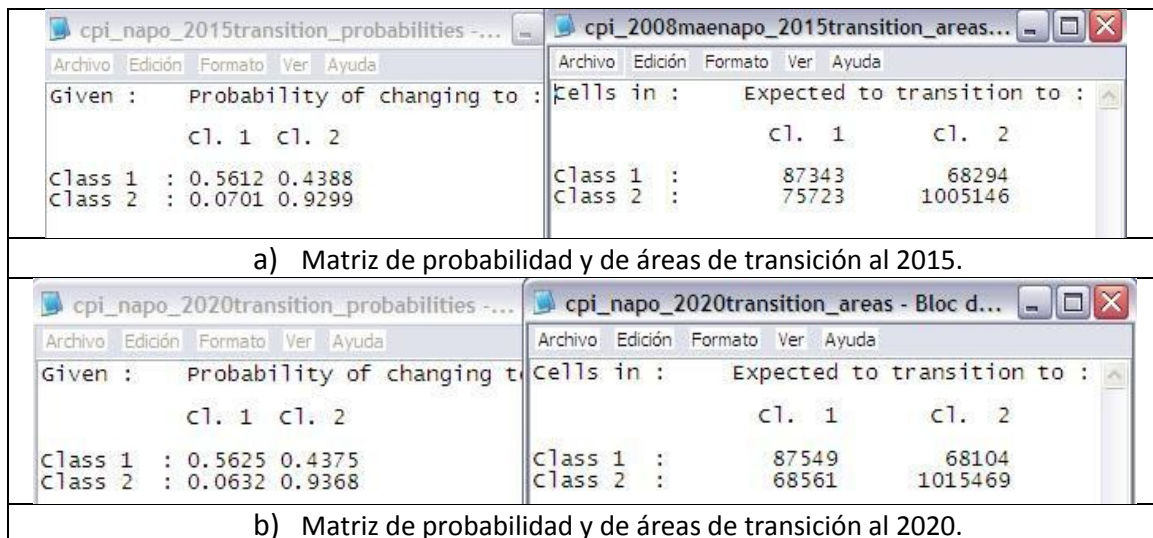


Figura 58. Matrices de Probabilidad y de Áreas de Transición al 2015 y 2020.

Posteriormente a la obtención de estas matrices se procedió a correr el modulo CA_MARKOV para generar los respectivos mapas de tipo de cobertura ya sea antrópico (1) o natural (2), para los años 2015 y 2020. Los mapas resultantes se muestran a continuación.

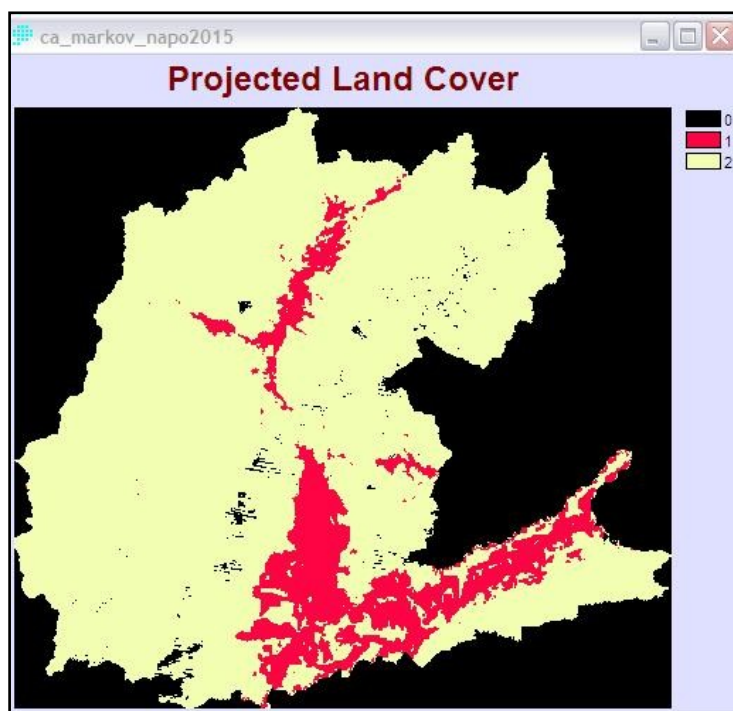


Figura 59. Mapa del escenario futuro (2015) del tipo de cobertura; antrópico (1), natural (2).

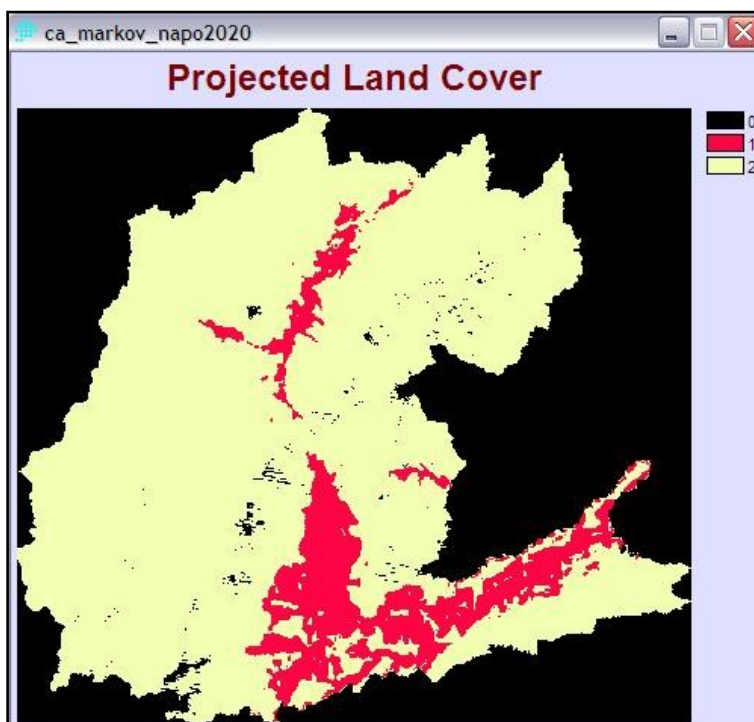


Figura 60. Mapa del escenario futuro (2020) del tipo de cobertura; antrópico (1), natural (2).

A *priori* se puede ver que en la zona centro izquierda (Papallacta) las coberturas antrópicas han desaparecido, lo que resulta poco probable, ya que durante décadas han existido coberturas de pastos cultivados y silvopastoriles. Sin embargo, este “error” en la simulación se puede deber a que el modelo de probabilidad de presencia

de coberturas antrópicas no muestra tan alta idoneidad en los sectores altos de la provincia, como sí lo hace en la parte baja. Como se señaló anteriormente, este modelo de probabilidad puede mejorarse, ya sea incluyendo mas variables predictivas - *drivers* - en caso de existir mas información, o mejorando la calidad de las ya existentes en cuanto a resolución espacial y temporal. También debe tenerse presente que la escala de los mapas que sirvieron para el análisis de transición es determinante en los resultados.

A pesar de todo lo expuesto, los resultados de la simulación son muy útiles para determinar tendencias futuras en las zonas de alta idoneidad de presencia de las coberturas de tipo antrópico, como ocurre en la parte baja de la provincia y/o cuenca. Así por ejemplo, permite determinar qué cuenca dentro de la provincia va a tener un mayor impacto hidrológico a futuro, al menos en cuanto a escurrimiento superficial y las consecuentes crecidas repentinas.

En el siguiente capítulo de “Resultados”, se hace un análisis más detallado de los mapas de escenarios futuros de *tipos de cobertura*, obtenidos en esta etapa, así como de los porcentajes de cambio de cobertura para el periodo de análisis (1990-2020).

CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1. DESCRIPCIÓN DEL MAPA DE COBERTURA DEL SUELO DEL AÑO 1990 DE LA PROVINCIA DE NAPO.

La Figura 31 (capítulo de metodología), muestra el mapa de cobertura del suelo de la provincia de Napo del año 1990¹⁷. La Tabla 11 y la Figura 61 a continuación, indican las áreas correspondientes a cada cobertura en este mapa con sus porcentajes.

Tabla 11. Porcentajes de las Coberturas del Suelo en Napo para el año 1990.

cobertura	tipo	area_km2	porc (%)	suma
Bosque_Primary	natural	9048.01590	70.75	96.90
Paramo/Pajonal/Arbustivo	natural	1798.35120	14.06	
Bosque_Sec/Silvopastoril	antropico	859.46490	6.72	
Pastos/Cultivos	antropico	686.87730	5.37	
Paramo_Almoadilla	natural	164.32560	1.28	3.10
Rios/Lagunas	natural	119.69820	0.94	
Suelo_Desnudo/Arenal/Roca	natural	42.26580	0.33	
Lavas	natural	27.46080	0.21	
Nieve	natural	24.22800	0.19	
Infraestructura/Urbano	antropico	10.40490	0.08	
Areas_Quemadas/Suelo_Organico	antropico	8.35110	0.07	
TOTAL				100.00

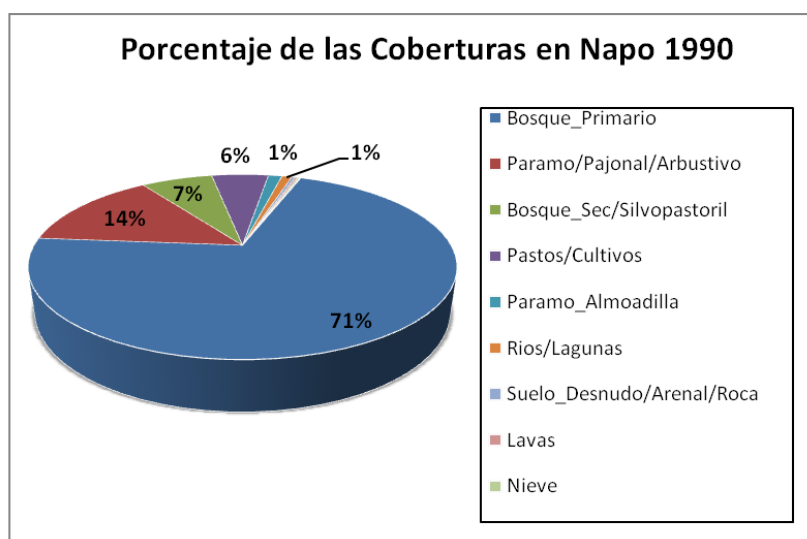


Figura 61. Porcentaje de las Coberturas en Napo para el año 1990.

¹⁷ No se muestra el mapa en esta parte para evitar redundancia de figuras.

La siguiente figura es un mapa que indica el grado de representación (Bajo, Medio o Alto) de acuerdo al porcentaje que ocupan las coberturas.

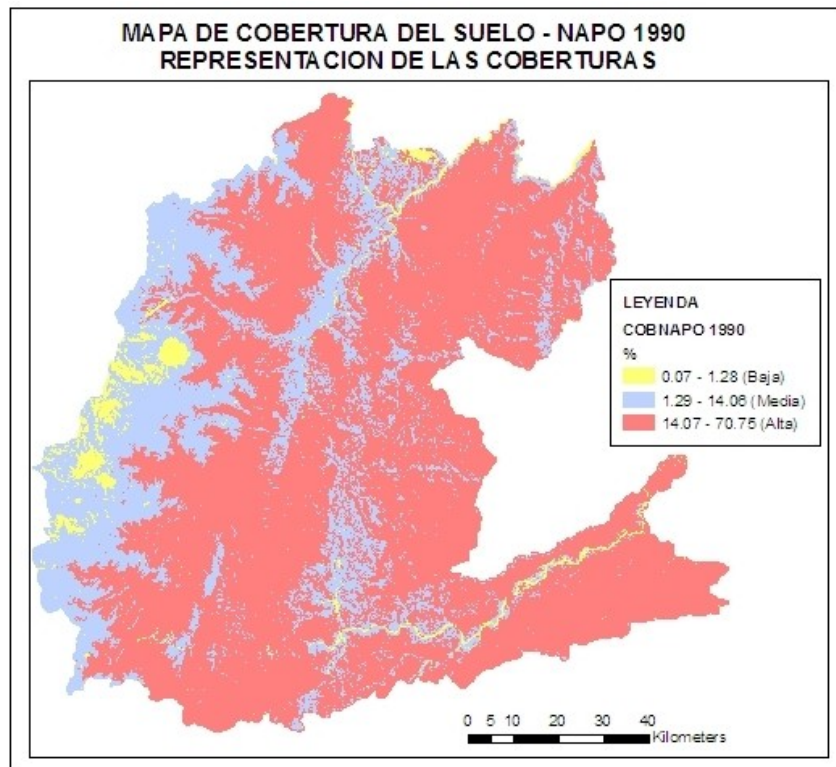


Figura 62. Representación de las coberturas por porcentaje de ocupación.

De acuerdo a esta clasificación, sólo el *bosque primario* tiene una representación **alta**, mientras que los *páramos de pajonal y/o arbustivos*, *bosques secundarios y/o sistemas silvopastoriles* y por último *pastos y/o cultivos* tienen una representación **media** (entre representación alta y media abarcan el 97%). Por último, los *páramos de almohadilla*, *cuerpos de agua*, *suelos desnudos*, *nieve*, *lavas*, *infraestructuras* (centros poblados) y *áreas quemadas* tienen una representación **baja** en este mapa (3%).

Como dato adicional, se menciona en relación con el mapa de cobertura del suelo de Napo del año 1990, que las áreas naturales corresponden a 11224.3455 km² (**87.76%**), con bosque primario y páramos, mientras que las áreas antrópicas abarcan 1565.0982 km² (**12.24%**), siendo en su gran mayoría, bosques secundarios y/o sistemas silvopastoriles y también pastos y/o cultivos.

4.2. ANÁLISIS DEL MODELO DE PROBABILIDAD DE PRESENCIA DE COBERTURAS DE TIPO ANTRÓPICO.

Como complemento del análisis de curva ROC que se hizo en el capítulo anterior, se procede a describir las variables más relevantes del modelo de RLM, utilizado para las coberturas de tipo antrópico, así como el resumen de los principales estadísticos.

▪ Variables Relevantes del Modelo.

En una primera aproximación, basándonos en la Ecuación 4 (modelo de regresión), y de acuerdo a la Figura 39 (parámetros del modelo), el mismo quedaría conformado de la siguiente forma, como ya se mencionó en el capítulo anterior:

$$P = 2.3 + [0.007 * \text{temperatura}] + [-0.0005 * \text{precipitación}] + [-0.0001 * \text{distancia a vías}] + [-0.0004 * \text{distancia a ríos}] + [-0.00008 * \text{distancia a centros urbanos}] + [-0.0005 * \text{altura msnm}]$$

Se destacan de estos parámetros los signos, pues indican que de las variables incluidas en el modelo, solamente la temperatura afecta de forma directamente proporcional a la probabilidad, es decir que a mayor temperatura, el valor de probabilidad será mayor también, mientras que las otras variables presentan una relación inversamente proporcional, por tanto, mientras más pequeña sea; la precipitación, la distancia a vías, la distancia a ríos, la distancia a centros urbanos, y la altura, mayor será la probabilidad de coberturas antrópicas. Estas características en conjunto se dan más en la parte baja de la cuenca, en la rivera del Río Napo, incluida el área de influencia de la ciudad de Tena que es la capital de provincia.

Para determinar ahora las variables más importantes y su nivel de importancia dentro del modelo, podemos basarnos en el *Estadístico de Wald* que contrasta la significación de las estimaciones de los parámetros. La obtención de significación indica que dicho parámetro es diferente de cero y merece la pena su conservación en el modelo, así mientras más alto es el estadístico de Wald, la variable es más importante en el modelo.

Por tanto de acuerdo a la Figura 63, las variables en orden de importancia para el modelo son:

1. **Distancia a vías.**
2. **Distancia a centros urbanos.**
3. Precipitación.

4. Altura.
5. Distancia a ríos.
6. Temperatura.

Se observa que las **dos primeras son de tipo antrópica y también las más importantes**. Esto tiene mucha lógica, ya que el modelo ha sido construido para explicar una variable antrópica (coberturas antrópicas).

		B	E.T.	Wald
Paso 1 ^a	dist_cp	.000	.000	394.874
	Constante	1.550	.086	322.770
Paso 2 ^b	dist_cp	.000	.000	230.251
	altura	.000	.000	58.611
	Constante	1.996	.108	340.607
Paso 3 ^c	dist_vi	.000	.000	55.585
	dist_cp	.000	.000	24.063
	altura	.000	.000	63.039
	Constante	2.022	.108	349.396
Paso 4 ^d	prec1	.000	.000	16.305
	dist_vi	.000	.000	49.040
	dist_cp	.000	.000	28.373
	altura	-.001	.000	64.728
	Constante	3.547	.398	79.554
Paso 5 ^e	prec1	.000	.000	14.502
	dist_vi	.000	.000	50.827
	dist_ri	.000	.000	11.415
	dist_cp	.000	.000	27.517
	altura	-.001	.000	58.428
	Constante	3.650	.400	83.177
Paso 6 ^f	temp1	0.007526	.003	8.620
	prec1	-0.000468	.000	22.952
	dist_vi	-0.000104	.000	49.673
	dist_ri	-0.000353	.000	11.365
	dist_cp	-0.000075	.000	26.050
	altura	-0.000482	.000	16.564
	Constante	2.303492	.576	16.021

Figura 63. Estadístico de Wald. Salida de SPSS.

A manera de aclaración, los pasos son 6, ya que el proceso de encontrar los parámetros es iterativo y se detiene cuando el valor de éstos cambia menos de 0.001. El criterio para añadir o no una variable en el modelo, está dado por su importancia en el mismo, midiendo la significancia de las variables.

De esto se deriva el hecho de no haber considerado la **saturación, la pendiente y el NDVI**, es porque estas variables son **poco significativas** (o explicativas) en el modelo. Es decir, el modelo no se ajusta más cuando se las incluye.

▪ **Resumen de Estadísticos.**

Una vez analizadas cuáles son las variables más importantes del modelo, sería importante recordar en esta parte los resultados que se obtuvieron en la tabla de clasificación (presencias y ausencias) y la curva ROC respecto al mapa de cobertura de 2008. La siguiente tabla resume estos resultados.

Tabla 12. Resumen de la clasificación de presencias en SPSS y de la Curva ROC en SIG.

Indicador	Descripción	Valor	Calificación
Tabla de clasificación	Se refiere a la capacidad del modelo de clasificar bien las presencias (verdaderos positivos) y las ausencias (verdaderos negativos) en una tabla de clasificación considerando un umbral del 50%	76.8	BUENO
Curva ROC	Es el área bajo la curva que resulta de unir puntos que corresponden a los verdaderos positivos y falsos positivos de las tablas de clasificación para diferentes umbrales, mientras mas cercano a 1 será mejor	0.89	MUY BUENO

De acuerdo a los valores de la Tabla 12 se podría decir que el modelo de RLM para las coberturas antrópicas en la provincia de Napo es de BUENO a MUY BUENO¹⁸. Considerando la escala de las variables de entrada, estos resultados son muy satisfactorios, sin embargo son susceptibles de ser mejorados incluyendo mas variables explicativas o *drivers* de tipo antrópico, pues como se vió, variables de esta naturaleza son las más significativas.

4.3. ANÁLISIS DEL MODELO CA_MARKOV, PARA SIMULACIÓN DEL TIPO DE COBERTURA EN LA PROVINCIA DE NAPO PARA EL AÑO 2008.

En el apartado que corresponde a validación del modelo CA_MARKOV (mapa “ca_markov_napo2008”) en el capítulo de metodología ya se mencionaron los estadísticos kappa obtenidos tanto para el modelo nulo como para el modelo de simulación al año 2008. En cuanto al porcentaje de concordancia, los valores fueron de 90.26 (modelo nulo) y 92.73 (modelo simulación 2008), por tanto nuestro modelo predice mejor que un modelo nulo. En cuanto a los índices kappa estándar, se obtuvo

¹⁸ De acuerdo a la jerarquización que se planteó en el capítulo anterior en la parte de “validación con la curva ROC”

54.77 (modelo nulo) y 65.97 (modelo simulación 2008). Este índice como se dijo mide el grado de concordancia respecto a un mapa de referencia (cob2008mae) en términos generales, por tanto el modelo tiene mejor concordancia que el modelo nulo. Sin embargo, la concordancia no es excelente respecto a estos índices¹⁹.

De forma gráfica, en la Figura 64 se pueden observar ver 3 zonas encerradas en círculos donde el modelo es más diferente respecto a la realidad. Sin embargo, esto puede deberse a la homogenización que realiza el modelo a partir del filtro de contigüidad incorporando la técnica de autómatas celulares, ya que como se ve en el mapa que representa a la “realidad”, son zonas antrópicas aisladas. Además, considerando la dificultad que implica calibrar este tipo de modelos, y el detalle de la información con que hemos contado para construir el mapa de idoneidad (RLM), se consideran bastante buenos y satisfactorios los resultados generales obtenidos del modelo.

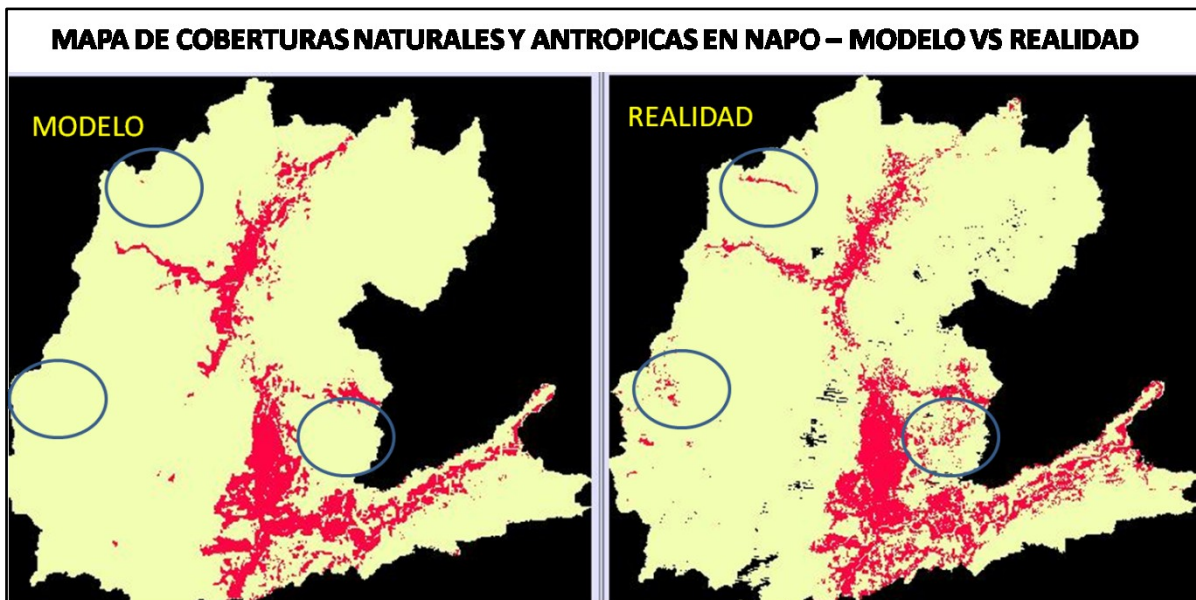


Figura 64. Comparación de coberturas (2008) entre el modelo CA_MARKOV y la “Realidad”.

Las tres zonas encerradas en círculos corresponden a áreas protegidas. Con baja intervención humana las dos de la izquierda y una regular intervención humana la inferior derecha. Se debe recordar que las zonas negras dentro de la provincia, en el mapa que representa la “realidad”, son vacíos de información (no data) del mapa original del MAE año 2008.

¹⁹ Se advierte que actualmente se está dudando mucho sobre la utilidad y oportunidad de este índice. El autor del índice (Pontius) ha publicado un artículo muy crítico al respecto, pero por ahora quizá sea lo mejor que se tiene al respecto.

4.4. COMPARACIÓN ENTRE MODELOS; PROBABILIDAD (REGRESIÓN) Y CA_MARKOV (TRANSICIÓN).

Para comparar ambos modelos nos basaremos en una tabla de clasificación como se ha venido haciendo. Se utiliza por tanto la tabla de clasificación donde el modelo de RLM para el mapa de probabilidad de presencia de las coberturas de tipo antrópico presenta la mejor *performance*, este es el punto de la curva ROC (RLM vs cobmae2008) que tiene la menor distancia al punto ideal en el gráfico de curva ROC. A continuación se muestra el gráfico ROC, indicando el umbral de menor distancia al punto ideal.

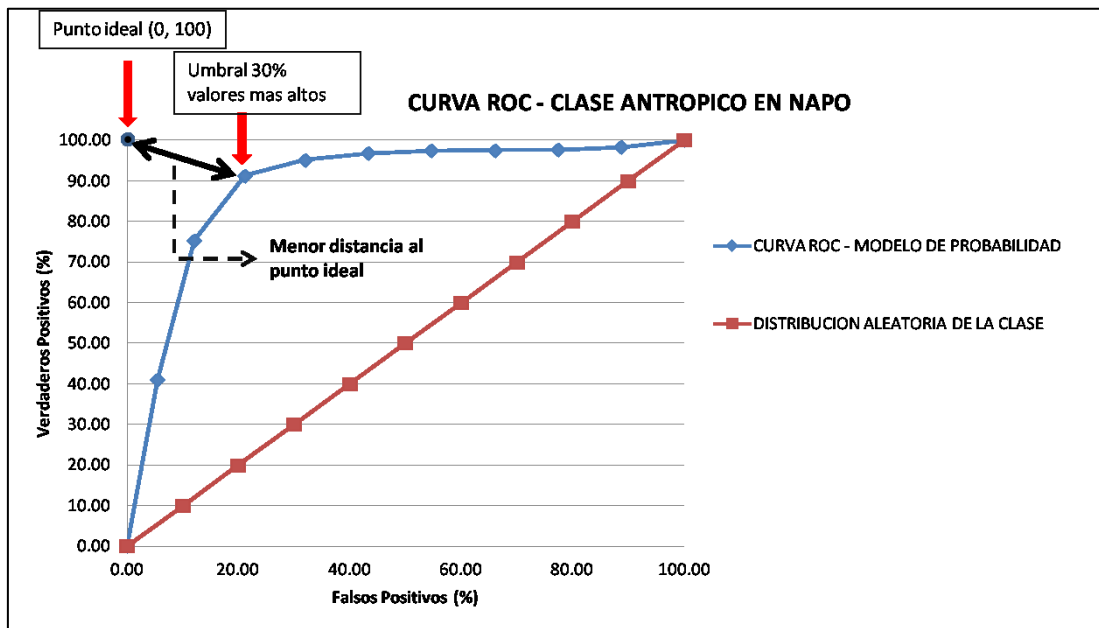


Figura 65. Umbral de menor distancia a al punto ideal en la curva ROC (RLM – MAE2008)

Esta distancia se ha calculado con una simple fórmula de distancia entre dos puntos a partir de la siguiente tabla que se construyó con los resultados arrojados por el software de SIG para el cálculo de ROC.

Tabla 13. Umbral con menor distancia al punto ideal en la tabla de valores de la curva ROC

N	UMBRAL(%)	%PIXELES				dist pto ideal (0, 100)
		A (VP)	B (FP)	C (FN)	D (VN)	
1	0	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
2	10	41.06	5.54	58.94	94.46	59.20
3	20	75.36	12.05	24.64	87.95	27.43
4	30	91.34	21.19	8.66	78.81	22.90
5	40	95.23	32.07	4.77	67.93	32.42
6	50	96.87	43.27	3.13	56.73	43.38
7	60	97.41	54.63	2.59	45.37	54.69
8	70	97.56	66.04	2.44	33.96	66.09
9	80	97.65	77.47	2.35	22.53	77.50
10	90	98.29	88.81	1.71	11.19	88.83
11	100	100.00	100.00	0.00	0.00	100.00

Esto quiere decir que el modelo de RLM tiene su **mejor poder de “predicción”**, utilizando el 30% de los valores más altos, y a partir del histograma de frecuencias acumulado de la imagen se determinó que este umbral corresponde a valores **iguales o mayores a 61%** de probabilidad (Figura65).

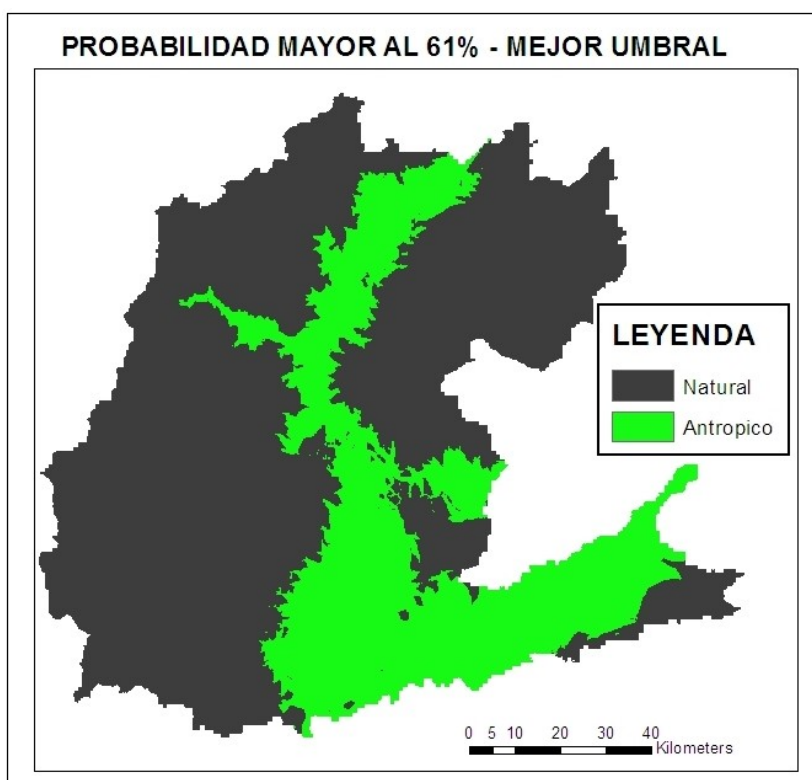


Figura 66. Áreas dentro del mejor umbral en el modelo de RLM.

Si en este umbral los verdaderos positivos son el 91.34% y los verdaderos negativos 78.81 %, el porcentaje global sería 85%. Este porcentaje global en el mejor umbral,

sería algo complementario a la parte de análisis del modelo de RLM de este capítulo, pero también sirve para hacer la comparación con el modelo CA_MARKOV (simulación año 2008 “ca_markov_napo2008”), ya que a partir de una tabulación cruzada entre ambos mapas se puede conocer el grado de concordancia entre ambos modelos, como se muestra a continuación.

	0	1	2	Total
0	940923	1438	21981	964342
1	33	137589	231760	369382
2	2427	3457	859842	865726
Total	943383	142484	1113583	2199450

Figura 67. Tabulación cruzada; RLM (filas) vs CA_MARKOV (columnas).

De los valores de la Figura 67, se determina que la clase antrópico del modelo RLM concuerda en un 96% con la misma clase del modelo CA_MARKOV, y la clase natural del modelo RLM concuerda en un 77% con la misma clase del modelo CA_MARKOV.

Una comparación entre estos modelos sirve para saber el grado de concordancia entre los mismos, mas no para determinar si uno es mejor que el otro, ya que son de diferente naturaleza (uno de transición y el otro de regresión). Más bien se puede decir que son complementarios en este caso, ya que el modelo CA_MARKOV se basa en el modelo de RLM.

4.5. ANÁLISIS DE LOS MAPAS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN CON CA_MARKOV PARA 2015 Y 2020.

Las áreas para cada tipo de cobertura en cada año de simulación, así como sus correspondientes porcentajes se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Áreas de cada tipo de cobertura en los mapas simulados 2015 y 2020.

AÑO	2015			2020		
	#pix(100m)	area(km2)	%	#pix(100m)	area(km2)	%
Antrópico (1)	163113	1631.13	13.156	156135	1561.35	12.593
Natural (2)	1076723	10767.23	86.844	1083701	10837.01	87.407
TOTAL	1239836	12398.36	100	1239836	12398.36	100

De aquí se deduce que la tendencia en el cambio de cobertura sería hacia la recuperación de áreas degradadas.

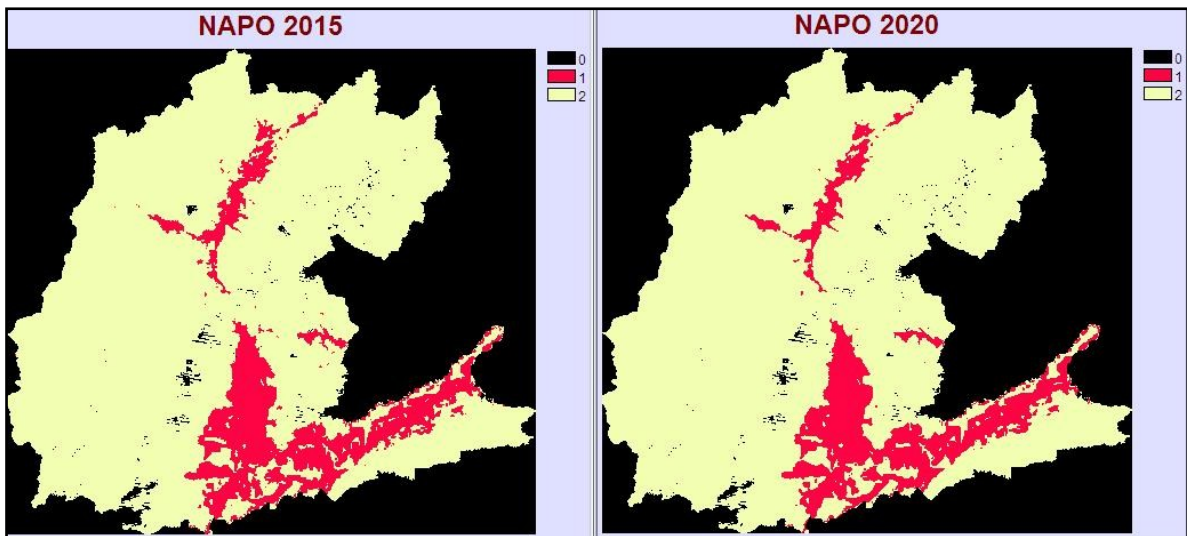


Figura 68. Simulaciones 2015 y 2020 de tipo de cobertura en Napo.

Esta tendencia a la recuperación puede deberse a los proyectos sobre conservación que se llevan a cabo en la provincia (por ejemplo, Proyecto Gran Sumaco), además de la creación de áreas protegidas como Antisana (1993), Cayambe Coca (1970), Sumaco Napo – Galeras (1994) y LLanganates (1996), entre otras. Puede observarse que 3 de ellas se han creado después de 1990, lo que seguramente ha favorecido la recuperación de ciertas zonas degradadas²⁰. Además, hay que considerar que el Estado²¹ ha ido ejerciendo cada vez más control sobre los bosques y su conservación, aunque todavía falta mucho por hacer.

A continuación, en base al escenario simulado de tipo de cobertura del suelo 2020 (más lejano) se hace un análisis general de cómo las áreas protegidas se podrían ver comprometidas en un futuro y de algunas amenazas naturales como; deslizamientos e inundaciones, que ya existen y que se podrían agravar debido a que se relacionan mucho a la cobertura del suelo.

a. Respecto a las Áreas Protegidas y Subcuencas.

La Figura69 es una superposición del mapa simulado de deforestación de 2020 con la cobertura de áreas protegidas dentro de la Provincia.

²⁰ Esta tendencia a la recuperación que si bien es optimista también se ve corroborada por las tasas de deforestación oficiales del Gobierno (Proyecto de Deforestación Historica – Ministerio del Ambiente) que se citan más adelante.

²¹ El Ministerio del Ambiente se creó en 1996 y pasó a tener control de las áreas protegidas en 1999.

Como puede observarse, la tendencia es que estas áreas se mantengan conservadas mientras las condiciones de accesibilidad (vías y centros poblados) sean limitadas. Sin embargo, la reserva Cayambe-Coca al Noroeste (elipse 1 en la Figura 69), sería la más comprometida de todas, en su franja de amortiguamiento en la zona de El Chaco. Otra área protegida afectada por los usos antrópicos de este escenario, es el bosque protector Sumaco (elipse2), por la influencia de la vía que va desde el sector del desvío a Loreto, conocido como Km24.

Si bien la tendencia es a la recuperación de las áreas degradadas, esto es a nivel de toda la provincia, es decir de forma general, pero a nivel más específico en ciertas zonas la tendencia es a la deforestación como ocurre en algunas subcuencas. Es así que basándonos en la superposición de la coberturas de subcuencas con el escenario antrópico de 2020, las subcuencas más afectadas son las de los Ríos Coca (parte media en el zona del Chaco), Misahuallí, Anzu, Arajuno y drenajes menores de la cuenca del Río Napo en la rívera del mismo en toda la extensión desde Puerto Napo hasta más allá de Chonta Punta.

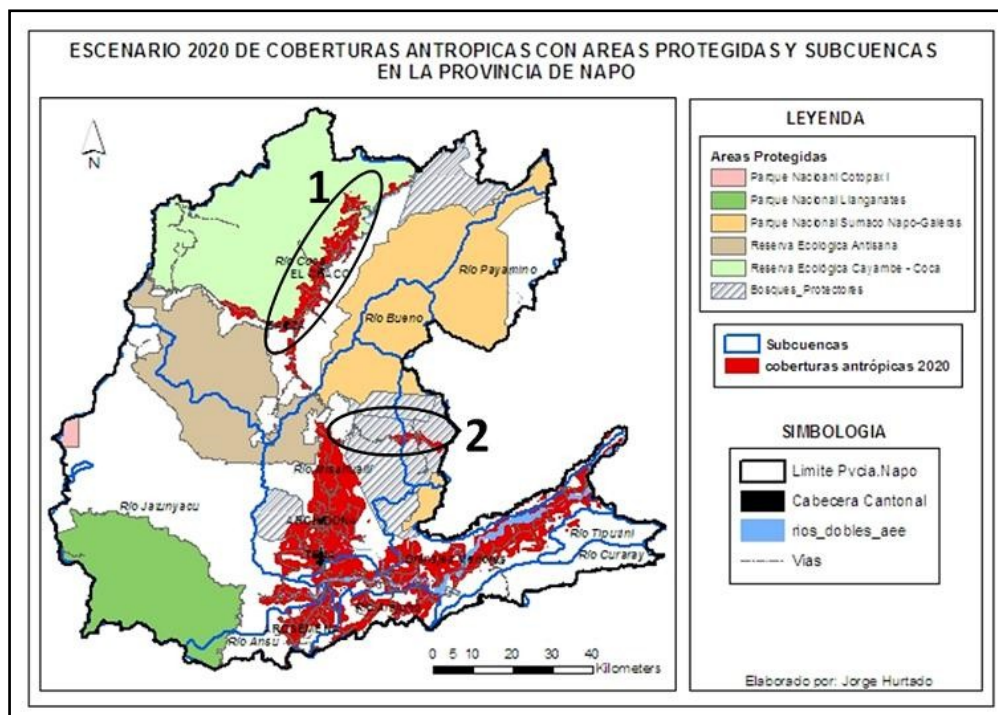


Figura 69. Mapa de tipo de cobertura simulado a 2020 con áreas protegidas y subcuencas dentro de Napo.

b. Respecto a las Áreas Susceptibles de Deslizamientos

Entre las amenazas naturales, que se agravan por el cambio de cobertura del suelo, se puede mencionar a los deslizamientos de tierra que son algo frecuente en las partes montañosas de la Provincia de Napo.

Algunos de estos deslizamientos se dan en las áreas protegidas donde no tienen mayor impacto sobre las actividades humanas, pero hay otros que afectan mucho por el cierre de vías, lo que se presenta especialmente en la vía Papallacta – Baeza (elipse 1, Figura 70), y en la zona de la cordillera de Guacamayos (elipse2, Figura 70), aunque en esta última los deslizamientos se dan principalmente por las condiciones topográficas (fuertes pendientes, taludes grandes y casi verticales) y las constantes precipitaciones, al tratarse de estribación de cordillera donde las masas de aire húmedo que vienen de la amazonia se condensan a esta altura, configurando una zona muy húmeda.

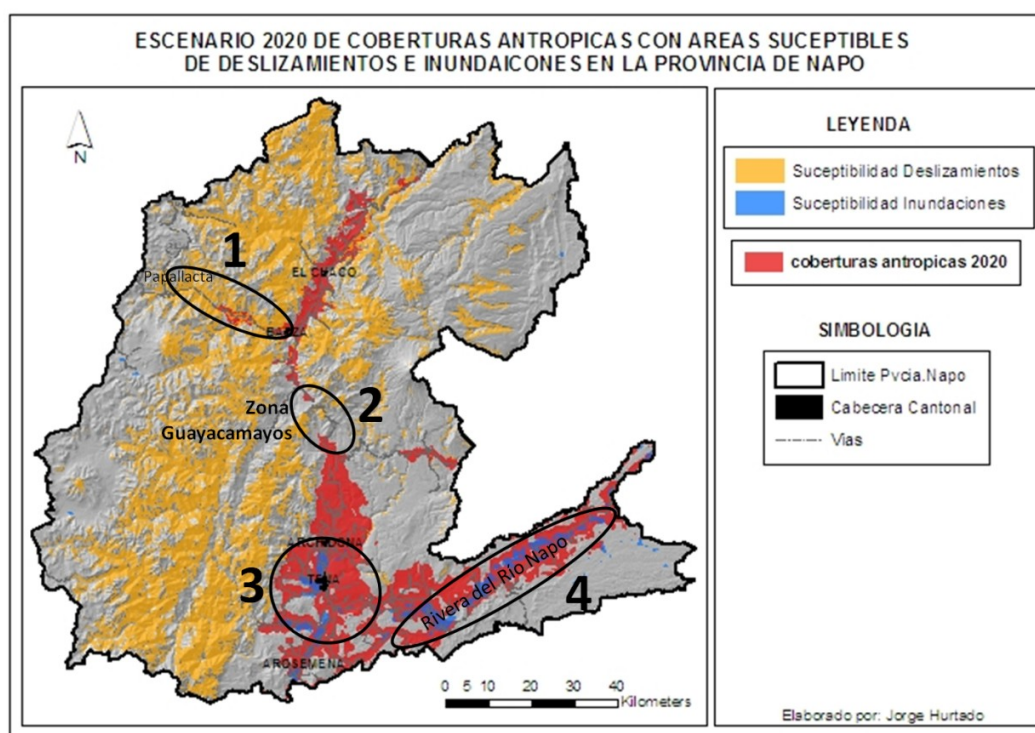


Figura 70. Mapa de tipo de cobertura simulado a 2020 con las zonas susceptibles de deslizamientos e inundaciones²².

En referencia a la vía Papallacta – Baeza, donde de partida es una zona muy húmeda y en consecuencia con muchas precipitaciones, sumado a los escenarios simulados de cobertura del suelo, que indican que hay una tendencia en el tiempo para que sigan

²² Fuente GPN e INAMHI (Instituto de Meteorología e Hidrología).

presentes las coberturas antropizadas (pastos, cultivos, sistemas silvopastoriles), se puede deducir que los procesos de movimientos en masa seguirán presentándose, ya que es sabido que la cobertura de bosque “fija el terreno” y lo mantiene más estable, lo que evita en gran medida la ocurrencia de estos eventos.

Este problema es algo muy importante a considerar ya que dicha vía es de alto tráfico por constituir el acceso principal a la provincia desde Quito y también es parte del acceso a la zona petrolera de Lago Agrio y El Coca.

c. Respecto a las Áreas Susceptibles de Inundaciones.

Ya se mencionó a las Subcuencas más comprometidas por el cambio de cobertura del suelo a 2020, pero de éstas quizá la más importante a considerar por el daño potencial ante una crecida repentina debido justamente a la transformación de las coberturas naturales hacia coberturas antrópicas, sería la **Subcuenca del Río Misahuallí**, ya que en ella se encuentra la capital provincial Tena (cabecera parroquial) que tiene más de 23000 habitantes. Dentro de ésta se encuentran las microcuencas de los ríos Pano y Tena, cuyas respectivas “salidas del sistema”, se juntan justo en la ciudad de Tena, habiéndose calculado para las mismas (Fernández et al., 2004), con condiciones relativamente actuales de cobertura, caudales de alrededor de 1200 m³/s para 100 años de periodo de retorno y con tiempo al pico de 2 horas, lo cual ya resulta bastante considerable.

Es importante recordar que las coberturas de tipo antrópica tienen efectos directos en los procesos hidrológicos, como la disminución de la infiltración por degradación de las propiedades hidrofísicas (conductividad hidráulica, capacidad de almacenamiento, etc), disminución de la pérdida por intercepción ya que un bosque intercepta más precipitación que un pasto o que un sistema silvopastoril, todos estos factores combinados hacen que llegue más agua al suelo y además infiltre menos, lo cual produce mayores cantidades de escurrimiento superficial, aumentando considerablemente los caudales de los ríos y produciendo inundaciones por crecidas repentinas. Esto se conoce como disminución del rendimiento hídrico de la cuenca (Tobón 2009), que provoca que en la época seca los caudales disminuyan de manera drástica y en la época de lluvias se presentes inundaciones, en vez de mantener los caudales más regulares. Si a esto le sumamos los efectos del cambio climático donde se advierte que los episodios de precipitación podrían ser más intensos con una distribución más irregular en el tiempo. De ser así, la combinación de cambio de uso de suelo y cambio climático harán que los episodios de inundaciones sean cada vez más frecuentes y de gran intensidad en el Tena.

Por eso, una de las propuestas de este trabajo consiste en un plan de manejo de la Subcuenca del Río Misahuallí como parte de un ordenamiento territorial cantonal o provincial, y además, un sistema de alerta temprana ante inundaciones para la zona de Tena y la rivera del Río Napo; Misahuallí, Ahuano, Chontapunta (elipses 3 y 4 en la Figura 70) que involucraría obviamente un sistema de monitoreo hidrometeorológico.

4.6. ANÁLISIS DEL CAMBIO ENTRE ÁREAS NATURALES Y ÁREAS ANTROPIZADAS, EN EL PERÍODO 1990 - 2020.

Se analiza en esta parte dos periodos; el primero desde 1990 hasta 2008 y el segundo desde 2008 hasta 2020. El análisis de los cambios se obtiene de la intersección de los mapas de cobertura correspondientes, identificando así 4 tipos de transiciones²³:

a. Periodo 1990 – 2008.

La siguiente figura resulta de la intersección entre los mapas de cobertura del primer periodo.

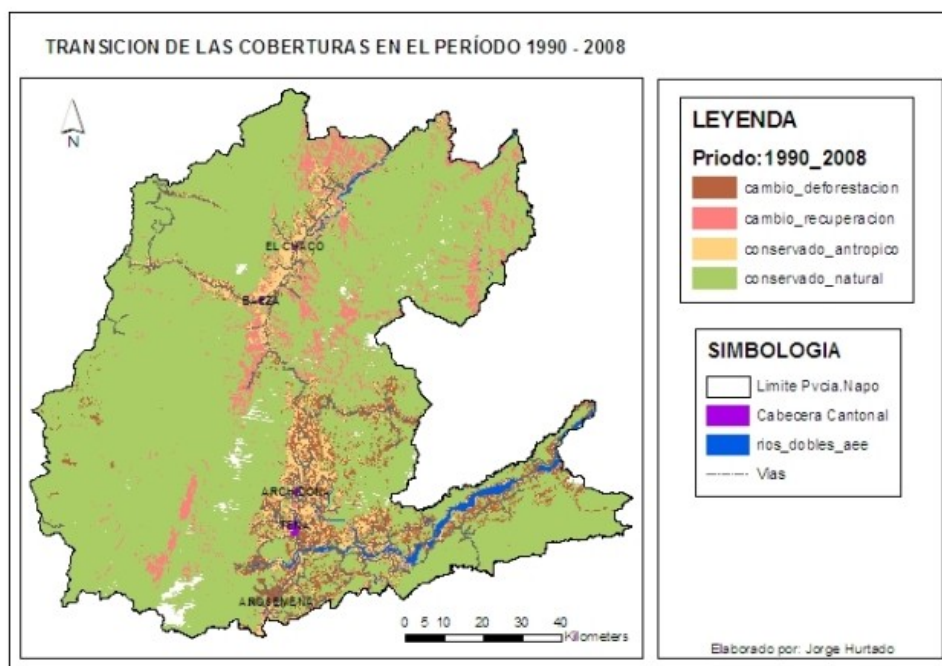


Figura 71. Análisis de transiciones entre 1990 y 2008.

El área para cada cambio, así como las tasas en Ha/año para cada tipo de transición se encuentran en la siguiente tabla.

²³ Como ya se vio en la parte de análisis de cambio entre 1990 y 2002 en el capítulo de metodología.

Tabla 15. Transiciones entre 1990 y 2008 (18 años) en Napo.

Transicion (1990_2008)	% area	area_ha	ha/año
conservado_antropico	5.78	71668.89700	3981.61
cambio_recuperacion	6.67	82637.97600	4591.00
cambio_deforestacion	6.77	83894.30900	4660.79
conservado_natural	80.78	1001421.15000	55634.51

b. Periodo 2008 – 2020.

Así mismo se indica el mapa de transiciones del segundo período, a partir de una intersección espacial de los mapas de cobertura correspondientes.

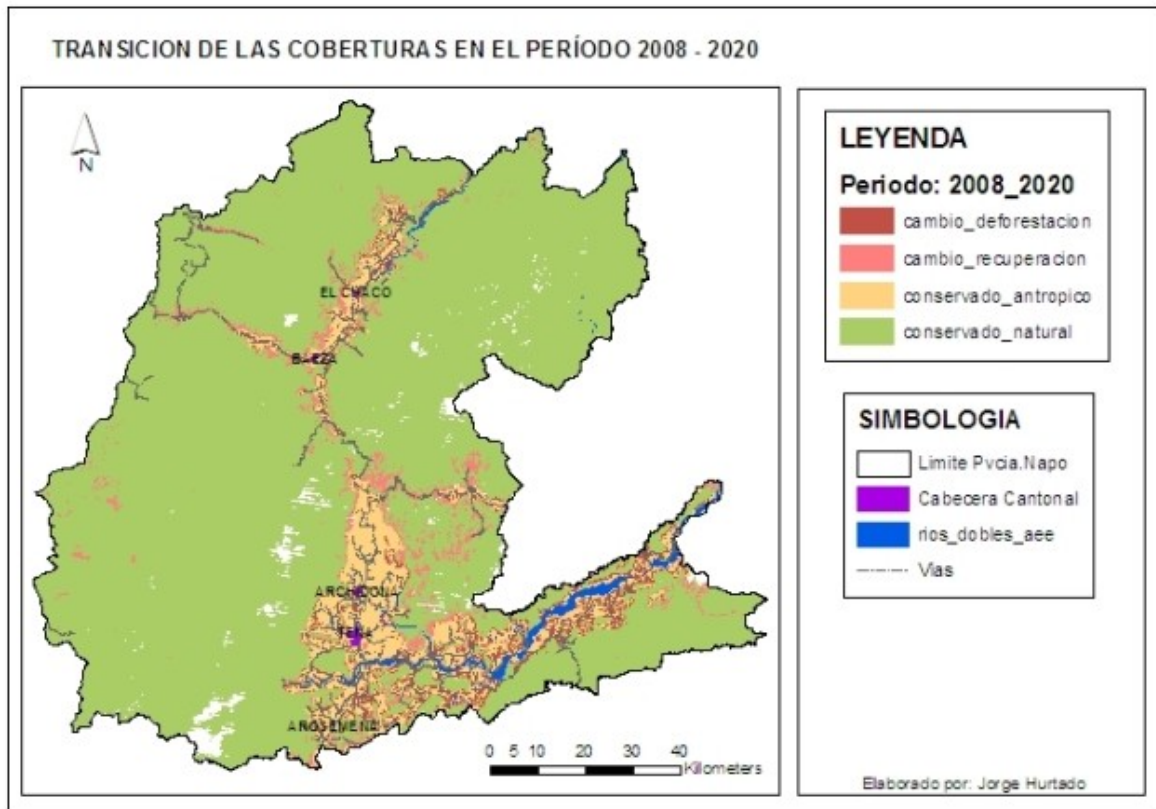


Figura 72. Análisis de transiciones entre 2008 y 2020.

También las áreas de cada transición se detallan a continuación:

Tabla 16. Transiciones entre 2008 y 2020 (12 años) en Napo.

Transicion (2008_2020)	% area	area_ha	ha/año
conservado_antropico	9.19	113366.36200	9447.20
cambio_recuperacion	3.39	41789.16600	3482.43
cambio_deforestacion	3.45	42604.41200	3550.37
conservado_natural	83.97	1035869.48000	86322.46

Las tasas de deforestación muestran una disminución de acuerdo a estos resultados, de 4660 ha/año (1990-2008) a 3550 ha/año (2008-2020). Si se hace referencia a los datos del Ministerio del Ambiente respecto al “Proyecto de Deforestación Histórica del Ecuador”, donde se indica que para el periodo 2000 – 2008 la deforestación anual promedio es de 77647 ha/año y para el período 1990 – 2000 corresponde a 89944 ha/año (para el Ecuador continental), esto quiere decir que la tendencia en el tiempo es a disminuir la tasa de deforestación anual, lo cual se ha verificado también en la provincia de Napo con este estudio.

Sin embargo, éste sería un escenario optimista donde las áreas de transición markovianas están jugando un papel determinante. Es importante considerar, a la hora de interpretar los resultados, que un territorio puede tener dinámicas de cambio de cobertura diferentes, por ejemplo en la provincia de Napo, en el sector de Papallacta el contexto económico, social y ambiental del territorio es diferente que en el sector de Tena, mientras el primero está más vinculado a la sierra, el segundo tiene una influencia mayor de las poblaciones del oriente, las mismas prácticas agrícolas son diferentes, la etnia de las personas y por tanto las culturas, también son diferentes (Ecuador es un país Pluricultural y Pluriétnico), entonces los “drivers” o factores que modifican el territorio o la cobertura del suelo también pueden ser diferentes o ponderarse de forma distinta, y cuando analizamos a la provincia como un todo, estamos mezclando realidades diferentes y la matriz markoviana principalmente (aunque también el mapa de probabilidad de presencia de coberturas de tipo antrópico), contempla de forma implícita ambas realidades sobre los procesos de transformación de la cobertura del suelo. Ahora que sabemos que los factores antrópicos (distancia a vías y a centros poblados) son los más importantes en el cambio de cobertura del suelo, quizá convenga analizar los procesos de cambio de cobertura por separado, es decir, realizar un análisis por zonas homogéneas desde el punto de vista social y cultural.

CAPITULO V. CONSIDERACIONES FINALES

5.1. CONCLUSIONES.

- ✓ Las técnicas de clasificación de imágenes empleadas han sido satisfactorias para generar el mapa de cobertura del suelo del año 1990. El hecho de incluir pseudobandas como la altitud, la pendiente, y el NDVI resultó de gran utilidad, para clasificar especialmente las coberturas de páramo.
- ✓ El Modelo de RLM obtenido es muy bueno para determinar el potencial de presencia de coberturas antrópicas. En este caso, genera un escenario quizás más realista, de riesgo de deforestación a partir del umbral de mejor clasificación (61%).
- ✓ Las variables más relevantes para la presencia de coberturas de tipo antrópico son las vías y centros poblados ya que ofrecen accesibilidad a zonas marginadas cubiertas de bosques. Algo quizá simple de deducir pero que en este trabajo se ha demostrado de forma técnica.
- ✓ A pesar de que el modelo CA_MARKOV es más complicado en procedimiento que el modelo de RLM, no quiere decir que sea mejor, ya que su naturaleza es diferente, mientras uno modela la probabilidad como el caso del modelo de RLM, el modelo markoviano obtiene una cobertura a partir de la transición entre coberturas, la misma que se da por su vecindad, aptitud de la cobertura y áreas estimadas de transición, entre otras, en un proceso iterativo.
- ✓ Se verifica una disminución en la tasa de deforestación para el segundo período (3550 ha/año), respecto del primero (4660 ha/año).
- ✓ Como ya se señaló, la clase antrópico del modelo RLM concuerda en un 96% con la misma clase del modelo CA_MARKOV, y la clase natural del modelo RLM concuerda en un 77% con la misma clase del modelo CA_MARKOV. Ambos modelos tanto el de RLM y CA_MARKOV determinan que los mayores Cambios de Cobertura del Suelo (CCS) al año 2020, se presentarían en la subcuenca del Río Misahuallí y la rivera del Río Napo.
- ✓ Este trabajo ha requerido la utilización de herramientas Geomáticas muy útiles a la hora de analizar el CCS: el Análisis Digital de Imágenes para mapear la Cobertura del Suelo del año 1990, y los Sistemas de Información Geográfica

(SIG), aún cuando el modelo de RLM se realizó en un software estadístico, la utilización de un SIG fue muy importante para poder extraer la información de las variables ambientales y antrópicas, y posteriormente representar el modelo obtenido en forma de mapa. Y por último, se ha probado el modelo CA_MARKOV que integra Cadenas de Markov y Autómatas Celulares en un entorno SIG. Todas estas herramientas Geomáticas y Estadísticas han permitido generar una simulación del CSS, que puede ser usada por los tomadores de decisiones en Gobiernos Locales (Municipio de Tena, Gobierno Provincial de Napo), por instituciones del Estado encargadas de la planificación y conservación de recursos naturales (Ministerio del Ambiente, Ministerio de Agricultura, Secretaria Nacional del Agua, etc) y también por ONG's que trabajen en conservación, ya que esta información es muy importante en los procesos de planificación territorial, para proyectos REDD (reducción de emisiones por deforestación y degradación) y también para los proyectos sobre pago por servicios ambientales por secuestro de carbono, por ejemplo. Por todo lo expuesto, las tecnologías y herramientas Geomáticas tendrán cada vez más importancia y desarrollo.

5.2. RECOMENDACIONES.

- ✓ Definitivamente una de las principales recomendaciones será trabajar con mapas de Cobertura del Suelo, realizados con la misma metodología; mismas imágenes, mismos procesos, mismos criterios, mismas escalas, mismas leyendas, todo esto para tener mayor certeza de la calidad de los resultados que se obtienen en todo el proceso.
- ✓ Para futuros trabajos se podría modificar la matriz markoviana a partir del modelo de regresión logística para áreas antrópicas, por ejemplo estimando las áreas a ser deforestadas a partir de la selección de pixeles mayores o iguales a 61% que corresponde al límite del mejor umbral evaluado a partir de la distancia óptima. Esta sería una propuesta para generar otro escenario más pesimista, dándole más relevancia al modelo RLM modificando la matriz markoviana de áreas y a partir de ambos se podría construir un escenario intermedio.
- ✓ Generar escenarios de escurrimiento superficial para evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca por los cambios de cobertura del suelo ante eventos extremos de precipitación. Aquí se plantea una línea de investigación para las instituciones que tengan esta competencia, ya que realizar modelaciones hidrológicas en diferentes escenarios de cobertura del suelo permitirá conocer

la respuesta hidrológica de las subcuencas, y desarrollar así un ordenamiento hidrológico territorial estratégico, que serviría como herramienta de toma de decisiones para gobiernos locales principalmente (Municipio, Gobierno Provincial) o también para apoyar el trabajo de ONG's, Ministerios e Instituciones afines al manejo de recursos hídricos, recursos naturales y planificación en general. Es decir, el agua es un recurso base para el desarrollo y la cobertura del suelo afecta directamente al comportamiento de dicho recurso.

- ✓ Como complemento de lo ya señalado, se recomienda la instalación de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) para monitorear los fenómenos hidrometeorológicos que pueden producir crecidas repentinas y de esta forma alertar de forma oportuna a la población.
- ✓ Combinar los escenarios de deforestación con modelos de riqueza de biodiversidad para encontrar, por ejemplo, zonas con alto potencial de riqueza de biodiversidad pero que a futuro se verían comprometidas por la deforestación²⁴.
- ✓ Modelar la probabilidad de cambio, no solo de presencia de las coberturas, a partir de módulos como LCM (Land Change Modeler) donde esta probabilidad de cambio se puede determinar a partir de regresiones logísticas o redes neuronales, aunque estas últimas han presentado, según algunos autores, ventajas significativas respecto a las primeras (Camacho et al., 2010).
- ✓ Analizar la conveniencia de usar modelos como MaxEnt que se ha desarrollado para la distribución de especies con pseudoausencia a través de la caracterización de un *background*. Como parte del presente trabajo, en el proceso de aprendizaje se hizo un ensayo²⁵ de este tipo, para modelizar transiciones entre 1990 y 2002, con resultados alentadores pero mejorables todavía. En este ensayo con MaxEnt se encontró que las variables más importantes para el cambio de coberturas naturales a antrópicas fueron: la altura, la distancia a vías y la distancia a centros poblados.

²⁴ Un trabajo parecido al de esta propuesta puede ser “Greenhouses, land use change, and predictive models: MaxEnt and Geomod working together” de Benito de Pando B, Peñas de Giles J.

²⁵ Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/139013005/Cambio-de-Cobertura-del-Suelo-en-Napo>

5.3. BIBLIOGRAFÍA

Páginas web consultadas

- <http://www.fao.org>
- <http://www.iniap.gob.ec>
- <http://www.agricultura.gob.ec>
- <http://www.ugr.es/~sigeomod/publicaciones.html>
- www.cluemodel.nl
- <https://lta.cr.usgs.gov/TM>
- http://Landsat.usgs.gov/Landsat_Processing_Details.php

Páginas para descargas información geográfica

- http://www.inec.gob.ec/estadisticas/index.php?option=com_remository&Itemid=&func=startdown&id=1761&lang=es&TB_iframe=true&height=250&width=800
- <http://www.worldclim.org/current>
- <http://glovis.usgs.gov/>
- <http://glcfapp.glc.f.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>
- <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/>
- <http://www.sni.gob.ec/web/guest/coberturas>

Documentos y Publicaciones.

- Benenson, I. Torrens. P (2004). Geosimulation: Automata-based modeling of urban phenomena.
- Buzai, G. Actualizaciones de cálculos y distribuciones espaciales a través de Cadenas de Markov y Autómatas Celulares. Pérdida de suelos en el área Metropolitana de Buenos Aires. GEPAMA – FADU – UBA. 2005. www.gepama.com.ar/buzai/publicaciones/Buzai-JEP.pdf
- Cabral. P, Zamyatin. A (2006). Three land change models for urban dynamics analysis in Sintra-Cascais area. http://www.earsel.org/workshops/SIG-URS-2006/PDF/Session5_cabral.pdf

- Cadenas de Markov – ITESCAM. Los autores, 2002; © Ediciones UPC, 2002.
<http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r55112.PDF>
- Camacho Olmedo, M.T., Morelo Melgarejo, E. y Paegelow, M. (2010): Modelos geomáticos aplicados a la simulación de cambios de usos del suelo. Evaluación del potencial de cambio. Secretariado de publicaciones de la Universidad de Sevilla.
<http://www.ugr.es/~camacho/archivos/CV/XIV%20CTIG%20 COMUNICACION-Camacho,%20Molero,%20Paegelow-%20CD.pdf>
- Center for Remote Sensing and Spatial Analyst, The State University of New Jersey. Land Use Change Models in Idrisi.
- Center for Remote Sensing and Spatial Analyst, The State University of New Jersey. Land Use Change Models in Idrisi.
<http://www.crssa.rutgers.edu/help/lucidrisi.htm>
- Clair. E, CD curso de Sistemas de Información Geográfica. Maestría de Geomática. UNLP 2010.
- Clarke, K.C., S. Hoppen, and L. Gaydos. 1997. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. Environment and Planning B: Planning and Design 24, pp 247-261.
- Chomitz. K, Gray. D (1996). Roads, Lands marketz and deforestation, a spatial model of land use in Belize. World Bank Economic Review 10, pp 487-512.
- Chuvieco. E, Teledetección Ambiental, ed2008.
- DeVore, Jay L. Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias. Editorial THOMSON. 2005. Cap13 Regresión logística.
- Echarche, P. Los Autómatas celulares. 2006.
<http://www.eslomas.com/index.php/archives/2005/09/01/automatas-celulares/>
- Elith. J, Phillips. J, otros (2011). A Statistical explanation of MaxEnt for ecologists. A Journal of Conservation Biogeography.
- ERDAS Tour Guide (versión español), Cap17 Clasificación Avanzada, U. Distrital (Colombia 2001).

- Fernández. M, Bateman. A (2004). Recuperación paisajística y estudio de inundabilidad del sistema hídrico a su paso por Tena, Ecuador. Universidad Politécnica de Cataluña, Grupo de transporte de sedimentos (GITS). http://www.gits.ws/08cyd/pdfs/ANEJO%205_HIDROLOGIAMir.pdf
- Gobierno Provincial de Napo (2010). Presentación del “Mapa de Cobertura Vegetal y Uso Actual del Suelo”. Napo - Ecuador.
- Henríquez. C, y otros (2006). Cambio de uso de suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile. http://www.geo.puc.cl/html/revista/PDF/RGNG_N36/art04.pdf
- IDRISI Andes Guide to GIS and Image Processing, Predictive Change Modeling, pp 235 – 237. Abril 2006.
- IDRISI Taiga Help System; CA_Markov, Markov, MOLA (Multi Objective Land Allocation), Validate, ROC.
- Kappa Tool User’s Guide, Utah State University 2003.
- Kaimowitz. D, Angelsen. A (1998). Economic Models of Tropical Deforestation A Review. http://www.cifor.org/publications/pdf_files/Books/Model.pdf
- Lambin. E, y otros (2003). Dynamics of Land-Use and Land-Cover Change in Tropical-Regions. http://www.globalrestorationnetwork.org/uploads/files/LiteratureAttachments/93_dynamics-of-land-use-and-land-cover-change-in-tropical-regions.pdf.
- Mahiny. A, Turner. B, (s/f). Modeling Past Vegetation Change Through Remote Sensing and GIS: A Comparison of Neural Networks and Logistic Regression Methods. http://www.geocomputation.org/2003/Papers/Mahiny_Paper.pdf.
- Mariano, A. Como hacer una regresión logística con SPSS. DOCUWEBFABIS. http://www.fabis.org/html/archivos/docuweb/Regres_log_1r.pdf
- Mateo. R, Felicísimo. A, Muñoz. J (2011). Modelos de distribución de especies. Revista Chilena de Historia Natural.
- Ministerio del Ambiente, (2012): / Línea Base de Deforestación del Ecuador Continental, Quito – Ecuador.

- Montagnini. F (1992). Sistemas Agroforestales. Organization for Tropical Studies.
- Moral, I. Modelos de regresión: lineal simple y regresión logística. <http://www.revistaseden.org/files/14-CAP%2014.pdf>
- Padilla, O. Autómatas Celulares: Una Solución a la Geosimulación. ESPE, Revista GeoEspacial N2, 2005. <http://www.espe.edu.ec/encuesta/sitiorevistas/revistas/civil/RevistaGeoespacialN2.pdf>
- Phillips. S, AT&T Research. A Brief Tutorial on MaxEnt.
- Pontius, R.G. 2002. Statistical methods to partition effects of quantity and location during comparison of categorical maps at multiple resolutions. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68(10), pp 1041-1049.
- Pontius, R. Shusas, E. y McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 101, pp. 251-268.
- Pontius, R. Malanson, J. (2005). Comparison of the structure and accuracy of two land change models. *International Journal of Geographical Information Science*, Nº19, Vol. 2, pp. 243-265.
- Qi, Y. & Wu, J (1996). Effects of changing spatial resolution on the results of landscape pattern analyst using autocorrelation indices. *Landscape Ecology*, Nº11, Vol. 1, pp 39-49.
- Rosenfield, G.H., and K. Fitzpatrick-Lins, 1986. A Coefficient of Agreement as a Measure of Thematic Classification Accuracy, In *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52(2), pp 223-227
- Sandoval. V, Oyarzun. V (2003), Modelamiento y prognosis espacial del cambio en el uso del suelo. <http://fcf.unse.edu.ar/archivos/quebracho/01-sandoval-oyarzun-q11.pdf>
- Sisti. J, CD curso de Percepción Remota. Maestría de Geomática. UNLP 2010.
- Stehman. S, Estimating the Kappa Coefficient and its Variance under Stratified Random Sampling.

- Tapia, F. Aranguen, R (2008). Autómatas celulares. Red científica, tecnológica y pensamiento, GAIA. <http://www.redcientifica.com/gaia/ac/index.html>
- Tobón, C. (2009). *Los bosques andinos y el agua*. Serie investigación y sistematización #4. Programa Regional ECOBONA – INTERCOOPERATION, CONDESAN. Quito.
<http://www.bosquesandinos.info/ECOBONA/Bosques,%20final-web.pdf>
- White, R. and G. Engelen. 2000. High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems. *Computers, Environment and Urban Systems* 24, pp 383-400.
- Yeh, A. G.-O. and X. Li. 2003. Simulation of development alternatives using neural networks, cellular automata, and GIS for urban planning. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 69(9), pp 1043-1052.
- Zhou, G. & Liebhold, A (1995). Forecasting the Spatial Dynamics of Gypsy-Moth Out-breaks Using Cellular Transition Models. *Landscape Ecology*, Nº10, Vol.3, pp 177-189.

5.4. GLOSARIO DE TÉRMINOS.

AEE (Almanaque Electrónico del Ecuador): Base cartográfica del Ecuador, año 2002, escala 1:250.000. Elaborado por la Universidad del Azuay.

Áreas Antropizadas: Son aquellas coberturas que son producto de la intervención humana, tales como: centros poblados, cultivos, pastos, sistemas silvopastoriles, bosques secundarios.

Áreas Naturales: Son aquellas donde ha existido poca o ninguna intervención humana, o que difícilmente cambian a otro tipo de cobertura, tales como: páramos, bosques primarios, cuerpos de agua, nieve, lavas, otros.

AUC (Area Under Curve): Es un estadístico que permite evaluar la capacidad de predicción de un modelo, mientras más se acerque a 1 es mejor.

CA_MARKOV: Módulo para modelar la transición de coberturas. Se basa en estados precedentes de las coberturas para proyectarlas a una fecha específica en el futuro. Combina la técnica de autómatas celulares, cadenas de markov, entre otras.

ca_markov_napo2008: Es el mapa de cobertura del suelo de la Provincia de Napo modelado para el año 2008 con el modulo CA_MARKOV.

ca_markov_napo2015: Es el mapa de cobertura del suelo de la Provincia de Napo modelado para el año 2015 con el modulo CA_MARKOV.

ca_markov_napo2020: Es el mapa de cobertura del suelo de la Provincia de Napo modelado para el año 2020 con el modulo CA_MARKOV.

Cambio de Cobertura del Suelo: Es la transición de una cobertura hacia otra en el tiempo y el espacio.

cob1990tms: Mapa de Cobertura del Suelo, de la provincia de Napo, para el año 1990, realizado en este trabajo a partir de imágenes del sensor TM (Landsat 4 y 5).

cob2002etm_infop: Mapa de Cobertura del Suelo, de la provincia de Napo, recopilado de la Base cartográfica Infoplan.

cob2008mae: Mapa de Cobertura del Suelo, de la provincia de Napo, elaborado por MAE, y recopilado para este trabajo.

Crosstab (tabulación cruzada): Es la intersección espacial de dos mapas.

Estadístico Wald: Estadístico que sirve para medir el grado de importancia de una variable en el modelo.

GPN (Gobierno Provincial de Napo): Gobierno autónomo descentralizado de la Provincia de Napo.

IEE (Instituto Ecuatoriano Espacial): Antes llamado CLIRSEN, es la institución ecuatoriana encargada de hacer estudios y desarrollar productos basados en el uso de sensores remotos.

IGM (Instituto Geográfico Militar): Es la institución ecuatoriana encargada de elaborar la cartografía base y mantener la red geodésica, entre otras cosas.

INEC (Instituto de Estadísticas y Censos): Encargada de elaborar las estadísticas, censos pero también dispone de información cartográfica relacionada a sus actividades.

Infoplan: Base cartográfica del Ecuador, año 2002, escala 1:250.000. Elaborado por la Secretaria de Planificación de aquel entonces.

KAPPA (Kappa Index of Agreement): Estadístico que mide el grado de concordancia entre dos mapas. Mientras más se acerque a 1 es mejor.

Landsat: Satélites de órbita heliosincrónica (NASA - EEUU), muy utilizados para mapear coberturas. El programa Landsat ha producido 8 satélites y tiene registros de 41 años, desde 1972 con Landsat 1, hasta el presente con Landsat Data Continuity Mission.

MAE (Ministerio del Ambiente del Ecuador): Encargado de la política y control ambiental en el Ecuador

Mapa de Cobertura del Suelo: Se refiere al uso (por ejemplo, silvopastoril) o cobertura (por ejemplo, bosque) que tiene un territorio.

Markoviano: Modelo de transición que utiliza el principio de las cadenas de markov.

Matriz de áreas de transición: Indica el área, basada en el número de píxeles, del cambio que se espera de una cobertura hacia otra. Resulta de multiplicar el número de píxeles de una categoría por la matriz de probabilidad de transición.

Matriz de contingencia: también se la conoce como matriz de confusión, que a partir de un umbral compara los datos modelados versus los reales.

Matriz de probabilidad de transición: muestra la probabilidad de que una cobertura cambie a otra en un tiempo específico, basándose en estados precedentes de cobertura.

NASA (National Aeronautics and Space Administration): Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos.

NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada): es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación.

Pixels (Picture element): es la mínima unidad de representación en el formato raster de datos geográficos.

Pseudobanda: Es información de una variable continua en formato raster que no se refiere a la respuesta espectral de una cobertura pero que se la añade a la imagen multiespectral para mejorar el proceso de clasificación. Por ejemplo puede ser la altitud, la pendiente o el NDVI.

Raster: Modelo de datos en formato grilla-celda, usado para representar variables continuas, facilita la operación matemática entre variables.

Raster Group File: Agrupación de archivos raster en un solo archivo. Usado en el módulo CA_MARKOV.

RLM (Regresión Logística Multivariada): Técnica de regresión utilizado para predecir ya sea la presencia o ausencia de algo, 1 o 0, en base al ajuste a una función de probabilidad.

ROC (Relative Operating Characteristic): La curva ROC es un excelente método para evaluar la validez de un modelo que predice la ubicación de la presencia de una clase.

TM (Thematic Mapper): Sensor ubicado en los satélites Landsat 4 y 5. Es multiespectral ya que tiene 7 bandas, todas excepto la 6 (120m), tienen 30m de resolución espacial.

Transition Suitability Images: Son mapas (raster), que representan la idoneidad para la presencia de determinada cobertura. Se puede expresar en términos de probabilidad de presencia de la cobertura. Para este trabajo se utilizó la técnica de RLM.

USGS (U.S. Geological Survey): Servicio Geológico de Estados Unidos, encargado del archivo y distribución de los datos del Satélite Landsat.

VALIDATE: Es un módulo que evalúa el grado de concordancia entre dos mapas a través del índice kappa.

Vector: Modelo de datos geográfico usado mas para representar variables discretas y también representar la ubicación más exacta de un objeto, entre otras.

World Clim: Base de datos de Clima, tipo raster, tiene disponible 19 variables bioclimáticas de 1km de resolución de todo el mundo.

5.5. LISTA DE ANEXOS.

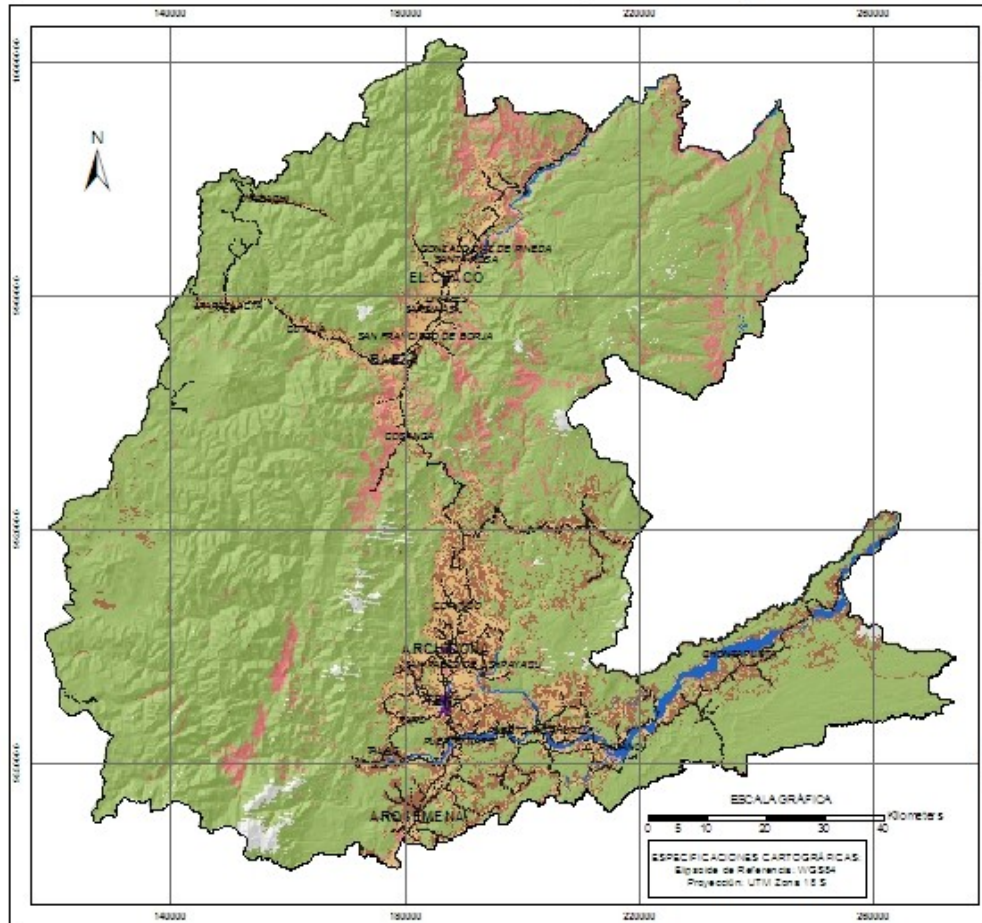
5.5.1. Composición de mapas de cobertura del suelo (áreas naturales y antropizadas) para los años 1990, 2008 y 2020 (Formato A3, escala 1:600.000)

- ✓ Cobertura Del Suelo 1990.
- ✓ Cobertura Del Suelo 2008.
- ✓ Cobertura Del Suelo 2020.

5.5.2. Composición de mapas de cambio de cobertura del suelo, para los períodos 1990 – 2008 y 2008 - 2020 (Formato A3, escala 1:600.000)

- ✓ Transiciones 1990 – 2008.
- ✓ Transiciones 2008 – 2020.

MAPA DE TIPO DE CAMBIO DE COBERTURA DEL SUELO EN LA PROVINCIA DE NAPO (ECUADOR) - PERIODO 1990 - 2008



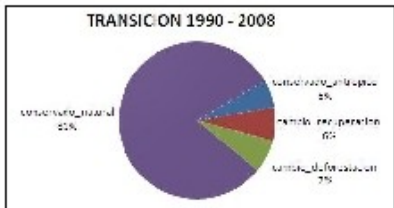
SIMBOLOGIA

- Max
- Cabezas Parroquial
- Cabezas Cantonal
- Límite Naipo
- Río Cobas

LEYENDA

- cambio_deforestacion
- cambio_recuperacion
- conservado_antropico
- conservado_natural

Transición (1990_2008)	% área	área_ha	ha/año
conservado_antropico	5.78	71.968.99700	3881.61
cambio_recuperacion	6.67	82.827.97600	4381.00
cambio_deforestacion	6.77	83.984.30800	4360.78
conservado_natural	80.78	1001421.13000	55624.51



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

Facultad de Ingeniería - Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

MAESTRÍA EN GEOMÁTICA

Tronco común al período 1990 - 2008

REALIZADO POR: JORGE HURTADO P.	DIRECTOR: ING. JORGE SISTI
Escala de Representación: 1:600000 PAS	Escala del Trabajo: 1:100000

AUTENTICACIÓN:
 Código QR: [http://bit.ly/1G8Z](#)
 Mapa de Cobertura de Suelo - 1990 - 2008 (100%)

MAPA DE TIPO DE CAMBIO DE COBERTURA DEL SUELO EN LA PROVINCIA DE NAPO (ECUADOR) - PERIODO 2008 - 2020

