

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

**Colegio de Postgrados**

**MODELAMIENTO DEL CAMBIO DE LA COBERTURA DE  
BOSQUES MONTANOS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO  
GUAYLLABAMBA PARA MEJORAR LA GESTIÓN AMBIENTAL  
DEL ÁREA**

**Xavier Eduardo Buenaño Guerra**

Tesis de grado presentada como requisito para la  
obtención del título de Master en Gestión Ambiental

Quito, mayo del 2007

**Universidad San Francisco de Quito**

**Colegio de Postgrados**

**HOJA DE APROBACION DE TESIS**

**MODELAMIENTO DEL CAMBIO DE LA COBERTURA DE BOSQUES  
MONTANOS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUAYLLABAMBA PARA  
MEJORAR LA GESTIÓN AMBIENTAL DEL ÁREA**

**Xavier Eduardo Buenaño Guerra**

Stella de la Torre, Ph.D. ....  
Directora de Tesis

Richard Resl, Ph.D. Candidate .....  
Miembro del Comité de Tesis

Hugo Valdebenito, Ph.D. ....  
Decano del Colegio de Ciencias  
Biológicas y Ambientales

Andrea Encalada, Ph.D. ....  
Directora de Maestría en Gestión Ambiental y  
Miembro del Comité de Tesis

Víctor Viteri Breedy, Ph.D. ....  
Decano del Colegio de Postgrados

Quito, mayo de 2007

**© Derechos de autor  
Xavier Eduardo Buenaño Guerra  
2007**

## Resumen

La deforestación en el Ecuador es uno de los problemas ambientales de mayor importancia, por lo que debe ser analizada con profundidad y en su verdadero contexto. Una de las herramientas que pueden ayudar a entender de mejor manera el fenómeno constituye el análisis de cambio de uso de suelos. Sin embargo, el estudio debe apoyarse en el uso de la tecnología disponible y en forma específica en la aplicación de los sistemas de información geográfica, con sus potencialidades para el modelaje espacial prospectivo. Concretamente el presente estudio hace uso de uno de los modelos de cambio de uso de suelo más utilizado, denominado GEOMOD, para proveer de una herramienta de análisis para mejorar la gestión ambiental de la Cuenca Alta del Río Guayllabamba (CARG).

De acuerdo a las simulaciones realizadas en los períodos 1986-2001 y 2001-2010, el ecosistema con mayor área deforestada en la CARG es el Bosque de neblina montano con aproximadamente una pérdida del 30 % de la cobertura vegetal original, aunque el ecosistema Bosque siempreverde piemontano, en términos relativos a la superficie del área que ocupa es el que más alteración sufrirá con casi un 80 % de pérdida de la cobertura vegetal original de este ecosistema.

Una vez que se conocen las tendencias de cambio en relación al incremento de la tasa de deforestación proyectada hacia el año 2010, se realizó un primer esfuerzo para plantear 3 estrategias de conservación en la CARG: conservación de especies, manejo de áreas naturales actuales y propuestas y corredores de conservación tomando como base una clasificación de áreas en función de la dinámica de cambio clasificadas en tres categorías: zonas no alteradas, zonas en proceso de alteración y zonas alteradas. Este es un aporte importante pues la CARG no posee un Plan de Manejo y únicamente la Reserva Maquipucuna posee uno pero desactualizado.

Es conveniente advertir que la validación de los resultados desprendidos por GEOMOD en relación a la proyección espacial del cambio de la cobertura de bosques montanos es muy complicada, siendo este uno de los primeros esfuerzos en analizar e interpretar estos resultados en términos estadísticos.

Una conclusión fundamental es la dilucidación de la importancia de la determinación de las tendencias de cambio de las coberturas de bosques, en términos regionales, a fin de acercarse a la realidad y a proveernos de una herramienta de planificación a mediano y largo plazo.

## Abstract

Deforestation in Ecuador is one of the most environmental problems, which is why it ought to be analyzed in depth and in its true context. One of the tools that can help understand the phenomenon in a better way constitutes the analysis of land use changes. However, the investigation should be supported on the use of the available technology and specifically in the application of the geographic information systems (GIS), with their potentialities for the prospective spatial modelling. Concretely, the current investigation uses one of the most utilized models of land use change, called GEOMOD, to provide an analysis tool to improve the environmental management of the Upper Basin of the Guayllabamba River (CARG in Spanish).

According to the performed simulations in the periods 1986-2001 and 2001-2010, the ecosystem with greater deforested area in the CARG is the mountain cloud forest with approximately a loss of 30% of the original vegetation cover, even though the premountain evergreen forest ecosystem, in relative terms to the surface of the area that occupies is the one that will undergo the greater disturbance, almost 80% of original vegetation cover would be lost in this ecosystem.

Once we know the tendencies of change related to the increase of the deforestation rate projected to the year 2010, we propose three conservation strategies in the CARG: the conservation of species, present and proposal natural areas and biological corridors, based on the classification of the area into three categories of disturbance: undisturbed zones, zones in process of alteration and altered/disturbed zones. This is an important contribution because the CARG does not have a Management Plan and only the Maquipucuna Reserve has one that is not updated.

It is convenient to warn that the validation of the results produced by GEOMOD in relation to the spatial projection of the mountains forest cover change is very complicated, being this one of the first efforts to analyze and interpret these results in statistical terms.

A fundamental conclusion is the clarification of the importance in determining the tendencies of change of the forests coverage, in regional terms, in order to draw the reality and provide a tool for planning in medium and large scale.

## Tabla de contenido

Tabla de contenido	vi
Índice de tablas, figuras y mapas	vii
1. <u>Introducción</u>	1
2. <u>Marco Teórico</u>	10
3. <u>Metodología</u>	32
4. <u>Resultados</u>	46
5. <u>Discusión</u>	56
6. <u>Conclusiones y Recomendaciones</u>	63
<u>Bibliografía</u>	73
<b>Anexos</b>	
<u>Tablas, figuras, mapas y anexos</u>	77

## Índice de tablas, figuras y mapas

<u>Tabla 1.</u> Estimaciones de la deforestación en el Ecuador. Varios autores	77
<u>Tabla 2.-</u> Análisis multitemporal de la cobertura de bosque entre el año 1986 y el año 2001 en la zona de estudio	78
<u>Tabla 3.-</u> Análisis de los resultados de GEOMOD al año 2001, versus los datos de la interpretación de imagen satelital del año 2001	78
<u>Figura 1.</u> Organización de la información espacial en capas en un SIG.	79
<u>Figura 2.</u> Sistema de ayuda a la gestión integrando modelos y SIG.	80
<u>Figura 3.</u> Pasos a seguir en el manejo de ecosistemas.	81
<u>Figura 4.</u> Metodología de manejo de ecosistemas: La lógica tras el esquema de las cinco S	81
<u>Figura 5.</u> Porcentajes de los diferentes tipos de Ecosistemas de Bosques en la Cuenca Alta del Río Guayllabamba, Ecuador.	82
<u>Figura 6.</u> Ubicación general del proyecto en la CARG, Provincia de Pichincha, Ecuador.	83
<u>Figura 7.</u> Localidades y densidad poblacional.	84
<u>Figura 8.</u> Proceso metodológico general del proyecto para la aplicación de GEOMOD	85
<u>Figura 9.</u> Gráfico estadístico de análisis multitemporal 1986-2001.	85
<u>Figura 10.</u> Simulación y clasificación real al año 2001.	86
<u>Figura 11.</u> Gráficos estadísticos de la simulación al año 2010.	87
<u>Figura 12.</u> Simulación al año 2010.	88
<u>Figura 13.</u> Áreas en función de la dinámica de cambio.	89
<u>Figura 14.</u> Gráfico estadístico Tasas de Deforestación Anual (1986-2001).	90
<u>Figura 15.</u> Gráfico estadístico Tasas de Deforestación Anual (2001-2010).	90
<u>Figura 16.</u> Corredores propuestos.	91
<u>Anexo a.</u> Modelo de entrevista.	92

# INTRODUCCIÓN

## La Deforestación en Ecuador

La deforestación en el Ecuador es un fenómeno complejo de analizar debido a la multiplicidad de factores que lo explican. Entre ellos se pueden citar los asentamientos agrícolas (alrededor del 60% de la superficie talada cada año), en segundo lugar, la demanda de madera para uso generalizado de la población y en procesos industriales y en tercer lugar la falta de planificación en la ejecución de obras de infraestructura (petróleo, electricidad, caminos, etc.). La deforestación puede contribuir al crecimiento económico a corto plazo y al alivio de la pobreza, pero con frecuencia a costa de otros objetivos ambientales y sociales importantes que se deben valorar. Algunos de los costos ambientales afectan al país y otros a la comunidad internacional, por lo que deben ser considerados apropiadamente en la toma de decisiones actuales (Ministerio del Ambiente, 2003).

La tasa de deforestación es un indicador de la magnitud de la pérdida del capital natural forestal. Debido a que el Ecuador no dispone de estadísticas exactas sobre la tasa de deforestación, se deben desarrollar esfuerzos para precisarla y, de esta manera, definir políticas apropiadas que permitan combatir el proceso deforestador (Ministerio del Ambiente, 2003).

En el Ecuador, se han hecho algunas estimaciones de la deforestación en diferentes períodos de tiempo y por varios autores (Tabla 1). Lamentablemente

estas estimaciones no describen específicamente la zona del país, el tamaño del área analizada y el período de tiempo en el que se llevaron a cabo los estudios. Esta es una de las razones por las que actualmente existen varios métodos para el cálculo de la tasa de deforestación. Así por ejemplo la tasa de deforestación típica es calculada a partir del cociente entre la superficie deforestada anual y la superficie forestal en el tiempo inicial por 100 (Ministerio del Ambiente, 2003). Por otro lado, el cálculo de la tasa de deforestación estandarizada se realiza a partir de la siguiente fórmula (Puyravaud, 2003):

$$r = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \times \ln \frac{A_2}{A_1}$$

Donde  $A_1$ : superficie de bosque al inicio del período,  $A_2$ : superficie de bosque al final del período,  $t_1$ : año de inicio del período y  $t_2$ : año final del período.

### **Sistemas de Información Geográfica (SIG)**

Durante los años 1960 y 1970 surgieron nuevas tendencias en la forma de utilizar los mapas para la evaluación de recursos y la planificación del uso de la tierra. Dándose cuenta de que los diferentes aspectos de la superficie de la tierra no eran independientes entre sí, se empezó a reconocer la necesidad de evaluarlos de una forma integrada y multidisciplinaria. Una manera de hacerlo era simplemente superponer copias transparentes de mapas de recursos sobre mesas iluminadas y buscar los puntos de coincidencia en los distintos mapas de los diferentes datos descriptivos (FAO, 2000).

Posteriormente, esta técnica se adaptó a la emergente tecnología de la informática con el procedimiento de trazar mapas sencillos sobre una cuadrícula de papel ordinario, superponiendo los valores de esa cuadrícula y utilizando la sobreimpresión de los caracteres de la impresora por renglones para producir tonalidades de grises adecuadas a la representación de valores estadísticos, en lo que se conocía como sistema de cuadrícula (trama). Sin embargo, estos primeros métodos no estaban lo suficientemente perfeccionados como para ser aceptados por los cartógrafos (FAO, 2000).

A finales del decenio de 1970 la tecnología del uso de ordenadores progresó rápidamente en cartografía, y se perfeccionaron cientos de sistemas informáticos para distintas aplicaciones cartográficas. Al mismo tiempo, se estaba avanzando en una serie de sectores conexos, entre ellos la edafología, la topografía, la fotogrametría y la teledetección. En un principio, este rápido ritmo de desarrollo provocó una gran duplicación de esfuerzos en las distintas disciplinas conexas, pero a medida que se multiplicaban los sistemas y se adquiría experiencia, surgió la posibilidad de articular los distintos tipos de elaboración automatizada de datos espaciales, reuniéndolos en verdaderos sistemas de información geográfica para fines generales (FAO, 2000).

A principios del decenio de 1980, el SIG se había convertido en un sistema plenamente operativo, a medida que la tecnología de los ordenadores se perfeccionaba, se hacía menos costosa y gozaba de una mayor aceptación. Una vez que los sistemas de información geográfica se consolidaron, aparecieron aplicaciones específicas en diferentes áreas de la ciencia. Actualmente se están instalando rápidamente estos sistemas en los organismos públicos, los

laboratorios de investigación, las instituciones académicas, la industria privada y las instalaciones militares y públicas (FAO, 2000).

Los sistemas de información geográfica, por ser tan versátiles, tienen un campo de aplicación muy amplio, pudiendo utilizarse en la mayoría de las actividades con un componente espacial. La profunda revolución que han provocado las nuevas tecnologías ha incidido de manera decisiva en su permanente evolución (Microimages, 2006).

### **Definición y componentes**

Un Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS, en su acrónimo inglés) es un sistema integrado compuesto por hardware, software, personal, información espacial y procedimientos computarizados, que permite y facilita la recolección, el análisis, gestión o representación de datos espaciales (Telesig, 2006). El SIG funciona como una base de datos con información geográfica (datos alfanuméricos) que se encuentra asociada por un identificador común a los objetos gráficos de un mapa digital (USGS, 2004).

El Sistema de Información Geográfica separa la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente (Figura 1), permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, y facilitando al profesional la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología de los objetos, con el fin de generar otra nueva que no podríamos obtener de otra forma (FAO, 2004).

Los sistemas de información geográfica tienen tres componentes principales: los equipos junto con los programas informáticos, los recursos humanos y la

organización que hace que el sistema funcione (FAO, 2003). Además, se mencionan también dos componentes adicionales: los datos/información y las metodologías utilizadas.

Los principales componentes del programa del SIG están destinados a desempeñar las siguientes funciones:

- entrada de datos (digitalización e ingreso de los atributos utilizando un teclado);
- almacenamiento de datos y gestión de la base de datos;
- análisis y tratamiento de datos;
- interacción con el usuario (edición de gráficos/mapas); y
- salida y presentación de datos (representación gráfica).

En cuanto a los recursos humanos y organización, podemos afirmar que cuando se describe un SIG se tiende a pensar en términos de equipos y programas como el sistema completo, descuidando tal vez el elemento más importante: las personas que hacen funcionar eficazmente todo el sistema (FAO, 2003).

### **Gestión Ambiental y los SIG**

La Gestión Ambiental utiliza una serie de herramientas para facilitar su formulación y ejecución. Los sistemas de información geográfica son una de las herramientas más difundidas y de más fácil acceso (FAO, 2003). Sin embargo, hay que tener en cuenta que la gestión ambiental abarca muchos ámbitos de acción, por lo que los sistemas de información pretenden constituirse en un

instrumento para la mejor toma de decisiones por parte de todos los niveles de administración, obviamente fundamentado en una base sólida de información.

Aunque puede parecer que el SIG es la bola de cristal del planificador de recursos, es evidente que, en la realidad, es algo menos que eso. Como sucede con cualquier sistema de ordenadores, la información producida solo tiene el valor de los datos introducidos previamente. Una información incorrecta o insuficiente introducida en el SIG produciría respuestas incorrectas o insuficientes, por muy perfeccionada o adaptada al usuario que pueda ser la tecnología (FAO, 2003).

Actualmente, los SIG que manejan estructura raster (arreglos bidimensionales de filas y columnas) son muy utilizados en estudios medioambientales donde la precisión espacial no es muy requerida (contaminación atmosférica, distribución de temperaturas, localización de especies marinas, análisis geológicos, etc.) (USDA, 2005).

Bosque (1997) indica que las funciones analíticas convierten a un SIG en una “máquina de simulación”, en la cual los planificadores territoriales pueden obtener una impresión de cuál puede ser el resultado en el territorio de sus decisiones, o bien pueden plantear diferentes escenarios virtuales para evaluar la implementación de políticas o medidas de planificación. En el SIG también es factible establecer funciones de selección de áreas óptimas para diversos aspectos, tan disímiles como localizaciones para instalaciones urbanas (Turkstra, 1991), o bien lugares para localización de vertederos de residuos peligrosos (Bosque *et al.*, 1999). La Figura 2, presenta un sistema conceptual de ayuda a la gestión del territorio integrando modelos y SIG.

Una de las aplicaciones medioambientales más importantes de los SIG constituye el análisis de cambios (Chuvienco, 2003). El análisis de cambios se puede realizar en relación con cualquier aspecto biofísico, detectable directa o indirectamente, a partir de la aplicación de tecnologías de información geográfica. La magnitud de los cambios puede ser valorada en relación con la cantidad, el tiempo y el lugar de los mismos. Así también, se debe realizar una separación entre cambios naturales y cambios inducidos por el hombre que determinan los impactos sobre el ecosistema, y que son valorados a través de significancia ecológica y retroalimentación climática y/o ecológica (Lambin, 2006).

### **Objetivos**

La Cuenca Alta del Río Guayllabamba es una zona de importancia para la conservación de especies animales y vegetales que forman parte del ecosistema del bosque nublado montano y del bosque siempreverde montano bajo, principalmente (Sierra, 1999). El objetivo general de la presente investigación es realizar la proyección de la dinámica del cambio de las coberturas de bosques montanos, a partir del modelo GEOMOD, fundamentado en el método de Cadenas de Markov (Clark Labs, 2004), en la Cuenca Alta del Río Guayllabamba, como herramienta para eventualmente mejorar la gestión ambiental del área. Se escogió esta área debido a la disponibilidad de información generada por parte de otros estudios anteriormente ejecutados. Es importante mencionar que la proyección se basa en la distribución espacial de la cobertura de bosque montano.

El presente estudio se focaliza en el análisis del cambio de la cobertura vegetal en la mencionada cuenca, a partir de información generada por interpretación de imágenes satelitales. Actualmente, encontramos en el SIG raster IDRISI algunos módulos especialmente diseñados para la evaluación multicriterio, como GEOMOD. Los datos que se utilizaron fueron imágenes satelitales LANDSAT de los años 1986 y 2001 para determinar la distribución de la cobertura de bosque, e información cartográfica básica y temática para ingresarla en el modelo GEOMOD. Por otro lado, es importante mencionar que se realizaron dos simulaciones: la primera para el período comprendido entre los años 1986 – 2001; y, la segunda para el período 2001 – 2010. La primera simulación pudo ser comparada y evaluada con datos reales obtenidos a partir de la interpretación de imágenes satelitales Landsat de los años 1986 y 2001.

Los objetivos específicos del estudio son: (1) la validación estadística de los resultados obtenidos a partir de la aplicación del modelo GEOMOD mediante una comparación con datos reales obtenidos a partir de la interpretación de imágenes satelitales en un análisis multitemporal; (2) la elaboración de una propuesta preliminar de conservación (estrategias) en función de la clasificación de zonas del área de estudio tomando en cuenta la dinámica de cambio de uso de suelo que poseen, que incluye una propuesta inicial de corredores de conservación; y (3) la definición de ecosistemas vulnerables mediante la determinación de tasas de deforestación.

No se debe perder de vista los análisis complementarios que fueron realizados con los resultados obtenidos como el cálculo de las tasas de deforestación en los períodos de tiempo analizados en el estudio y la exploración general de la

realidad socio ambiental que desencadena la fragmentación de los ecosistemas de la zona.

La validación y apropiación de los resultados del estudio por parte de los actores de la zona constituye un tema fundamental en el proceso de gestión ambiental. Actualmente, existen grandes dificultades para que las comunidades adopten la visión de conservación, cuando la realidad socio-ambiental a la que enfrentan es bastante crítica, por lo que esta investigación pretende ser un insumo para mejorar la actual situación, en el sentido de que provee a los tomadores de decisiones, especialmente políticos, una herramienta para poder concienciar a la comunidad sobre las acciones de presión que ejercen sobre el ecosistema, y de forma paralela brindar nuevas opciones de desarrollo, tomando en cuenta adicionalmente que el Bosque Protector Cuenca Alta del Río Guayllabamba (CARG) no posee un Plan de Manejo y el Bosque Privado Maquipucuna posee uno pero desactualizado (Maquipucuna, 1992).

# MARCO TEÓRICO

## Los Sistemas de Información Geográfica y los Modelos

### Modelos de datos

Los sistemas de información geográfica realizan la representación gráfica de un mapa de dos formas: modelo raster y modelo vectorial (Chuvieco, 2003). El modelo raster se fundamenta en la representación de objetos espaciales en un arreglo bidimensional de filas y columnas, divididas en celdas regulares (generalmente en cuadrícula pero no necesariamente), en las que cada una de ellas presenta un atributo o valor (altitud, reflectancia, etc.).

En el caso del modelo de SIG vectorial, el interés de las representaciones se centra en la precisión de localización de los elementos sobre el espacio y la facilidad de modelación de redes topológicas (ríos, tuberías, carreteras, etc.). Para modelar digitalmente las entidades del mundo real se utilizan tres objetos espaciales: el punto, la línea y el polígono (Chuvieco, 2003).

### Funciones básicas

Primordialmente, el SIG permite obtener una gran cantidad de información de distinto tipo, tratarla para convertirla en conjuntos de datos compatibles, combinarla y exponer los resultados sobre un mapa. Algunas de las operaciones estándar del SIG son: (Bosque, 2002)

- integración de mapas trazados a escalas diferentes, o con proyecciones o leyendas distintas;

- cambios de escala, proyecciones, leyenda, inscripciones en los mapas.
- superposición de distintos tipos de mapas de una determinada zona para formar un nuevo mapa en el que se incluyen los datos descriptivos de cada uno de los mapas.
- creación de zonas intermedias o próximas en torno a las líneas o polígonos de un mapa.
- preguntas de carácter espacial e informativo a través de bases de datos.

### **Funciones avanzadas**

Los sistemas de información geográfica disponen de funciones avanzadas, entre las más importantes encontramos (Bosque, 2002):

- Análisis paisajístico.
- Análisis de redes.
- Análisis multitemporal.
- Clasificación digital de imágenes satelitales: supervisada y no supervisada.
- Análisis tridimensional: cuencas hidrográficas, visibilidad, análisis de cortes y rellenos de superficies.
- Filtros espaciales.
- Generación de modelos a partir de fenómenos o actuaciones simuladas.

Entre las funciones avanzadas mencionadas, en el presente capítulo se profundizarán los temas concernientes al análisis multitemporal y la generación de modelos.

## **Análisis Multitemporal**

Una de las aportaciones más destacadas de la teledetección espacial al estudio del ambiente es su capacidad para seguir procesos dinámicos. Al tratarse de información adquirida por un sensor situado en una órbita estable y repetitiva, las imágenes de satélite constituyen una fuente valiosísima para estudiar los cambios que se producen en la superficie terrestre, ya sean debidos al ciclo estacional de las cubiertas y a catástrofes naturales o a alteraciones de origen humano (Chuvienco, 2001).

De forma específica, el análisis multianual, tiene por objetivo detectar los cambios producidos entre dos o más fechas, para lo que suele partirse de imágenes adquiridas en distintos años, que se comparan visual o digitalmente (Gopal y Woodcock, 1996; Lucas *et al.*, 1993; Sader y Winne, 1992).

Los estudios de detección de cambios pueden aplicarse a una gran variedad de disciplinas (Mouat *et al.*, 1993). Tienen por objeto analizar qué rasgos presentes en un determinado territorio se han modificado entre dos o más fechas. Como en otras fases de la interpretación de imágenes, la localización de esos cambios suele implicar un compromiso entre los errores de omisión y de comisión, esto es desechar un cambio que realmente existe, o detectar un cambio que no ha ocurrido, respectivamente (Bosque, 2002).

La detección de cambios a partir de técnicas de clasificación puede abordarse empleando dos grupos de técnicas:

- 1) Comparar imágenes previamente clasificadas; y,
- 2) Clasificar conjuntamente las imágenes de las dos fechas.

En el primer caso se aborda una clasificación para cada imagen por separado, cuidando de emplear la misma leyenda temática, y si es posible la misma resolución espacial, así como similares características espectrales en las imágenes satelitales, de las dos fechas, con objeto de que puedan compararse posteriormente. A continuación se genera una tabla multitemporal de cambios, en donde se presentan las transiciones que se producen entre las dos fechas. En la diagonal de esta tabla aparecen los píxeles estables (que cuentan con la misma categoría en las dos fechas), mientras los cambios se detectan en el resto de las celdillas. El gran interés de esta tabla es ofrecernos las transiciones que se han producido. En otras palabras, no solo observamos las zonas estables y dinámicas, sino también cuál era la cobertura original y cuál la actual, lo que nos indica las tendencias del cambio en la zona de estudio (Bosque, 2002).

En el segundo caso se considera la asignación conjunta de las dos fechas. En este caso la clasificación resultante estará formada por categorías multitemporales, definidas por su estabilidad o por su cambio entre las dos imágenes que se consideren, como por ejemplo: transición de zonas rurales a urbanas, cambios de agricultura de secano a regadío o urbano estable.

## **Generación de Modelos**

### **Definición**

Un modelo es una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades (Joly, 1988).

## **Utilidad y propósito de los modelos**

La utilidad de los modelos está condicionada por (Mitasova, 1998):

- Una buena selección de los factores relevantes.
- Una buena descripción de sus relaciones funcionales.
- Sometimiento de los resultados a verificación experimental.

Debido a que el modelo representa la realidad con una menor cantidad de información, va a existir un error inherente a este hecho, que podrá ser reducido, pero nunca eliminado. Por lo tanto, debe buscarse una armonía entre la complejidad del modelo y el error aceptable para el resultado (Mitasova, 1998).

Los principales propósitos u objetivos que deben cumplir los modelos son: el análisis y entendimiento de los fenómenos observados, la evaluación de hipótesis y teorías, la predicción del comportamiento de sistemas espacio-temporales bajo varias condiciones y escenarios para fundamentar la toma de decisiones, la consecución de nuevos descubrimientos de funcionamiento de fenómenos geoespaciales activos, entre otros (Mitasova, 1998).

## **Clasificación**

Los modelos se construyen basándose en una relación de correspondencia con la realidad, según sus variantes, se pueden clasificar en tres tipos (Turner, 1970):

*Modelos icónicos:* La relación de correspondencia se da a través de las propiedades morfológicas. Por ejemplo: una maqueta a escala.

*Modelos análogos:* Poseen algunas propiedades similares a los objetos que representan, pero no son réplicas morfológicas, que resultan en un objeto distinto al original. Por ejemplo: la cartografía atendiendo a una serie de convenciones.

*Modelos simbólicos:* Poseen un nivel mayor de abstracción. El objeto real queda representado por una simbolización matemática o geométrica. Un ejemplo de este modelo es la representación de un edificio mediante la identificación y codificación en una estructura geométrica de sus elementos básicos.

Adicionalmente podemos tener otro tipo de clasificaciones, así tenemos: modelos basados en el área de aplicación, en el tipo de distribución espacial, en la naturaleza de las interacciones espaciales, en el tipo de causa física o proceso social, en la extensión espacial del fenómeno modelado (Mitasova, 1998).

### **Proceso de modelaje y simulación**

Constituye el conjunto de conceptos teóricos y métodos computacionales que describen, representan y simulan los procesos funcionales del mundo real (NGCLA, 1998). Las simulaciones por computador han llegado a ser la tercera manera de desarrollo de investigación, expandiéndose además a la tradicional experimentación y a los logros teóricos.

## **Roles de los SIG**

Los principales roles de los Sistemas de Información Geográfica frente a la generación de modelos, son los siguientes:

- Almacenamiento y administración de datos de entrada y resultados.
- Pre-procesamiento de datos de entrada (edición, transformación, interpolación, derivación de parámetros, etc.).
- Análisis y visualización de resultados.
- Provisión del ambiente computacional y herramientas para simulaciones.

Actualmente, uno de los tipos de modelos que están en constante desarrollo son los modelos estocásticos (NGCLA, 1998).

## **Modelos estocásticos**

Los modelos estocásticos, tienen las siguientes características (Molchanov y Woyczynski, 1997):

- Modelan el comportamiento espacio-temporal de un fenómeno con componentes randómicos.
- Una única entrada origina diferentes salidas para cada corrida del modelo, debido al componente randómico del proceso modelado, simulaciones simples dan solo un posible resultado.
- Múltiples corridas son usadas para estimar probabilidades de distribución.

- Simulaciones condicionales combinan modelamiento estocástico y geoestadística para mejorar la caracterización espacial del fenómeno.
- El comportamiento de sistemas estocásticos dinámicos puede ser descrito por diferentes procesos estocásticos, como Poisson y procesos de Markov continuos y discretos en el tiempo (Nelson 1995, Molchanov y Woyczynski 1997).

### **Cadenas de Markov**

Las cadenas de Markov, constituyen el fundamento matemático para el desarrollo de GEOMOD (ClarkLabs, 2004).

Las cadenas de Markov se utilizan para estudiar las propiedades de un sistema que evoluciona de forma aleatoria. Constituyen, por lo tanto, un ejemplo relativamente sencillo de proceso estocástico (Berrendero, 2001).

Supongamos que un sistema, en cada etapa (día, año o período de tiempo en general) se encuentra en uno de los  $k$  posibles estados del conjunto  $S = \{1, 2, \dots, k\}$ . Sea  $X_n$  la variable aleatoria que representa el estado del sistema en la etapa  $n$ . Se dice que  $X_n$  es una cadena de Markov si (Berrendero, 2001):

$$P\{X_{n+1} = i | X_n = j, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_0 = i_0\} = P\{X_{n+1} = j | X_n = i\} \equiv p_{ij}.$$

Es decir, el estado del sistema en el futuro (etapa  $n+1$ ) depende únicamente de su estado presente (etapa  $n$ ), independientemente de la evolución en el pasado que ha conducido a este estado presente. Las probabilidades  $p_{ij}$  se suelen llamar probabilidades de transición, y resulta útil disponerlas en forma de matriz:

$$T = \begin{pmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{k1} & \cdots & p_{kk} \end{pmatrix}$$

Las columnas de la matriz  $T$  deben sumar uno, ya que el sistema, a partir de un estado cualquiera  $j$  pertenece a  $S$ , evoluciona con probabilidad uno a alguno de los estados del conjunto  $S$ .

Si cuando el sistema llega a un estado ya no lo abandona nunca, se dice que el estado es absorbente. Si  $i$  es un estado absorbente, entonces  $p_{ii} = 1$  y, en la matriz  $T$ , la columna  $i$  está formada por ceros en todos los lugares salvo un uno en la fila  $i$  (Berrendero, 2001).

Por otro lado, se dice que una cadena de Markov con matriz de probabilidades de transición  $T$  es regular si todos los elementos de la matriz  $T_n$  son estrictamente positivos para algún valor de  $n$ . Es decir, una cadena de Markov es regular si existe un número de etapas  $n$  tal que la probabilidad de la transición en  $n$  etapas entre cualquier par de estados es estrictamente positiva. Por tal motivo, es posible estudiar el comportamiento de un evento a largo plazo.

Para la determinación específica de la variación espacial de una cobertura vegetal se añade el elemento de continuidad espacial, más conocido como semejanza de distribución espacial de transiciones fundamentado en cadenas de Markov (ClarkLabs, 2004), es decir se usa la aleatoriedad para la determinación de la transición de una categoría a otra en el espacio.

## **Modelos y Realidad**

**La calibración:** El rol de los parámetros y sus límites es evaluado por parámetros de búsqueda (Clarke 1996 en Goodchild *et al.* 1997). Los resultados del modelo son comparados con experimentos y parámetros que son colocados a valores que aseguran la mejor reproducción de los datos experimentales.

**Análisis de sensibilidad, propagación de error e incertidumbre:** Es desarrollado para estimar el impacto de errores de los datos de entrada en los resultados del modelo.

**Causas de inconsistencia entre modelos y realidad:** Existen algunas causas para que exista inconsistencia entre modelos y realidad, entre ellas, podemos citar al limitado número de procesos interactivos que pueden ser tratados, a los procesos que pueden no ser bien entendidos o tratados inadecuadamente, a resolución y/o escala inadecuada, a que la solución numérica puede ser demasiado sensible a condiciones iniciales, a que pueden ser incorrectamente aplicados a condiciones cuando estas aseveraciones no son válidas, y a errores en datos de entrada (Berrendero, 2001).

**Comprobación o Validación de datos en campo:** La verificación de resultados permite al usuario valorar su grado de acuerdo con la realidad. Este proceso de verificación siempre requiere que comparemos nuestros resultados con una fuente externa al proceso de generación de resultados (Chuvieco, 2003). En el caso del presente estudio la verificación en campo sirve para tener únicamente

una idea general de la calidad de interpretación de las imágenes satelitales realizada, debido al desfase de tiempo entre la actualidad y las fechas de toma (ver Metodología).

Para el caso de la validación de los resultados desprendidos por la aplicación del modelo GEOMOD hacia el futuro, se utiliza el índice Kappa, el mismo que es calculado a partir de la comparación entre datos interpretados y datos obtenidos de otra fuente de información en un tiempo conocido anterior a la actualidad (Chuvieco, 2003).

### **Índice Kappa (K)**

Como habíamos mencionado es un valor estadístico, el mismo que puede aplicarse para medir el grado de cambio entre dos fechas, a partir de calcular su grado de asociación (ClarkLabs, 2004). Específicamente, permite calcular el grado de acuerdo entre filas y columnas de una matriz cuadrada, y en el contexto de verificación de imágenes medir el grado de cambio entre las dos fechas: cuanto más alto sea el valor, indicará una mayor estabilidad (ClarkLabs, 2004).

Adicionalmente, el índice Kappa mide la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad observado y el que cabría esperar simplemente por azar. En definitiva, intenta delimitar el grado de ajuste debido sólo a la exactitud de la clasificación, prescindiendo del causado por factores aleatorios. La estimación de K se obtiene a partir de la siguiente fórmula (Hudson y Ramn, 1987):

$$\hat{k} = \frac{n \sum_{i=1, n} X_{ii} - \sum_{i=1, n} X_{i+} X_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1, n} X_{i+} X_{+i}}$$

En donde  $n$  sería el tamaño de la muestra,  $X_{ij}$  el acuerdo observado, y el producto de los marginales  $(X_{i+}, X_{+i})$  el acuerdo esperado en cada categoría  $i$ . El acuerdo observado aparece en la diagonal de la matriz, mientras el esperado nos sirve para calcular el ajuste entre mapa y realidad que puede deberse al azar. El estadístico  $K$  nos permite conocer si el grado de acuerdo observado se aleja o no significativamente del esperado al azar. En definitiva, este índice pretende evaluar si la clasificación ha discriminado las categorías de interés con exactitud significativamente mayor a la que se hubiera obtenido con una asignación aleatoria (Chuvienco, 2003).

Una de las aplicaciones más claras del índice  $K$  es comparar clasificaciones realizadas por distintos métodos, con objeto de estudiar si difieren significativamente en cuanto su grado de ajuste con la realidad (Fitzegarld y Lees, 1994). Para ello puede utilizarse la distribución normal para estimar intervalos de confianza (Skidmore, 1989):

$$z = \frac{|\hat{\kappa}_1 - \hat{\kappa}_2|}{\sqrt{\sigma_{\kappa 1}^2 + \sigma_{\kappa 2}^2}}$$

El valor de  $K$  puede variar entre 0 y 1, si es que por ejemplo tenemos valores de 0.53 y 0.70, lo que indica es que las clasificaciones o en el caso de esta investigación la simulación es un 53 o un 70 % mejor de lo esperable al azar, respectivamente. Un valor de  $K$  igual a 1 indica un acuerdo pleno entre la realidad y el mapa, mientras un valor cercano a 0 sugiere que el acuerdo observado es puramente debido al azar (Chuvienco, 2002).

El cálculo de la varianza de  $K$  puede realizarse a partir de la siguiente fórmula (Congalton y Green, 1999):

$$\sigma_K^2 = \left( \frac{1}{n} \right) \left\{ \frac{\theta_1(1-\theta_1)}{(1-\theta_2)^2} + \frac{2(1-\theta_1)(2\theta_1\theta_2 - \theta_3)}{(1-\theta_2)^3} + \frac{(1-\theta_1)^2(\theta_4 - 4\theta_2^2)}{(1-\theta_2)^4} \right\}$$

donde  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  y  $\theta_4$  se calculan de la forma siguiente:

$$\theta_1 = \left( \frac{1}{n} \right) \sum_{i=1, n} X_{ii}$$

$$\theta_2 = \left( \frac{1}{n^2} \right) \sum_{i=1, n} X_{i+} X_{+i}$$

$$\theta_3 = \left( \frac{1}{n^2} \right) \sum_{i=1, n} X_{ii} (X_{i+} + X_{+i})$$

$$\theta_4 = \left( \frac{1}{n^3} \right) \sum_{i=1, n} \sum_{j=1, n} X_{ij} (X_{i+} + X_{+j})^2$$

En el caso específico del presente estudio, lo que se hizo fue realizar una comparación entre: 1) el resultado desprendido por la simulación mediante la aplicación del modelo GEOMOD para el período 1986 – 2001 (primera); y, 2) la clasificación de cobertura vegetal obtenida mediante la interpretación de la imagen satelital del año 2001 (fin del período de tiempo 1986 a 2001). El índice Kappa se obtuvo mediante la determinación del grado de acuerdo o coincidencia entre estos dos temas.

## **Modelos de cambio de uso de suelo:**

Existen algunos modelos de cambio de uso de suelo. En esta investigación nos centraremos en uno de los más desarrollados y validados, éste es GEOMOD.

### **GEOMOD (ClarkLabs, 2003)**

GEOMOD es un modelo de simulación de cambio de uso de suelo que predice la transición de un estado de uso de suelo a otro, se fundamenta en la ubicación de las celdas de un raster que cambian sobre el tiempo de un estado a otro mediante la utilización de Cadenas de Markov. GEOMOD simula el cambio entre exactamente dos categorías, estado 1 y estado 2. Por ejemplo, GEOMOD puede ser usado para predecir áreas probables de cambio de bosque (estado 1) a no bosque (estado 2) sobre un tiempo dado. La simulación puede ocurrir atrás o adelante en el tiempo (ClarkLabs, 2003).

La simulación está basada en:

- Especificación del tiempo inicial, tiempo final e intervalo de tiempo para la simulación.
- Una imagen mostrando la ubicación de los estados de uso de suelo 1 y 2 al tiempo inicial.
- Una imagen opcional de máscara, distinguiendo entre áreas dentro y fuera de la zona de estudio.

- Una imagen opcional de estratificación que muestra el área de estudio dividida en regiones, en donde cada región es un estrato.
- Una decisión que presione el cambio simulado al límite entre el estado 1 y 2.
- Un mapa de adecuación o conveniencia para la transición al uso de suelo del estado 2.
- La cantidad anticipada de usos de suelo en el estado 1 y 2 al final del tiempo.

Una opción adicional permite la creación de una imagen de impactos ambientales para cada intervalo de tiempo de la simulación de cambio de uso de suelo. GEOMOD puede también generar un mapa de impactos acumulativos para la duración completa de la simulación. Estos mapas de impacto muestran la magnitud de cambio de un recurso natural a las ubicaciones de cambio de uso de suelo simulados. Por ejemplo, estos mapas podrían mostrar emisiones de carbono que resultan de la conversión de bosque a no-bosque (Pontius, 2006). En el caso del presente estudio lamentablemente no se pudo utilizar esta opción debido a la falta de datos, en especial a lo que tiene relación con datos específicos de la biomasa existente en la zona de estudio, lo que hubiese sido muy interesante para enriquecer el presente estudio.

La principal salida de GEMOD es una imagen binaria (byte) que muestra los usos de suelo: estado 1 y 2 simulados al final del tiempo designado por el usuario. Las imágenes de uso de suelo para tiempos intermedios pueden también ser generadas. El nivel de resolución espacial de las imágenes satelitales utilizadas

para la clasificación en las dos categorías mencionadas define el grado de discriminación entre las mismas. Así por ejemplo, si se utilizan imágenes satelitales de alta resolución, inclusive se podría detectar una tala selectiva. En el caso del presente estudio, debido a que se utilizan imágenes satelitales LANDSAT de resolución espacial de 30 metros, la categoría no bosque prácticamente representa claros totales o con un porcentaje de cobertura mínimo (aproximadamente 10 %).

Por otra parte, una vez obtenidos los resultados del modelo, se puede proceder a realizar comparaciones o cruzamientos con otros mapas temáticos, como el mapa de distribución de asentamientos humanos y densidad poblacional, como en el caso del presente estudio.

## **VALIDACIÓN DE GEOMOD**

### **VALIDATE**

Esta función que no se encuentra dentro del módulo GEOMOD, es otro módulo del programa IDRISI y provee un método para medir el acuerdo entre dos imágenes categóricas (enteros o byte), un mapa de comparación y un mapa de referencia. Cada imagen puede contener hasta 32000 categorías (ClarkLabs, 2003).

El mapa de comparación, usualmente será el resultado de una simulación o modelo de clasificación cuya validación está siendo evaluada en contra de un mapa de referencia que describe la realidad.

El módulo VALIDATE ofrece un análisis estadístico comprensivo, que responde simultáneamente dos importantes preguntas:

- 1) ¿Cuán bueno es el acuerdo de un par de mapas, en términos de la **cantidad** de celdas en cada categoría. ?
- 2) ¿Cuán bueno es el acuerdo de un par de mapas, en términos de la **ubicación** de celdas en cada categoría. ?

VALIDATE calcula varios índices Kappa de Acuerdo y relaciona estadísticas para responder las anteriores preguntas.

Las estadísticas indican cuán bueno es el acuerdo entre el mapa de comparación y el mapa de referencia. El análisis separado de acuerdo y desacuerdo entre las dos imágenes, se integra por los siguientes componentes (ClarkLabs, 2003):

- Acuerdo debido al cambio.
- Acuerdo debido a la cantidad.
- Acuerdo debido a la ubicación del nivel de estratificación.
- Acuerdo debido a la ubicación del nivel de la celda del raster.
- Desacuerdo debido a la ubicación del nivel de la celda del raster.
- Desacuerdo debido a la ubicación del nivel de estratificación.
- Desacuerdo debido a la cantidad.

El valor de cada uno de los items anteriores, es arrojado a través de la aplicación del módulo VALIDATE (ClarkLabs, 2003). El fundamento matemático para la

obtención de cada uno de los componentes mencionados no será tratado en esta investigación.

### **Enfoque Ecosistémico de la Simulación del cambio de la cobertura de los bosques montanos**

La problemática de la deforestación de los bosques montanos puede ser tratada utilizando el enfoque ecosistémico en el que tenemos una multiplicidad de sistemas debido a que la realidad ambiental es compleja y cambiante. Su complejidad se debe tanto a los elementos que intervienen en ella (complejidad estructural) como a las interacciones que se establecen entre ellos, de forma interna o externa (complejidad funcional). Su cambio es una manifestación dinámica (evolutiva) resultante de las variaciones que afectan a su estructura y su funcionamiento. Al conjunto de elementos interactuantes entre sí y con el entorno que les rodea lo denominamos sistema. La realidad ambiental (el ambiente, la Naturaleza) es, por tanto, un sistema. Los problemas ambientales, en consecuencia, son problemas sistémicos cuya solución no afecta únicamente a la más evidente de las causas sino a otras que pueden pasar desapercibidas y que, sin embargo, están relacionadas con ellos (Herrerros, 1999).

Un elemento central en el proceso de manejo de ecosistemas es el de identificar claramente el objetivo de manejo. Para ello, es de suma importancia incorporar a los diferentes sectores sociales en el proceso de identificación de objetivos, en un ejercicio participativo. No sólo aquellos que participan directamente en el programa de manejo, sino también aquellos que tienen injerencia o que se ven

afectados indirectamente por el proceso (INE, 2001). En la Figura 3, podemos apreciar los principales pasos en el manejo de ecosistemas.

### **Esquema de las 5 S para la conservación de sitios**

El nombre “Esquema Cinco S” proviene de los cinco elementos del mismo, los cuales comienzan con la letra s en inglés: *systems* (sistemas), *stresses* (presiones), *sources* (fuentes), *strategies* (estrategias), y *success* (éxito) (TNC, 2000).

**Sistemas:** son los objetos de conservación que se encuentran en el sitio y los procesos naturales que los mantienen, en los cuales se enfocará la planificación para el sitio.

**Presiones:** son los tipos de degradación o destrucción que afectan a los objetos de conservación o procesos ecológicos en el sitio.

**Fuentes:** son los agentes que generan las presiones o amenazas.

**Estrategias:** son los tipos de actividades de conservación empleadas para mitigar las fuentes de presión (mitigación de amenazas) y las presiones persistentes (restauración).

**Éxito:** son las medidas de salud de la biodiversidad y mitigación de amenazas en un sitio.

La definición de los objetos de conservación (*sistemas*) y amenazas críticas (*presiones y fuentes de presión*) son dos de los pasos de la planificación, son el fundamento vital para desarrollar estrategias sólidas y para medir el éxito de las estrategias de conservación. En la Figura 4 se puede apreciar cómo se encuentran relacionados los componentes del esquema de las cinco S. La presente investigación identificará o estimará parcialmente estos elementos, ya que delinearé estrategias de conservación generales definidas con base en la clasificación de áreas por su dinámica de cambio. Los objetos de conservación constituirán los bosques montanos y las amenazas serán identificadas a priori en la investigación socio ambiental.

### **Los bosques montanos en el Ecuador**

En la presente investigación existen varios ecosistemas involucrados, entre ellos están el bosque siempreverde piemontano, el bosque siempreverde montano bajo, el bosque de neblina montano y el bosque siempreverde montano alto (Sierra, 1999).

### **Estado de conservación de los bosques montanos y piemontanos:**

La región andina del Ecuador mantiene una flora única y rica en especies que crece mayormente en lugares escarpados y poco accesibles (Sierra, 1999), por esta razón su estado de conservación es relativamente bueno, pero no hay estudios a escalas más detalladas que confirmen estas aseveraciones. Se estima que entre los 900 metros y los 3.000 metros de altitud (10 % del territorio del país)

crece cerca de la mitad de las especies de plantas ecuatorianas (Balslev, 1988). Según los registros depositados en los principales herbarios del mundo, al menos 4.688 especies de plantas vasculares con semilla, de las cuales 1.566 son arbustos y árboles, crecen sobre los 2.400 m.s.n.m. (Jorgensen y Ulloa, 1994), en esta franja altitudinal se encuentran los ecosistemas de bosques montanos, esta es una de las razones por las que la trascendencia científica de la presente investigación es indudable, ya que mediante ella se podrá profundizar en el estudio del fenómeno de cambio de la cobertura vegetal y por consiguiente validar si la información desprendida por el sistema de información geográfica es confiable y permite el uso de la misma en futuros estudios.

Por otro lado, la región Costa del Ecuador está definida bajo los 1300 m.s.n.m. en las estribaciones occidentales de los Andes y el Océano Pacífico, incluyendo las cordilleras costeras y las tierras bajas. La Costa se subdivide en las subregiones norte, centro y sur, las que a su vez están compuestas por varios sectores según sean ambientes de cordillera o de tierras bajas. Excepto en el norte, que ha experimentado cambios promedio, varios siglos de actividades humanas han reducido la vegetación natural de la región a pequeños remanentes aislados. Su transformación ha sido especialmente rápida en las últimas cinco décadas. Entre los finales de los años setenta y mediados de los ochenta, el área usada para agricultura se duplicó (Whitaker y Alzadora, 1990). Su transformación está íntimamente relacionada con la necesidad de acomodar una población que crece con rapidez y de ajustarse a las crecientes demandas nacionales e internacionales de productos agrícolas (Bromley, 1981; Devaluad, 1980;

PMRC/FPVM, 1989; Sierra, 1996; Sierra y Stalings, 1998). Dentro de esta región se encuentra el ecosistema bosque siempreverde piemontano (Sierra, 1999) que forma parte de la CARG (Ver Área de Estudio).

Esta investigación es evidentemente importante tanto en términos de conservación como en relevancia social, puesto que mediante el conocimiento del fenómeno de cambio de la cobertura de los bosques montanos, se podrán brindar estrategias de conservación debidamente fundamentadas para el desarrollo de la zona y que sean compatibles con su alta biodiversidad. Los resultados del estudio servirán también para trazar áreas que deben ser consideradas como prioritarias para la conservación y para evitar la fragmentación de ecosistemas.

El estudio servirá adicionalmente como una base para realizar investigaciones más profundas relacionadas con la sostenibilidad ecológica de la zona (ClarkLabs, 2007), ya que se podrá contar con un conocimiento más profundo de las zonas y/o ecosistemas más vulnerables dentro del área de estudio y de esta manera se podrá focalizar las acciones a estas zonas y a las comunidades que se encuentren dentro del área de influencia de las mismas.

## METODOLOGÍA

### Área de Estudio

El área de estudio constituye la cuenca alta del Río Guayllabamba. Específicamente se analizó el área comprendida por el Bosque Protector CARG (Cuenca Alta del Río Guayllabamba), creado el 16 de junio de 1989, mediante Registro Oficial 213, y el Bosque Protector Maquipucuna, creado al 20 de febrero de 1989, mediante Registro Oficial 132 y sus zonas de influencia. En la parte sur del área de estudio, tenemos una porción del Bosque Protector Mindo y Cordillera de Nambillo, creado el 25 de abril de 1988. El área total del estudio es de aproximadamente 36.730 Hectáreas y el rango altitudinal oscila entre los 1.100 y los 3.380 m.s.n.m (Buenaño, 2007). Debido a que existe una gran variación altitudinal, podemos encontrar las siguientes formaciones vegetales: 1. bosque siempreverde piemontano (300 a 1.300 m.s.n.m.), 2. bosque siempreverde montano bajo (1.300 a 1.800 m.s.n.m.), 3. bosque de neblina montano (1.800 a 3.000 m.s.n.m.) y 4. bosque siempreverde montano alto (3.000 a 3.400 m.s.n.m.) (Sierra, 1999). Es importante recalcar que el bosque siempreverde piemontano cubre apenas un 2.8 % del área de estudio, y el bosque siempreverde montano alto un 3.7 %, mientras que la mayor parte del área de estudio está cubierta por bosque siempreverde montano bajo (19.6 %) y por bosque de neblina montano (73.9 %) (Figura 5).

**Bosque siempreverde piemontano:** es una formación caracterizada por una gran dominancia de especies arbóreas, en especial del grupo de las palmas junto a Mimosaceae, Fabaceae, Burseraceae y Meliaceae. El dosel puede alcanzar 30 o más metros de altura. Los fustes de los árboles están cubiertos por orquídeas,

bromelias, helechos y aráceas, va desde los 300 m hasta los 1300 m sobre el nivel del mar. El estrato herbáceo es denso, en especial con especies de las familias Marantaceae y Araceae y por Polypodiopsida. En 0,1 ha se encontraron más de 80 especies de 2,5 cm. o más de DAP (Cerón, 1995). Este tipo de bosque se ubica en la provincia de Esmeraldas y al pie de la cordillera occidental en las provincias de Carchi, Imbabura y Pichincha (Sierra, 1999). Entre la flora característica de este ecosistema están: Palmas: *Wettinia quinaria*, *Pholidostachys dactyloides*, *Iriartea deltoidea* (Arecaceae); *Virola dixonii*, *Otoba gordoniiifolia* (Myristicaceae); *Guarea cartaguenya* (Meliaceae); *Protium occidentale* (Burseraceae); *Vitex gigantea* (Verbenaceae); *Caryodaphnopsis theobromifolia* (Lauraceae); *Swartzia haughtii* (Fabaceae). Entre las herbáceas están: *Irbachia alata* (Gentianaceae); *Begonia glabra* (Begoniaceae) y *Costus laevis* (Costaceae) (Sierra, 1999).

**Bosque siempreverde montano bajo:** comprende los bosques que van de los 1.300 m hasta los 1800 m sobre el nivel del mar, con un dosel entre 25 a 30 m. En esta faja de vegetación, la mayoría de especies y familias enteras de árboles característicos de las tierras bajas desaparece (por ejemplo: Bombacaceae). En otros casos, éste es el límite superior de su distribución (como en Myristicaceae). Las leñosas trepadoras también disminuyen, tanto en el número de especies como en el de individuos, mientras que las epífitas (musgos, helechos, orquídeas y bromelias) se vuelven más abundantes. Este tipo de bosque es una franja angosta a lo largo del flanco occidental de la cordillera de los Andes, desde Colombia hasta el valle de Girón-Paute. En este tipo de vegetación se han

encontrado entre 70 y 140 especies leñosas con diámetros de 2,5 cm o más en áreas de 0,1 hectáreas (Sierra, 1999).

Entre la flora característica de este ecosistema están: *Anthurium ovatifolium*, *a.* spp. (Araceae); *Ceroxylon alpinum*, *Socratea exorrhiza* (Arecaceae); *Buddleja americana* (Buddlejaceae); *Cecropia bullata*, *C. monostachya* y *C.* spp. (Cecropiaceae); *Cyathea* spp. (Cyatheaceae); *Heliconia* spp. (Heliconiaceae); *Nectandra membranacea* (Lauraceae); *Carapa guianensis* (Meliaceae); *Siparuna guajalitensis*, *S. eggertii*, *S. laurifolia*, *S.* spp. (Monimiaceae); *Fuchsia macrostigma* (Onagraceae); *Piper* spp. (Piperaceae); especies hemiepífitas de *Ficus* spp. (Moraceae) (Sierra, 1999).

**Bosque de neblina montano:** se distribuye desde 1.800 hasta los 3.000 m sobre el nivel del mar. Es un bosque cuyos árboles están cargados de abundante musgo y cuya altura del dosel está entre 20 y 25 metros. En esta franja altitudinal las epífitas, especialmente orquídeas, helechos y bromelias, son numerosas en especies e individuos, registrándose probablemente su más alta diversidad. Los bambúes también alcanzan su máxima diversidad en esta zona, donde se encuentran 45 de las 54 especies descritas para el Ecuador (Clark, 1997). En algunas localidades, sin embargo, puede encontrarse fuera de este rango altitudinal y probablemente corresponde a una mezcla de elementos que resulta en un tipo específico de bosque nublado. Acosta Solís (1982) reconoce el bosque nublado desde los 800 hasta los 1.800 m (o 2.600 m en Acosta Solís, 1968) en las dos estribaciones de la cordillera; Harling (1979) da un rango entre 2.500 hasta 3.400 m.s.n.m. Entre la flora característica que posee este ecosistema, están *Bomarea* spp. (Amaryllidaceae); *Anthurium mindense*, *A. gualanum*, *A.*

*nanegalense*, *A. clorugatum* y *A. spp.* (Araceae); *Ceroxylon ventricosum*, *Prestoea acuminata* var. *montana* (Arecaceae); *Blechnum monomorphum* (Blechnaceae); *Begonia* spp. (Begoniaceae); *Alnus acuminata* (Betulaceae); *Brunellia tomentosa* y *B. spp.* (Brunelliaceae); *Cecropia maxima* (Cecropiaceae); *Weinmannia pinnata* (Cunoniaceae); *Cyathea caracasana* (Cyatheaceae); *Dennstaedtia tryoniana* (Dennstaedtiaceae); *Escallonia paniculada* (Escalloniaceae); *Gunnera brgophea* y *G. colombiana* (Gunneraceae); *Bocona integrifolia* (Papaveraceae); *Piper carpunya*, *P. sodiroi* y *P. spp.*, *Peperomia* spp. (Piperaceae); *Palicourea* spp. (Rubiaceae); *Nectandra* spp. (Lauraceae); *Miconia corazonica*; *M. crocea*, *M. theazans* y *M. spp.*, *Brachyotum ledifolium* (Melastomataceae); *Cedrela montana* (Meliaceae); *Siparuna guajalitensis* y *S. spp.* (Monimiaceae); *Myrcianthes hallii* y *M. spp.* (Myrtaceae) *Fucsia pilalensis* y *F. spp.* (Onagraceae); numerosas especies de *Orchidaceae*; *Pasiflora mixta*, *P. alnifolia* y *P. coactilis* (Passifloraceae); *Chusquea scandens* y *Ch. spp.* (Poaceae); *Elaegia utilis* (Rubiaceae); *Freziera verrucosa* y *F. spp.* (Theaceae); *Aegiphila* spp. (Verbenaceae) (Sierra, 1999).

**Bosque siempreverde montano alto:** se extiende desde los 3.000 hasta los 3.400 m sobre el nivel del mar. Incluye la “Ceja Andina” o vegetación de transición entre los bosques montano altos y el páramo. El bosque siempreverde (húmedo) montano alto es similar al bosque nublado en su fisonomía y en la cantidad de musgos y plantas epífitas. Una diferencia importante es que el suelo tiende a estar cubierto por una densa capa de musgo y los árboles tienden a crecer irregularmente, con troncos ramificados desde la base y en algunos casos muy inclinados o casi horizontales (Sierra, 1999).

Entre la flora característica tenemos: *Gynoxys buxifolia* y *G. spp.* (Asteraceae); *Berberis conferta* (Berberidaceae); *Tournefortia fuliginosa* (Boraginaceae); *Hedyosmum spp.* (Chloranthaceae); *Gunnera pilosa* (Gunneraceae); *Brachyotum ledifolium* (Melastomataceae); *Siphocampylus giganteus* (Campanulaceae); *Vallea stipularis* (Elaeocarpaceae); *Siparuna echinata* (Monimiaceae); *Myrciathes rhopaloides* y *M. spp.* (Myrtaceae); *Piper spp.* (Piperaceae); *Hesperomeles lanuginosa* (Rosaceae); *Cervantesia tomentosa* (Santalaceae); *Freziera verrucosa*, *F. canescens* y *F. spp.* (Theaceae). A mayor altitud, en la Ceja Andina, los arbustos son más frecuentes (por ejemplo, *Hypericum laricifolium*, *Brachyotum ledifolium*, *Lupinus spp.*), pero ocasionalmente se encuentran árboles de *Buddleja incana* (Buddlejaceae), *Oreopanax spp.* (Araliaceae), *Polylepis spp.* (Rosaceae) y *Miconia spp.* (Melastomataceae), entre otras especies (Sierra, 1999).

El área de estudio seleccionada está determinada en función de la disponibilidad de información como base para la factibilidad del proyecto y toma en cuenta la premisa de que lo importante no constituye la amplitud del área, sino más bien la metodología y su validación en la investigación. Adicionalmente es muy dinámica, debido a los procesos socio-económicos que se desarrollan en la misma y que se constituyen en amenazas humanas (Castro, 2002). Por razones metodológicas se extendió el estudio a un área rectangular mayor que comprenda las áreas mencionadas.

La mayor parte del área se encuentra dentro del área política-administrativa del Distrito Metropolitano de Quito (D.M.Q.). Una pequeña parte se encuentra circunscrita en la parroquia Mindo del cantón San Miguel de Los Bancos,

concretamente el territorio del Bosque Protector Mindo y Cordillera de Nambillo. En el área de estudio existe un número considerable de localidades en las que habitan entre 35 y 105 familias por localidad (INEC, 2001).

La zona de estudio es drenada por una red hidrográfica bastante desarrollada, destacándose el curso del río Pichán desde sus nacientes en la parte sur oriental del área de estudio y continuando hacia el nor occidente hasta las aguas formadoras del río Alambí. Otros ríos importantes en la zona son el río Mindo, el río Meridiano, el río Saguangal, el río Tulambi, entre otros.

El área de estudio está comprendida dentro de las siguientes coordenadas (Figura 6):

	<i><b>MÍNIMO</b></i>	<i><b>MAXIMO</b></i>
<i><b>ESTE</b></i>	757658	773062
<i><b>NORTE</b></i>	9990839	10014634

Las coordenadas planas indicadas se presentan en la Proyección Universal Transversa de Mercator, Zona 17 Sur, Datum: WGS84, Elipsoide: WGS84, al igual que todos los mapas presentados en el estudio.

### **Esquema Metodológico**

En primer lugar se realizó la recopilación de información: cartográfica, alfanumérica y bibliográfica y su respectivo análisis a fin de ingresar las variables óptimas al modelo GEOMOD y de este modo efectuar la proyección de la dinámica de cambio de la cobertura de los bosques montanos existentes en el

área de estudio. Las acciones realizadas en relación a esta actividad se describen a continuación.

### **Recopilación de información**

Se recopiló durante el año 2006 cartografía básica y temática, así como información bibliográfica de diversas fuentes, entre ellas las bases de datos geográficas de: Fundación Maquipucuna, Consejo Provincial de Pichincha y Universidad de Maryland. Es importante mencionar que la mayor cantidad de datos recopilados corresponde a fuentes secundarias, es decir no fueron obtenidos en campo. Sin embargo se realizaron tres salidas de campo de cuatro días cada una, básicamente para familiarizarse con la realidad socio ambiental de la zona, mediante la realización de entrevistas informales a los moradores del lugar. El formato general de las entrevistas se puede apreciar en el Anexo a. Fueron realizadas 15 entrevistas, el criterio de selección de los entrevistados fue aleatorio, se tomó en cuenta la dispersión geográfica de las entrevistas, es así que se realizaron las mismas en las localidades de Alaspungo (3), San Carlos (2), El Copal (2), San Francisco (2), Palupe (2), Tandayapa (2), San Ramón (2) (Figura 7).

Estos datos fueron complementados con datos socioeconómicos obtenidos a partir de una revisión bibliográfica. Las visitas de campo, además sirvieron para determinar la correspondencia y fiabilidad general de las interpretaciones de las imágenes satelitales recopiladas, a través de los recorridos de campo realizados.

### **Información cartográfica**

Fundamentalmente la información cartográfica recopilada corresponde a la desarrollada en el Proyecto Corredor Chocó-Andino, en lo relacionado a

cartografía básica (centros poblados, vías, curvas de nivel, hidrografía) y temática (cobertura vegetal, suelos), y ajustada con la disponible en el área de SIG de la provincia de Pichincha. Es importante mencionar que la escala de la cartografía utilizada es 1:50.000.

En cuanto a las imágenes satelitales, han sido descargadas de la página Web <http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml> del Global Land Cover Facility (GLCF) desarrollada por la Universidad de Maryland. Se han utilizado dos imágenes satelitales LandSat, correspondientes a los años 1986 y 2001. Esta selección de años tuvo relación directa con la disponibilidad de imágenes satelitales del área de estudio con la menor cobertura de nubes y con un intervalo de tiempo adecuado en el que se puedan hacer evidentes cambios en la cobertura de bosque.

### **Información alfanumérica**

La información alfanumérica, en especial la relacionada con el tema socioeconómico, se ha relevado del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), la misma que fue levantada en el último censo de población y vivienda realizado en el año 2001.

### **Información bibliográfica**

En relación a la información bibliográfica sobre el fundamento técnico-científico y las aplicaciones del modelo GEOMOD, la mayor parte ha sido descargada del Internet, aunque se han tomado en cuenta publicaciones especializadas presentadas por los desarrolladores del modelo GEOMOD (Pontius 2001, 2006).

## **Estructuración de información**

La información recopilada fue revisada, analizada y estructurada a fin de poderla ingresar en el modelo.

## **Obtención de los mapas de cobertura vegetal y uso de suelo**

Para obtener el mapa de cobertura vegetal, tanto de la imagen satelital del 23 de marzo de 1986, como de la del 30 de julio de 2001, se procedió a realizar una clasificación no supervisada, para posterior a ello realizar una interpretación visual para ajustar la clasificación automática.

El estudio de la cobertura vegetal se centró en la discriminación de la cobertura de bosque en las dos fechas. Este proceso fue apoyado con la obtención del NDVI (Índice normalizado de vegetación) para cada una de las fechas (Chuvieco, 2003). Se realizó una validación general en campo de los resultados obtenidos a partir de la interpretación de la cobertura vegetal del año 2001. Al finalizar la interpretación digital se generó una imagen clasificada con dos categorías:

- 1) bosque; y,
- 2) no-bosque.

En la categoría bosque podemos subclasificar los 4 ecosistemas (formaciones vegetales) presentes en el área de estudio, y de esta manera realizar conclusiones importantes sobre el estado de conservación de los mismos.

Es importante mencionar que para que exista una adecuada aplicación del modelo es necesario que la resolución espacial (tamaño del píxel) sea la misma en las imágenes satelitales de las dos fechas. De igual manera la georeferenciación de las mismas debe ser la adecuada. Estos aspectos fueron tomados en cuenta en el presente estudio.

La categoría no-bosque, por otro lado agrupa todas las categorías de cobertura vegetal que sean distintas a bosque, en este caso pastos cultivados, vegetación arbustiva, deslizamientos, principalmente, sin discriminarlas individualmente. No se realiza la discriminación de las categorías mencionadas en vista de que el requerimiento de GEOMOD es tener únicamente dos categorías.

Las clasificaciones tienen sustento en mapas históricos de la cobertura vegetal, especialmente del año 2001. Sin embargo se realizó una validación o verificación general en campo de las clasificaciones realizadas, poniendo especial énfasis en los lugares donde existen claros de bosque, y por supuesto en donde existe bosque conservado. No se visitaron bosques alterados por tala selectiva debido a que la resolución espacial de las imágenes satelitales utilizadas no nos permite discriminar este aspecto. Se tomaron fotografías a fin de documentar lo expuesto.

**Análisis multitemporal de los mapas de cobertura vegetal para la posterior validación estadística de la simulación:**

Una vez que se realizó la clasificación de la cubierta vegetal del área con el criterio mencionado anteriormente, se procedió a realizar un análisis multitemporal, a fin de observar las tendencias de cambio entre el año 1986 y 2001, independientemente de la utilización posterior del modelo GEOMOD.

El análisis multitemporal, es decir el análisis comparativo de la presencia de las categorías 1 y 2 entre los años 1986 y 2001, se realizó usando el módulo CROSSTAB del programa IDRISI.

El proceso metodológico general se resume en la Figura 8.

### **Aplicación del modelo GEOMOD**

De acuerdo a los requerimientos del modelo GEOMOD, se procedió a realizar una primera simulación, con las siguientes consideraciones:

En la imagen de uso de suelo inicial, se ingresó el raster de clasificación (bosque y no-bosque) de la imagen satelital del año 1986.

En el tiempo inicial se colocó: 1986; y, en el tiempo final se colocó: 2001.

El intervalo de tiempo (número de años) fue: quince (15), a fin de obtener una sola imagen de simulación al año 2001.

La imagen de adecuación (suitability), resultó de la elaboración del mapa de pendientes y de su posterior reclasificación. La clasificación se realizó tomando en cuenta que la pendiente constituye una variable importante en el proceso de deforestación, es decir a mayor pendiente, mayor dificultad para deforestar (Pontius, 2006). La probabilidad de deslizamientos que originan deforestación, especialmente en los lugares en donde existe infraestructura vial y una fuerte pendiente fue contemplada en el estudio, y determinada mediante un análisis de correlación entre la presencia de infraestructura vial y la existencia de deslizamientos fundamentado en la verificación de campo asignando una probabilidad de deforestación mayor en aquellas zonas con alta pendiente en el área de influencia (cercanía) de la vía Calacalí – La Independencia. No se tomaron en cuenta otras variables biogeográficas dentro del proceso de generación de la imagen de adecuación, debido a que no se poseían dichas variables para el tiempo inicial (año 1986), de acuerdo a lo que estipula la metodología (Pontius y Chen, 2006). Sin embargo, si se dispusiera de otras variables biogeográficas, como la accesibilidad en función de las vías de acceso y su estado en el tiempo inicial, estas podrían ser incluidas en el análisis.

Una vez obtenida la imagen de adecuación y con las variaciones de las cantidades de bosque y no-bosque entre las clasificaciones reales de los años 1986 al 2001, se obtuvo la imagen simulada al año 2001, usando los principios teóricos indicados con anterioridad.

### **Validación estadística de los resultados de la primera simulación**

Continuando con la aplicación de la metodología, la imagen de simulación al año 2001 (primera simulación) fue comparada con la imagen satelital interpretada y clasificada del mismo año. Esta comparación o validación estadística se realizó en el módulo VALIDATE del software IDRISI, obteniéndose el índice Kappa ( $K$ ).

### **Segunda simulación hacia el año 2010**

Posterior a la primera simulación, se procedió a realizar la segunda simulación hacia el año 2010, bajo el mismo esquema anteriormente descrito es decir, se utilizaron los datos reales de la clasificación de la cubierta vegetal de la imagen satelital del año 2001 y el mapa de adecuación (pendientes reclasificadas) de la primera simulación. Para el caso de las cantidades proyectadas de bosque y no-bosque al año 2010, se utilizó la cantidad de celdas proporcionales a 9 años (desde el año 2001 al 2010). Este dato se obtuvo del análisis multitemporal realizado con anterioridad entre el año 1986 al 2001.

Se observaron los resultados desprendidos por la segunda simulación, se analizaron y con éstos se obtuvo una zonificación (clasificación de áreas) en función de la dinámica de cambio, lo que sirvió para plantear las respectivas estrategias de conservación.

En el caso de esta segunda simulación no se pudo utilizar una imagen de validación (comparación) y por ende utilizar el módulo VALIDATE para obtener el estadístico  $K$ , porque esta simulación es hacia el futuro.

Continuando con la aplicación de la metodología se procedió a realizar la clasificación de áreas en función de la dinámica de cambio, y se determinó además los ecosistemas más vulnerables mediante el cálculo de las tasas de deforestación mediante los métodos Típico y de Puyravaud.

### **Clasificación de áreas en función de la dinámica de cambio**

Una vez que se realizó la segunda simulación (hacia el año 2010), se procedió a clasificar las principales zonas del área de estudio de acuerdo a su dinámica y/o tendencia de cambio, así:

- Zonas no alteradas.
- Zonas en proceso de alteración.
- Zonas alteradas.

La primera categoría corresponde a zonas en donde prácticamente la cubierta boscosa no ha sufrido cambios en lo referente a cantidad y calidad.

La segunda categoría abarca zonas en donde la cubierta boscosa empieza a sufrir cambios en la cantidad. Esta clase se obtiene a partir de la comparación de áreas que pertenecían a la categoría bosque en el año 2001 y que en el año 2010 pertenecerán con gran probabilidad a la categoría no-bosque.

Finalmente, la tercera categoría comprende zonas en donde la cubierta boscosa se ha perdido. La pérdida no puede ser definitiva, sin embargo la restauración podría ser muy complicada.

El módulo dentro del programa IDRISI que facilita la obtención de la clasificación de áreas en función de la dinámica de cambio, se denomina CROSSTAB.

## RESULTADOS

### **Análisis multitemporal – Cobertura vegetal y deforestación**

Los resultados de los análisis de las imágenes satelitales entre los años 1986 y 2001 muestran que el área de bosque en 1986 fue de 28633.14 hectáreas y en el año 2001 fue de 23988.11 ha, es así que en esos 15 años existió una pérdida de bosque de aproximadamente 4645 hectáreas, equivalente al 16.22 % de la cobertura original de bosque en el año 1986 (28633.14 hectáreas). Sin embargo, existió también una regeneración de la cobertura boscosa de 1885 hectáreas, por lo que un total de 6530 hectáreas sufrieron cambios en este transcurso de tiempo (Tabla 2).

Realizando un análisis más detallado podemos afirmar que en el año 1986 existían 579.76 ha de Bosque Siempreverde piemontano, 5494.26 ha de Bosque Siempreverde montano bajo, 21657.00 ha de Bosque de neblina montano y 888.67 ha de Bosque Siempreverde montano alto, mientras que en el año 2001 existían 246.74 ha de Bosque Siempreverde piemontano, 4578.14 ha de Bosque Siempreverde montano bajo, 18536.90 ha de Bosque de neblina montano y 576.56 ha de Bosque Siempreverde montano alto dentro del área de estudio (Figura 9). Podemos afirmar entonces que existió una pérdida de 333.02 hectáreas de Bosque Siempreverde piemontano (57.44 %), 916.12 hectáreas de Bosque Siempreverde montano bajo (16.67 %), 3120.1 hectáreas de Bosque de neblina montano (14.41 %), 312.11 hectáreas de Bosque Siempreverde montano alto (35.12 %) (los porcentajes son calculados en relación a la cobertura de cada tipo de bosque en el año 1986).

Algunas zonas sin presencia de bosque en el año 1986 pudieron ser deslizamientos, que posteriormente se estabilizaron y regeneraron con vegetación natural pionera. Las áreas susceptibles a deslizamientos se encuentran en las zonas de pendientes fuertes y con la presencia de vías, de acuerdo a las observaciones realizadas en campo. Este es el caso de la mayoría de áreas con regeneración. Por otro lado, existe una cantidad considerable (6211 ha) de áreas desprovistas de bosque que no se regeneraron. Es así que 422.4 Hectáreas de áreas alteradas en Bosque Siempreverde piemontano, 1401.6 Hectáreas en Bosque Siempreverde montano bajo, 3974.1 Hectáreas en Bosque de neblina montano; y, 409.6 Hectáreas en Bosque Siempreverde montano alto no se regeneraron al llegar el año 2001 de acuerdo al análisis realizado.

El 60 % del área total de bosque no sufrió cambios en ese período, este es un porcentaje considerable y posiblemente se debe a que la mayor parte del área de estudio se encuentra bajo alguna categoría de protección, esto es 20683.7 Hectáreas, equivalente al 56.34 % del total del área de estudio, sin embargo sí hay una clara reducción de los ecosistemas presentes en la zona de estudio. En ese lapso existió un 5 % de regeneración de bosque y casi un 20 % de cobertura boscosa se perdió, por lo que la tendencia de la deforestación en el área continuó.

No existe ningún patrón espacial de distribución de las áreas de bosque y no bosque en ninguno de los dos años: 1986 y 2001. Sin embargo, se puede evidenciar para los dos años que existen pequeños parches de deforestación (menores al 1% de toda el área) y que corresponden a pequeñas áreas de pastizales, ubicadas en claros del bosque de neblina montano.

### **Primera simulación del período 1986 -2001**

En la primera simulación del cambio de la cobertura boscosa, es decir hacia el año 2001 (Figura 10), se puede apreciar que las zonas en donde existían áreas deforestadas semi consolidadas, tienden a consolidarse como tales de manera definitiva, es decir las áreas deforestadas tienden a crecer. Por otro lado, los parches de bosque tienden a perderse.

Para la validación de la simulación se utilizó el estadístico Kappa ( $K$ ) para ubicación, el mismo que arrojó un valor de 0.5341, que se lo podría catalogar como relativamente bajo, aunque comparándolo con corridas anteriores del modelo es el que mejores resultados ha arrojado. Los resultados de la primera simulación en relación a la pérdida de bosque en la zona de influencia de la carretera Quito-Nono-Tandayapa, parecen ser exagerados, debido a que en el año 1986 que se toma como base o fecha inicial, existía un mayor flujo vehicular, el mismo que decreció substancialmente con la apertura y uso de la vía Calacalí-La Independencia. Esta aseveración se realiza gracias a una comparación visual entre el mapa simulado al año 2001 y el mapa interpretado a partir de la imagen satelital del año 2001 (Figura 9) que viene a constituir un dato real. En cambio, en la zona de influencia del tramo de la actual vía Calacalí-La Independencia, existe una subestimación de la deforestación, debido a que en el año 1986 dicha vía no poseía las características y estado que actualmente posee. Este resultado será analizado en el siguiente capítulo con detenimiento.

**Segunda simulación (al año 2010):**

La categoría bosque permanece como tal en la cantidad de 21201 ha (57.7 % del área de estudio), mientras que 2787 ha han cambiado de bosque a no-bosque y constituyen las áreas deforestadas durante los 9 años de la simulación. Este valor corresponde al 7.6 % del área de estudio. Es importante mencionar que GEOMOD no contempla la utilización de tasas de crecimiento poblacional y de migración de los ecosistemas, por lo que no se podría relacionar directamente estas variables con los datos que se están presentando.

La superficie de la transición de la categoría no-bosque a bosque tiene un valor de 0 ha. El diseño del módulo GEOMOD en el software IDRISI no prevee la regeneración de la cobertura de bosque, por lo que el área de no-bosque que permanece o persiste sin cambios es de 12742 ha (34.7 % del área de estudio). Realizando una revisión más exhaustiva podemos apreciar que 113.25, 3581.89, 17003.70; y, 458.25 ha de áreas disturbadas en Bosque Siempreverde piemontano, Bosque Siempreverde montano bajo, Bosque de neblina montano; y Bosque Siempreverde montano alto, respectivamente permanecerán en el 2010 con la misma cobertura. Además 133.49, 996.25, 1533.20; y, 118.31 ha de Bosque Siempreverde piemontano, Bosque Siempreverde montano bajo, Bosque de neblina montano; y, Bosque Siempreverde montano alto, respectivamente estarán deforestadas en el 2010. Finalmente 769.14, 2615.83, 8562.64; y, 768.29 ha de Bosque Siempreverde piemontano, Bosque Siempreverde montano bajo,

Bosque de neblina montano; y, Bosque Siempreverde montano alto, respectivamente, persistirán como zonas desprovistas de cobertura boscosa natural al llegar el año 2010 (Figura 11).

En cuanto al componente cualitativo de la segunda simulación, podemos mencionar lo siguiente:

La deforestación existente a lo largo de las vías Calacalí – La Independencia y Quito – Nono – Tandayapa tiende a consolidarse, en especial en la primera vía.

Los pequeños parches de bosque dentro de las grandes áreas deforestadas tienden a desaparecer. Las áreas que se consolidan como deforestadas coinciden con las áreas que poseen una mayor densidad poblacional humana. Se pueden distinguir claramente dos zonas: el sector nor-occidental del área de estudio, en donde se encuentran asentadas las localidades de El Copal, Palupe, Cachillacta, principalmente, y el sector sur-oriental del área de estudio, en donde se encuentran asentadas Angarapamba, Pucará Alto, Alaspungo, Chiquilpe, entre las principales.

En cuanto a la zona sur-occidental del área de estudio, correspondiente a una parte del Bosque Protector Mindo y Cordillera Nambillo, permanece prácticamente inalterada. El Bosque Protector Maquipucuna conserva prácticamente la misma cobertura boscosa. La zona nor-occidental muestra una tendencia de pérdida de bosque. La Figura 12 es el producto resultante de la segunda simulación (es decir hacia el 2010).

### **Clasificación de áreas en función de la dinámica de cambio**

Con respecto a la clasificación de áreas en función de la dinámica de cambio tomando como base el año 2001 y con proyección el año 2010, podemos mencionar lo siguiente (Figura 13):

1. Las zonas no alteradas, cubren una superficie aproximada de 21157.1 ha, equivalente al 57.6 % del área de estudio.
2. Las zonas en proceso de alteración, es decir las que cambian de categoría bosque a no bosque, cubren una superficie aproximada de 2781.3 ha, equivalente al 7.6 % del área de estudio. Como se puede apreciar, estas zonas se encuentran en los alrededores de las zonas alteradas, debido al efecto de borde utilizado en la segunda simulación dentro del modelo GEOMOD (decisión que presiona el cambio simulado al límite entre el estado 1 y 2).
3. Las zonas alteradas, cubren una superficie aproximada de 12715.9 ha, equivalente al 34.8 % del área de estudio.

Realizando un análisis comparativo entre la clasificación de áreas en función de la dinámica de cambio de la cobertura de bosques obtenida (tomando como base el año 2001 y con proyección el año 2010) y los ecosistemas presentes en el área de estudio, podemos mencionar que las pérdidas de bosque en este período corresponden a un 2.10 % en el ecosistema bosque siempreverde piemontano, un 7.14 % en el ecosistema bosque siempreverde montano bajo, un 23.36 % en el ecosistema bosque de neblina montano, y un 2.10 % en el ecosistema bosque

siempreverde montano alto. Estos porcentajes son calculados tomando como universo el área total de la zona de estudio.

Por otro lado, relacionando las superficies ocupadas por los ecosistemas en el año 2001, con la superficie de los mismos simulados al año 2010, se estima que para ese año se perderá prácticamente la totalidad del bosque siempreverde piemontano, la tercera parte del bosque siempreverde montano bajo, el 30 % del bosque de neblina montano y el 57 % del bosque siempreverde montano alto.

#### **Tasas de deforestación:**

La tasa anual de deforestación (típica) calculada del período 1986 – 2001, resultado del análisis multitemporal es de 2.97 %. La tasa de deforestación calculada para la primera simulación (al año 2001), arroja el mismo resultado. La tasa anual de deforestación (típica) calculada para el período 2001 – 2010, resultado de la segunda simulación es de 7.19 %. La tasa anual de deforestación, calculada según la fórmula propuesta por Puyravaud (2003), para el período 1986 – 2001, resultado del análisis multitemporal es de 1.18 %. La tasa anual de deforestación, calculada según la fórmula propuesta por Puyravaud (2003), para el período 2001 – 2010, resultado de la segunda simulación calculada es de 1.37 %.

Las tasas anuales de deforestación (típicas) calculadas para el período 1986 – 2001, para los ecosistemas: Bosque Siempreverde piemontano, Bosque Siempreverde montano bajo, Bosque de neblina montano; y, Bosque Siempreverde montano alto son: 8.84 %, 3.17 %, 2.64 %; y, 5.76 %,

respectivamente. Las tasas anuales de deforestación, calculadas según la fórmula propuesta por Puyravaud (2003), para el período 1986 – 2001, para los ecosistemas: Bosque Siempreverde piemontano, Bosque Siempreverde montano bajo, Bosque de neblina montano; y, Bosque Siempreverde montano alto son: 5.70 %, 1.22 %, 1.04 %; y, 2.88 %, respectivamente (Figura 14).

Las tasas anuales de deforestación (típicas) calculadas para el período 2001 – 2010, para los ecosistemas: Bosque Siempreverde piemontano, Bosque Siempreverde montano bajo, Bosque de neblina montano; y, Bosque Siempreverde montano alto son: 40.65 %, 8.77 %, 6.05 %; y, 17.09 %, respectivamente. Las tasas anuales de deforestación, calculadas según la fórmula propuesta por Puyravaud (2003), para el período 2001 – 2010, para los ecosistemas: Bosque Siempreverde piemontano, Bosque Siempreverde montano bajo, Bosque de neblina montano; y, Bosque Siempreverde montano alto son: 8.65 %, 2.73 %, 0.96 %; y, 2.55 %, respectivamente (Figura 15).

### **Presiones socio-ambientales al uso del suelo**

La caracterización socio ambiental del área, producto de las visitas de campo, permite mencionar lo siguiente:

Los habitantes han ido cambiando poco a poco sus prácticas habituales, por ejemplo la quema de madera extraída del bosque para la obtención de carbón a través de la utilización de hornos, ha sido sustituida por otras actividades como la creación y utilización de huertos familiares. En este sentido es importante

mencionar que se han agrupado algunas localidades para la formación de Asociaciones Agrícolas, entre las más importantes podemos mencionar a: Alaspungo, Chacapata, El Golán, Marianitas y Yunguilla, de acuerdo a lo expresado por los habitantes de la zona en las entrevistas realizadas.

La baja calidad de vida dificulta la gestión ambiental en la zona, pero esta situación se ve contrastada con la demanda generalizada de la población de educación y capacitación ambiental expresada en 10 de las 15 entrevistas realizadas. Sin embargo, existen todavía personas que continúan con prácticas atentatorias a la conservación del ecosistema. Estas personas, que no forman parte de las Asociaciones Agrícolas antes mencionadas, deforestan con el principal objetivo de obtener pastizales por lo que han asentado sus viviendas dentro del bosque y se las podría considerar como invasores en virtud de que no disponen de documentos legales que acrediten la tenencia de la tierra. Estas personas son sumamente agresivas con los individuos que se acercan por donde ellas habitan pues piensan que el objetivo de la visita es su desalojo, de acuerdo a lo aseverado por los moradores de la zona. La mayoría de las invasiones se ubican en los claros del bosque de neblina montano, debido a que en los otros ecosistemas de la zona de estudio existen comunidades o Asociaciones Agrícolas establecidas. Otros aspectos socio ambientales del área son analizados en el siguiente capítulo.

## DISCUSIÓN

En esta sección brevemente se realizará un análisis de los resultados obtenidos en el presente estudio. Adicionalmente, se analizará la realidad socio-ambiental de la zona y la aplicabilidad del estudio, debido a que la utilización de la herramienta de simulación no tendrá ningún efecto si no se la difunde a los principales actores.

### **Resultados de la simulación**

La validez de los resultados está sujeta a la precisión de los datos espaciales y alfanuméricos. Los datos espaciales, en especial los obtenidos de las imágenes satelitales en lo que concierne a la presencia y ausencia de bosque, tienen una fiabilidad alta (alrededor del 95 %), en virtud de que no se realiza la discriminación de otras categorías. Este valor se lo obtuvo gracias a la comparación con los datos recopilados en la verificación de campo. Si es que se realizaría una mayor discriminación de categorías, este porcentaje de fiabilidad decrecería notablemente (Pontius, 2006).

Tomando como referencia las áreas de cobertura de los diferentes ecosistemas en los años 1986 y 2001, apoyados del análisis multitemporal podemos darnos cuenta que el Bosque siempreverde piemontano es el ecosistema que mayor pérdida sufrió (57.44 %) y el Bosque de neblina montano el que menor pérdida sufrió (14.41 %), debido posiblemente a las diferencias de accesibilidad y presencia de localidades en los ecosistemas mencionados. Es importante mencionar además que en este período de tiempo, la mayor cantidad de

regeneración correspondió al ecosistema bosque de neblina montano (3974.1 ha) debido probablemente a la menor fragmentación de este ecosistema.

La tasa de deforestación de 2.97 % para el período 1986-2001, es más alta que la expuesta por otros estudios (Amelung y Diehl, 1992) (Tabla 1), esto se debe a que los mismos son regionales y los períodos de tiempo analizados distintos a los del presente estudio, por lo que es muy delicado realizar comparaciones más finas sobre este aspecto.

Realizando una comparación entre las tasas anuales de deforestación típica calculadas para los períodos 1986-2001 y 2001-2010, podemos apreciar que la tasa se duplica (del 2.97 % al 7.19 %), esta situación se debe a que se están comparando dos tasas en dos períodos de tiempo con un intervalo de años diferente, en el primer caso son 15 años, en el segundo son 9 años. Teóricamente se debería esperar un menor incremento en el segundo período por el menor intervalo de tiempo, sin embargo esta afirmación puede ser cuestionada, debido a que la dinámica de la zona puede haber variado notablemente de una década a otra.

Con este antecedente, se comparan las tasas de deforestación, calculadas según la fórmula propuesta por Puyravaud (2003) para los períodos 1986-2001 y 2001-2010, y es así que podemos observar que la tasa varía ligeramente (del 1.18 % al 1.37 %), esta situación sucede porque la fórmula de Puyravaud es estandarizada, es decir, permite comparar los resultados obtenidos de distintos ensayos, ya que el cálculo de la tasa de deforestación se independiza de la superficie de bosque

analizada y de los períodos de tiempo considerados (Puyravaud, 2003), lo que no sucede en el cálculo de la tasa de deforestación anual típica como pudimos apreciar anteriormente.

La comparación de las tasas de deforestación estandarizadas (a través de la utilización de la fórmula de Puyravaud) obtenidas en el estudio con las de otros autores, como Clirsen y FAO, es una labor interesante e importante pero demanda de un análisis y conocimiento más profundo de cada uno de los estudios y no es uno de los objetivos de esta investigación. Sin embargo, si por ejemplo, realizamos una breve comparación con los datos registrados por Clirsen (2004) podemos observar que las tasas son bastante semejantes. El presente estudio arroja una tasa estandarizada de 1.37 % y la de Clirsen (2004) es de 1.47 %, asumiendo que la tasa calculada por Clirsen es estandarizada. Si es que no lo fuera, por el contrario, existiría una gran diferencia entre la tasa de deforestación típica obtenida por el presente estudio (7.19 %) y la de Clirsen (1.47 %), es decir cada estudio puede tener bases metodológicas de cálculo de la tasa de deforestación distintas y de esta situación debemos tener plena conciencia. Con este antecedente si el investigador cree conveniente es posible comparar las tasas de deforestación obtenidas en este estudio con las mostradas en la Tabla 1.

Al realizar un análisis más detallado podemos apreciar que para el período 1986-2001, la tasa de deforestación anual más alta, calculada tanto por el método típico como por el de Puyravaud, se encuentra asociada al ecosistema Bosque siempreverde piemontano, y la más baja al Bosque de neblina montano. De igual manera, para el período 2001-2010, la tasa de deforestación más alta seguirá

asociada al ecosistema Bosque siempreverde piemontano, y la más baja al Bosque de neblina montano.

Por otro lado, estableciendo la relación de pérdida entre cada uno de los ecosistemas presentes en el área de estudio y el tamaño del área de estudio: es decir tomando en cuenta las superficies netas de los ecosistemas, se puede observar que el ecosistema que sufre la mayor pérdida (23.36 %) es el ecosistema Bosque de neblina montano. Esta situación está asociada al porcentaje del área de estudio que es cubierto por este ecosistema, ya que en este caso existe una relación directamente proporcional entre la pérdida y la presencia del ecosistema.

En la primera simulación, del año 1986 al 2001, el valor de K es de 0.5341, y es un valor relativamente bajo, esto significa que la probabilidad de tener aciertos en la localización de la deforestación es limitada, considerando que sin necesidad de aplicar el modelo y con el conocimiento de la zona podríamos llegar a un valor de 0.50 aproximadamente (Pontius, 2006). Si el valor de K fuese menor a 0.5 no tendría sentido aplicar el modelo. Sin embargo, tiene sentido usar el modelo porque es la única herramienta disponible. A futuro se recomienda utilizar para el mapa de adaptación (suitability), a más de la pendiente, otra variable biogeográfica como la accesibilidad para mejorar la exactitud del modelo. Si existiese una buena línea base inicial se podría incluir además un análisis por tipo de ecosistemas dentro del modelo tomando en cuenta la variable vulnerabilidad o fragilidad de cada ecosistema.

En cuanto a la complejidad de la utilización de GEOMOD es importante resaltar que éste no prevé la regeneración de la cobertura de bosque. En el caso del presente estudio aproximadamente un porcentaje menor al 5 % del área total de la zona de estudio se encontraría en un proceso de regeneración en un período de 15 años, de acuerdo a los resultados del análisis multitemporal. Es por ello, que para la segunda simulación (al año 2010) este porcentaje de regeneración podría considerarse no crítico en la aplicación del modelo y descartarse debido al período corto de tiempo entre los años analizados (2001 al 2010).

### **Factores socioeconómicos que influyen en la tasa de deforestación**

Internándonos en la realidad socio-ambiental del área podemos aseverar que el nivel educativo de los habitantes de las comunidades de la Cuenca Alta del Río Guayllabamba (CARG), es más bien bajo, variando entre un 73 % de habitantes con nivel educativo primario o inferior para Nanegal y un 100 % para Bellavista y Alaspungo. En promedio, el porcentaje de habitantes con educación primaria o inferior es 86% (Castro, 2002).

En varias comunidades, la diferencia de creencias religiosas es frecuente causa de desacuerdo entre los miembros de la comunidad, lo que dificulta la organización de grupos y coordinación de actividades a nivel comunitario (Castro, 2002).

Las actividades económicas más frecuentes en la zona son la ganadería, la agricultura, y los jornales. En el área de estudio existen aproximadamente 93

localidades, en las que se incluyen pequeñas haciendas, pero la mayoría de éstas se agrupan dentro de las 5 Asociaciones Agrícolas existentes en el área. El porcentaje de habitantes dedicados a cada una de las actividades económicas es muy variable según la comunidad, con más tendencia al predominio de jornales y menor a la ganadería y agricultura (Castro, 2002). La cercanía o accesibilidad al bosque y por consiguiente la densidad poblacional de las localidades (Figura 12) es un factor importante en el patrón de deforestación general de la zona de estudio, es decir las áreas boscosas que tienen una influencia directa de agrupaciones de localidades (cercanas), y que por consiguiente poseen algún tipo de infraestructura vial desarrollada, son más vulnerables que las áreas que no poseen estas características.

En relación con servicios públicos, existen escuelas, pero abundan quejas en relación al número de profesores. Los servicios básicos son deficitarios, apenas un 20% de la población de la zona de estudio tiene acceso a alcantarillado y agua potable (Castro, 2002).

La demanda generalizada de educación y capacitación ambiental hace presumir que si se trabajara adecuadamente en estos temas, de una manera u otra se podría aportar a mejorar su nivel de vida.

En tal virtud, a estas poblaciones se las debe dotar de opciones laborales alternativas, que propendan a disminuir la migración, el crecimiento poblacional, la deforestación y la extracción inadecuada de recursos naturales, tomando en cuenta que todas estas comunidades se encuentran asentadas en el área de

influencia de los bosques protectores de la zona, y por tanto constituyen presiones para la destrucción del ecosistema (Figura 7). Es por ello, que entre otras cosas, es necesaria la elaboración y/o actualización de los Planes de Manejo del área. Estos deben contemplar todas las problemáticas anteriormente señaladas, pero más que nada se debe propender a que sean operativos y reales, fundamentados en estudios técnicos como el presente. Esto debido a que se han realizado anteriormente Planes Estratégicos de conservación y desarrollo para algunas de las comunidades y sus respectivas asociaciones agrícolas, pero han quedado en su mayor parte en simples enunciados (Maquipucuna, 2003).

De lo expuesto se puede resumir que el manejo del Bosque Protector CARG no es el mejor, y a corto plazo se deben tomar acciones para propender a la conservación de la zona.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Más allá de la precisión de localización o ubicación de las zonas de alteración de cobertura boscosa, es importante llegar a la determinación de las tendencias de cambio de la cobertura de bosque, en términos regionales. Desde este punto de vista, los modelos constituyen una buena aproximación de la realidad sin embargo, la calidad de las variables de entrada es fundamental para la obtención de un buen producto. En el caso de esta investigación no se han encontrado problemas en este aspecto.

La selección adecuada de las variables de entrada es otro punto crítico en el desarrollo del modelo. La selección de las mismas debe realizarse en función de las realidades de cada área de estudio. Para este estudio, se encontraron limitaciones, puesto que básicamente se utilizó cobertura vegetal (categorías de bosque y no-bosque), tipos de ecosistemas de bosques, el factor pendiente como variable biogeográfica de adecuación y la ubicación de los asentamientos humanos o localidades como variable de comparación con los datos desprendidos por el modelo. Hubiese sido interesante ingresar otras variables biogeográficas en el modelo como la accesibilidad y definir la calidad de la misma en el proceso de predicción, pero lamentablemente no se disponía de esta variable a la fecha inicial de la primera simulación (año 1986). En tal virtud, es importante destacar que este estudio es pionero en el área y que se usó una variable importante (pendiente del terreno) en el modelo, con lo que se obtuvo datos claros. Por otro lado, la utilización de un mayor número variables hace que el modelo sea más complejo.

En cuanto a la validez de los resultados del modelo GEOMOD específicamente, es muy difícil determinar el rendimiento del mismo, a no ser por la aplicación del índice Kappa (K). Es más difícil todavía realizar una comparación con otros modelos de cambio de uso de suelos, porque los mismos pueden ser fundamentalmente diferentes en una variedad de maneras. Así por ejemplo, GEOMOD simula el cambio entre dos categorías de uso de suelo (Silva y Clarke 2002; Pontius *et al.* 2001), mientras que otros como CA\_MARKOV, pueden simular el cambio entre algunas categorías (Li y Reynolds 1997; Wagner 1997; Wu y Webster 1998; Pontius y Malanson 2005). Sin embargo mientras mayor complejidad posea el modelo, existirá una mayor incertidumbre y por tanto más errores. Adicionalmente, existen particularidades inherentes a las diferentes áreas de estudio.

Definitivamente, es siempre mejor tener un análisis tendencial (prospectivo) deficiente que no tener un análisis, puesto que la gestión ambiental debe ajustarse a las realidades y proyecciones de los escenarios. De manera concreta los resultados de esta investigación pueden servir para incorporarlos dentro del programa de Ordenamiento Territorial dentro de un nuevo Plan de Manejo Ambiental del área, que deberá además incluir otros programas de prevención, mitigación, remediación y compensación de impactos significativos, que previamente deben ser identificados en un estudio de impacto ambiental del área.

El modelo de cambio de uso de suelo puede dar mejores resultados en términos espaciales, analizando áreas geográficas amplias, como por ejemplo el Corredor Chocó-Andino, debido a que por el tamaño del área geográfica que se abarca, se

pueden observar y evidenciar fácilmente las áreas con mayor dinámica de cambio (son obvias a través de un análisis visual). Sin embargo, áreas pequeñas de estudio, como la de esta investigación, muestran particularidades en la dinámica de cambio de uso de suelo, pero determinadas a partir de un análisis estadístico espacial asistido o con el apoyo de un Sistema de Información Geográfica.

El concepto de persistencia en el paisaje que maneja GEOMOD, es decir la imposibilidad de considerar los cambios simultáneos de estados, y no poder predecir la regeneración de cobertura boscosa, no es crítico en el presente estudio, pero en estudios en otras áreas y en períodos más largos de tiempo puede traer problemas, por lo que podemos concluir que GEOMOD es un modelo pseudo-aleatorio (Pontius, 2006).

Es fundamental complementar los resultados del modelo de cambio de usos de suelo con otros análisis complementarios, como los estudios de integridad ecológica y los análisis de vacíos de conservación (gap analysis), que finalmente conllevan a la sostenibilidad ecológica de una zona (Chuvieco, 2003), junto con los procesos de participación e intervención de las comunidades que se asientan en el área de influencia. Es por ello que el estudio de análisis de los cambios de uso de suelo, en todo el sentido de la palabra, involucra a una amplia gama de áreas del conocimiento y constituye un estudio multidisciplinario. Esta es una de las razones por la que el presente estudio puede poseer algunos vacíos.

Por otra parte, mediante la aplicación de las técnicas de modelaje de cambios pueden plantearse proyectos forestales relacionados con el “Uso y Cambio del

Uso del Suelo” LULUCF (Land-use, Land-use Change and Forestry), como un Mecanismo de Desarrollo Limpio, contemplado dentro del Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, en los que interesa conocer áreas degradadas que pueden ser reforestadas y de esta forma predecir la emisión de dióxido de carbono, atribuible al cambio de uso de suelo (Pontius y Chen, 2006).

Las entidades políticas que gestionan el ambiente en el Ecuador deben buscar asesoría en organizaciones científicas internacionales que analizan la dinámica de cambio de suelo, denominadas LUCC (Land Use & Cover Change), y que están conectadas con las entidades internacionales del Programa de Cambio Climático y el Programa Internacional Geósfera-Biósfera, a fin de empezar a aplicar el mecanismo de desarrollo limpio expuesto. Específicamente los proyectos forestales podrían tener como áreas de intervención las identificadas en el presente estudio como alteradas y que ofrecen las opciones de generación de corredores, tanto en tenencia estatal (Bosque Protector CARG) como en tenencia privada (Reserva Maquipucuna, Asociaciones Agrícolas).

A continuación se presenta la propuesta y primera aproximación de las estrategias de conservación que son planteadas en función de los resultados del análisis prospectivo (áreas en función de la dinámica de cambio), y están englobadas en los siguientes aspectos:

Estrategia 1.- Conservación de especies: Este aspecto es fundamental debido al hecho de que el probable incremento de las tasas de extinción biológica en las últimas décadas se debe, en gran medida, a la destrucción y fragmentación de los

hábitats, es decir, a un proceso que opera a nivel de regiones o paisajes (Sierra, 1999). Adicionalmente, se debe tomar en cuenta la gran biodiversidad existente en los ecosistemas de bosque montano, así por ejemplo, en el bosque de neblina montano las epífitas, especialmente orquídeas, helechos y bromelias, son numerosas en especies e individuos, registrándose probablemente su más alta diversidad (Sierra, 1999). Adicionalmente si consideramos que los ecosistemas albergan a especies animales y constituyen su hábitat, al proteger la cobertura vegetal natural, estamos protegiendo la diversidad animal.

Es por ello, que se debe considerar principalmente:

- El desarrollo y cumplimiento de normas internacionales de protección de especies amenazadas, como el Convenio sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestre (CITES).
- Crear un centro de datos, recopilando toda la información dispersa sobre el estado de los ecosistemas, la vegetación y las especies animales presentes en la zona de distintas instituciones públicas y privadas.
- Mantener comunidades de fauna intactas (Conservación Internacional, 2005).

En términos sistémicos, en los 4 ecosistemas de la zona de estudio se debe prever la conservación de especies, mas allá de los resultados desprendidos por el presente estudio. Sin embargo, por ejemplo no existen Bosques Protectores que protejan el ecosistema Bosque Siempreverde piemontano como se discute más adelante.

Estrategia 2.- Áreas naturales: En este aspecto se debe considerar:

- Expansión de las áreas protegidas existentes. De los resultados desprendidos en el estudio, especialmente en lo referente a la alta tasa de deforestación del ecosistema Bosque Siempreverde piemontano se puede aseverar que la conservación de este ecosistema es prioritaria para una adecuada gestión ambiental del área de estudio, asegurando un adecuado enfoque sistémico. Por lo que recomiendo ampliar la extensión del Bosque Protector CARG o crear un nuevo Bosque Protector que proteja el ecosistema Bosque Siempreverde piemontano tomando en cuenta que el concepto de ampliación de área de protección como un criterio en el diseño de reservas solo tiene sentido si a mayor tamaño existe mayor diversidad ecosistémica o de formaciones vegetales. Un área geográfica muy grande pero con poca variabilidad de formaciones vegetales puede ser ineficiente si la realidad ecosistémica es mucho más compleja (Sierra, 1999).

- Mejoramiento de la gestión de las áreas protegidas, a través de: fortalecimiento logístico y capacidades de gestión y supervisión, resolución de conflictos, zonificación, plan de manejo y levantamiento catastral actualizado, recaudación de fondos, fiscalización de procesos y valorización económica total de biodiversidad (Conservación Internacional, 2005). En este aspecto es necesario focalizarse al adecuado manejo del Bosque Protector Cuenca Alta del Río Guayllabamba (CARG), que actualmente se encuentra en manos públicas, debido a que esta zona alberga en su mayoría al ecosistema del Bosque de neblina montano. Por otro lado, si bien es cierto que el Bosque Protector Maquipucuna mantiene un nivel adecuado de conservación de su bosque y está en manos

privadas, es necesario fortalecer las políticas de gestión de las comunidades del área de influencia, ya que como se puede apreciar en los resultados del estudio, la presión sobre los ecosistemas presentes en el área de estudio es bastante fuerte.

Estrategia 3.- Corredores de conservación: Que debe contemplar los siguientes puntos:

3.1.1 Conectividad y mantenimiento de procesos ecológicos: que se consigue con una buena base de datos biológica, ecológica, socioeconómica, y con claras políticas legales y administrativas.

3.1.2 Planificación estratégica: con un buen plan de ordenamiento territorial, que contemple nuevos instrumentos económicos.

3.1.3 Acciones que promuevan la conectividad y consolidación de los corredores. Este es quizá el punto más crítico y se lo lograría a través de: alternativas económicas sostenibles (agricultura orgánica, ecoturismo, turismo rural), comunicación (Educación Ambiental), monitoreo, restauración de áreas degradadas que aseguren colectividad (Conservación Internacional, 2005).

3.1.4 El diseño de corredores: es un tema bastante complejo y podría ser objeto de un estudio extenso y complementario, sin embargo me he permitido proponer al menos un par de corredores en la zona de estudio (Figura 16) tomando en cuenta las siguientes premisas generales en relación con parches (reservas) y corredores (USDA, NRCS, 1999)

- a) Grandes reservas o parches son mejores que pequeñas reservas o parches.
- b) Parches o reservas conectados son mejores que parches o reservas separados.
- c) Muchos parches o reservas (redundancia) son mejores que un parche o reserva.
- d) La cercanía entre parches es mejor que la lejanía.
- e) Corredores continuos son mejores que corredores fragmentados.
- f) Corredores anchos son mejores que corredores angostos.
- g) La conectividad natural debería ser mantenida o restaurada.
- h) Dos o más conexiones de corredores entre parches (redundancia) son mejores que una.
- i) Corredores y parches estructuralmente diversos son mejores que estructuras simples.
- j) Plantas nativas son mejores que plantas introducidas. Este concepto debe ser incorporado en potenciales proyectos forestales.

Los corredores propuestos constituyen únicamente una primera aproximación, a partir de los datos recopilados y obtenidos en el presente estudio que deben ser ajustados con inventarios de vida silvestre y hábitats que inevitablemente tendrán que ser procesados en un análisis de vacíos (GAP Analysis).

Concretamente se proponen 2 corredores de conservación (Figura 16): el primero, con una longitud aproximada de 8575 metros y un área de 730 ha; y, el segundo con una longitud aproximada de 9801 metros y un área de 831 ha. El primer corredor se ubica al norte de la vía Calacalí - La Independencia, conectando el

Bosque Protector Cuenca Alta del Río Guayllabamba con la Reserva Privada Maquipucuna; y, el segundo corredor se ubica al sur de la vía Calacalí – La Independencia, conectando el Bosque Protector Cuenca Alta del Río Guayllabamba con el Bosque Protector Mindo y Cordillera de Nambillo. En ambos casos se conecta a los ecosistemas: Bosque Siempreverde Montano Bajo y Bosque de Neblina Montano.

En el primer corredor será necesario desarrollar actividades para reforestar o construir el mismo mediante acciones de reforestación de áreas actualmente degradadas. En el segundo, las acciones de restauración serán mínimas o nulas debido a la buena conservación de los bosques presentes en este corredor.

En resumen, la estrategia 1, es decir conservación de especies, deberá ser principalmente aplicada en las zonas no alteradas, como el área bien conservada de Bosque de Neblina Montano. Las estrategias 2 y 3, pueden ser aplicadas principalmente por las autoridades públicas fundamentalmente en zonas en proceso de alteración y alteradas, como la zona nor-occidental del área de estudio con la presencia del Bosque Siempreverde Piemontano carente de protección legal.

La estrategia 3, puede ser aplicada básicamente en las zonas en donde existe continuidad de la cobertura boscosa.

La segunda aproximación deberá incluir la concertación con las comunidades como entes de presión, a más de otros estudios complementarios. Adicionalmente deberá identificarse en un futuro estudio claramente las Fuentes de la Presión (TNC, 2001).

Como podemos apreciar la definición de estrategias de conservación, toma también en cuenta la determinación de los ecosistemas más vulnerables determinados en el presente estudio, por lo tanto se puede afirmar que se han cumplido con todos los objetivos planteados al inicio de la ejecución de la investigación.

Finalmente, como corolario puedo afirmar que los Sistemas de Información Geográfica constituyen una gran herramienta en los procesos de planificación y gestión ambiental, sobre todos en los subprocesos interactuantes de generación de alternativas, evaluaciones y selecciones, con la asistencia de diferentes tipos de modelos, entre ellos los modelos de predicción, objeto de esta investigación (Bosque, 2002).

## BIBLIOGRAFÍA

- Acosta Solís, M. 1982. *Fitogeografía y vegetación de la provincia de Pichincha*. Consejo Provincial de Pichincha. Quito.
- Bosque Sendra, J. y Zamora Ludovic, H. 2002. *Visualización geográfica y nuevas cartografías*. Geofocus 2, pp. 567-598.
- Bromley, R.J. 1981. *The Colonization of humid tropical areas in Ecuador*. Singapore Journal of Tropical Geography 2(1): 15-26.
- Buenaño, X. 2007. *Análisis altimétrico de la zona de estudio (CARG)*. Documento de trabajo.
- Castro, B. 2002. *Análisis de la Información Socio-ambiental de las comunidades de la Cuenca Alta del Río Guayllabamba (CARG). Resumen Analítico*. Fundación Maquipucuna. Probona.
- Cerón, C. 1995. *Diversidad vegetal en la parte baja del Bosque Protector Mindo*. Revista Geográfica 35:5-38.
- Clark, L. 1997. *Diversity and biogeography of Ecuador bamboos*. En R. Valencia y H. Baslev (Eds.). Estudios sobre diversidad y ecología de plantas. Publicaciones de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito.
- Clarklabs. 2004. *Descripción de módulos de Idrisi Kilimanjaro*. Ayuda de Idrisi Kilimanjaro. United States.
- Chuvieco, E. 2002. *Teledetección Ambiental*. Editorial Ariel. España.
- Conservación Internacional. *Estrategia de Acción*. Obtenido en línea el 12 de diciembre de 2006. Disponible en: <http://www.conservacion.org.pe/estrategia/index.html>.
- Devalud, A. 1980. *From colonization to agricultural development. The case of coastal Ecuador*. En D. Preston (Ed.). *Environment, society, and rural change in Latin America: The past, present, and future in the countryside*. John Wiley, Chichester.

- Dirección General de Estadística e Información Ambiental de México. *Factores relacionados al cambio de uso del suelo*. Obtenido en línea el 10 de febrero de 2005. Disponible en: [http://www.semarnat.gob.mx/estadisticas\\_2000/informe\\_2000/02\\_Vegetacion/2.4\\_Factores/index.shtml](http://www.semarnat.gob.mx/estadisticas_2000/informe_2000/02_Vegetacion/2.4_Factores/index.shtml).
- Dushku, A. Hall, M. 2003. *The GEOMOD modeling approach*. Memoria Técnica. United States.
- FAO. *Conceptos, historia y comparación con otros sistemas similares*. Obtenido en línea el 10 de febrero de 2005. Disponible en: <http://www.fao.org/sd/spdirect/gis/chap2.htm>.
- Fundación Maquipucuna. 1992. *Plan de Manejo Bosque Protector Maquipucuna*. Quito. Ecuador.
- Gómez, M. y Barredo J. 2005. *Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Segunda Edición. Editorial RA-MA. España.
- Harling, G. 1979. *The vegetation types of Ecuador-A brief survey*. En K. Losen y B. Høla-Neilsen (Eds.). Tropical botany. Academic Press. Nueva York.
- INEC. 2001. *Resultados del Censo Nacional de Población y Vivienda en el Ecuador*.
- Martínez, C. 2005. *Estudio Multitemporal De Cambios En La Cobertura Vegetal (1979-2004) Y Modelización Prospectiva En La Provincia De Cotopaxi*. Ecociencia.
- Mitsova, H. 1998. *Process Modeling and Simulations*. University of Illinois at Urbana-Champaign, USA. Obtenido en línea el 18 de abril de 2006. Disponible en: <http://www.ncgia.ucsb.edu/giscc/units/u130/u130.html>.
- PMRC/FPVM (Programa de Manejo de Recursos Costeros/Fundación P.V. Maldonado). 1989. *Ecuador: Visión global del desarrollo de la Costa*. PMRC. Guayaquil.

- Pontius Jr, R. G., J. Cornell y C. Hall. 2001. *Modeling the spatial pattern of landuse change with GEOMOD2: application and validation for Costa Rica*. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 85(1-3) p. 191-203.
- Pontius Jr, R. G., Hao Chen. 2006. *Geomod Modeling*. Land-Use & Cover Change Modeling Clark University.
- Puyravaud, J. P. 2003. *Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation*. *Forest Ecology and Management*, 117:593-596.
- Sierra, R. (Ed.). 1999. *Propuesta Preliminar de un Sistema de Clasificación de Vegetación para el Ecuador Continental*. Proyecto INEFAN/GEF-BIRF y Ecociencia. Quito, Ecuador.
- Starfield, A. y Bleloch A. 1991. *Building Models for Conservation and Wildlife Management*. Segunda Edición. Edina. USA.
- The Nature Conservancy. 2000. *Manual de planificación para la conservación de sitios y la medición del éxito en conservación*. United States. Segunda Edición.
- Universidad Nacional de Colombia. *Los Modelos Ocultos de Markov*. Obtenido en línea el 13 de febrero de 2005. Disponible en: <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ingenieria/2001832/lecciones/hmm1.html>.
- USDA, NRCS. 1999. *Wildlife Planning Principles for Patches, Corridors, Matrix, and Structure*.
- Vázquez M., Ulloa R. 1997. *Estrategia para la Conservación de la Diversidad Biológica en el Sector Forestal del Ecuador*. Proyecto FAO-Holanda "Apoyo a la ejecución del Plan de Acción forestal del Ecuador (PAFE)"/Ecociencia. Quito.
- Velásquez, E. *Patrones y Tasas de Cambio de Uso del Suelo en México*. Obtenido en línea el 15 de febrero de 2005. Disponible en:

[http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/gacetitas/62/velasquez.html?id\\_publicacion=357](http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/gacetitas/62/velasquez.html?id_publicacion=357).

- Whitaker, M. y J. Alzamora. 1990. *Production agriculture: Nature and characteristics*. En Whitaker, M. y D. Colyer (Eds.). *Agriculture and economic survival: The role of agriculture in Ecuador's development*. Westview Press. Boulder.

## ANEXOS

### Tablas, Figuras y Gráficos:

*Tabla 1: Estimaciones de la deforestación en el Ecuador. Varios autores (Sierra, 1994 en Vásquez, 1997).*

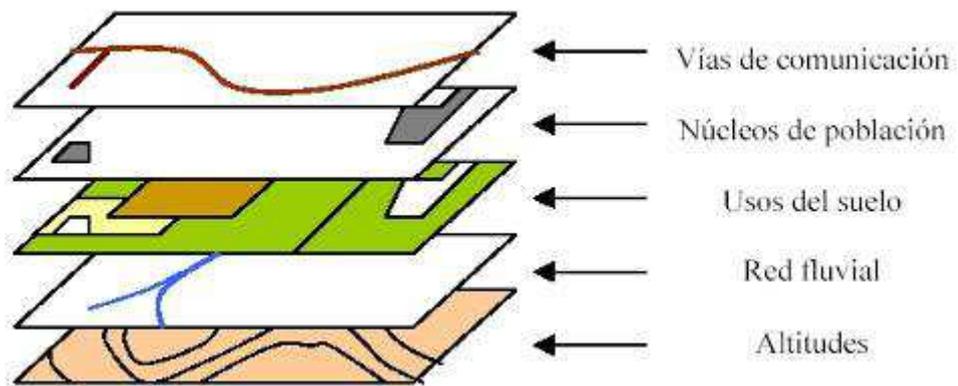
<b>Fuente</b>	<b>Período</b>	<b>Área deforestada en Ecuador (ha/año)</b>	<b>Porcentaje (% año)</b>
FAO (1982)	-	34.000	-
CLIRSEN (1983)	1976 - 1983	400.000	-
Bremer – Fox & Bender (1987)	-	200 – 300.000	-
World Resources Institute (1987)	-	277.000	2,4
Repetto (1988)	1981 - 1985	340.000	2,4
USAID (1988)	-	75.000	-
Schmidt (1990)	1981 - 1990	60.000	0,5
World Resources Institute (1990)	1980s	340.000	2,3
SUFOREN (1991)	-	200.000	-
Amelung & Diehl (1992)	1980 - 1988	306.000	-
World Resources Institute (1994)	1981 - 1990	238.000	1,7
CLIRSEN (2004)	1991 - 2000	1.782.832	1,47

*Tabla 2: Análisis multitemporal de la cobertura de bosque de la CARG entre el año 1986 y el año 2001 en la zona de estudio.*

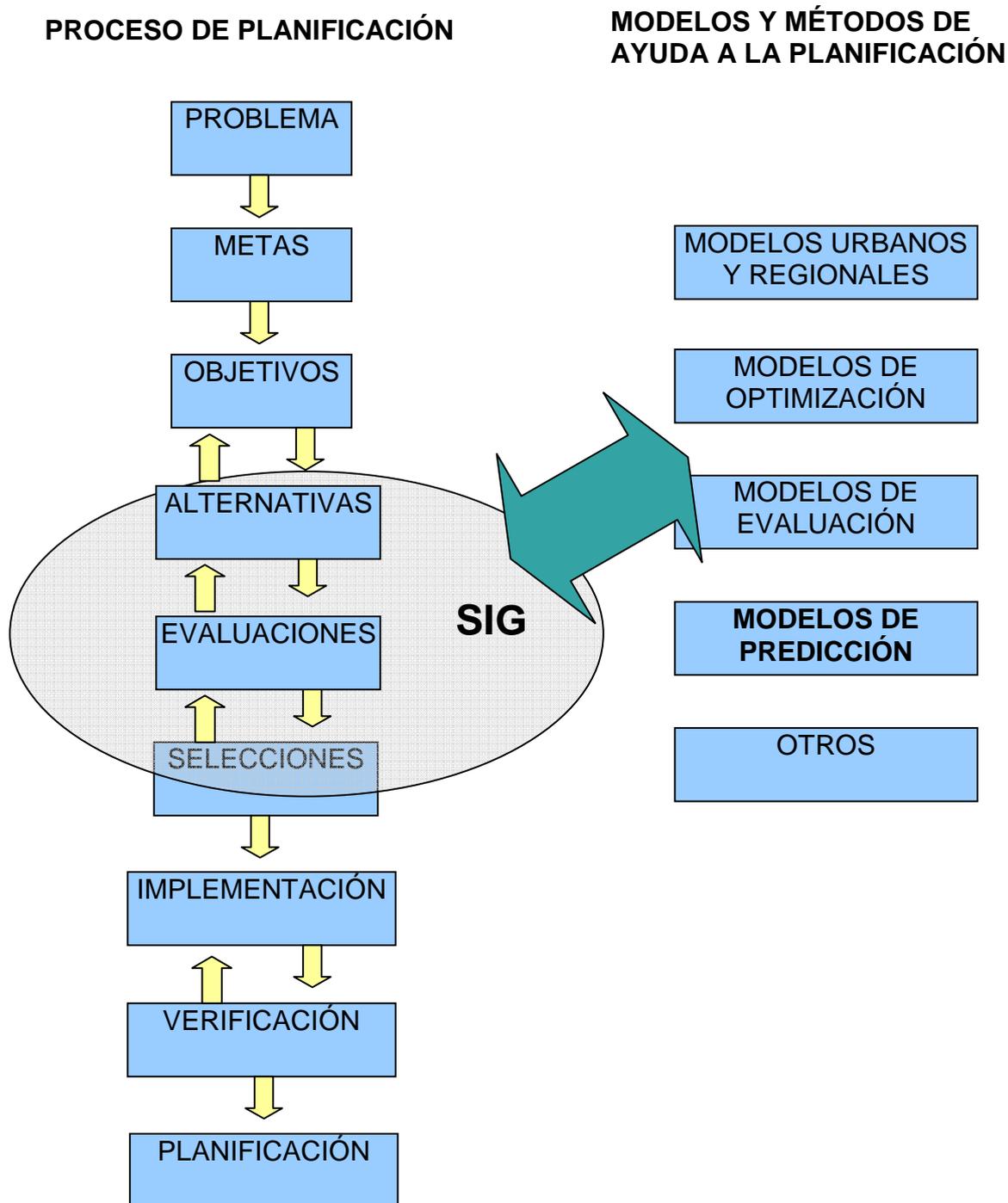
<b>Tabulación cruzada</b>	<b>Bosque 1986 (ha)</b>	<b>No-Bosque 1986 (ha)</b>	<b>Total (ha)</b>
<b>Bosque 2001 (ha)</b>	22102.40	1885.70	23988.11
<b>No-Bosque 2001 (ha)</b>	6530.74	6211.60	12742.34
<b>Total (ha)</b>	28633.14	8097.30	36730.4

*Tabla 3: Análisis de los resultados de GEOMOD al año 2001, versus los datos de interpretación de imagen satelital del año 2001 en la zona de estudio.*

<b>Tabulación cruzada</b>	<b>Bosque 2001 (ha)</b>	<b>No-Bosque 2001 (ha)</b>	<b>Total (ha)</b>
<b>Bosque 2010 (ha)</b>	21201.075	0	21201.1
<b>No-Bosque 2010 (ha)</b>	2787.03	12742.335	15529.4
<b>Total (ha)</b>	23988.105	12742.335	36730.4



*Figura 1: Organización de la información espacial en capas en un SIG (FAO, 2005).*



*Figura 2: Sistema de ayuda a la gestión integrando modelos y SIG. Tomado de Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio (Bosque, 2002).*

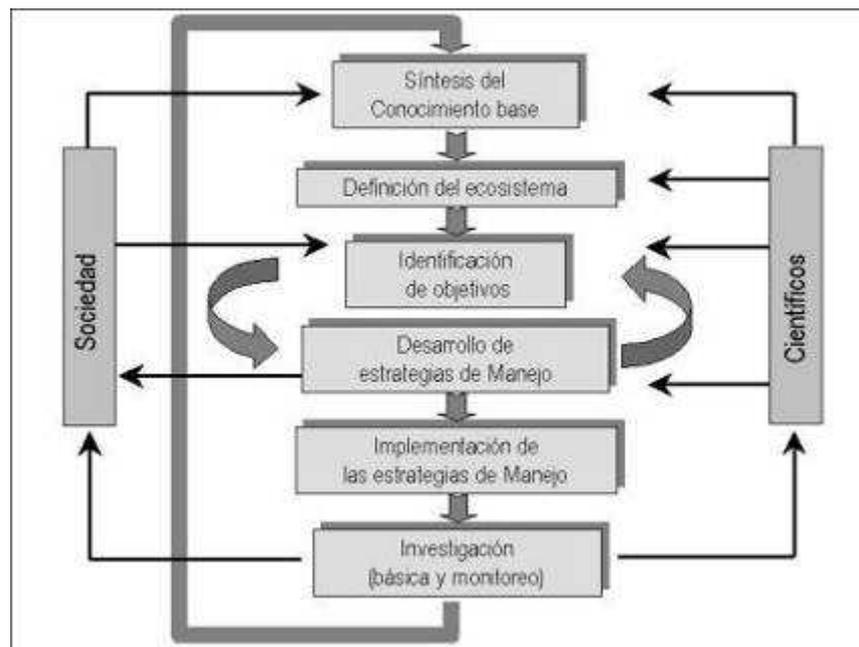
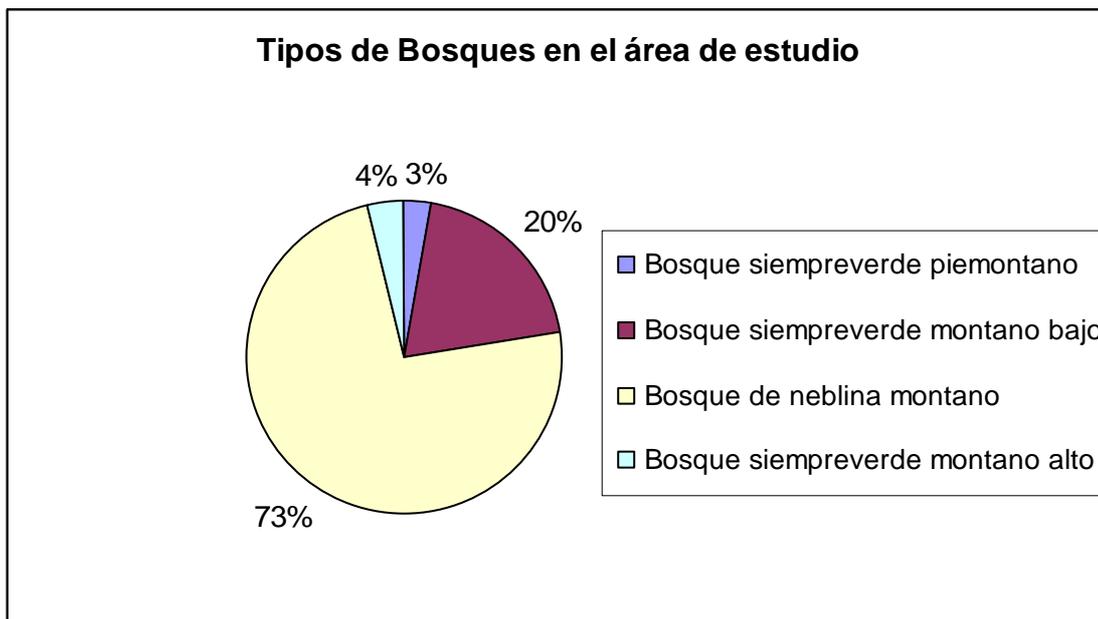


Figura 3. Pasos a seguir en el manejo de ecosistemas. Tomado de Esquema de las 5 S para la conservación de sitios (The Nature Conservancy, 2001).



Figura 4. Metodología de manejo de ecosistemas: La lógica tras el esquema de las cinco S (TNC, 2001).



*Figura 5. Porcentajes de los diferentes tipos de Ecosistemas de Bosques en la Cuenca Alta del Río Guayllabamba, Ecuador (Buenaño, 2007).*

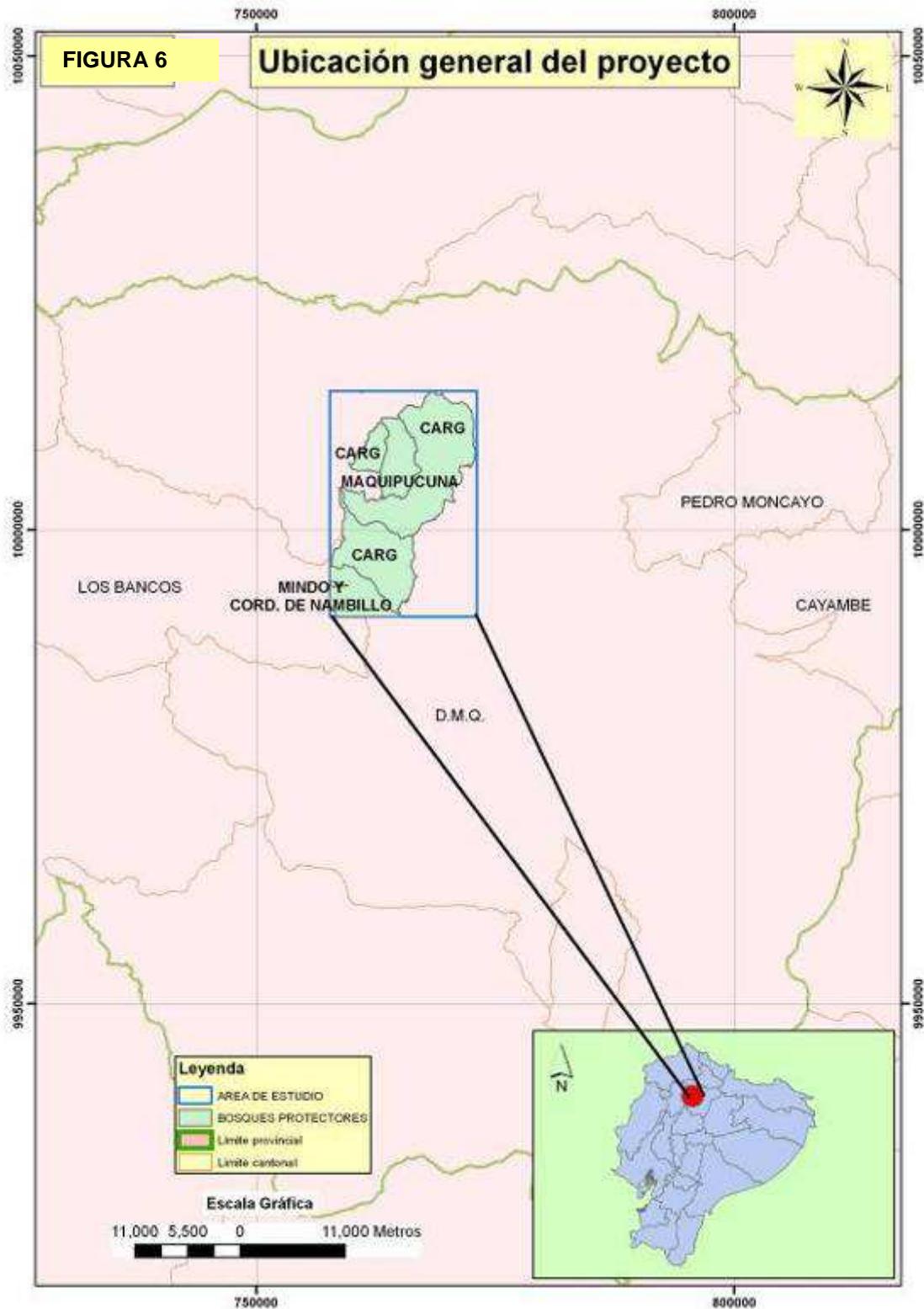


Figura 6: Ubicación general del proyecto en la CARG, Provincia de Pichincha, Ecuador.

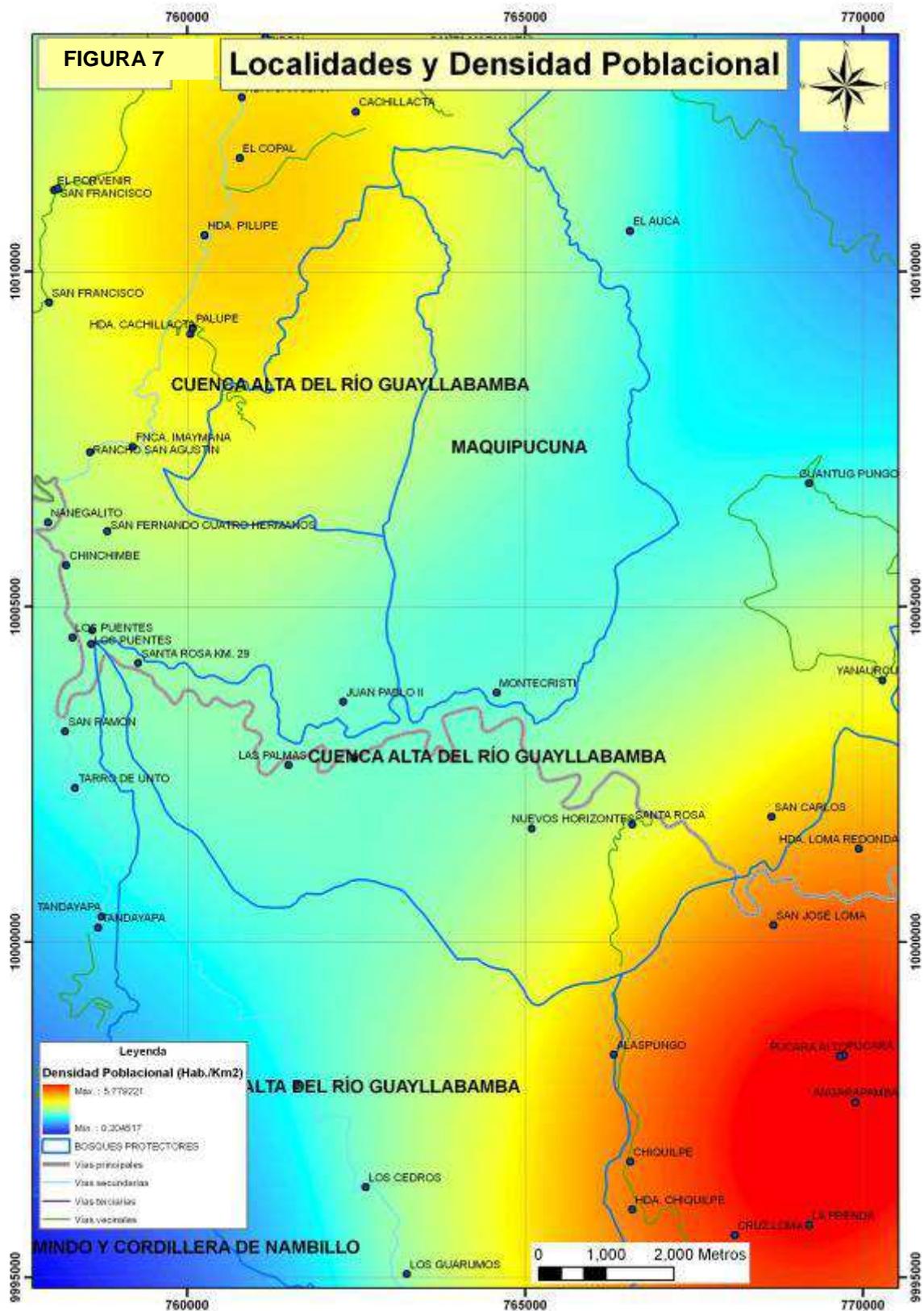


Figura 7: Localidades y densidad poblacional.

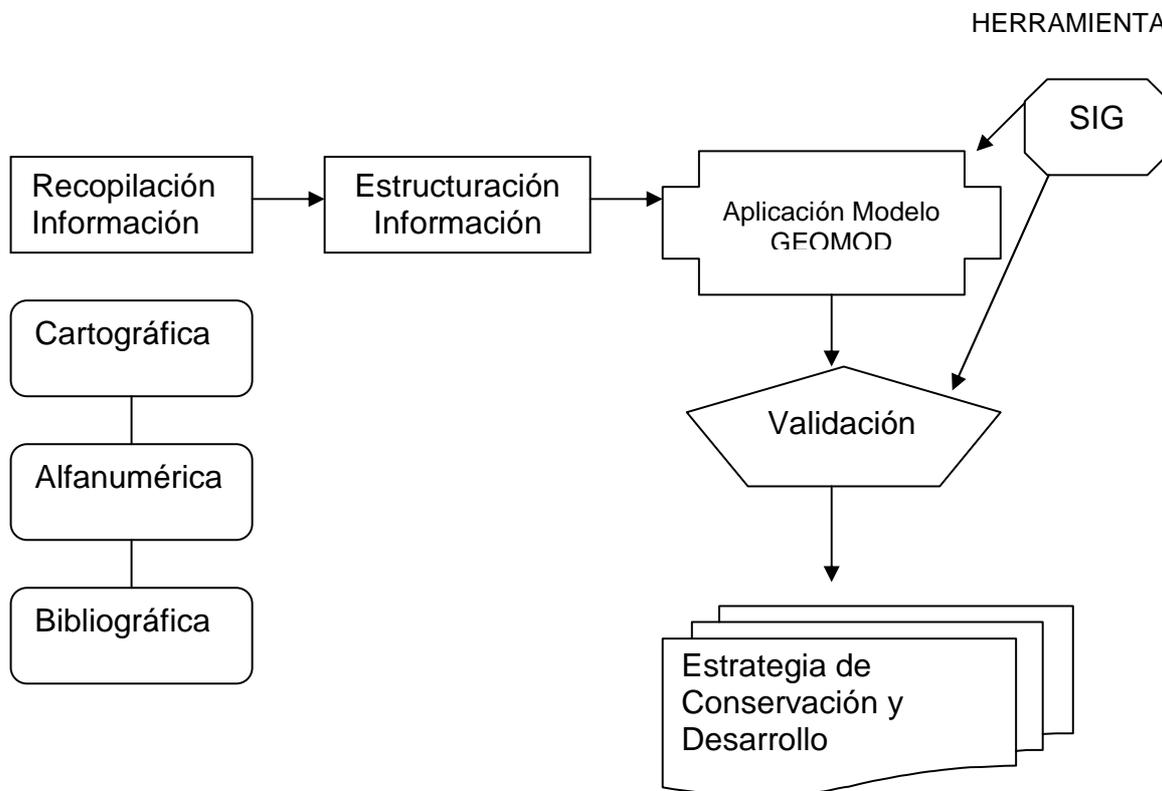


Figura 8: Proceso metodológico general del proyecto para la aplicación de GEOMOD.

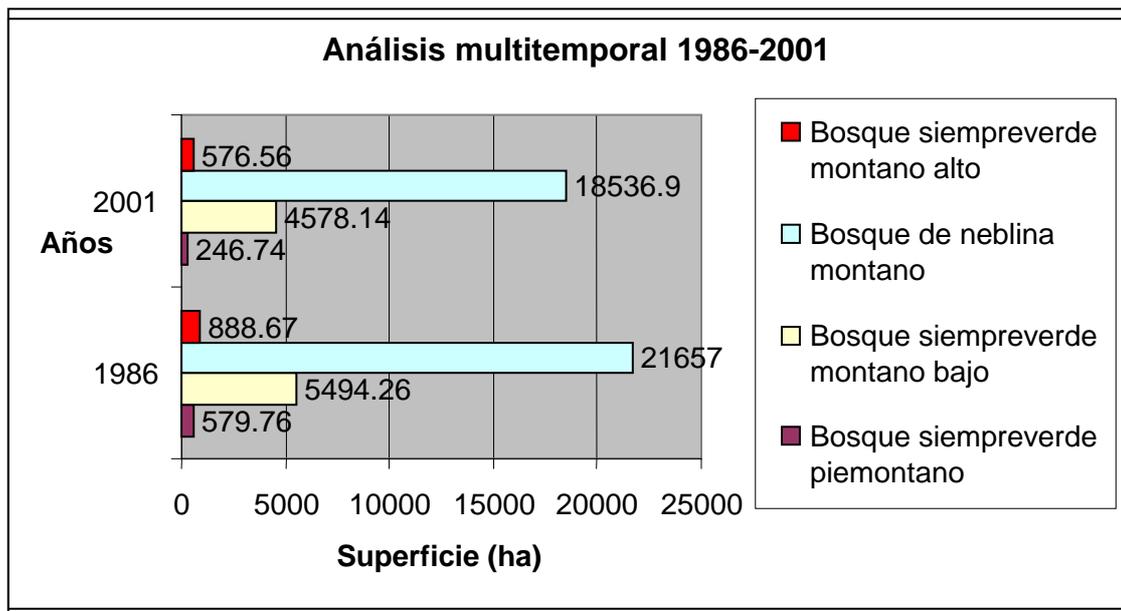


Figura 9: Gráfico Estadístico de Análisis multitemporal 1986-2001.

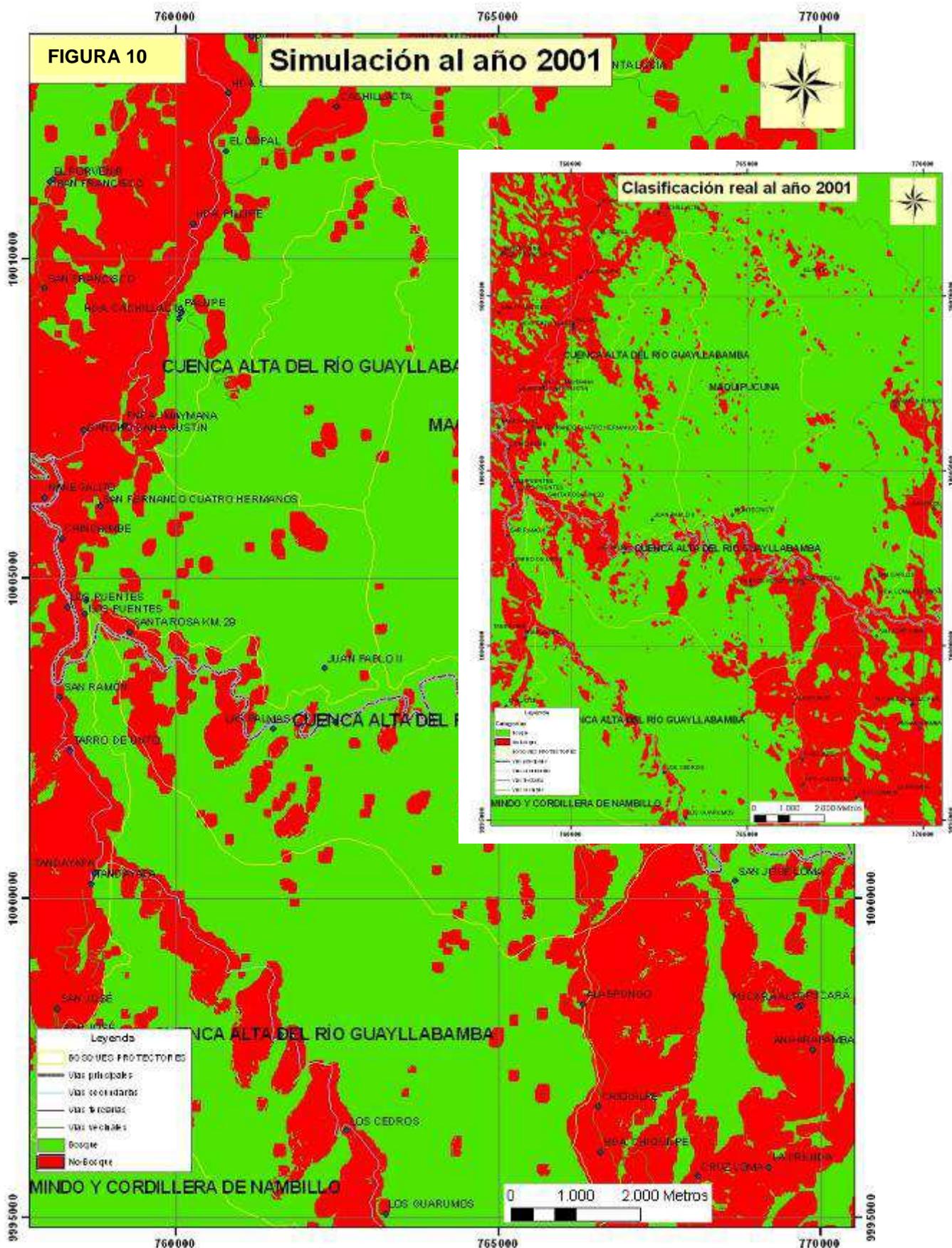


Figura 10: Simulación y clasificación real al año 2001.

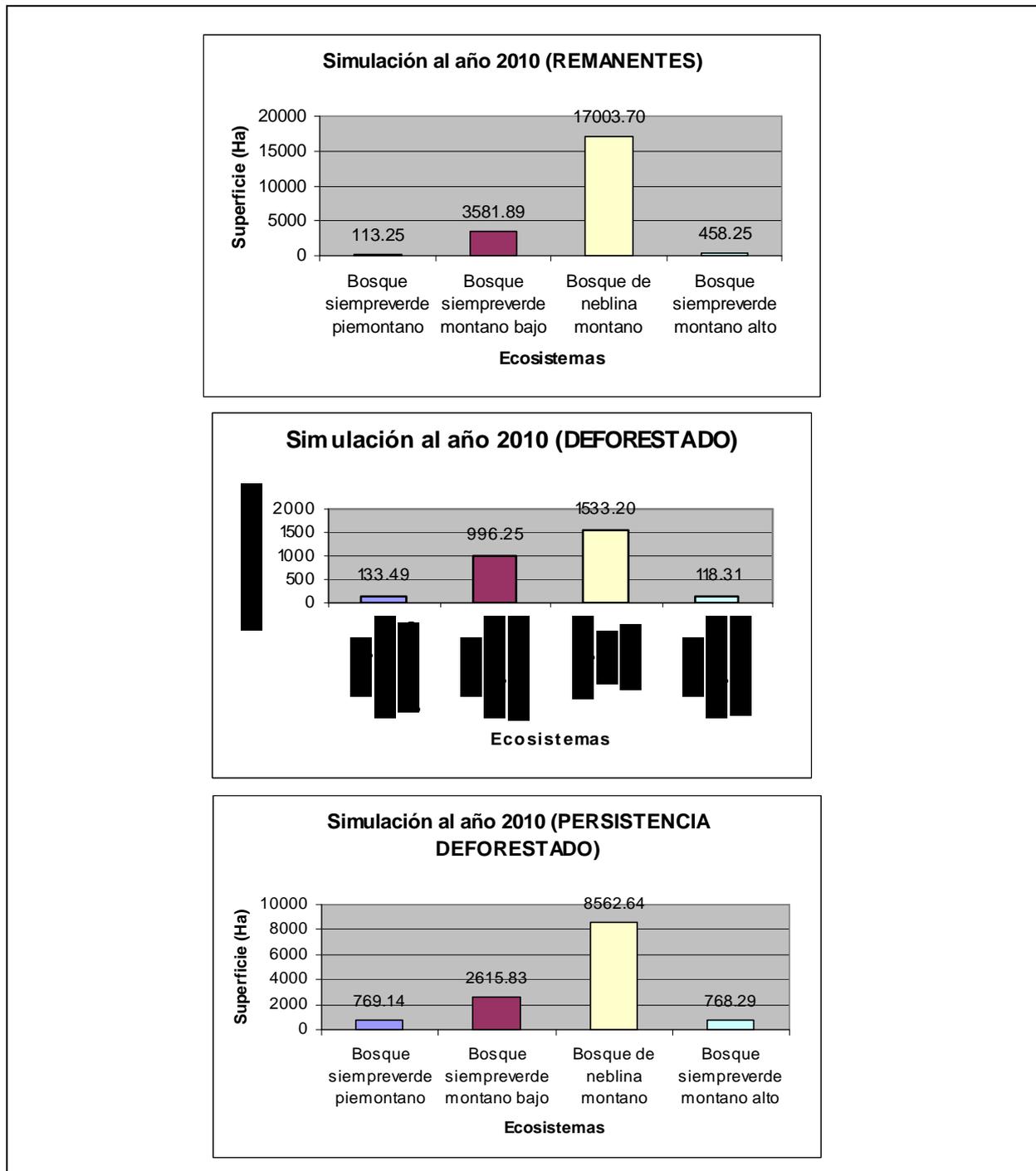


Figura 11: Gráficos estadísticos de la simulación al año 2010 (Remanentes, Deforestado y Persistencia Deforestado por Ecosistemas).

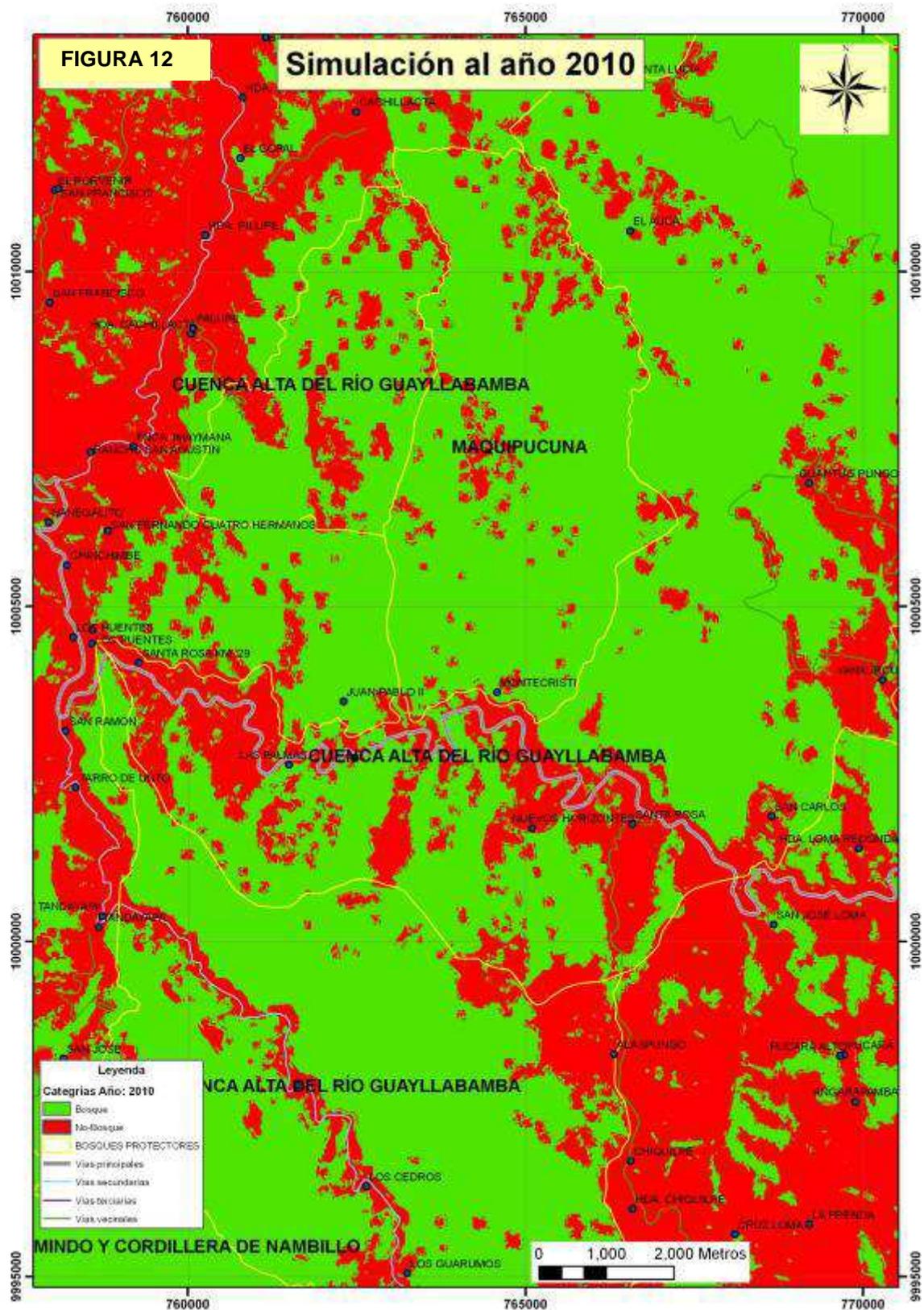


Figura 12: Simulación al año 2010.

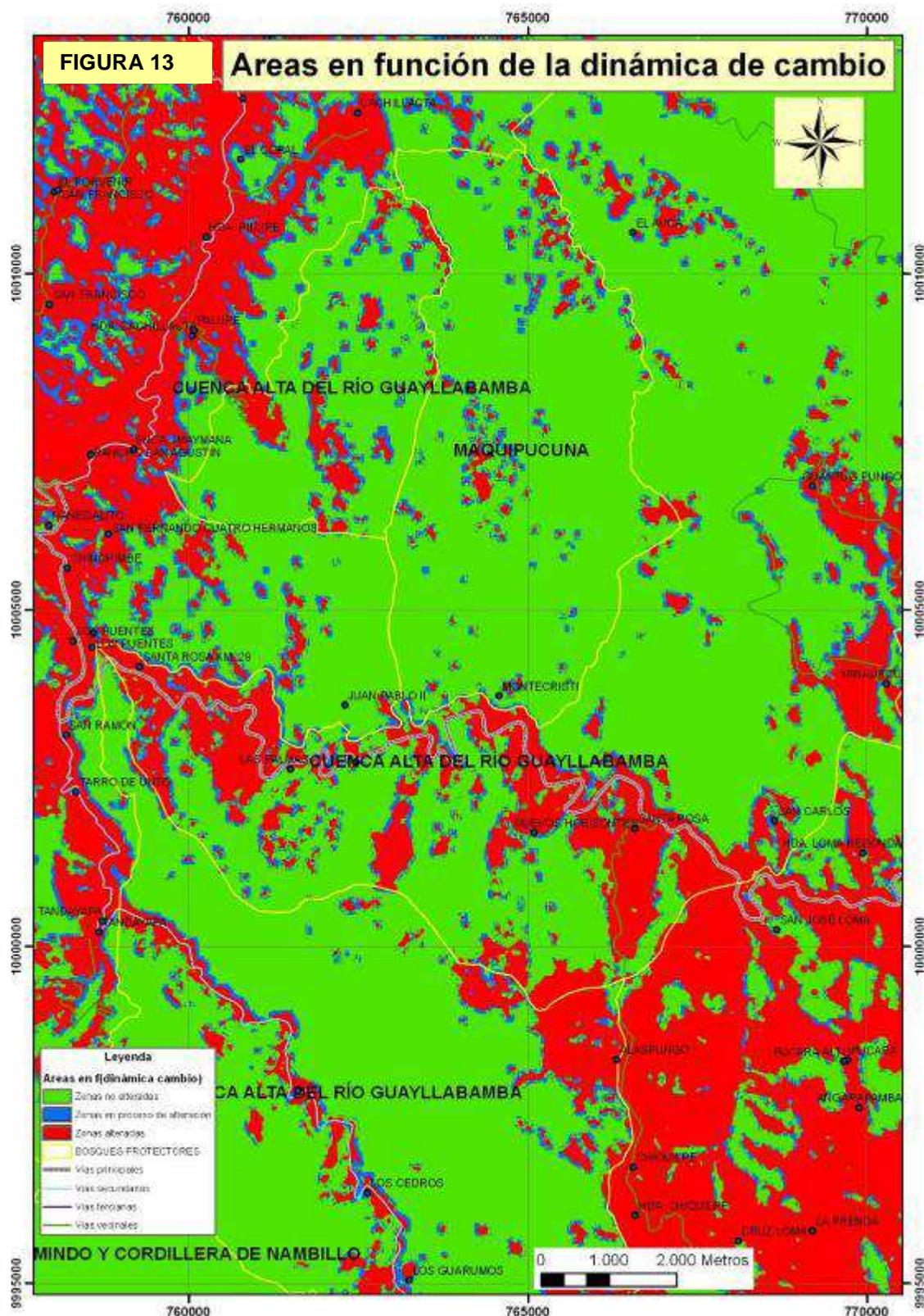


Figura 13: Áreas en función de la dinámica de cambio.

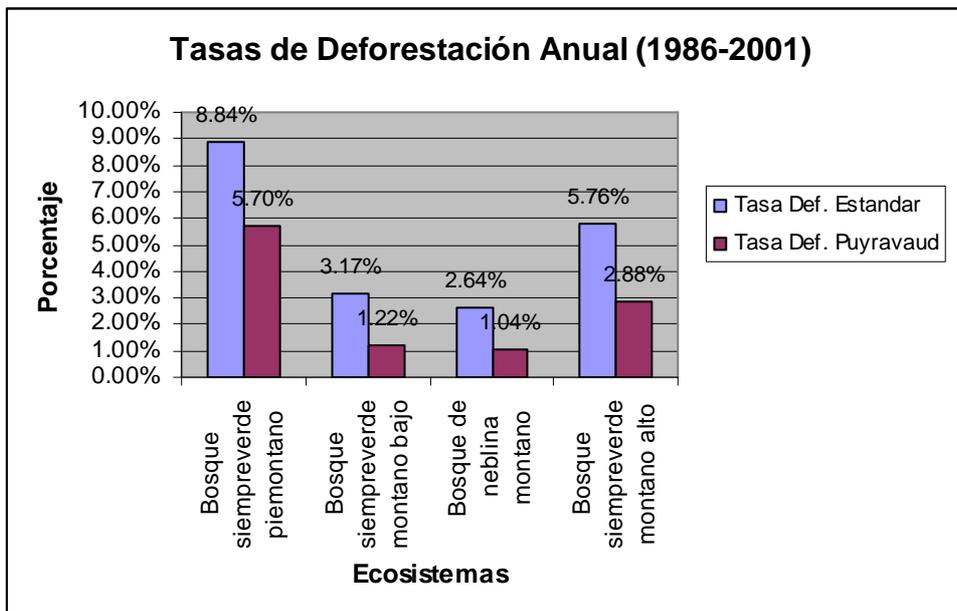


Figura 14: Gráfico Estadístico Tasas de Deforestación Anual (1986-2001)

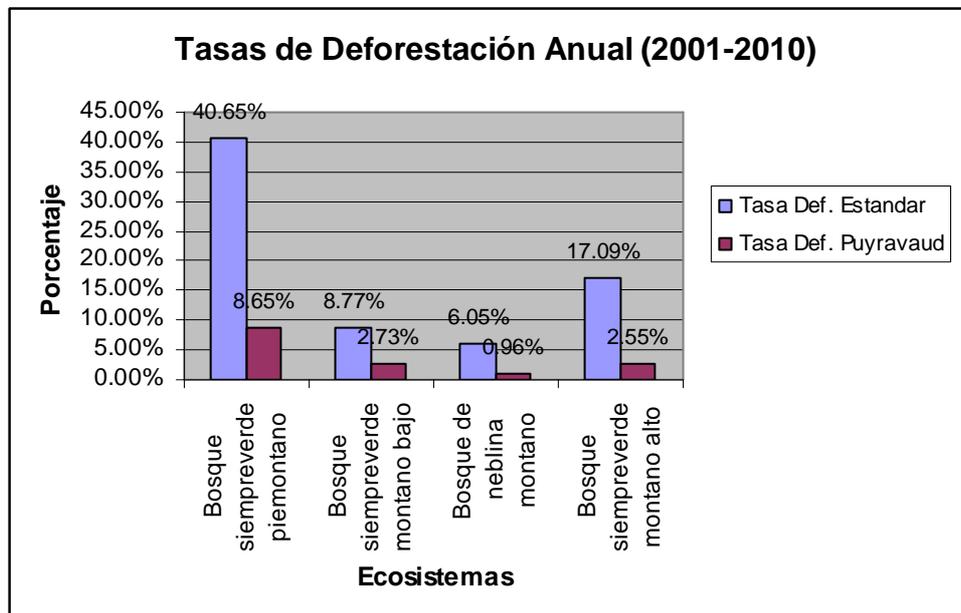


Figura 15: Gráfico Estadístico Tasas de Deforestación Anual (2001-2010)

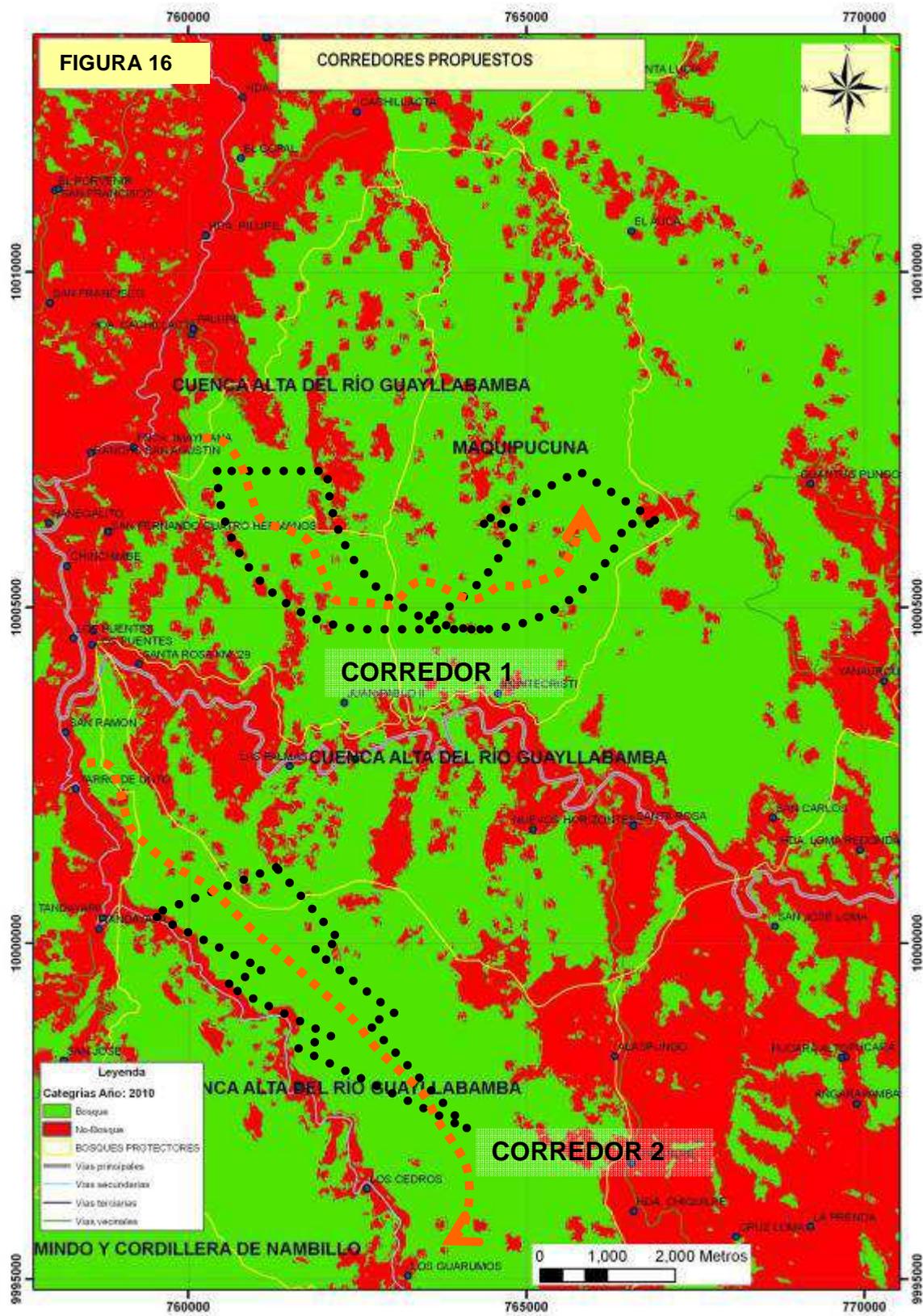


Figura 16: Corredores propuestos.

**ENTREVISTA**

Cuestiones tratadas:

- 1.- DISPONE DE TODOS LOS SERVICIOS BÁSICOS ?
- 2.- A QUÉ ACTIVIDADES ECONÓMICAS SE DEDICA PRINCIPALMENTE ?
- 3.- COMO MANEJAN LOS BOSQUES CERCANOS ?
- 4.- EXISTEN PROBLEMAS EN LA TENENCIA DE LA TIERRA ?
- 5.- LE INTERESA LA CAPACITACIÓN Y EDUCACIÓN AMBIENTAL ?

*Anexo a: Modelo de entrevista.*