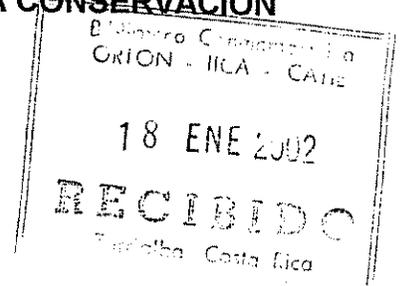


**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA  
PROGRAMA DE EDUCACIÓN PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACIÓN  
ESCUELA DE POSGRADO**



**PROBABILIDAD DE CAMBIO Y FACTORES ASOCIADOS A LOS PATRONES DEL  
USO DE LA TIERRA EN LA FRANJA COMPRENDIDA ENTRE LOS PARQUES  
NACIONALES VOLCÁN IRAZÚ Y VOLCÁN TURRIALBA**

Tesis sometida a la consideración de la Escuela de Postgrado, Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza y como requisito parcial para optar por el grado de:

*Magister Scientiae*

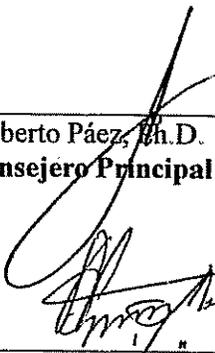
✓ Por  
Tania Bermúdez Rojas

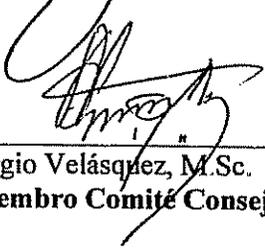
Turrialba, Costa Rica  
2001

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por el Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del Estudiante como requisito parcial para optar por el grado de:

*MAGISTER SCIENTIAE*

FIRMANTES:

  
\_\_\_\_\_  
Gilberto Páez, Ph.D.  
**Consejero Principal**

  
\_\_\_\_\_  
Sergio Velásquez, M.Sc.  
**Miembro Comité Consejero**

  
\_\_\_\_\_  
Estelle Motte, Dr. Sc.  
**Miembro Comité Consejero**

  
\_\_\_\_\_  
Ali Moslemi, Ph.D  
**Director Escuela de Posgrado**

  
\_\_\_\_\_  
Tania Bermudez Rojas  
**Candidata**

## **Dedicatoria**

Al Dr. Manuel Bermúdez Alvarez.....mi abuelo

## **Agradecimientos**

A David Bermúdez y Gladys Rojas, mis padres, por todo el apoyo y confianza que me brindaron en estos dos años.

A mi hermano Daniel por todos los sacrificios que hizo por mí.

Al resto de mi familia aquí en Costa Rica como en Chile, sé que siempre pensaron y esperaron lo mejor de mí.

A mi profesor consejero, Dr Gilberto Páez por su guía, enseñanzas y la dedicación que tuvo durante la realización de este trabajo.

A los miembros del comité, Sergio Velásquez por su gran dedicación en enseñarme sobre los Sistemas de Información Geográfica y a Estelle Motte por su aporte y la confianza depositada en mi trabajo.

Al personal del Laboratorio de SIG de CATIE por su ayuda y amistad, especialmente a Alexander González y Francisco Casasola.

Al CATIE, al Fondo Nacional de Incentivos del Ministerio de Ciencia y Tecnología, el Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (Conicit) y al ICE por la ayuda financiera brindada.

A Luz Angela, Judith, Karen, Jaime, Marco, Karla y Blanca..... mil gracias!!!! por ser mis amigos.

A Víctor por..... todo.

A mis ángeles que siempre me cuidan y protegen.

## **Contenido**

<b>1.Introducción</b>	<b>1</b>
1.1.Descripción del problema	1
1.2.Justificación	2
1.3.Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4.Hipótesis	4
<b>2. Revisión de literatura</b>	<b>5</b>
2.1.Deforestación tropical y la fragmentación de hábitat	5
2.1.1.El problema de la deforestación a nivel mundial	5
2.1.2.La deforestación en Costa Rica	6
2.2.Efecto de la deforestación	7
2.2.1. El impacto a la biodiversidad	7
2.2.2. El impacto a los suelos y el cambio climático	9
2.3 El rol de las Áreas protegidas y las políticas de conservación	9
2.4. Modelos de cambio de uso/cobertura de la tierra	11
<b>3. Metodología</b>	<b>14</b>
3.1 Descripción del área de estudio	14
3.2. Análisis espacial	16
3.2.1. Preparación e Interpretación de Fotografías aéreas y generación de Mapas de usos/cobertura de la tierra	17
3.3 Generación de datos espaciales	20
3.3.1. Unidad de información	20
3.3.2. Generación de la muestra	21
3.4 Estimación de índices descriptivos del paisaje para cada periodo de tiempo analizado	22
3.5. Modelos de análisis de cambio en el uso de la tierra	22

3.5.1. Cadenas o procesos de Markov	23
3.5.2. Simplificación sugerida por la importancia de las transiciones probabilísticas de los eventos	26
3.6 Factores que inciden en el cambio de uso/cobertura de la tierra	27
<b>4. Resultados y Discusión</b>	<b>32</b>
4.1. Selección del tamaño de la celda o "pixel " para los mapas del uso / cobertura de los tres periodos de tiempo	32
4.2. Determinación del numero de la muestra	32
4.3 . Cuantificación y descripción del uso / cobertura de la tierra para cada período de tiempo analizado	33
4.3.1. Descripción general	33
4.3.2. Índices de Diversidad, Contagio y Dominancia para el paisaje en los tres periodos de tiempo	35
4.4. Cambios en el uso / cobertura de la tierra entre los años 1978 a 1992 a 1998	41
4.5. Modelos de cambio del uso / cobertura de tierra	44
4.4.1 . Efecto de las variables explicativas sobre los cambios en el uso de la tierra en los dos modelos de transición	46
4.4.1.1.Efectos marginales para las transiciones a cobertura no boscosa	50
4.4.1.2.Efectos marginales para las transiciones a cobertura Boscosa	52
<b>5. Conclusiones</b>	<b>53</b>
<b>6. Recomendaciones</b>	<b>55</b>
<b>6. Bibliografía</b>	<b>56</b>

## RESUMEN

**Palabras claves:** Cambio de uso de la tierra, Parques Nacionales, Volcán Irazú, Volcán Turrialba, índices de paisaje, cadenas de markov, modelos logísticos

El cambio de uso /cobertura de la tierra en Costa Rica, provoca significativas modificaciones en el paisaje, tanto en áreas privadas como en áreas protegidas. En la zona comprendida entre los Parques Nacionales Volcán Irazú y Volcán Turrialba se determino la estructura espacial del paisaje, se analizaron los cambio del uso / cobertura de la tierra en un período que comprende 20 años (1978, 1992, 1998) y se identificaron los factores que han influido en dicho cambio.

La información necesaria para la investigación se obtuvo de interpretación de fotografías aéreas, por medio de Sistemas de Información Geográfica (SIG) e información secundaria de instituciones públicas y privadas. Luego, con la utilización de índices de diversidad y el análisis de procesos de markov se estimo la estructura y los cambios de uso / cobertura de la tierra para cada periodo de tiempo analizado y por medio de regresiones logísticas multinomiales se estimo los factores asociados a los cambios o estabilidad de los usos/ coberturas de la tierra.

Los resultados indican que existe una tendencia del paisaje a agregarse, sin presentar dominancia por ningún tipo de uso / cobertura de la tierra, y por una ligera disminución de la diversidad del paisaje. La faja estudiada muestra una pequeña pero sostenida recuperación de zonas boscosas y de vegetación de páramo, con transiciones de usos muy dinámicos de pastos y cultivos, que tienden a cambiar entre ellos; también se observa disminución del suelo desnudo.

Los factores que inciden en las transiciones de cobertura boscosa a no boscosa en los 20 años analizados, presentan significancia con excepción de las zonas de vida presentes en el área de estudio. La política del país en materia de áreas protegidas contribuye positivamente al mantenimiento de la cobertura boscosa a pesar de existir ocupación dentro de sus áreas, concluyendo que existe un manejo adecuado de los dos Parque Nacionales.

## ABSTRACT

Keywords: Land use change, National Parks, Volcano Irazú, Volcano Turrialba, landscapes indexes, markov chains, logistical models.

The land use/cover change in Costa Rica causes significant modifications in the landscape, as much in private areas as in protected areas. In the area between Volcano Irazú National Park and Volcano Turrialba National Park, the space structure of the landscape was determinate; its analyzes the change of the land use / covering for a period of 20 years (1978, 1992, 1998), as well as, the factors that have influenced in this change.

The information to carry out this work was obtained through air picture, the use of Geographical Information Systems (GIS) for its analyze and secondary information from public and private institutions. Then, using diversity indexes and markov probabilities the structure and the land use/cover change for every analyzed period was determinate. Finally, using multinomial logistic models, the factors associated to the changes or permanencies, were determined too.

The results suggests a tendency of the landscape to be added without presenting dominance for any type of land use / cover, was determinate and a small decreasing of landscape diversity was found too. The strap study area, presents a small and constant recovery of forest areas and moor vegetation with very dynamic uses as the grasses and cultivations, but that they spread to change among them; a decrease of naked soil is also observed.

The factors that influences in the transitions of change to forest covering as to non-forest in the 20 years analyzed, present statistical significance except for the life zones inside the study area. The protect areas policy of the country contribute positively to the maintenance of the forest covering in spite of existing occupation inside them, concluding that an appropriate management of the two National Park is happening.

## Lista de cuadros

<b>Cuadro 1.</b>	Investigaciones de algunos autores sobre cambio de uso/ cobertura.	13
<b>Cuadro 2.</b>	Secuencia y características básicas de las fotografías	18
<b>Cuadro 3.</b>	Tipología de uso/ cobertura presentes en el área de investigación	19
<b>Cuadro 4.</b>	Matriz de probabilidades markovianas para los cambios ocurridos entre dos instantes	
<b>Cuadro 5.</b>	Matriz de agrupamiento y generación de nuevas variables	27
<b>Cuadro 6.</b>	Factores claves que inciden en el cambio de uso/ cobertura	29
<b>Cuadro 7.</b>	Dirección esperada de los efectos marginales para cada variable explicativa	31
<b>Cuadro 8.</b>	Área, diversidad, dominancia y otros parámetros espaciales estimados para todo paisaje en los tres años analizados	36
<b>Cuadro 9.</b>	Parámetros espaciales estimados para cada tipo de uso/ cobertura de la tierra para los tres años analizados en la zona de estudio	37
<b>Cuadro 10.</b>	Matriz de probabilidades de transición markovianas para el período de 1978 a 1992	42
<b>Cuadro 11.</b>	Matriz de probabilidad de transición markovianas para el período de 1992 a 1998	43
<b>Cuadro 12.</b>	Matriz de probabilidades de transiciones markovianas para usos/ coberturas agrupadas, en el período de 1978 a 1992	43
<b>Cuadro 13.</b>	Matriz de probabilidades de transición markovianas para usos/ coberturas agrupadas, en el período de 1992 a 1998	44
<b>Cuadro 14.</b>	Estadística descriptiva de las variables explicativas utilizadas en el modelo	44
<b>Cuadro 15.</b>	Estimación de la capacidad predictiva del modelo para el período 1978 a 1992	45
<b>Cuadro 16.</b>	Estimación de la capacidad predictiva del modelo para el período 1992 a 1998	46

<b>Cuadro 17.</b> Parámetros estimados por medio de razón de máxima verosimilitud, para el período comprendido de 1978 a 1992.	47
<b>Cuadro 18.</b> Parámetros estimados por medio de razón de máxima verosimilitud, para el período comprendido de 1992 a 1998	48
<b>Cuadro 19.</b> Parámetros estimados por medio de los efectos marginales, para el período comprendido de 1978 a 1992	49
<b>Cuadro 20.</b> Parámetros estimados por medio de los efectos marginales, para el período comprendido de 1992 a 1978	50
<b>Cuadro 21.</b> Dirección de los efectos marginales esperados y observados de las variables independientes para cada tipo de transición para todos los períodos de tiempo analizados.	52

## **Lista de Figuras**

<b>Figura 1.</b>	Forma y tamaño del área de estudio	14
<b>Figura 2.</b>	Ubicación de la zona de estudio	16
<b>Figura 3.</b>	Distribución de los puntos de muestreo en el área de estudio	21
<b>Figura 4.</b>	Proceso de cambio de un estado inicial a otro estado del uso/ cobertura de la tierra	25
<b>Figura 5.</b>	Varianza muestral en función del uso/ cobertura de la tierra Con tamaño de píxel de 20x20 metros	33
<b>Figura 6.</b>	Uso / cobertura de la tierra en la zona de estudio para el año 1978	38
<b>Figura 7.</b>	Uso / cobertura de la tierra en la zona de estudio para el año 1992	39
<b>Figura 8.</b>	Uso / cobertura de la tierra en la zona de estudio para el año 1998	40

## **Lista de Anexos**

- Anexo 1.** Distancia a carreteras (metros) en la zona de estudio
- Anexo 2.** Distancia a casas y lecherías (metros), en la zona de estudio
- Anexo 3.** Distancia como un costo de acceso (metros), en la zona de estudio
- Anexo 4.** Mapa de áreas Reforestadas y Deforestadas entre los años 1978 y 1992.
- Anexo 5** Mapa de áreas Reforestadas y Deforestadas entre los años 1992 y 1998
- Anexo 6** Indices descriptivos utilizados para el paisaje estudiado.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Descripción del problema

El planeta tierra está sufriendo considerables cambios ambientales, caracterizados por una profunda degradación de hábitats naturales, con serias implicaciones para la conservación de la diversidad biológica y la sostenibilidad de los recursos naturales (Bennett 1999).

Los cambios del paisaje constituyen una de las principales amenazas para la biodiversidad y la sustentabilidad del desarrollo humano. Aunque es evidente que el paisaje alterado se ha incrementado en décadas recientes, el detalle de los patrones y procesos fundamentales de la pérdida de hábitat es poco conocido (Groom 1997).

El crecimiento demográfico a provocado cambios en los bosques quedando cada vez menos superficie de la tierra que no se ve afectada por interferencias humanas. El medio ambiente se ha modificado severamente ha tal extremo que los patrones más comunes en el paisaje son mosaicos de asentamientos humanos, terrenos agrícolas y fragmentos dispersos de ecosistemas naturales (Bennett 1999). De esta forma se puede afirmar que el cambio indiscriminado en el uso de la tierra constituye uno de los más importantes factores que provoca el deterioro, la deforestación y fragmentación de hábitat.

El cambio de bosque a pasturas, por ejemplo, provoca la erosión y reducción de los suelos, incrementa la frecuencia y severidad de las inundaciones y aumenta la sedimentación. Muchas de las tierras que han sufrido una pérdida de cobertura, para ser utilizadas en actividades más productivas, conforme pasa el tiempo, ven disminuida su capacidad de producir cultivos, siendo económicamente poco rentables para la producción agrícola. Sin olvidar, el efecto en la disminución de especies, el uso indiscriminante de agroquímicos para hacerlo más productivo y su contribución al calentamiento global (Houghton 1994).

El efecto en la disminución y extinción de especies debido a la reducción, fragmentación y degradación de hábitats es una de las más serias amenazas a la biodiversidad mundial, tradicionalmente las estrategias de conservación de biodiversidad han sido enfocadas en el

establecimiento de reservas naturales, con el propósito de mantener muestras representativas de las especies existentes, ecosistemas y procesos ecológicos relacionados. Pero muchas de estas áreas protegidas se encuentran aisladas en el paisaje, lo que representa una amenaza para las comunidades y especies debido a que limita la probabilidad de migración, resultando en procesos demográficos y genéticos que amenazan y degradan la funcionalidad de los ecosistemas (Laurance 1997).

El efecto provocado por el cambio de uso/cobertura de la tierra en Costa Rica, ha producido grandes cambios en el paisaje. Este es el caso de la zona comprendida entre los Parques Nacionales Volcán Irazú y Volcán Turrialba, donde por causas antrópicas han quedado poco a poco aisladas, convirtiéndose en islas boscosas sin conexión, ocasionando la pérdida de la biodiversidad. También, esto ha provocado la degradación del suelo y ha aumentado los sedimentos en las cuencas (Bolaños 2000). Por lo tanto, se hace necesario enfocar los esfuerzos de investigación en esta zona, para así tomar acciones pertinentes para el manejo sustentable y eventualmente propiciar su recuperación.

## **1.2 Justificación**

El nuevo paradigma de la sustentabilidad y el manejo de ecosistemas requiere de un buen conocimiento de la dinámica del paisaje y los procesos ecológicos para dar respuestas sobre el dónde, cuando y él porque, que eventualmente pueden ser utilizadas por planificadores y tomadores de decisiones.

Es indispensable mantener las zonas fuera de las áreas protegidas en un buen estado; entender el funcionamiento y estructura del paisaje, integrando aspectos biológicos y socioeconómicos. El manejo de los recursos, en particular, necesita de la integración de una efectiva evaluación de las consecuencias sociales, ambientales y escenarios con alternativas de manejo.

El área comprendida entre los Parques Nacionales Volcán Irazú y el del Volcán Turrialba, presenta un alto potencial hídrico y ecológico. En esta zona nacen varios ríos que alimentan las cuencas del río Chirripó, Reventazón, Sarapiquí y el Grande de Tárcoles que son de gran importancia para el país. En el área se ven representadas ocho zonas de vida, con gradientes de altitud que van desde los 3432 msnm a los 240 msnm, lo cual genera una gran diversidad de especies de plantas y animales (Bolaños et al 2000). Dada la riqueza de biodiversidad y su importancia en términos de recursos hídricos, es importante comprender los procesos de cambio y uso de suelo que han afectado a la zona a lo largo del tiempo, a los fines de elaborar estrategias de manejo que garanticen el uso racional y sustentable de los distintos recursos albergados en la zona de estudio.

### **1.3.Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

- Contribuir al conocimiento y el diseño de estrategias que favorezcan la conservación y uso sustentable de los recursos naturales por medio del conocimiento de ciertos factores que inciden en el cambio de cobertura vegetal en la franja comprendida entre el volcán Irazú y el volcán Turrialba.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Describir la estructura del paisaje en el área comprendida entre el Parque Nacional Volcán Irazú y el Parque Nacional Volcán Turrialba.
- Estimar las probabilidades de cambio de la cobertura vegetal y patrones de uso de la tierra en los últimos 20 años, en la zona entre los Parques Nacionales Volcán Irazú (PNVI) y Volcán Turrialba (PNVT).
- Caracterizar algunas variables (biofísicas y socioeconómicas) que han incidido en el cambio de la cobertura vegetal en la zona comprendida entre los Parques Nacionales Volcán Irazú y Volcán Turrialba.

- Ofrecer elementos indicativos para el diseño de estrategias de manejo sostenible en el largo plazo, en la zona de estudio.

#### **1.4 Hipótesis**

1. El patrón del uso de la tierra dentro y fuera de las áreas protegidas (PNVI, PNVT) es dinámico y ha cambiado significativamente en el lapso de 20 años.
2. Los factores que inciden en el cambio del uso del suelo actúan en forma diferenciada.

## **2. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1.. Deforestación tropical y la fragmentación de hábitat**

#### **2.1.1.El problema de la deforestación a nivel mundial.**

El cambio de uso de la tierra es un problema que se extiende a nivel mundial, esto ha provocado una disminución del área natural normalmente cubierta con una vegetación boscosa, trayendo como consecuencia un incremento en la deforestación y fragmentación del paisaje (Houghton 1994)

La deforestación a nivel mundial se estimó en 10.7 millones de ha por año; más del doble de la superficie de Costa Rica. El área de tierra productiva es hoy día aproximadamente  $4700 \times 10^6$  ha, donde el 30% de esa tierra es dedicada a cultivos y el restante 70% son pasturas permanentes. Esas tierras comprenden aproximadamente el 32% de la superficie del planeta (Houghton 1994).

A pesar de la preocupación generalizada por la degradación de hábitat en los trópicos, la deforestación en los países tropicales continúa su curso. Al examinar los factores que provocan la deforestación en los trópicos, por medio de variables socioeconómicas, se encuentra que las más significantes correlaciones de deforestación varían de una región a otra del mundo. Por ejemplo, para África, las tasas de deforestación están más fuertemente relacionadas con la población rural que con la población urbana, pero se observa lo contrario en Asia. La deforestación para América Latina está correlacionada con el incremento de las áreas de pasturas, así como la de otros cultivos, además de la distribución de la tierra y la reforma agraria, donde mucho de las tierras están usadas ineficientemente para la ganadería (Bawa y Dayanandan 1997).

La extensión de los bosques naturales, solo en Centroamérica está disminuyendo aun ritmo alarmante; por ejemplo en el período 1990-1995 hubo una pérdida de alrededor de 29 millones de ha, a sea, el 2,3 % de la superficie existente en 1990. Esta deforestación es el producto de las políticas gubernamentales de desarrollo y colonización, especialmente de la conversión de terrenos forestales a la agricultura y ganadería; la colonización espontánea; la

extracción de leña; la sobre- explotación industrial en forma irracional; los incendios forestales; las plagas y enfermedades. (Fao 2000; Richters 1995).

### **2.1.2.La deforestación en Costa Rica**

Costa Rica esta conformado por una variedad de ecosistemas definido por una compleja combinación de microclimas, topografías y distribución espacial de la precipitación (Sanchez-Azofeifa 1996) .Esas variables combinadas con una gran variabilidad de tipos de suelo, y el hecho de formar un puente entre América del Norte y del Sur explican su alta riqueza ecológica.

Se estima que el territorio de Costa Rica alberga el 5% de la biodiversidad mundial, compuesto de 12000 especies de plantas, 848 de aves, 205 mamíferos y 218 reptiles, más un número indeterminado de artrópodos (INBIO 2000), teniendo casi todos los ecosistemas principales de Centroamérica y del sur de México representados en el país (Watson et al 1998).

Sader y Joyce (1988), localizaron los límites del bosque y otros atributos del paisaje en cuatro períodos de referencia entre 1940-1983. Encontraron que la deforestación en los primeros períodos ocurre predominantemente en el bosque seco; en períodos intermedios se ven más afectados las zonas tropicales, húmedo premontano y muy húmedo. Para 1983, solamente terrenos accidentados y con alta cantidad de precipitación retenían una relativa porción de bosque no perturbado. Además, se observó una mayor deforestación en las tierras bajas de la región atlántica, debido probablemente a la apertura y mejoramiento rutas de transporte en la zona.

El desarrollo de carreteras fue un importante agente de cambio en todos los períodos de referencia ya que proporcionó acceso al bosque, ya para 1977 la mayor parte de las regiones del país han sido atravesadas por carreteras. Hay que destacar que existen ciertas lagunas en las bases de datos utilizados por los investigadores que les hace imposible caracterizar los bosques en regeneración.

Otros estudios, sobre el cambio de uso de la tierra y deforestación en Costa Rica, estiman que cerca de 50% de la cobertura original de bosque se ha perdido, decrecieron de 3240000 de ha (63.5 % del total del país) en 1961 a 1638000 ha (32.1% total del país) en 1982. En 20 años disminuyó en más del 50 %, siendo la tasa de deforestación del 3% anual. La cantidad de las tierras en uso permanente y de cultivos anuales y otros usos tiene una permanencia constante desde 1961(Hall et al 2000).

## **2.2.Efecto de la deforestación**

### **2.2.1. El impacto a la biodiversidad**

El cambio de uso de la tierra conlleva a una disminución de la cobertura vegetal o sea deforestación y fragmentación del paisaje: Un análisis del cambio de uso de la tierra debe considerar los siguientes elementos: extensión, intensidad y frecuencia del cambio. Estas variables permiten evaluar las condiciones abióticas del ecosistema afectado, la disponibilidad de recursos, así como las interacciones que se llevan a cabo en dicho ecosistema. El cambio de uso del suelo afecta la variabilidad desde el nivel genético, fenotípico, poblacional hasta la suprapoblacional (poblaciones de diferentes localidades) (Martinez 1998). Las prácticas relacionadas con el uso de la tierra es una de las mayores causas de la reducción de la biodiversidad en las recientes décadas (Soulé 1991).

Dale et al (1994), proponen un método para examinar los efectos potenciales de la fragmentación del bosque sobre la biodiversidad, considerando los cambios en el uso de la tierra y las características de las especies susceptibles. Ellos trabajaron en la Amazonía Brasileña, con nueve grupos de animales, caracterizándolos en base a la habilidad de cruzar claros y a sus requerimientos de superficie. La probabilidad de extinción de especies animales debido a la destrucción del hábitat, se estimó en un período de 40 años bajo tres escenarios de prácticas de uso de la tierra simulada por medio de un modelo.

Los escenarios que propusieron dichos autores incluye el uso típico de la tierra de Rondonia Central, Brasil y dos prácticas extremas de uso de la tierra que cubren el rango de los posibles cambios en el uso agrícola. Entre los resultados se determinó que los animales con una habilidad para cruzar claros proporcional a los requerimientos de superficie, respondieron similarmente a la fragmentación independientemente a su filiación taxonómica

y el hábitat disponible para estas especies es proporcional a la cantidad de bosque remanente bajo los tres escenarios de manejo agrícola. Por el contrario, las especies que tienen grandes requerimientos de área pero que solo son capaces de cruzar pequeños claros, son afectados adversamente por la fragmentación del bosque.

Para estudiar los efectos de la fragmentación del bosque, se considero una rana tropical, considerando su habilidad para cruzar claros, requerimientos de área, de hábitat especiales y los efectos del borde. Para el peor de los escenarios de manejo de la tierra, la habilidad de cruzar claros y los requerimientos de superficie, implican para la rana que solo el 60% del bosque que queda después de 7 años de manejo es un hábitat adecuado. Si se toma en cuenta los requerimientos del hábitat para cría y los posibles efectos de borde, se reduce en un 39% el hábitat adecuado para la rana.

White et al (1997), examinaron los impactos en la biodiversidad de un paisaje debidos a posibles patrones de modificación de la tierra. Los datos utilizados incluyeron un mapa actual del área de estudio, seis mapas de distribuciones futuras del hábitat que resultan de diferentes escenarios de desarrollo del suelo, una lista de todas las especies de aves, mamíferos, reptiles y anfibios de la zona, sus asociaciones de hábitat y los requerimientos de espacio de las especies<sup>1</sup>. La biodiversidad se midió por riqueza de especies y abundancia del hábitat. Se consideró que la extinción de especies ocurría cuando no tenía área de hábitat, estimando su proporción en cada paisaje futuro y presente. Entre los resultados encontrados tenemos que la riqueza de las especies cambió poco del presente al futuro, aunque siempre existieron grandes riesgos distintivos para la abundancia de hábitat en paisajes, que fueron extrapolados a partir de tendencias actuales o patrones de zonificación opuestos a paisajes en los cuales las actividades de desarrollo siguieron patrones restringidos. Estos resultados se evaluaron usando simulaciones de Monte Carlo y pruebas de sensibilidad para requerimientos de áreas.

---

<sup>1</sup> Los requerimientos de área se obtuvieron por medio de rangos de hogar, densidades de poblaciones muestreadas o requerimientos genéticos de área que incorporan distancias de dispersión.

### **2.2.2. El impacto a los suelos y el cambio climático**

La deforestación y el cambio de uso de la tierra provoca un gran número de efectos adversos a nivel ecológico, como disminución en la protección de cuencas, erosión y pérdida de nutrientes incrementos de sedimentos en los ríos, cambio climático tanto local como globalmente debido al aumento de emisiones de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O (Lambin 1994, Detwiler et al 1988)

La capa de humus provista por la cobertura boscosa y la ausencia de un uso intensivo facilitan el proceso de infiltración e inhibe degradación y desecamiento del suelo. Los suelos deforestados tienen poca capacidad de infiltración y favorecen la escorrentía superficial, lo que provoca la erosión, fuente principal de sedimentos de los ríos. Además, la densidad del suelo, puede ser influenciada fuertemente por el cambio de uso / cobertura de la tierra (Stadtmüller 1994).

Detwiler y Hall (1988) estimaron que la emisión anual neta de carbono en forma de CO<sub>2</sub> esta causada principalmente por la deforestación tropical y en segundo lugar por el uso de combustibles fósiles. También se ha reportado que los suelos que recientemente han establecido pasturas emiten mayor magnitud de N<sub>2</sub>O que los suelos forestales. Esta tendencia similar fue encontrada para el óxido nítrico NO, el cual es precursor del ozono troposférico uno de los gases de efecto invernadero (Keller et al 1993).

### **2.3 El rol de las Áreas protegidas y las políticas de conservación.**

Entre las medidas que los gobiernos han impulsado para la conservación de la biodiversidad tenemos la creación de áreas protegidas y la implementación de políticas de conservación.

La UICN, define un área protegida como tierra y/o mar que es dedicado a la protección de la diversidad biológica, y los recursos naturales y culturales asociados, manejado a través de leyes u otros métodos efectivos (UICN 1999).

Las áreas protegidas son parte esencial del desarrollo integral de un país, le brindan a las sociedades beneficios económicos, culturales, educativos y espirituales (UICN 1993). Sin olvidar, su papel en el mantenimiento de la diversidad de ecosistemas, especies y genes, que es parte fundamental del patrimonio de una región. Además se suma a esto, la protección de cuencas, zonas litorales, provee sitios de recreación para el turismo, mejora las condiciones del clima local, controla la erosión, recicla nutrientes, contribuye al secuestro de carbono, provee un amplio rango de productos naturales, entre otras funciones (UICN 1999).

Bruner et al (2000) evaluaron el impacto y amenaza antropogénica en 93 áreas protegidas de 22 países tropicales, probando la hipótesis de que los parques son eficientes medios para la protección de la biodiversidad tropical. Encontraron que la mayoría de los parques son exitosos y han detenido el cambio de cobertura, aún aquellos que presentan el más pequeño grado de efectividad y mitigación de la caza, fuego y pastoreo. La efectividad correlacionada con el manejo de actividades tal como la ejecución, demarcación de límites y la directa compensación a las comunidades locales, sugieren que aun con un modesto incremento en su financiamiento, las áreas podrían directamente incrementar la protección de la biodiversidad tropical.

En Costa Rica, cerca del 12% del territorio está considerado bajo sistemas de reservas, afirmando algunos que es un modelo de preservación de biodiversidad de los trópicos (Boza 1993). Pero al mismo tiempo la deforestación y la destrucción de los hábitats naturales continúa, tanto alrededor de las áreas, como incluso dentro de los Parques Nacionales (Hunter 1994; Cornell 2000).

Sánchez-Azofeifa et al (1999) compararon las tasas de deforestación y la extensión de la fragmentación del ecosistema fuera y dentro de un área protegida, en la región de Sarapiquí, Costa Rica. Ellos encontraron que la tasa de deforestación en las áreas protegidas es considerada baja y con una reducción sostenida. Por el contrario, la fragmentación fuera de las áreas protegidas se incrementó considerablemente, el número de islas boscosas aumentó de 537 islas en 1976 a 1231 islas en 1996, durante el mismo período de tiempo el tamaño promedio de las islas se redujo de  $0.95\text{km}^2$  a  $0.25\text{km}^2$ . Ellos concluyeron, que aunque la deforestación en áreas protegidas está virtualmente parada, la disminución de bosques y el extensivo cambio de uso fuera de áreas protegidas no ha

disminuido, aumentado la pérdida de la biodiversidad. De ahí la importancia, de enfocar investigaciones en las zonas aledañas a las áreas protegidas (zonas de amortiguamiento), ya que de esta manera se pueden formular estrategias para el manejo y conservación de los remanentes de bosque y propiciar actividades enmarcadas en el desarrollo sostenible.

Otras de las estrategias de conservación que se han impulsado en Costa Rica , a parte del establecimiento de las áreas protegidas, ha sido la creación de un marco jurídico que enmarca la ordenación, conservación y desarrollo sostenible de los bosques naturales y plantaciones. La nueva Ley Forestal de 1996 implementa un novedoso instrumento; el pago por servicios ambientales que prestan el bosque y las plantaciones forestales. Este incide directamente en la protección y el mejoramiento del ambiente, siendo muy significativo tanto en política ambiental como en la económica, pues por primera vez se reconoce en una ley nacional que los bosques proveen bienes y servicios que deben ser retribuidos, además de la madera y la tierra para la agricultura, y la necesidad de valorarlo adecuadamente (Carranza et al 1996). Esto responde principalmente a la política nacional de disminuir la tasa de deforestación que en los últimos años se mantiene en un promedio de 14000 ha. por año, después de estar en 50000 ha./año en la década de los 80 e inicios de los 90.

En las zonas aledañas a las áreas protegidas (casi todas tierras privadas), se hace necesario implementar instrumentos eficaces que permitan la conservación de los recursos naturales y la disminución de su aislamiento. En la actualidad los gobiernos de los países en vías de desarrollo, como Costa Rica , no tienen la capacidad financiera para la compra de más tierras para la conservación de bosques , de zonas con alta riqueza en biodiversidad o de áreas que pueden brindar una alta conectividad entre áreas boscosas, de esta manera los pagos por servicios ambientales pueden brindar una solución para la conservación y retribución económica a los dueños de las tierras.

#### **2.4. Modelos de cambio de uso/cobertura de la tierra.**

Para responder la demanda de información en ecosistemas terrestres a escala global, se necesita entender el cambio en el uso de la tierra y como esos cambios influyen en la cobertura forestal en el tiempo. Los modelos forman una conexión entre factores antrópicos

y físicos que determinan el uso de la tierra y la cobertura forestal, estos a su vez proveen un entendimiento y sientan las bases para simulaciones y predicción de cambios. Los modelos explican el problema teóricamente, pero no duplican cada detalle del mundo real (Lambin 1994). De esta forma los modelos de dinámica espacial en un paisaje pueden ser utilizados para:

- 1) Describir fenómenos espaciales cuantitativamente
- 2) Predecir estos fenómenos a escala temporal
- 3) Integrar lo espacial y temporal.

En temas relacionados con procesos de deforestación se integran las escalas espaciales y temporales, ya que el cambio de, por ejemplo, bosque, a otro tipo de cobertura se da en ecosistemas que ocupan unidades territoriales específicas (paisajes), y surge de la comparación entre dos tiempos concretos (tiempo 0 y tiempo 1) (Bocco 1998). De esta forma los modelos pueden responder preguntas de "porque", "cuando" y "donde" ocurren estos cambios.

Uno de los principales objetivos de los modelos relacionados con procesos de deforestación y cambios de uso es contribuir a un mejor entendimiento de los factores que intervienen y explican este fenómeno. Es imposible identificar una única combinación de causas que provocan el cambio de uso y deforestación para todas las regiones del mundo, sin embargo se pueden definir factores aplicables a escala regional y local (Lambin 1994).

Entre los factores de mayor importancia son los relacionados con aspectos económicos y sociales, más que con factores ambientales (Turner et al 1996). Sin embargo, otras variables de gran importancia son aquellas relacionadas con infraestructura y proximidad a centros urbanos, que indudablemente tienden a explicar los cambios de uso de la tierra, tanto a nivel temporal como espacial (Sader y Joyce 1988).

Los modelos conformados por escalas espacio temporales utilizan una combinación de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG). Generalmente están basados en la utilización de una estructura cartográfica de celdas o píxeles, asociados a factores físicos y culturales de cada paisaje. Muchos estudios se han basado en este tipo de

combinación y han utilizados diversos factores para asociarlos con los cambio de uso cobertura, en el siguiente cuadro 1 se muestra alguna de las investigaciones realizadas :

Cuadro 1. Investigaciones de algunos autores sobre cambio de uso/ cobertura.

Autor	Lugar de la investigación	Modelo	Variables explicativas
Nelson y Hellerstein	Centro de México	Regresión Multinomial logística	Altitud, pendiente, tipo de suelo, Distancia como costo de acceso, población
Ludeke, Maggio y Reid	Honduras	Regresión logística simple	Zonas de vida, pendiente, carreteras tipo de suelo, áreas protegidas
Liu, Iverson, Brown	Filipinas	Regresión cuadrática	Carreteras
Turner, Wear, Flamm	Los Apalaches y Península olímpica, Estados Unidos	Regresión Multinomial logística	Altitud, pendiente, tipo de suelo, Distancia a carreteras y a mercados, población y tenencia
Nelson, Harris y Stone	El Darién, Panamá	Regresión Multinomial logística	Precipitación, altitud, pendiente, áreas protegidas, distancias como un costo de acceso
Baritto	Venezuela	Regresión Multinomial logística	Pendiente, altitud, precipitación, carreteras, áreas protegidas
Kok y Veldkamp	Zona Atlántica Costa Rica	Regresión múltiple	Tipos de suelo, pendiente, altura, carreteras, políticas, precipitación.

### 3 METODOLOGÍA

#### 3.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio se ubica en las hojas cartográficas Istarú en las coordenadas UTM 218350-553250 y Carrillo en coordenadas UTM 222700-562400 cubriendo aproximadamente una extensión de 61 km<sup>2</sup> (6100 ha); se encuentra entre el Parque Nacional Volcán Irazú (3432msnm) y Parque Nacional Volcán Turrialba (3358msnm) dos picos volcánicos situados en los cantones de Cartago y Turrialba respectivamente; cabe mencionar que la mitad de cada parque esta dentro del área de estudio- representando el 20 por ciento de los 61 km<sup>2</sup>.

Al considerar los dos Parques Nacionales, el área delimitada para la investigación, toma una forma rectangular. Cabe señalar que las áreas protegidas están delimitadas por líneas rectas separadas en extensión por 10.2km y tienen una forma redonda con 2Km de radio cada una, como zona de amortiguamiento se le agrega un kilometro mas a cada lado, sumando finalmente 6km de ancho (Figura 1).

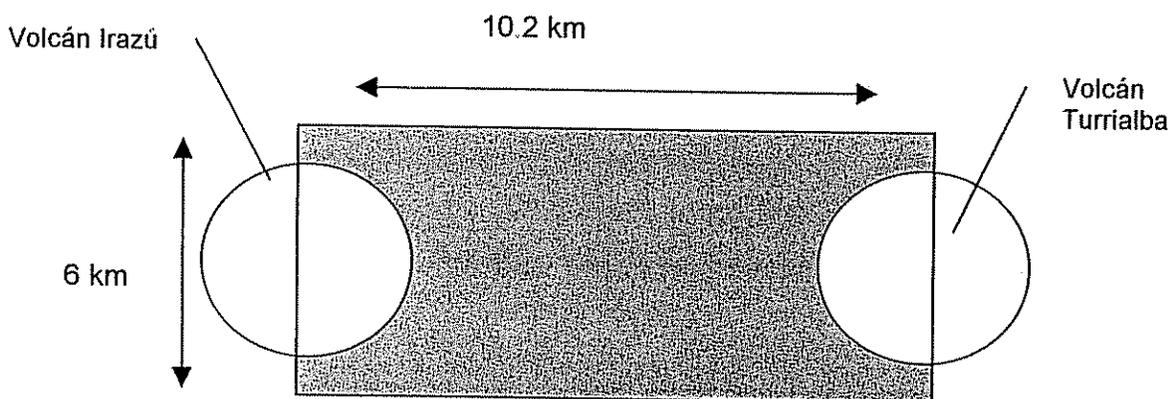


Figura 1. Demarcación de forma y tamaño del ecosistema investigado

La zona se localiza administrativamente en una jurisdicción compartida por los siguientes distritos Santa Cruz (cantón de Turrialba), Capellades y Pacayas (cantón de Alvarado) y Santa Rosa (Cantón de Oreamuno). Se encuentran parte de importantes subcuencas (parte alta) como el Sucio, Toro Amarillo, Turrialba y Birris, estas dos ultimas pertenecientes a la

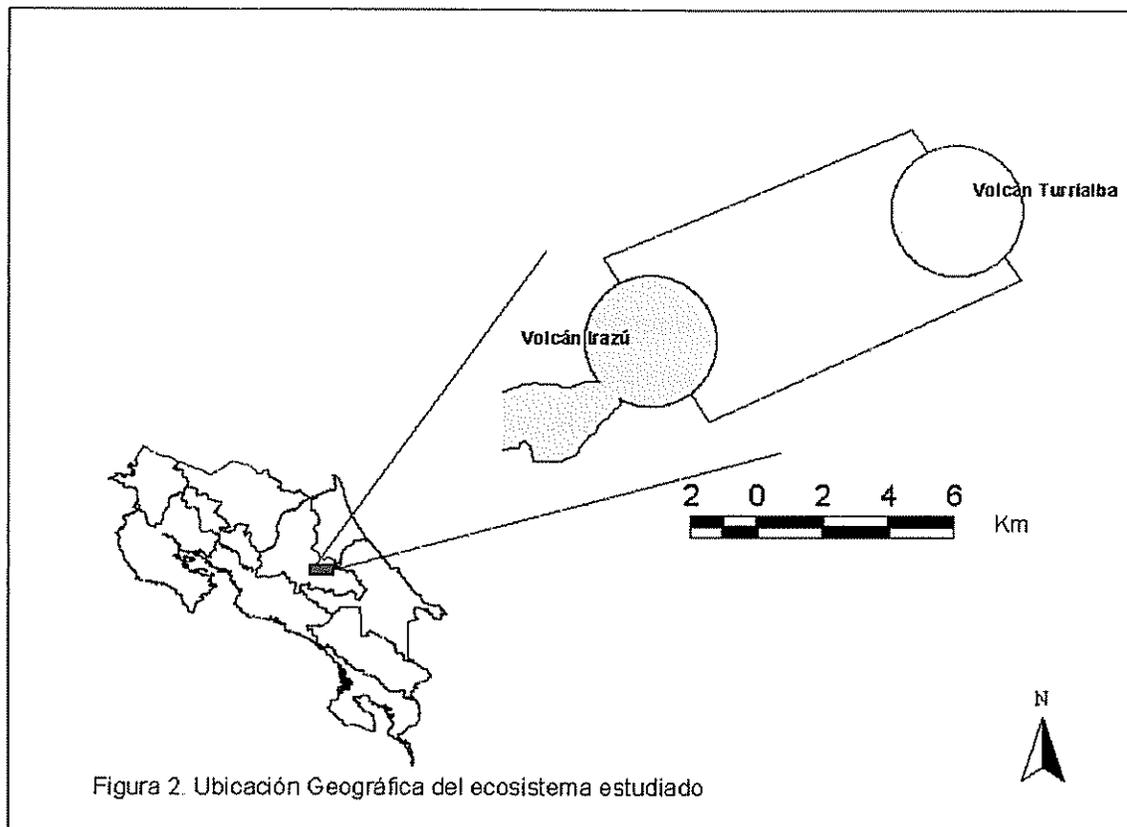
cuenca del Reventazón de gran importancia para Costa Rica en la generación de energía hidroeléctrica (proyecto Angostura) (Figura 2).

Se presentan actividades productivas como la ganadería de leche, así como algunos cultivos anuales como papa y coliflor.

En el área existen tres zonas de vida Bosque Pluvial Montano bajo (porcentaje) Bosque pluvial Montano y Bosque muy húmedo Montano bajo. La zona es verdadero refugio de avifauna reportándose 84 especies de aves (Vacaflor 1997)

Parte de la zona en estudio se encuentra dentro de la Reserva Forestal Cordillera Volcánica Central, una categoría de manejo poco restrictiva, además de los dos Parques Nacionales en donde la mayoría de las tierras están en manos privadas. La Reserva comprende un área de 61542 ha, siendo el área estudiada el 10 por ciento del área total (61 km<sup>2</sup>) y se ubica alrededor del Parque Nacional Braulio Carrillo, Volcán Irazú y Volcán Turrialba. Se constituyó para conservar y manejar el potencial hídrico y ecológico del área, en favor de la región central de Costa Rica (Vacaflor 1997, ACCVC 2000).

La zona de estudio esta incluida dentro del El Area de Conservación Cordillera Volcánica Central (ACCVC), es una de las 11 áreas del país que integran el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), del Ministerio del Ambiente y Energía. El ACCVC es una región con gran cantidad de nacientes de agua y mantos acuíferos, los cuales abastecen el uso industrial y doméstico a más del 50% de la población del país, lo que hace del área una región de gran importancia económica y social. También presenta una gran diversidad de especies lo que le valió en 1988 que la UNESCO la declarará Reserva de la Biosfera (Bolaños et al 2000).



### 3.2. Métodos de análisis espacial

#### 3.2.1. Preparación e Interpretación de Fotografías aéreas y generación de Mapas de usos/cobertura de la tierra

Para la interpretación del uso/cobertura de la tierra se utilizó fotografías aéreas; obtenidas de varias instituciones públicas y privadas como en Instituto Geográfico Nacional, la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica y el Departamento de Sistemas de Información Geográfica del CATIE.

Se realizó una revisión amplia de todos los períodos de tiempo existente en las instituciones y se pudo identificar series completas de toda la zona de estudio de los años 1978, 1992 y 1998 (Cuadro 2); las dos primeras fechas se obtuvieron en formato de papel a blanco y

negro, revelándose directamente del rollo fotográfico original, en el Instituto Geográfico Nacional, más una fotografía del año 1978 que se obtuvo como préstamo de la Universidad de Costa Rica. Las fotografías del año 1998 se obtuvieron directamente del departamento de Sistemas de información geográfica del CATIE, provenientes del proyecto Terra-MINAE; dichas fotos se encontraban en formato digital a color.

Las fotografías de los años 1978 y 1992 se pasaron a formato digital, con una resolución de salida de 300 pi (puntos por pulgada). Todas las fotografías en formato digital –78,92,98- se procedieron a orthocorregir; proceso que consiste en manipular las fotos aéreas para reducir las distorsiones como la radial, el desplazamiento y la distorsión del terreno. El primer tipo de distorsión es introducido por el lente de la cámara aérea. Los lentes en general tienen una tendencia a distorsionar las imágenes fotográficas y estas imperfecciones varían de un modelo de cámara a otro. El segundo tipo; el desplazamiento, se debe a que la cámara no se encuentra en un punto fijo, ya que el avión esta en movimiento, se balancea, gira, asciende o desciende; esta distorsión puede ser corregida con puntos de control. La ultima distorsión se debe al terreno ya que la superficie de la tierra no es plana y tiene continuamente cambios en su topografía, esta distorsión es disminuida con ayuda de los modelos de elevación digital (Falkar 1995; PCI Geomatics 2000).

La orthocorrección se hizo por medio del software PCI GEomatic con él modulo OrthoEngin Airphoto versión 7.0, se utilizo la extensión de fotos aéreas, teniendo estas un formato de imagen en JPG.

En el proceso de la generación de las orthofotos en el modulo OrthoEngin se necesitó introducir información adicional como la proyección, parámetros de la cámara, marcas fiduciales, las escalas de las fotografías, puntos de control y el modelo de elevación digital.

Para la proyección se utilizo D000-wgs 1984 –World Geodetic System 1984 la mas usada en la nueva cartografía. Para los parámetros de la cámara se trabajo con la distancia focal que es la distancia entre el negativo y el lente variando de un modelo de cámara a otro; así para cada año estudiado (1978,1992,1998) fue diferente. Además se utilizaron las escalas de las fotografías que junto con la resolución del proceso de digitalización se obtiene el espaciamiento del pixel (Cuadro 2).

Las marcas fiduciales usualmente define el punto principal de la fotografía que es el centro de la misma (PCI Geomatics 2000). Para las fotos de 1998 se contaba con la información de dichas marcas, no así para los años 1992 y 1978 el cual se calcularon por medio de la mesa digitalizadora con el software ArcInfo 7.1.

Para los puntos de control se utilizo los vectores de carreteras y ríos de Costa Rica, el cual se obtuvieron del departamento de SIG del CATIE, estas además de bajar el error (RMS) se utilizaron para georeferenciar las fotografías. Por ultimo el modelo de elevación digital se genero a partir de las curvas de nivel a cada 10 metros de la cartografía de Costa Rica 1:25000, se utilizo el software Arview 3.2 con la extensión 3D analysis, el cual genero una red de triángulos irregulares (TIN en ingles) que posteriormente se interpolo a curvas cada 5 metros. Del modelo se derivan la pendiente y la altura de la zona de estudio.

Con el mismo modulo OrthoEngin se unieron las orthofotos por años, para así generar las series de tiempo en formato PIX , para luego ser exportadas en formato TIFF al software Arcview 3.2 , que se utilizo en los análisis de cambio de uso/cobertura de la tierra. Cabe mencionar que la orthocorrección no elimina por completo el error, sino que lo disminuye, así que cada serie de tiempo tiene un error asociado (RMS) (cuadro2)

Cuadro 2. Secuencia y características básica de las fotografías

CARACTERÍSTICAS DE LAS FOTOS	AÑOS		
	1998	1992	1978
Numero de fotos	7	4	6
Rollos/líneas de vuelo/numero de foto	7/34/41-42-43 7/35/144-145-146-147	3/23b/751-752-753-754	133/218/141-142-143-144-145-146
Escala	1:40000	1:60000	1:35000
Distancia Focal	151.73	153.36	152.44
Espaciamiento del pixel	3 metros	5.08 metros	3 metros
Error rms	3.53metros	13metros	4.63metros

Luego de la generación de las series de tiempo con las orthofotos se procedió a la interpretación en pantalla (clasificación uso/cobertura) y digitalización de los mapas con el

software Arcview 3.2. Hay que aclarar que lo más importante para este trabajo se refiere al bosque, o a otro tipo de cobertura que brinde conexión y hábitat a especies de flora y fauna; así que la diferenciación entre cultivos o el tener un gran número de categorías no se hace necesario para cumplir con los objetivos de la investigación.

Se realizaron cinco giras de verificación de campo a la zona de estudio, tomando coordenadas geográficas con un equipo de GPS Garmin 12xL (errores nominales entre 8 a 17 metros) luego se compararon con la interpretación hecha en el laboratorio de SIG. Por último se corrigió la topología de los mapas generados en Arcinfo 7.1, teniendo cada uno de los tres mapas una escala de 1:10000. Se identificaron siete tipos de uso/cobertura presentes en el área de estudio en los diferentes períodos de tiempo, cuya clasificación se presenta en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Tipología de uso/cobertura presentes en el área de investigación.

IDENTIFICADOR		TIPO DE	DESCRIPCION
Numeración	Sigla	USO/COBERTURA	
1	Sd	Suelo desnudo	Con escasa cobertura vegetal.
2	Pa	Pasto	Pasturas con menos de 10% de cobertura arbórea
3	Cu	Cultivo agrícolas	Área con cultivos anuales predominantemente de papa y coliflor
4	P/Ar	Pasto con árboles	Pastos con arboles dispersos predominantemente <i>Quercus</i> sp..
5	Vp	Vegetación de Páramo	Vegetación achaparrada y arbustiva muy cercana al volcán
6	Bs	Bosque secundario	Bosque intervenido con vegetación secundaria
7	Bp	Bosque primario	Bosque con cobertura continua entre 100 % y el 70%, además de franjas de bosque galería.

### 3.3 Generación de datos espaciales

#### 3.3.1. Unidad de información

La investigación del paisaje en la zona comprendida entre el volcán Irazú y el Volcán Turrialba considerada en un lapso de 20 años, es un proceso espacio - temporal, cuya unidad de información básica constituye la celda o pixel, unidad muestral mínima que provee la información representada en la imagen y que puede ser procesada (PCI Geomatics 2000, Chuvieco 1996).

Cada una de las celdas que componen la imagen ofrece información con características propias, el cual permite estimar cambios a través del tiempo y el espacio.

Debido a que no se tiene información previa del tamaño apropiado del pixel para el análisis de este tipo de eventos, este se investigo utilizando el mapa de uso/ cobertura de la tierra de 1998. A partir de este mapa base se generaron diferentes mapas cada uno con un tamaño de pixel o celda diferente que va de 5x5 metros, 10x10 metros, 20x20 metros, 30x30 metros, 50x50 metros y 75x75 metros. Se obtuvo una muestra de cada mapa y por medio de una regresión cuadrática entre tamaño de la celda o pixel y la varianza asociada a cada

tamaño  $\frac{df(t)}{dt} = 0$ . Sin embargo para esta investigación se decidió utilizar un tamaño de celda de 20x20 (400 m<sup>2</sup>) empleado por Baritto (2000).

#### 3.3.2. Generación de la muestra

Todos los estudios relativos a eventos dinámicos espacio - temporales tienen una alta autocorrelación espacial (Bockstael 1996). La estimación basada en muestras dispersa aleatoriamente la autocorrelación, reduciéndose a magnitudes menores. Por medio del software Arcview 3.2 y su extensión "Random Point Generation"- una herramienta que genera puntos al azar predeterminado por el usuario en un paisaje- se obtuvo un conjunto aleatorio de puntos (20x20) entre un n=500 a n=3000.

Estas series de puntos se relacionaron con el mapa de uso / cobertura de la tierra del año 1998, obteniendo para cada punto un numero exacto de coordenadas y su uso. Aplicando la

curva de la varianza mínima del cambio en los tipos de uso/ cobertura del suelo con relación al tamaño de la muestra se estimó el tamaño "n". (Steel y Torrie 1996; Scheaffer et al 1987)

$$\sigma_n^2 = \frac{pq}{n}$$

$p$  = La proporción de la muestra que poseen las características de cada uso / cobertura analizados

$q$  = 1- $p$

$n$  = Tamaño de las muestras

Para obtener el número  $n$  de la muestra que minimiza la varianza se procedió a resolver la derivada de la ecuación:

$$\sigma_n^2 = b_0 + b_1n + b_2n^2$$

El valor de  $n$  fue de 1833 puntos, redondeándose a 2000 puntos para facilitar el manejo de los datos. En la Figura 3 se ilustra la distribución espacial de los puntos (píxeles de 20x20 m) en el área de la investigación. De estas unidades de muestreo aleatorias se obtendrá la información que será utilizada para el procesamiento y aplicación del modelo de análisis.

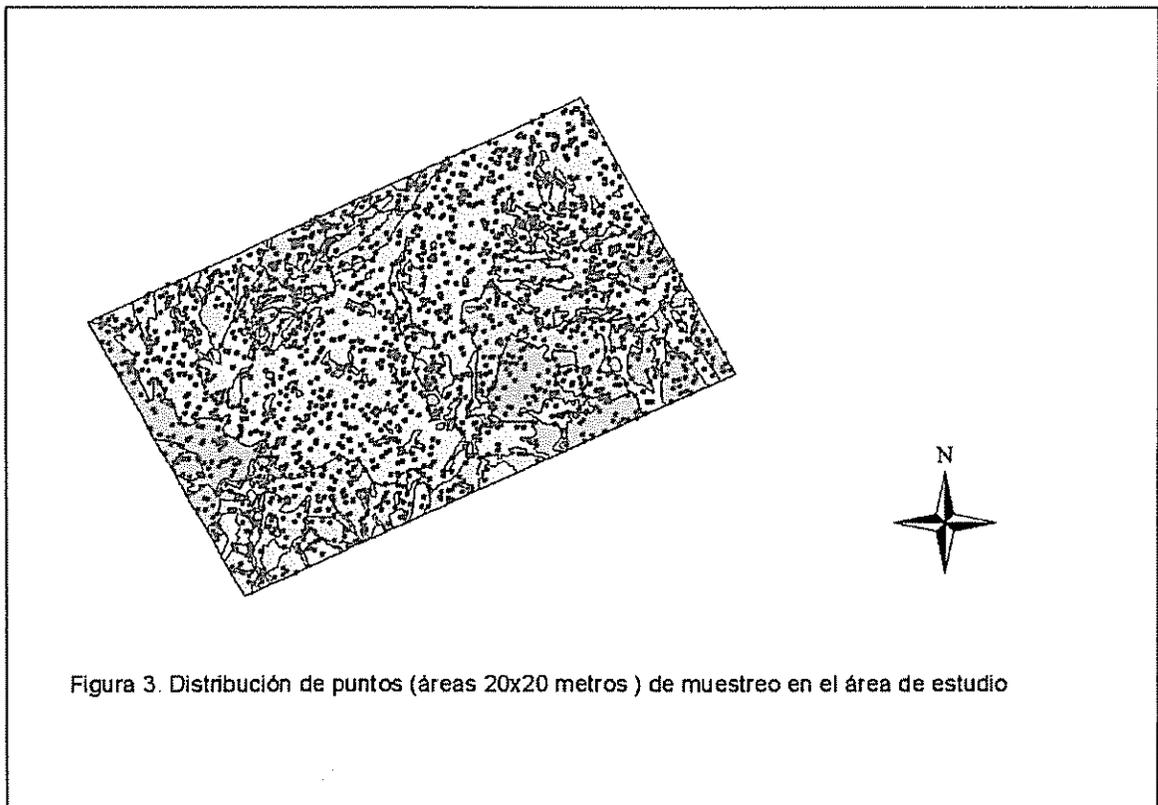


Figura 3. Distribución de puntos (áreas 20x20 metros ) de muestreo en el área de estudio

### **3.4 Estimación de índices descriptivos del paisaje para cada periodo de tiempo analizado.**

Los índices y medidas descriptivas del paisaje fueron estimados para obtener los patrones y características de la estructura espacial en los tres periodos de tiempo (1978, 1992, 1998). Esto permite determinar el grado de fragmentación del paisaje y su dinámica en el tiempo y espacio.

El cálculo de estos índices se obtuvo por medio del software Fragstats versión 3.0 utilizado para el análisis de paisajes y fragmentación. Funciona en interfase con Arview 3.2 y ha sido utilizado por varios autores, tanto en análisis espacial como temporal (Kramer 1997, Corrêa 2000). El software trabaja con imágenes en formato raster y utiliza todas las celdas o píxeles generados para todo el paisaje analizado (toda la población), además no tiene límite de escala.

Fragstats calcula medidas del paisaje en tres escalas: Fragmentos individuales, clases de vegetación o usos y para el paisaje entero. En esta investigación solo se trabajó a nivel de clase y paisaje ya que el interés principal es obtener información general de cada tipo de cobertura/uso sin hacer énfasis en los fragmentos individuales por sí mismos.

Los mapas del uso / cobertura de la tierra de las tres instancias de tiempo fueron transformados a formato raster (20 x20 metros). Para la descripción al nivel de clase y paisaje general se utilizó medidas como áreas, densidad, contagio, diversidad (Farina 1999, O'Neill et al 1988, Turner et al 1988, Li and Reynolds 1993) entre otras, en el anexo 6 se presenta el tipo de índice o medida, a qué nivel se utilizó y la forma de estimarla.

### **3.5. Modelos de análisis de probabilidad de cambio en el uso de la tierra.**

#### **3.5.1. Cadenas o procesos de Markov.**

Los cambios en el paisaje pueden ser estimados por medio de análisis estocásticos. Un proceso estocástico es aquel que representa eventos aleatorios y se miden en términos de probabilidades. Los modelos probabilísticos en general son indicados para la medición de cambio o transición en el uso de la tierra y ofrece una forma simple para interpretar la complejidad de relaciones entre las variables. Un modelo probabilístico usado comúnmente

en ecología y geografía para describir procesos de sucesión o difusión espacial son las cadenas de markov (Lambin 1994), el cual se utilizo en el presente estudio para reflejar el estado del ecosistema como un evento dinámico espacio - temporal.

La Cadena de Markov representa un modelo matemático que describe cierto tipo de procesos que se mueven en una secuencia de pasos a través de un grupo de estados. La medida que utiliza el proceso o cadenas de markov es la probabilidad " $p_{ij}$  . ", este se refiere a la probabilidad de transición o movimiento de un estado " $i$ " a un estado " $j$ " en un periodo de tiempo dado, donde  $i$  y  $j$  son además posiciones como los procesos de difusión de modelos espaciales, o clases relevantes de posicionamiento como los procesos de cambio en los modelos de paisaje (Brown 1970 en Lambin 1994, Feller 1989, Bockstael 1996, Baritto 2000)

Los modelos de Markov pueden ser expresados en notación matricial como:

$$n_{t+1} = Mn_t$$

Donde  $n_t$  una columna del vector,  $n = (n_1, \dots, n_m)$  cuyos elementos son una fracción de área de tierra en cada  $m$  estado de tiempo  $t$ ,  $M$  es una matriz de  $m \times m$  cuyos elementos,  $p_{ij}$ , son las probabilidades de transición durante un intervalo de tiempo  $t$  a  $t+1$  (Lambin 1994).

Una Cadena de Markov forma un sub grupo del proceso de markov con la condición añadida de las probabilidades de transición estacionarias sobre el tiempo. En un proceso markoviano, el modelo de respuesta, el cual es una distribución entre estados, es basado en la probabilidades de transición o cambio de un estado a otro. Esas transiciones representan características tal que:

$$p_{ij} = f(a_i, b_j, c_{ij})$$

Donde  $p_{ij}$  es una probabilidad de cambio entre el estado  $i$  y  $j$  como una función con características de un estado de origen  $a_i$  características del estado de respuestas  $b_j$  y relaciones entre el estado de origen y el de respuesta  $c_{ij}$ . Dado que  $a_{ij}$  indican transiciones

entre pares de estados sobre intervalos de tiempo, las probabilidades de transición  $p_{ij}$  son estimadas como (Lambin 1994, Baritto 2000) :

$$p_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_j a_{ij}}$$

La transición hacia cualquier categoría de uso en el instante  $j$  depende del uso previo en el instante  $i$  , por lo tanto se trata de eventos condicionales y cuyas probabilidades de ocurrencia son también condicionales :

$$p(i / j) = \frac{p(a_{ij} \cap a'_{ij})}{\sum_i p(a_{ij})}$$

Para el análisis de la probabilidad condicional de transición de un estado a otro consideramos los diferentes estados como el uso / cobertura de la tierra presentado por un conjunto convencionalmente denominado, UT, que consta de siete estados discretos y nominales, simbólicamente representado como:

$$UT = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$$

Donde:

*Sd (1): Suelo desnudo*

*Pa (2): Pasto*

*Cu (3): Cultivo*

*P/Ar (4): Pasto con árboles*

*Vp (5): Vegetación de Páramo*

*Bs (6): Bosque secundario*

*Bp (7): Bosque Primario*

La muestra aleatoria simple de  $n = 2000$  compuesta por cada unidad de información o celda de 20 x20 metros puede tomar alguno de los valores discretos nominales de uso / cobertura definido para el conjunto  $UT = \{Sd, Pa, Cu, P/Ar, Vp, Bs, Bp\}$  en un tiempo determinado, asumiendo independencia entre las diferentes alternativas consideradas. Cada estado definido por el conjunto UT en cada uno de los tres años, requirió de la comparación de las

posibles transiciones ocurridas en un  $U_t$  inicial y un  $U_t$  posterior entre al menos un par de instantes ( $t_h, t_{h+1}$ ), pasando de lo estático a lo dinámico (Figura 4) (Baritto 2000).

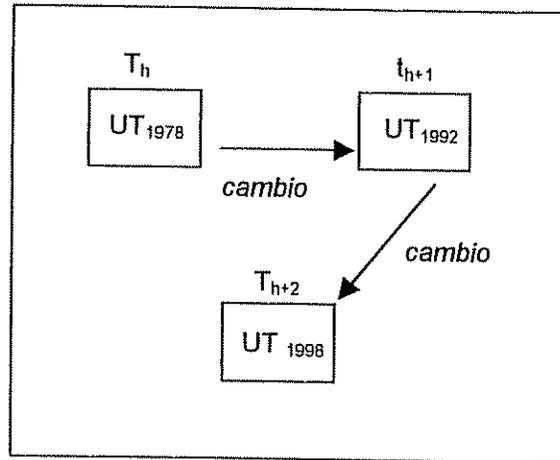


Figura 4. Proceso de cambio de un estado inicial a otro estado del uso/cobertura de la tierra

Las probabilidades asociadas a los eventos condicionales de transición de un estado de uso a otro en un lapso determinado en esta investigación están conformadas por las siguientes ecuaciones:

$\frac{p(Sd \cap sd)}{p(Sd)} + \frac{p(Sd \cap Pa)}{p(Sd1)} + \dots + \frac{p(Sd \cap Vp)}{p(Sd)} + \frac{p(Sd \cap Bs)}{p(Sd)} + \frac{p(Sd \cap Bp)}{p(Sd)}$	=1
$\frac{p(Pa \cap Sd)}{p(Pa)} + \frac{p(Pa \cap pa)}{p(Pa)} + \dots + \dots + \dots + \dots$	
<div style="text-align: center;">             '                    '                    '                    '                    '                    '         </div>	
<div style="text-align: center;">             '                    '                    '                    '                    '                    '         </div>	
<div style="text-align: center;">             '                    '                    '                    '                    '                    '         </div>	
<div style="text-align: center;">             '                    '                    '                    '                    '                    '         </div>	
$\frac{p(Bp \cap Sd)}{p(Bp)} + \frac{p(Bp \cap Pa)}{p(Bp)} + \dots + \frac{p(Bp \cap Vp)}{p(Bp)} + \frac{p(Bp \cap Bs)}{p(Bp)} + \frac{p(Bp \cap Bp)}{p(Bp)}$	=1

Para este caso en particular la matriz de probabilidad es de dimensiones de 7x 7, es decir, 49 masas probabilísticas posibles para cada evento de cambio que abarca de 1978 a 1992 y de 1992 a 1998 (Cuadro 4).

Cuadro 4. Matriz de probabilidades markovianas para los cambios ocurridos entre dos instantes.

$t_i$		$t_{i+1}$	$UT_i$							$P_{it}$
			1	2	3	4	5	6	7	
$UT_i$	Sd	1	p(1 1)	p(2 1)	p(3 1)	p(4 1)	p(5 1)	p(6 1)	p(7 1)	1.0
	Pa	2	p(1 2)	p(2 2)	p(3 2)	p(4 2)	p(5 2)	p(6 2)	p(7 2)	1.0
	Cu	3	p(1 3)	p(2 3)	p(3 3)	p(4 3)	p(5 3)	p(6 3)	p(7 3)	1.0
	P/Ar	4	p(1 4)	p(2 4)	p(3 4)	p(4 4)	p(5 4)	p(6 4)	p(7 4)	1.0
	Vp	5	p(1 5)	p(2 5)	p(3 5)	p(4 5)	p(5 5)	p(6 5)	p(7 5)	1.0
	Bs	6	p(1 6)	p(2 6)	p(3 6)	p(4 6)	p(5 6)	p(6 6)	p(7 6)	1.0
	Bp	7	p(1 7)	p(2 7)	p(3 7)	p(4 7)	p(5 7)	p(6 7)	p(7 7)	1.0

Para la interpretación de la matriz anterior hay que tomar en cuenta que la diagonal representa el no cambio de los distintos usos, o sea la estabilidad del sistema en el tiempo y que la suma horizontal de las probabilidades condicionales es igual a 1:0 (Feller 1989)

### 3.5.2. Simplificación sugerida por la importancia de las transiciones probabilísticas de los eventos

Hay que aclarar que lo más importante para este trabajo se refiere al bosque u otro tipo de cobertura natural protectora como la vegetación de páramo; muy común en la zona por las condiciones climáticas, así que la diferenciación entre cultivos o el tener un gran número de categorías no se hace necesario para responder a este objetivo de la investigación. Además las probabilidades condicionales mostraron que no todas las 49 probabilidades de

transiciones ocurren y otras tienen una probabilidad muy baja de ocurrencia. Bajo este criterio se agruparon y se generó una variable transformada, multinomial Y, con tres niveles o estados posibles, a saber.

Donde:  $Y = \{C_0, C_1, C_2\}$

$C_0$  :Transiciones con muy bajas o nulas probabilidades de ocurrencia (Tcbaja).

$C_1$  :Transición a cobertura no boscosa (incluye cultivos, pastos con y sin árboles y suelo desnudo) (TCNoBos)

$C_2$ :Transición a cobertura boscosa (incluye el bosque primario, secundario y la vegetación de páramo, ya que esta última es una vegetación natural del área) (TCBos)

Se agrupó 25 transiciones con muy bajas o nulas probabilidades de ocurrencia ( $C=0$ ); 13 transiciones a cobertura no boscosa ( $C=1$ ) y por último a cobertura boscosa 11 ( $C=2$ ), en el cuadro 5 se observan como se agruparon dichas variables..

Cuadro 5. Matriz de agrupamiento y de generación de nuevas variables

	<i>Sd</i>	<i>Pa</i>	<i>Cu</i>	<i>P/Ar</i>	<i>Vp</i>	<i>Bs</i>	<i>Bp</i>
<i>Sd</i>	$C_1$	$C_0$	$C_0$	$C_0$	$C_2$	$C_2$	$C_0$
<i>Pa</i>	$C_0$	$C_1$	$C_1$	$C_1$	$C_0$	$C_2$	$C_2$
<i>Cu</i>	$C_0$	$C_1$	$C_1$	$C_0$	$C_0$	$C_0$	$C_0$
<i>P/Ar</i>	$C_0$	$C_1$	$C_1$	$C_1$	$C_2$	$C_2$	$C_0$
<i>Vp</i>	$C_0$	$C_0$	$C_0$	$C_0$	$C_2$	$C_2$	$C_0$
<i>Bs</i>	$C_0$	$C_1$	$C_0$	$C_0$	$C_0$	$C_2$	$C_2$
<i>Bp</i>	$C_0$	$C_1$	$C_1$	$C_1$	$C_0$	$C_0$	$C_2$

### 3.6 Factores que inciden en el cambio de uso/cobertura de la tierra

El efecto de los factores o variables exógenas y endógenas en las transiciones o cambios de un uso determinado a otro, pueden ser estimado considerando los estados  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  como variables multinomial o dependientes.

Los modelos de regresión multinomial logística describe la relación entre una variables de respuesta categórica y un conjunto de variables explicativas continuas y discretas. Nótese la diferencia que la variable de respuesta es nominal y multinomial, o sea no tiene ningún tipo de jerarquía y puede tener más de dos valores ( $C_0, C_1, C_2$ ). Hay que aclarar, que no se estima el valor de la variable de respuesta Y, sino la probabilidad ocurrencia de esta variable (Agresti 1990 , Baritto 2000).

La matriz de variables explicativas (X) se genero de fuentes secundarias, como fotografías áreas del departamento de SIG del CATIE, del Instituto Geográfico Nacional; y de la Universidad de Costa Rica, así como, mapas, y de otras fuentes de información como informes y estudios, obtenido de instituciones gubernamentales como el ICE (Instituto Costarricense de Electricidad), MINAE (Ministerio de Ambiente y Energía), IDA (Instituto de desarrollo Agrario); y el MAG. (Ministerio de Agricultura y Ganadería).

Las variables explicativas usadas en el análisis son exclusivamente de naturaleza espacial, que posiciona la variable de respuesta Y en función de las variables independientes X, como distancia a carreteras, pendiente, altura y zonas de vida entre otras (Cuadro 6 y Anexos 1,2,3); estas han sido utilizadas en otros trabajos para describir factores relacionados con los procesos de deforestación, con diferentes modelos y en gran número de países, como ejemplo en Honduras (Ludeke et al 1990), Los Apalaches , Estados Unidos (Turner et al 1996; Wear et al 1996), Costa Rica (Sader y Joyce 1988); en el Darien , Panamá (Nelson et al 1999), Filipinas (Dawning et al 1993), y en México (Nelson y Hellerstein 1997).

Cuadro 6. Factores claves que inciden en el cambio de uso/cobertura.

notación	variable	Unidad	Détalle
X <sub>1</sub>	Distancia de carreteras (discarr)	km	Distancia euclidiana
X <sub>2</sub>	Distancia de casas y lecherías (discasa)	km	Distancia
X <sub>3</sub>	Costo de acceso (distcosto)	Km	Distancia asociada aun coeficiente de fricción
X <sub>4</sub>	Altitud	m.s.n.m	Sobre el nivel del mar
X <sub>5</sub>	Pendiente(pend)	grados	Inclinación del terreno
X <sub>6</sub>	Uso de la tierra	Categóricas (1,2,3,4,5,6,7)	Uso anterior
X <sub>7</sub>	Áreas de influencia de los Parques Nacionales(parque)	Categórica	0= fuera de los Parques nacionales 1=dentro del PN.
X <sub>8</sub>	Zona de vida (Zovida)	Categórica	Tres zonas de vida BPMB=0 BPM=1 BMHMB=2

Para interpretar en forma directa los resultados asociados a las respuestas categóricas en función de las variables explicativas discretas y continuas, se aplicó un modelo de regresión multinomial logística, el cual es el logaritmo natural del chance ( $odds=p/(1-p)$ ) de ocurrencia de alguna de las alternativas del conjunto  $C_0, C_1, C_2$  (Baritto 2000).

Como se menciona anteriormente el modelo utilizado fue un modelo Multinomial Logit, representado como un logit generalizado (Agresti 1990):

$$p_k(x) = \frac{e^{\beta_k'x}}{\sum_{h=1}^K e^{\beta_h'x}}$$

Donde :

$e$  : Base de logaritmo natural

$\beta_k$  : Parámetros o coeficientes de regresión estimados para las 8 variables explicativas, y el intercepto

$X$  : Matriz de variables explicativas o factores reguladores de cambio.

$k$  : Posibles valores que toma la variable de respuesta

$K$  : Número máximo de categorías comprendidas en el conjunto  $k$ , en total 3

El ajuste de la función de regresión logística y los parámetros del modelos fueron estimados por el método de máxima verosimilitud con el software econométrico LINDEP (Greene 1998). Para interpretar la influencia de las variables explicativas a las diferentes transiciones se estimo los efectos marginales, debido a que los coeficientes estimados ( $\beta$  eta) y sus varianzas muchas veces no representan el signo, la magnitud y las significancia apropiadas (Turner 1996). Los efectos marginales son calculadas por medio de la función de densidad estimada y la matriz de varianza -covarianza para los  $\beta$  según :

$$ME = \frac{\delta F}{\delta X}$$

Para obviar la dificultad de interpretación se estimo los efectos marginales esperados para cada una de las variables explicativas, definidos como facilitadores (+) o limitadores (-) para la probabilidad de transición asociados a cada uso/ cobertura de la tierra (cuadro 6).

Cuadro 7. Dirección esperada de los efectos marginales para cada variable explicativa

Variable explicativa	Transición con muy baja probabilidad de ocurrencia Tcbaja	Transición cobertura no boscosa TCNoBos	Transición a cobertura boscosa TCBos
Distancia carreteras	0	-	+
Distancia de casas	0	-	+
Costo de acceso	0	-	+
Altitud	0	-	+
Pendiente	0	-	+
Parque Nacional	0	-	+
Zona de Vida	0	+	-

## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1. Selección del tamaño de la celda o "pixel" para los mapas del uso / cobertura de los tres periodos de tiempo.**

Para la selección de un tamaño de celda o pixel que describa razonablemente bien los eventos estudiados se compararon las homogeneidades de las varianzas de los tamaños de 5x5 metros, 10x10 metros, 20x20 metros, 30x30 metros, 50x50 metros y 75x75 metros. Los resultados de la comparación no detecto diferencias de consideración entre los distintos tamaños. Esto puede ser debido a que la variabilidad fue relativamente pequeña y no se incluyo áreas menores a 5x5 metros debido a lo poco practico para el manejo de datos.

Por esta razón se seleccionó el tamaño de pixel siguiendo a Baritto (2000) celdas de 20 x 20 metros (0.04 ha); este tamaño es frecuentemente usado en las imágenes de satélites y además es mayor al error máximo asociado (RMS) de 13 metros presentes en el mosaico de fotografías aéreas de 1992 (cuadro 2). Al tener un área de parcelas de 0.04 ha el tamaño de la población de estudio sería  $N= 152500$  celdas, para un total de 6100 ha que representa la zona de estudio.

### **4.2. Determinación del número de la muestra**

De acuerdo a la metodología presentada anteriormente se estimo por medio de la curvatura de la mínima varianza el tamaño de "n".

La varianza estimada cae drásticamente a partir de los  $n=1000$  puntos (pixeles) (Figura 5) Para obtener el número de muestra se ajusto una ecuación cuadrática, de la varianza del uso de la tierra en función del número de puntos (pixeles), obteniendo el número de muestra  $n$  que minimiza la varianza. De esta forma se obtuvo un tamaño de 1833 puntos, aumentando ese valor a  $n=2000$  para el mejor manejo de los datos.

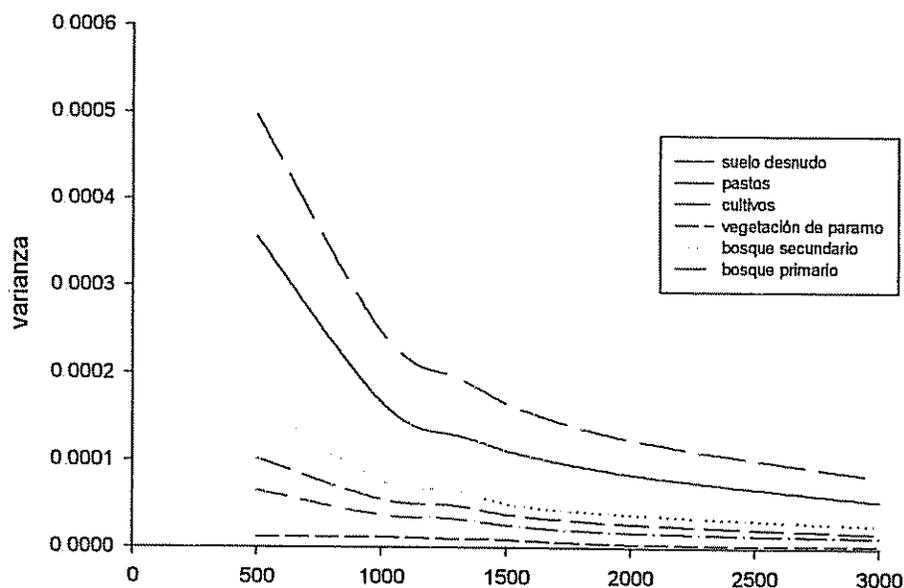


Figura 5. Varianza en función del uso/ cobertura de la tierra con tamaño de pixel 20 x20 metros.

### 4.3. Cuantificación y descripción del uso / cobertura de la tierra para cada período de tiempo analizado

#### 4.3.1. Descripción general

En las Figuras 6, 7 y 8 considera el uso / cobertura de la tierra para cada período de tiempo analizado y en el cuadro 8 se presenta la configuración espacio- temporal del área total de cada paisaje estudiado, variando entre 1.22 y 0.23 hectáreas entre los períodos de 14 y 6 años respectivamente, debido a la corrección de la topología de cada mapa, que disminuye la frontera y provoca que haya esta pequeña diferencia entre cada serie de tiempo. El número de fragmentos y la densidad es mayor en el año 1978 presentando 164 fragmentos y una densidad de 2.68 en 100 hectáreas. Veinte años después hay una disminución de 17 fragmentos y una densidad 2.4 fragmentos en 100 hectáreas, esto podría indicar que el grado de fragmentación del paisaje esta disminuyendo; sin embargo no existen diferencia

apreciables entre tipos de usos / coberturas, así que estas medidas por si solas no da una respuesta satisfactoria, ya que esta disminución podría darse en usos agrícolas y no en zonas boscosas.

En los tres años analizados el Bosque Primario fue el que tuvo la mayor predominancia en el paisaje entre el 48% y el 53% del área total, además de presentar un aumento a través del tiempo de aproximadamente de 3.8 % entre los años 1978 y 1992 y de 1.5% entre los años 1992 a 1998. La diferencia entre los dos periodos se debe quizás a la distancia entre los años analizados, ya que en primer periodo hay una diferencia de 14 años y en segundo solamente de 6 años (Cuadro 9). Este bosque se caracteriza principalmente por la dominancia de varias especies de robles (*Quercus sp*), pero también se pueden encontrar especies como Magnolias (*Magnolia Sororua*), además de especies de la familia Lauracea como los aguacatillos (*Ocotea sp*, y *Persea sp*), importantes para las aves de la zona, al brindar alimento con sus frutos (ICE 1999)

Las áreas de Pasto y Pasto con árboles son el segundo y tercer uso con mayor representatividad en el área total del paisaje, estos van desde 24.9 % en pastos y 11 % en pastos con árboles en el año 1978 a 20.25 % y 8.4% respectivamente en el año 1998. Sin embargo los pastos tienen una marcada disminución del 8 %entre el año 1978 y 1992, pero vuelve aumentar en un 5% en al año 1998. Los dos usos son utilizados para la ganadería de leche, y los árboles presentes en los pastos son principalmente especies de Robles, que se dejaron para darle abrigo al ganado, ya que el área se caracteriza por tener condiciones climáticas bastantes adversas (ICE 1999).

La vegetación de páramo se mantiene bastante constante en el tiempo, sin presentar grandes cambios dentro de los tres años analizados, los porcentajes van de 6.1, 6.0 y 5.9 % del área total. Se localiza cerca de los dos de los volcanes, presentando una vegetación enana de hojas coráceas. Entre las familias más comunes se encuentran Poaceas como bambues (*Chusquea sp*) y otros tipos de zacates así como palmas enanas, Cyclantaceas, Ericaceas, Asteraceas entre otras (ICE 1999a).

El bosque secundario presenta un aumento en los primeros dos años analizados 1978 y 1992, de 5.1 % y 7.2 % respectivamente, sin embargo para el año 1998 hay una disminución del área al presentar un 5.5% del área total. Generalmente es una vegetación intervenida con una densidad de árboles menor y con estratos más bajos.

Los cultivos presentan una gran dinámica en los tres periodos de tiempo, para el año 1978 hay muy poca representatividad en la zona un 2.5% del total, pero para el año 1992 se observa un marcado crecimiento de este uso pasando al 5.12%, para luego decrecer a un 4.8% en el año 1998. Estos cultivos son principalmente de papa y coliflor.

El uso con menor área en los tres paisajes es el suelo desnudo con porcentajes que van de 1.6 % al 1.16%. Este es representado en las zonas cerca y dentro de los cráteres de los dos volcanes, este uso se caracteriza por no presentar nada o casi nada de vegetación.

#### **4.3.2. Índices de Diversidad, Contagio y Dominancia para el paisaje en los tres periodos de tiempo.**

Los índices de contagio no presentan diferencias significativas entre cada periodo de tiempo, indicando una relativa estabilidad en el ecosistema (Cuadro 8). Todos los valores obtenidos son mayores al 50% indicando que los fragmentos se distribuyen aleatoriamente, con una tendencia a agregarse.

Al comparar estos valores con el trabajo realizado por Kramer (1997), observamos que los paisajes presentes en Guanacaste tienen índices mucho más bajos de contagio<sup>2</sup>, presentando ecosistemas más desagregados. Hay que indicar que las zonas secas de Costa Rica se han caracterizado por una acelerada deforestación, debido principalmente al desarrollo de la ganadería extensiva de carne, que se incentivó a partir de los años 60 y a la presencia continua de incendios (Watson et al. 1998). La zona del presente estudio, en cambio, presenta altos niveles de precipitación anual y temperaturas un poco adversas para la colonización humana, por lo que tal vez estos factores relacionados con las zonas de vida (precipitación, temperatura y evapotranspiración) puedan ser limitadores a cambios agrícolas o productivos que ayudan a mantener un ecosistema más agregado. Para los índices de diversidad aplicados en los tres periodos analizados tampoco se observan diferencias marcadas indicando la estabilidad del ecosistema. La pequeña disminución de los índices de Shannon y Simpson podrían indicar para el primero, que la riqueza de tipos de

---

<sup>2</sup> Para el caso de Kramer (1997), los valores de índice de contagio para Santa Rosa en 1979 es de 13.24 y para 1985 es de 25. En el caso del Parque Nacional Guanacaste para el primer año el índice fue de 13.24, pero para el segundo año fue de 32.25.<sup>2</sup>

fragmentos esta disminuyendo, y para el segundo que la distribución caso del Parque Nacional Guanacaste para el primer año el índice fue de 13.24, pero para el segundo año fue de 32.25

equitativa entre tipos de fragmentos también disminuye, debido a la recuperación de zonas boscosas y la disminución de áreas agrícolas y de pastos.

El índice de Dominancia tampoco presenta diferencias marcadas entre los distintos periodos analizados. Los valores más cercanos a 1 indican que el paisaje esta dominado por un solo uso o cobertura (o'Neill et al 1988, Farina 1999), así para la zona de estudio el valor obtenido nos indica que los fragmentos de distintos usos/ coberturas están representados en proporciones cercanas o parecidas, sin haber dominancia de ningún uso específico.

Cuadro 8 . Área, diversidad, dominancia y otros parámetros espaciales estimados para todo paisaje en los tres años analizados

Medidas e índices	1978	1992	1998
Area Total del Paisaje (ha)	6112.820	6112.590	6113.810
Numero de fragmentos	164	158	147
Densidad de fragmentos(n/100ha)	2.683	2.585	2.404
Numero de usos (riqueza de parches)	7	7	7
Tamaño promedio de los fragmentos (ha)	37.273	38.687	41.591
Desviacion estandar del tamaño de los fragmentos(ha)	212.355	244.414	254.579
Coefficiente de variación del tamaño de los fragmentos(%)	569.723	631.769	612.109
Indice de contagio (%)	59.378	59.141	61.548
Indice de Dominancia	0.311	0.259	0.274
Indice de diversidad de shannon	1.427	1.452	1.366
Indice de diversidad de Simpson	0.683	0.674	0.647

Cuadro 9. Parámetros espaciales para cada tipo de uso/ cobertura de la tierra en los tres períodos

	Área(ha)	Porcentaje del paisaje	Número de fragmentos	Densidad	Área promedio (ha)	Desviación estándar	Coefficiente de variación %
<b>Paisaje en 1978</b>							
Suelo desnudo	102.47	1.676	17	0.278	6.028	10.551	175.042
Pasto	1523.85	24.929	74	1.211	20.593	57.751	280.444
Cultivo	154.21	2.523	6	0.098	25.702	34.589	134.5
Pasto con árboles	680.02	11.124	18	0.294	37.779	66.145	175.085
Vegetación de paramo	377.84	6.181	4	0.065	94.46	129.97	137.593
Bosque secundario	312.6	5.114	5	0.082	62.52	108.751	173.947
Bosque primario	2961.83	48.453	40	0.654	74.046	413.093	557.888
<b>Paisaje en 1992</b>							
Suelo desnudo	70.29	1.15	18	0.294	3.905	9.767	250.103
Pasto	1036.12	16.951	73	1.194	14.193	46.066	324.557
Cultivo	313.37	5.12	5	0.082	102.674	201.236	195.995
Pasto con árboles	602.99	9.865	30	0.491	20.1	58.995	293.511
Vegetación de paramo	370.02	6.053	2	0.033	185.01	127.57	68.953
Bosque secundario	471.78	7.71	5	0.082	64.222	122.332	190.484
Bosque primario	3198.69	52.33	25	0.409	127.948	583.989	456.428
<b>Paisaje en 1998</b>							
Suelo desnudo	71.66	1.172	14	0.229	5.119	9.628	188.091
Pasto	1238.5	20.25	71	1.161	18.852	56.72	300.86
Cultivo	294.16	4.811	6	0.098	49.027	68.357	139.428
Pasto con árboles	519.29	8.494	19	0.311	27.331	67.55	247.153
Vegetación de paramo	360.28	5.893	3	0.049	120.093	130.605	108.753
Bosque secundario	337.08	5.513	4	0.065	59.27	91.233	153.928
Bosque primario	3292.84	53.859	30	0.491	109.761	544.046	495.662

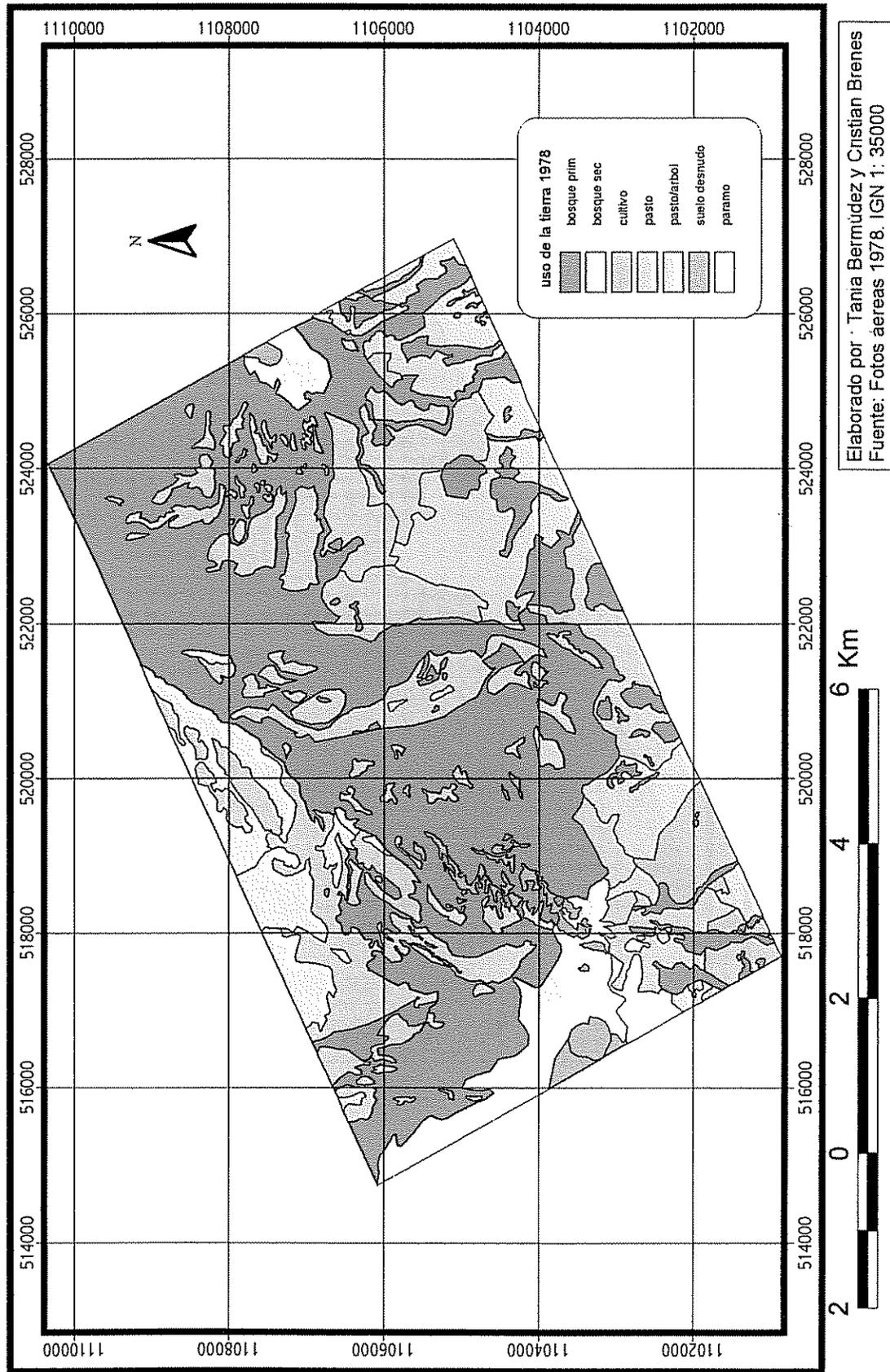
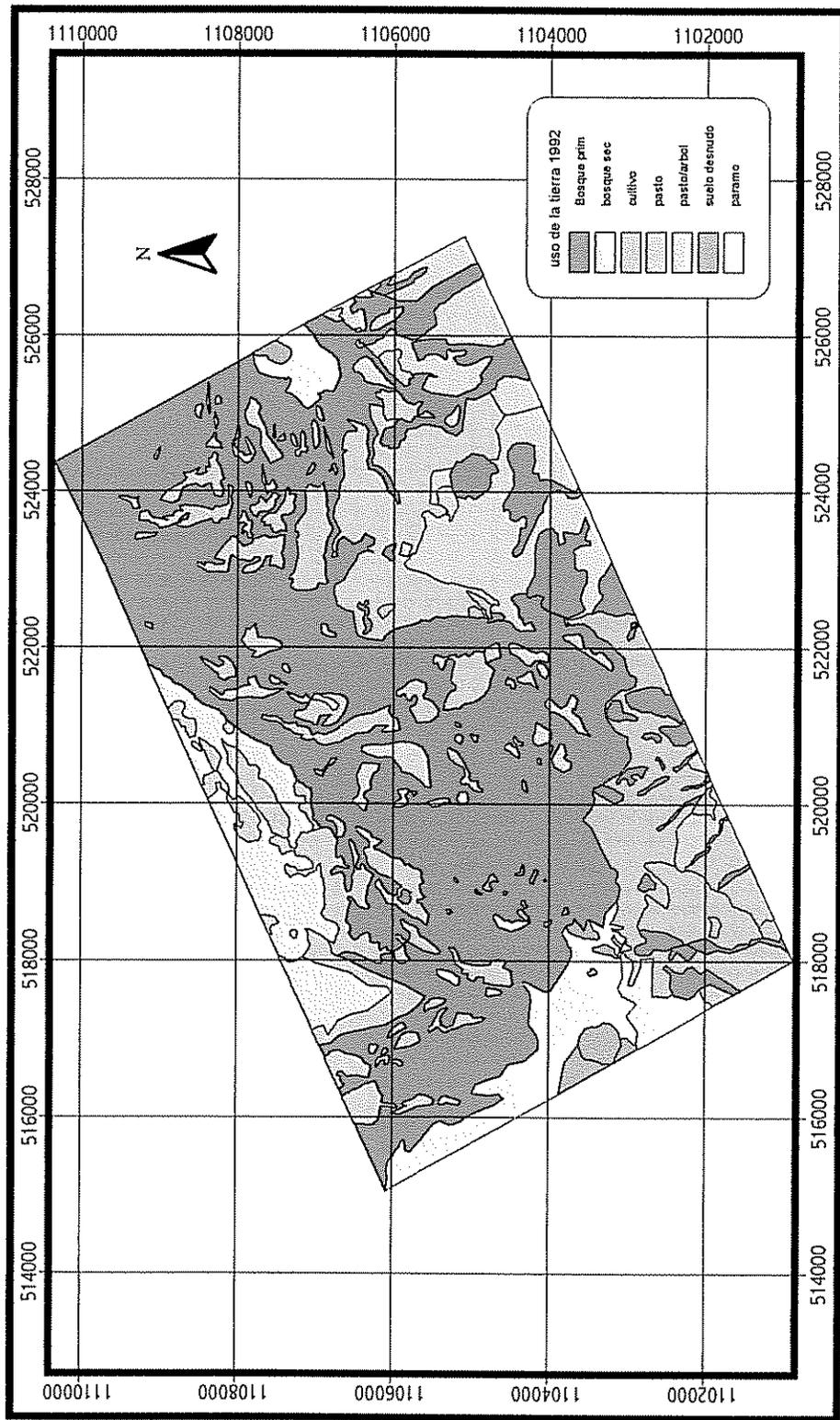


Figura 6. Mapa de Uso/Cobertura de la tierra para el año 1978, en la zona de estudio



Elaborado por Tania Bermúdez y Cristian Brenes  
Fuente : Fotos aéreas 1992 .IGN 1:60000

Figura 7. Mapa de Uso/Cobertura de la tierra para el año 1992, en la zona de estudio

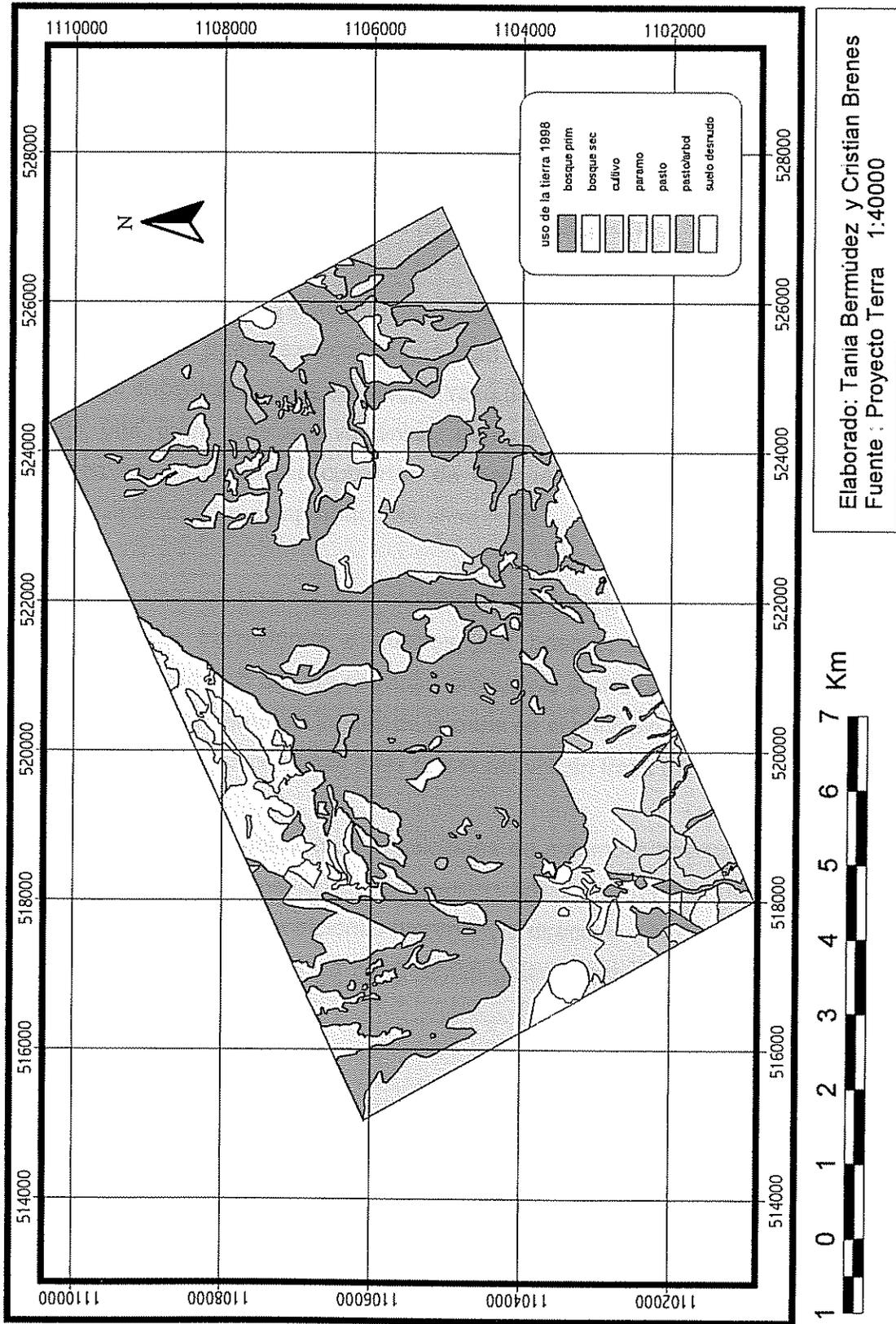


Figura 8. Mapa de Uso/cobertura de la Tierra para el año 1998, en la zona de estudio

#### **4.4. Cambios en el uso / cobertura de la tierra entre los años 1978 a 1992 a 1998.**

En el Cuadro 10 se presentan las probabilidades de transición entre los diferentes uso / cobertura de la tierra del año 1978 al 1992. Los usos/ coberturas más estables en el tiempo son la vegetación de páramo (Vp) y el bosque primario (Bp) y las más dinámicas son el suelo desnudo (Sd), pasto con árboles (P/Ar), y los pastos (Pa).

La transición más relevante fue de suelo desnudo a bosque secundario. Este comportamiento se puede explicar ya que gran cantidad del suelo desnudo observado en el año 1978 se encontraba cerca del volcán Irazú (Figura 6), que en la década de los años 60, presentó una gran actividad volcánica, que pudo haber ocasionado alteraciones por derrumbes en las montañas cubiertas de bosque; sin embargo no se dispone de una referencia anterior para comprobar esta afirmación.

Los otros dos uso con una mayor probabilidad de cambio son pasto con árboles y pastos, estos tienen sus transiciones a cultivos y a bosque secundario, aunque en menor proporción. Este cambio de una actividad productiva a otra como son los pastos a cultivos, puede deberse al fomento del cultivo de la papa en el principio de la década de los años 90, que se dio en las zonas cercanas a las faldas del volcán Irazú (ICE 1999a).

En menor proporción observamos transiciones de cobertura boscosa a usos como pasto, pasto con árboles y cultivos; así como también transiciones de bosque secundario a pastos, por lo tanto no todas las transiciones fueron en la dirección de conservación y recuperación de bosque. En los anexos 4 se representan gráficamente las zonas con recuperación y degradación de bosque.

Cuadro 10. Matriz de probabilidades de transición markovianas para el período de 1978 a 1992

t <sub>1</sub>	t <sub>n+1</sub>	1992							p	
		1	2	3	4	5	6	7		
1978	Sd	1	0.571	0.000	0.000	0.000	0.029	0.400	0.000	1
	Pa	2	0.000	0.598	0.170	0.029	0.006	0.172	0.025	1
	Cu	3	0.000	0.196	0.783	0.000	0.000	0.022	0.000	1
	P/Ar	4	0.000	0.032	0.204	0.597	0.028	0.139	0.000	1
	Vp	5	0.008	0.000	0.000	0.000	0.940	0.053	0.000	1
	Bs	6	0.000	0.080	0.000	0.000	0.000	0.830	0.089	1
	Bp	7	0.002	0.033	0.018	0.028	0.001	0.002	0.916	1

En las transiciones de 1992 a 1998 (cuadro 11), los usos / cobertura más estables son igual que en la transición anterior bosque primario y páramo, con la diferencia en suelo desnudo donde llega ha estabilizarse. También se nota una clara diferencia en los usos más dinámicos, en donde cultivos y bosque secundarios tienen la menor proporción de persistencia a través del tiempo. En el anexo 5 se representan gráficamente las zonas con recuperación y degradación de bosque.

Los cultivos tienden a regresar a la actividad productiva de los pastos, debido quizás al poco resultado que tuvo el cultivo de la papa en la zona. Los bosques secundarios en cambio tiene una significativa proporción de transición a bosque secundario, sumando ha esto la transición de pastos con árboles a bosques secundarios observados entre 1978 a 1992 puede indicar el abandono paulatino de las actividades agrícolas a través del tiempo.

Sin embargo al igual que los años anteriores sigue presentándose ciertas probabilidades de transiciones de bosque a otros usos como pastos, pero en proporciones muy bajas. Observamos que de los siete usos / cobertura cuatro tienden a estabilizarse en el tiempo, esto puede indicar que conforme pase el tiempo el ecosistema vaya hacia un equilibrio del ecosistema, llamado en la teoría Markoviana como steady-state (Baritto 2000)

Cuadro 11. Matriz de probabilidad de transición markovianas  
Para el periodo de 1992 a 1998

t <sub>1</sub>	t <sub>n+1</sub>	1998							p	
		1	2	3	4	5	6	7		
1992	Sd	1	0.913	0.000	0.000	0.000	0.000	0.087	0.000	1
	Pa	2	0.000	0.808	0.085	0.005	0.000	0.079	0.022	1
	Cu	3	0.000	0.632	0.324	0.011	0.000	0.032	0.000	1
	P/Ar	4	0.000	0.083	0.000	0.781	0.000	0.124	0.012	1
	Vp	5	0.022	0.029	0.000	0.037	0.890	0.022	0.000	1
	Bs	6	0.000	0.112	0.000	0.000	0.000	0.664	0.224	1
	Bp	7	0.004	0.032	0.004	0.013	0.002	0.005	0.941	1

Al reagrupar los siete usos / cobertura de la tierra en cobertura boscosa y cobertura no boscosa se observó una mayor estabilidad en ambos períodos analizados de 1978 a 1992 y 1992 a 1998 (Cuadro 12 y 13)

Sin embargo, la cobertura no boscosa presenta una probabilidad de transición significativa a cobertura boscosa, en comparación con la con la matriz de probabilidad del mismo período para todos los usos específicos, donde suelo desnudo, pasto con árboles y pastos siempre presentaron cambios a coberturas boscosas.

Cuadro 12. Matriz de probabilidades de transiciones markovianas para usos/ coberturas agrupadas, en el período de 1978 a 1992

1978	1992			total
	USO	Cobertura boscosa	Cobertura no boscosa	
Cobertura boscosa		0.927	0.073	1
Cobertura no boscosa		0.193	0.807	1

Para la matriz de transición de 1992 a 1998 (Cuadro 13), observamos un aumento en la estabilidad en el tiempo de las dos variables (cobertura boscosa y cobertura no boscosa), siendo más significativa en la cobertura no boscosa y disminuyendo en su probabilidad de transición a cobertura boscosa. Comparándose con la misma transición de 1992 a 1998 con

todos los usos, observamos la misma tendencia en la transición de bosque secundario a pastos.

Cuadro 13. Matriz de probabilidades de transición markovianas para usos/ coberturas agrupadas, en el período de 1992 a 1998

	1998			total
	USO	Cobertura boscosa	Cobertura no boscosa	
1992	Cobertura boscosa	0.938	0.062	1
	Cobertura no boscosa	0.1	0.9	1

#### 4.5. Modelos de cambio del uso / cobertura de tierra en función de las variables explicativas.

Para los dos modelos de transición estudiados de 1978 a 1992 y de 1992 a 1998, se detectó una alta significancia ( $P < 0.01$ ). En el Cuadro 14 se presentan la estadística descriptiva para cada uno de las variables explicativas utilizadas en los dos modelos de transición. Hay que aclarar que para la mejor interpretación de este cuadro se convirtieron las distancias tanto de carreteras como de casas de metros a kilómetros, sin embargo en los modelos fueron utilizadas estas medidas en metros debido a lo pequeña del área de estudio.

Cuadro 14. Estadística descriptiva de las variables explicativas utilizadas en el modelo ( $n=2000$ )

Variables	Unidades	Promedio	Desv estandar	Mínimo	Máximo
discarr	km	0.439	0.434	0	1.8
Discasa/1000	km	0.728	0.503	0.007	2.47
distcosto	km	1.734	1688	0	6883
altitud	msnm	2577	399	1375	3383
pend	grados	52	62	0	90
parque	categorías	-	-	0	1
zovida	Categorías	-	-	0	2

La precisión de los modelos de transición de la tierra se obtuvo comparando el número de transiciones estimadas de los modelos con las transiciones observadas de las muestras

(Cuadros 15 y 16). Así la precisión de cada modelo fue de un 77.3% para la transición de 1978 a 1992 y de 79.2% para la transición de 1992 y 1998.

Para el primer período analizado (1978 a 1992) las transiciones a cobertura no boscosa presentan una precisión del 69.9%, mientras que la precisión de la transición a cobertura boscosa fue mayor con un valor de 82.1%. Las transición con bajas probabilidades de ocurrencia presento una probabilidad esperada de cero, debido a la naturaleza de los datos. En el segundo modelo de 1992 a 1998 se observa una mayor precisión para la transición a cobertura no boscosa 74.6%, sin embargo para la transición a cobertura boscosa se mantiene casi igual al período anterior.

Cuadro 15. Estimación de la capacidad predictiva del modelo para el periodo 1978 a 1992

		Esperado			
		Variable	TCBPrb(0)	TCNoBos(1)	TCBos(2)
Observado	Transición con bajas probabilidades(0) TCbaja	0	3	4	7
	Transición cobertura no boscosa (1) TCNoBos	0	518 (69.9%)	223	741
	Transición a cobertura boscosa(2) TCBos	0	223	1029 (82.1%)	1252
	<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>744</b>	<b>1256</b>	<b>2000 (77.3%)</b>

Cuadro 16. Estimación de la capacidad predictiva del modelo para el período 1992 a 1998

Observado	Esperado			
	Variable	TCBPrb(0)	TCNoBos(1)	TCBos(2)
Transición con bajas probabilidades(0) TCbaja	0	7	10	17
Transición cobertura no boscosa (1) TCNoBos	0	555 (74.6%)	189	744
Transición a cobertura boscosa(2) TCBos	0	210	1029 (83.0%)	1239
<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>772</b>	<b>1228</b>	<b>2000 (79.2%)</b>

#### 4.4.1. Efecto de las variables explicativas sobre los cambios en el uso de la tierra en los dos modelos de transición.

En los cuadros 17 y 18 se presentan los parámetros estimados ( $\beta$  etas) para los modelos de transición para los dos períodos de tiempos analizados. Para el primer período de tiempo comprendido entre 1978 a 1992 observamos que solo dos de los parámetro estimados son significativos para las probabilidades de transición tanto a cobertura no boscosa (TCNoBos) como a cobertura boscosa (TCBos). Estos dos parámetros son cambio y altura con un signo positivo y negativo respectivamente.

Para el segundo período de tiempo (1992 a 1998) los parámetros estimados cambian con respecto al primero, siendo cambio, distancia a carreteras y distancia como un costo de acceso los parámetros significativos para transiciones a coberturas no boscosas  $C_1$  (TCNoBos). Para la transición a cobertura boscosa  $C_2$  (TCBos) solo un parámetro resulta significativo, distancia a casas. Hay que mencionar que los parámetros estimados para las transiciones con bajas probabilidades de ocurrencia  $Y=0$  (Tcbaja) no son calculados debido a que el programa normaliza una de las variables en este caso la denominada cero.

Cuadro 17. Parámetros estimados de la regresión logística, para el período comprendido de 1978 a 1992.

Parámetros estimados 1978-1992	Transición cobertura no boscosa (1) TCNoBos		Transición a cobertura boscosa(2) TCBos	
	Coefficiente	Error estándar	Coefficiente	Error estándar
<b>Intercepto</b>	24.6018 <sub>ns</sub>	16.6155	24.7350 <sub>ns</sub>	16.6098
<b>Discarr</b>	0.0033 <sub>ns</sub>	0.0063	-0.0005 <sub>ns</sub>	0.0063
<b>Cambio</b>	1.6779 <sup>**</sup>	0.7393	1.7289 <sup>**</sup>	0.7391
<b>Discasa</b>	0.00009 <sub>ns</sub>	0.0015	0.0013 <sub>ns</sub>	0.0015
<b>costo</b>	-0.0020 <sub>ns</sub>	0.0011	-0.0005 <sub>ns</sub>	0.0011
<b>Altitud</b>	-0.0067 <sup>**</sup>	0.0027	-0.0075 <sup>**</sup>	0.0027
<b>pend</b>	-0.0077 <sub>ns</sub>	0.0063	-0.0034 <sub>ns</sub>	0.0063
<b>parque</b>	-1.4257 <sub>ns</sub>	1.1982	-0.4490 <sub>ns</sub>	1.1964
<b>zovida</b>	-0.1828 <sub>ns</sub>	7.2989	0.0259 <sub>ns</sub>	7.2988

\*\* Significativo al ( $p < 0.05$ ), \* significativo al ( $p < 0.08$ ), ns= no significativo

Cuadro 18 Parámetros estimados por medio de razón de máxima verosimilitud, para el período comprendido de 1992 a 1998

Parámetros estimados 1992-1998	Transición cobertura no boscosa (1) TCNoBos		Transición a cobertura boscosa (2) TCBos	
	Coefficiente	Error estándar	Coefficiente	Error estándar
<b>Intercepto</b>	-0.8513 <sub>ns</sub>	2.4766	0.4981 <sub>ns</sub>	2.4510
<b>Discarr</b>	0.0055 <sup>**</sup>	0.0024	0.0012 <sub>ns</sub>	0.0024
<b>Cambio</b>	0.5540 <sup>**</sup>	0.2578	0.4657 <sup>*</sup>	0.2577
<b>Discasa</b>	0.0014 <sub>ns</sub>	0.0010	0.0027 <sup>**</sup>	0.0010
<b>costo</b>	-0.0023 <sup>**</sup>	0.0005	-0.0006 <sub>ns</sub>	0.0004
<b>Altitud</b>	0.00082 <sub>ns</sub>	0.0012	0.0002 <sub>ns</sub>	0.0012
<b>pend</b>	0.0061 <sub>ns</sub>	0.0057	0.0091 <sub>ns</sub>	0.0057
<b>parque</b>	-0.0399 <sub>ns</sub>	0.7958	0.8210 <sub>ns</sub>	0.7902
<b>zovida</b>	0.7343 <sub>ns</sub>	0.7418	0.8686 <sub>ns</sub>	0.7400

\*\* Significativo al ( $p < 0.05$ ), \* significativo al ( $p < 0.08$ ), ns= no significativo

Se podría esperar que con solo la significancia de los parámetros estimados se obtuviera la significancia individual de las variables explicativas para cada transición de uso / cobertura de la tierra, como ocurre en la regresión lineal. Sin embargo, Turner et al (1996) mencionan que con los modelos de Multinomial logit los parámetros estimados por medio de pruebas de razón de máxima verosimilitud y sus varianzas no corresponden necesariamente al signo, magnitud relativa y significancia para las probabilidades de transición. Por esta razón se utilizó los efectos marginales para estimar la magnitud, el signo y la significancia de cada coeficiente relacionado con cada variable explicativa para cada probabilidad de transición. En los cuadro 19 y 20 se representan los efectos marginales para cada variable explicativa y para cada período de tiempo (1978 a 1992 y 1992 a 1998).

Para los dos períodos de tiempo analizados se observó que zonas de vida no mostró ninguna significancia en las probabilidades de transición a cobertura no boscosa  $C_1$  (TCNoBos) como a cobertura boscosa  $C_2$  (TCBos). Además el intercepto para el modelos de

1992 a 1998 no presento significancia para las transiciones (TCNoBos y TCBos). Para las transiciones con bajas probabilidades de ocurrencia  $C_0$  (Tcbaja) no hubo significancia para ninguna de las variables analizadas.

Todas las demás variables explicativas utilizadas en los modelos resultaron ser significativas. Sin embargo la magnitud relativa de las variables fue muy pequeña. Comparando estas magnitudes con estudios similares, Baritto (2000) y Turner (1996) observamos que estos presenta valores mucho mayores. Una de las posibles diferencias en la magnitud se deba a la escala de las variables, ya que para este estudio se utilizo metros y en comparación a los otros dos que utilizaron kilómetros.

Cuadro 19. Parámetros estimados por medio de los efectos marginales, para el periodo comprendido de 1978 a 1992

Parámetros estimados 1978-1992	Transición con bajas probabilidades (0) Tcbaja		Transición cobertura no boscosa (1) TCNoBos		Transición a cobertura boscosa (2) TCBos	
	Coefficiente	Error estándar	Coefficiente	Error estándar	Coefficiente	Error estándar
<b>Intercepto</b>	-0.0014	0.0023	-0.0269 <sub>ns</sub>	0.1246	0.0283 <sub>ns</sub>	0.1246
<b>Discarr</b>	$-0.35 \times 10^{-7}$	$0.37 \times 10^{-6}$	0.00079 <sub>..</sub>	0.00009	-0.0007 <sub>..</sub>	0.00009
<b>Cambio</b>	-0.0001	0.00018	-0.0104 <sub>.</sub>	0.0059	0.0105 <sub>.</sub>	0.0059
<b>Discasa</b>	$-0.58 \times 10^{-7}$	$0.14 \times 10^{-6}$	-0.00026 <sub>..</sub>	0.00004	0.00026 <sub>..</sub>	0.00004
<b>Costo</b>	$0.59 \times 10^{-7}$	$0.12 \times 10^{-6}$	-0.00029 <sub>..</sub>	0.00002	0.00029 <sub>..</sub>	0.00002
<b>Altitud</b>	$0.42 \times 10^{-6}$	$0.80 \times 10^{-6}$	0.00015 <sub>..</sub>	0.00005	-0.00015 <sub>..</sub>	0.00005
<b>Pendiente</b>	$0.27 \times 10^{-6}$	$0.63 \times 10^{-6}$	-0.00087 <sub>..</sub>	0.0002	0.00087 <sub>..</sub>	0.0002
<b>parque</b>	$0.42 \times 10^{-4}$	0.0001	-0.2004 <sub>..</sub>	0.0338	0.2003 <sub>..</sub>	0.0338
<b>zovida</b>	$0.20 \times 10^{-5}$	0.0004	-0.04285 <sub>ns</sub>	0.0263	0.0428 <sub>ns</sub>	0.0263

\*\* Significativo al ( $p < 0.05$ ), \* significativo al ( $p < 0.08$ ), ns= no significativo

\*\*\* Para las transiciones con bajas probabilidades de ocurrencia todas las variables resultaron ser no significativas

Cuadro 20. Parámetros estimados por medio de los efectos marginales, para el período comprendido de 1992 a 1978

Parámetros estimados 1992-1998	Transición con bajas probabilidades (0) Tcbaja		Transición cobertura no boscosa (1) TCNoBos		Transición a cobertura boscosa (2) TCBos	
	Coefficiente	Error estándar	Coefficiente	Error estándar	Coefficiente	Error estándar
<b>Intercepto</b>	-0.0013	0.025	-0.2647..	0.1241	0.2661..	0.1257
<b>Discarr</b>	-0.0051	0.0034	0.0008..	0.0001	-0.0008..	0.0001
<b>Cambio</b>	-0.24x10 <sup>-4</sup>	0.25x10 <sup>-4</sup>	0.0187..	0.0061	-0.0136..	0.0067
<b>Discasa</b>	-0.25x10 <sup>-4</sup>	0.12x10 <sup>-4</sup>	-0.00025..	0.00004	0.0002..	0.00004
<b>costo</b>	0.11x10 <sup>-4</sup>	0.59x10 <sup>-4</sup>	-0.00033..	0.00002	0.00032..	0.00002
<b>Altitud</b>	-0.70x10 <sup>-6</sup>	0.12x10 <sup>-4</sup>	0.0002..	0.00005	-0.0002..	0.00005
<b>pend</b>	0.87x10 <sup>-4</sup>	0.64x10 <sup>-4</sup>	-0.0005..	0.0001	0.0006..	0.0002
<b>parque</b>	-0.0061	0.0089	-0.1674..	0.0348	0.1736..	0.0353
<b>zovida</b>	-0.0087	0.0108	-0.0239 <sub>ns</sub>	0.0271	0.0327 <sub>ns</sub>	0.0283

\*\* Significativo al ( $p < 0.05$ ), \* significativo al ( $p < 0.08$ ), ns= no significativo

\*\*\* Para las transiciones con bajas probabilidades de ocurrencia todas las variables resultaron ser no significativas

#### 4.4.1.1. Efectos marginales para las transiciones a cobertura no boscosa (TCNoBos).

Las probabilidades de transición a coberturas no boscosa (como cultivos y pastos), resulto significativa para casi todos los factores como distancia a carreteras, la distancia a casas, la distancia como un costo de acceso, la altura, la pendiente y la presencia de los Parques Nacionales.

La distancia a carreteras y la altura aumentan la probabilidad de transición para ambos modelos (1978 a 1992 y 1992 a 1998), siendo diferente a lo esperado (Cuadros 20 y 19), es decir que la probabilidad de ocurrencia a transiciones a cobertura no boscosa crece a medida que aumenta la altura y se alejan las carretas. Sin embargo hay que recalcar que en la zona de estudio, a pesar de presentar grandes alturas, también se localizan zonas relativamente planas. De esta manera podemos relacionar la altura con la pendiente; la cual esta última influye negativamente a la probabilidad de transición (como lo esperado).

A diferencia de la distancia a carreteras, la distancia como un costo de acceso influye negativamente a la probabilidad de transición a cobertura no boscosa. Esta diferencia de signo en variables asociadas a carreteras, se debe quizás a que la distancia como un costo incluye la pendiente y un coeficiente de fricción. La distancia a casas influye también negativamente a la transición a cobertura no boscosa, así que a mayor distancia disminuye la probabilidad de transición, esto resulta lógico ya que en la zona de estudio la gran mayoría de habitantes cuentan con pequeñas lecherías y varias cabezas de ganado que dejan pastando cerca de sus casas.

La influencia de los dos Parques Nacionales para estas transiciones resulto ser negativa, a pesar de haber una significativa presencia de agricultores dentro de estas áreas protegidas.

Se puede inferir que la probabilidad de transición a cobertura no boscosa esta influenciada principalmente por la pendiente, a la asociación de esta con las vías de acceso como carreteras (distancia como un costo de acceso) y por la presencia de casas asociadas a actividades productivas.

#### **4.4.1.1. Efectos marginales para las transiciones a cobertura Boscosa (TCBos ).**

Sader y Joyce (1988) encontraron para Costa Rica una alta relación entre la pendiente, las carreteras y la presencia de bosque. Ellos demostraron que con el crecimiento de las vías de acceso como calles, carreteras y caminos aumentaban la tasa de deforestación, quedando remanentes de bosque solo en aquellas zonas con gran pendiente, donde era sumamente costoso la construcción de vías de comunicación. Con los efectos marginales volvemos a confirmar lo anterior, observando una influencia positiva de la pendiente y las distancia como un costo de acceso a las transiciones a coberturas boscosas.

La presencia de Parques Nacionales dentro de la zona de estudio influye positivamente a las transiciones de bosque, vegetación secundaria y de páramo. A pesar que la mayoría de las propiedades dentro de las dos áreas protegidas son privadas (ya que no han sido pagadas por el gobierno), la presencia de guarda parques en el área parece haber influenciado positivamente la protección de la zona (comunicación personal funcionarios del MINAE 2001). Además las políticas ambientales ejecutadas en años recientes a permitido la recuperación de bastas zonas deforestadas en Costa Rica, que eventualmente podrían haber afectado el área de estudio, con el pago de servicios ambientales.

Todas las variables explicativas son consistentes en el tiempo tanto en su significancia como en su dirección. De esta manera se puede suponer dos cosas o que el ecosistema esta entrando aun equilibrio, o que las distancias entre los análisis son muy pequeños para observar diferencias en el tiempo (Cuadro 21).

Cuadro 21. Dirección de los efectos marginales esperados y observados de las variables independientes para cada tipo de transición para todos los períodos de tiempo analizados.

Variable explicativa	Transición cobertura no boscosa (1) TCNoBos		Transición a cobertura boscosa (2) TCBos	
	Esperado	Observado	Esperado	Observado
Distancia a carreteras	-	+	+	-
Distancia a casas	-	-	+	+
Distancia como un costo de acceso	-	-	+	+
Altitud	-	+	+	-
Pendiente	-	-	+	+
Parque Nacional	-	-	+	+
Zona de Vida	+	ns*	-	ns*

ns= no significativo

## 5. CONCLUSIONES

- La utilización de sistemas de información geográfica facilita el manejo de información a nivel espacial, y permite una comparación en el tiempo. Sin embargo la utilización de sensores remotos como las fotografías aéreas siempre incluye un error, que para este estudio fue de 13 metros.
- No existen diferencias en los tamaños de celdas o píxeles utilizados en el análisis espacio temporal realizado, debido a lo pequeño de la zona de estudio y a la falta de utilización de tamaños de celdas más pequeñas.
- De acuerdo a los parámetros de contagio, diversidad y dominancia analizados para los tres periodos de tiempo se puede concluir que los paisajes tienen una tendencia a agregarse, no presentan dominancia por ningún tipo de uso / cobertura de la tierra con un decrecimiento muy pequeño en la diversidad del paisaje.
- Dentro de los usos / cobertura de la tierra en los 20 años analizados, el bosque primario presenta la mayor estabilidad en el tiempo, con una pequeña tendencia a aumentar su probabilidad de ocurrencia. Se observa una disminución en el uso de suelo desnudo en los primeros 14 años, cambiando a bosque secundario, para luego estabilizarse en los últimos 6 años. En los dos periodos de tiempo hay una marcada tendencia a cambiar de una actividad productiva a otra como es de pastos a cultivo y viceversa.
- A nivel general, en el primer periodo de tiempo analizado se observa un aumento en la probabilidad de transición de cobertura no boscosa a cobertura boscosa, disminuyendo esta probabilidad en los últimos seis años.
- Se puede concluir que la zona comprendida entre el volcán Irazú y Turrialba presenta una pequeña pero constatare recuperación de zonas boscosas y de vegetación de páramo.

- De las variables analizadas que inciden en las transiciones de cambio tanto a cobertura boscosa como a no boscosa en los 20 años analizados, todas presentan significancia con excepción de las zonas de vida presentes en el área de estudio.
- Las áreas protegidas contribuyen positivamente al mantenimiento de la cobertura boscosa a pesar de existir ocupación dentro de sus áreas, concluyendo que existe un manejo adecuado de los dos Parque Nacionales.
- El análisis desarrollado en esta investigación, facilita la toma de decisiones porque identifica posibles áreas críticas en donde hay que aumentar los esfuerzos para la conservación y manejo de los recursos naturales, tanto dentro como fuera de las áreas protegidas. Además que cuantifica el tamaño de cada uso / cobertura presente en el área, convirtiéndose en una excelente herramienta para las políticas ambientales y de tenencia de la tierra.

## 6. RECOMENDACIONES

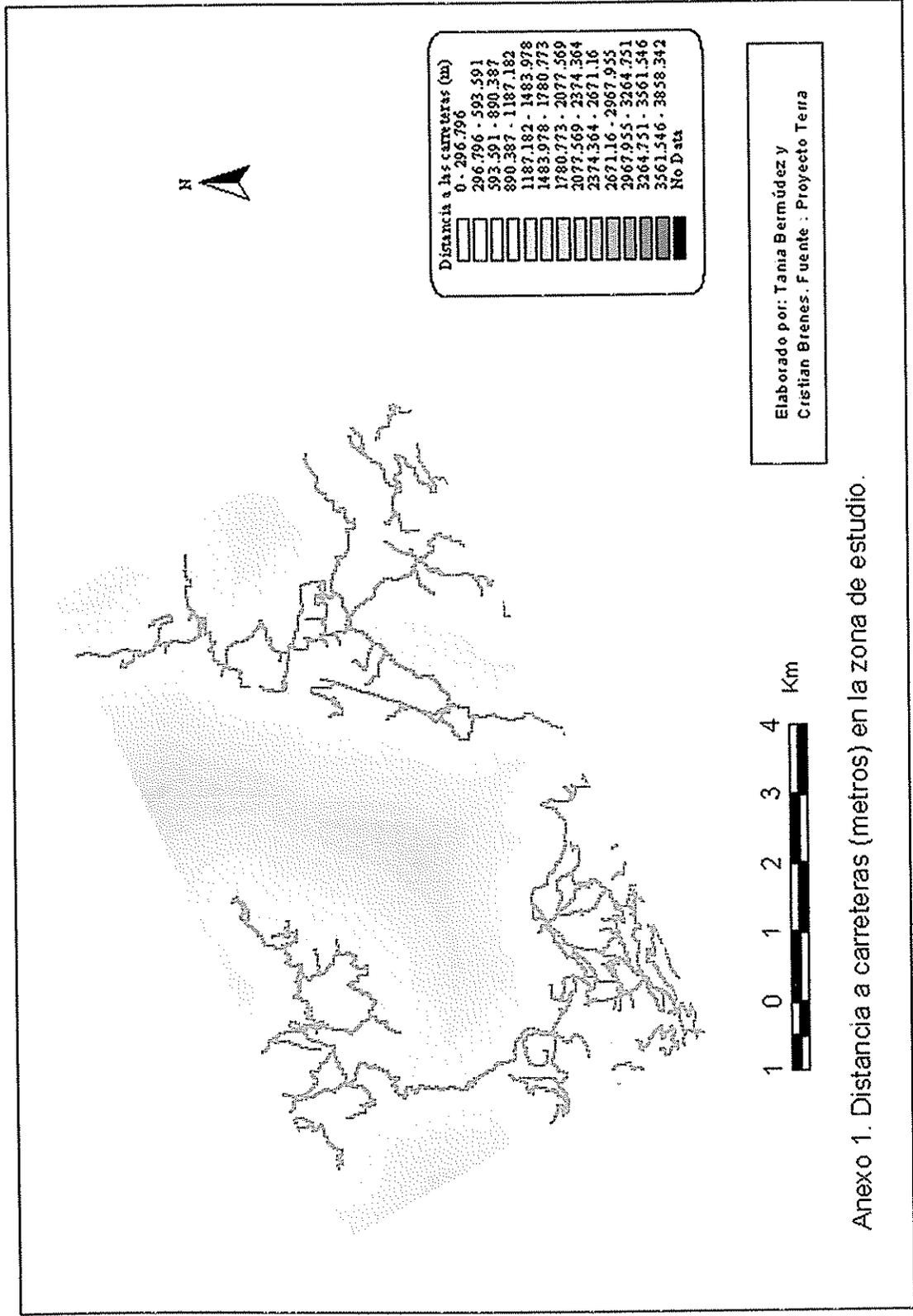
- Se recomienda realizar una caracterización fitosociológica para identificar ecosistemas prioritarios para la conservación.
- Utilizar otros factores que puedan influir en el cambio del uso/ cobertura de la tierra, como tenencia, población y políticas ambientales. Además aumentar las áreas de estudio espacial, para así involucrar diferentes tipos de manejo de la tierra.
- Incluir dentro de los factores de cambio, las formas que toman las áreas en el tiempo tanto de zonas recuperadas como degradadas.
- Realizar un estudio de la tenencia de la tierra, para cuantificar tamaños y estatus legal de los propietarios.
- Analizar la factibilidad socio - económica implementando la estrategia de pagos de servicios ambientales para los habitantes que se encuentran en la zona de estudio.
- Se les recomienda a las instituciones con alta participación en la zona, como el ICE y el MINAE enfocar sus esfuerzos en la conservación de los recursos naturales en zonas con bosques y que estén cerca de carreteras, casa o lecherías y que se encuentren en zonas relativamente planas. Además fomentar la conservación de bosques de galería que protegen importantes ríos necesarios para la generación de energía hidroeléctrica.

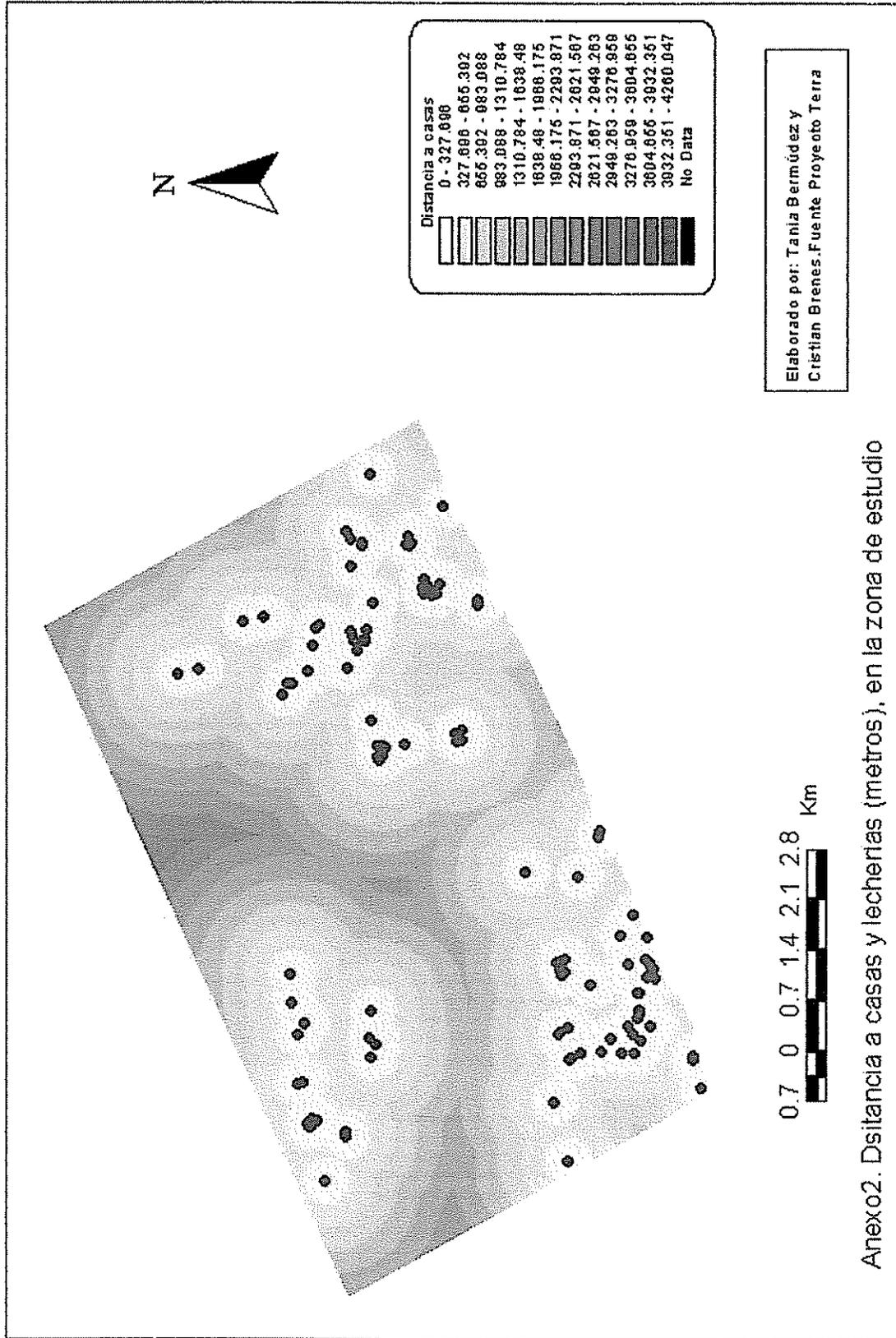
## 7. BIBLIOGRAFÍA

- ACVC. 2000. Cordillera Volcánica Central, Reserva de la biosfera.(en línea) Consultado en enero 2001. Disponible en <http://www.minae.go.cr/accvc/investiga/accvc.html>
- Baritto, F. 2000. Dinámica de factores asociados al uso de la tierra e implicaciones sobre el colapso ambiental de 1999 en la costa Norte de Venezuela. Tesis de Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 104 p.
- Bawa, K; Dayanandan, S. 1997. Socioeconomic factors and tropical deforestation. *Nature* 386: 562-563.
- Bennet, A. F. 1999. Linkages in the landscape. The role of corridor and conectivity in wildlife conservation. UICN Victoria, Australia. 254p.
- Bockstael, N. 1996. Modeling Economics and Ecology: the importance of a spatial perspective. *American Journal Agricultu Economic*. 78:1168-1180
- Boza, M. 1993. Conservation in action: past, present, and future of National Park System of Costa Rica. *Conservation Biology* 7(2) 239-247
- Bolaños. B; Gamboa, A; Coto, M. 2000. Proyecto de desarrollo para el Parque Nacional Volcan Turrialba. Heredia, Costa Rica. 321p
- Bruner, A.G; Gullison, R; Rice, R; Fonseca, G.A. 2001. Effectiveness of Parks in Protecting Tropical Biodiversity. *SCIENCE* 291: 125 -128.
- Carranza, C.F; Aylward, B.A; Echeverría, J; Tosi, J.A; Mejías, R. 1996. Valoración de los servicios ambientales de los bosques de Costa Rica. Centro Científico Tropical, San José, Costa Rica. 71p
- Chuvieco, E. 1996. Fundamentos de teledetección espacial. Rialp, S.A. Madrid 565p
- Corrêa, A.P. 2000. Evaluación de patrones del paisaje y los ecosistemas para fines de recuperación, conservación y manejo de biodiversidad en un paisaje fragmentado. Tesis de Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 105 p.
- Dale, V.H; S.M. Pearson; H. Offerman; R. O'Neill. Relating patterns of land-use change to faunal biodiversity in central Amazon. *Conservation Biology* 8(4): 1027-1036.
- Dawning, S. L; Iverson, L.R.; Brown, S. 1993. Rates and patterns of deforestation in the Philippines: application of geographic information system analysis. *Forest Ecology and Management* 57: 1-16.
- Detwiler, R.P; Hall, C.A. 1988. Tropical forest and the global carbon cycle. *Science* 239:42-47.
- Falkner, E. 1995. Aerial Mapping. Methods and applications. Lewis Publishers. USA. 322p

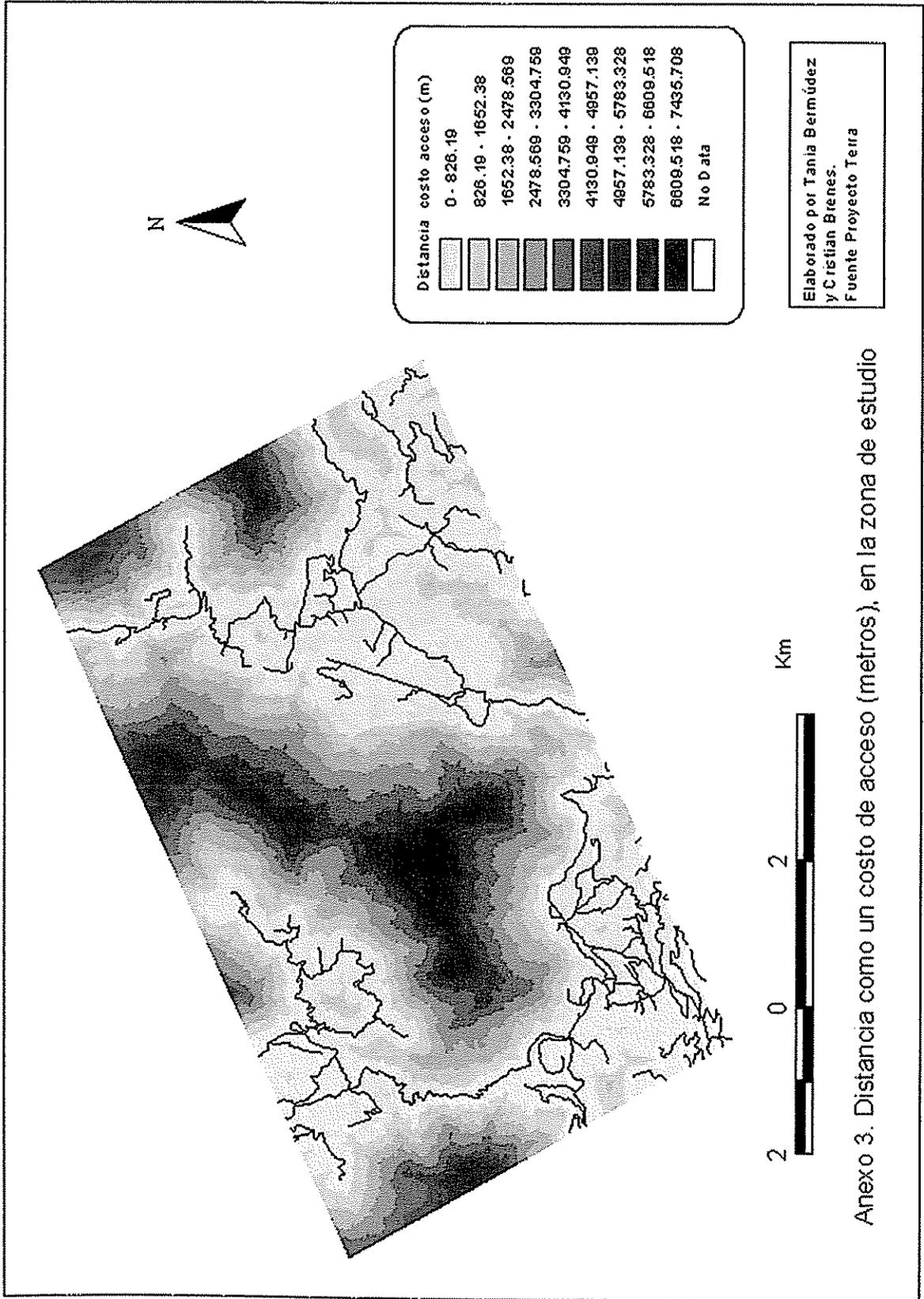
- Farina ,A. 1999. Principles and Methods in Landscape Ecology. Ed.Chapman &Hall. New York. 225 p.
- FAO (Food Agricultural Organization). 2000. ( en Línea). Consultado en enero del 2001. <http://www.fao.org>.
- Green,W.H. 1998. Limdep. Versión 7.0. User's Manual. Econometric Software, Inc. New York. 89p.
- Feller , W. 1989. Introducción a la teoría de probabilidades y sus aplicaciones. Volumen 1 Edt. Limusa. Mexico.p 373-376.
- Hall,C.A.S; Vargas, J.R; Saenz, O; Ravenscroft, W; Ko, J.Y. 2000. Data on sustainability in Costa Rica. Times series analysis of population, land use, economic, energy and efficiency. In Quantifying Sustainable Development. Ed Hall, C.A.S. Academic press, USA. 101-102.p
- Hamilton, L.S.; King, P.N. 1983. Tropical forested watersheds. Hydrologic and Soils Response to Major Uses or Conversions. Westview . Colorado, USA. 168 p.
- Houghton, R.A. 1994. The worldwide extent of land – use change. BioScience 44 (5):305-313.
- Hunter, J.R. 1994. Is Costa Rica truly conservation-minded?. Conservation Biology 8(2) 592-595.
- ICE (Instituto Costarricense de Electricidad). 1999. Plan de manejo integral de la cuenca del Río Reventazón. Informe de Diagnostico. Caracterización de los aspectos ambientales, zonas de vida y cobertura vegetal. San José, Costa Rica .35p
- ICE (Instituto Costarricense de Electricidad). 1999a. Plan de manejo integral de la Cuenca del Río Reventazón. Informe de Diagnostico. Caracterización económica. San José, Costa Rica 35 p.
- Keller, M; Veldkamp, E; Weitz, A; Reiners, W . 1993. Effect of pasture age on soil trace-gas emissions from a deforested area of Costa Rica. Nature 365: 244-246
- Kramer,E. 1997. Measuring landscape change in remnant tropical dry forest. *In* : Laurance, W.F y R.O Bierregaard Jr Eds. Tropical forest remnants: ecology, management and conservation of fragmented communities. The University of Chicago Press, London, England. p 386-399.
- Kok, K; Veldkamp,T. 2000. Using the CLUE framework to model change in land use on multiple scales. In: Bouman, B; Jansen, H; Schipper, R; Hengddijk, H. (Eds).Tools for land use analysis on different scales, with case studies for Costa Rica. Kluwer Academic publishers p 35-62
- Lambin,E.1994. Modelling Deforestation Processes. Trees tropical Ecosystem Environment Observations by Satellites. Trees Series B: Research Report European commission. Community European. 98p.

## ANEXOS

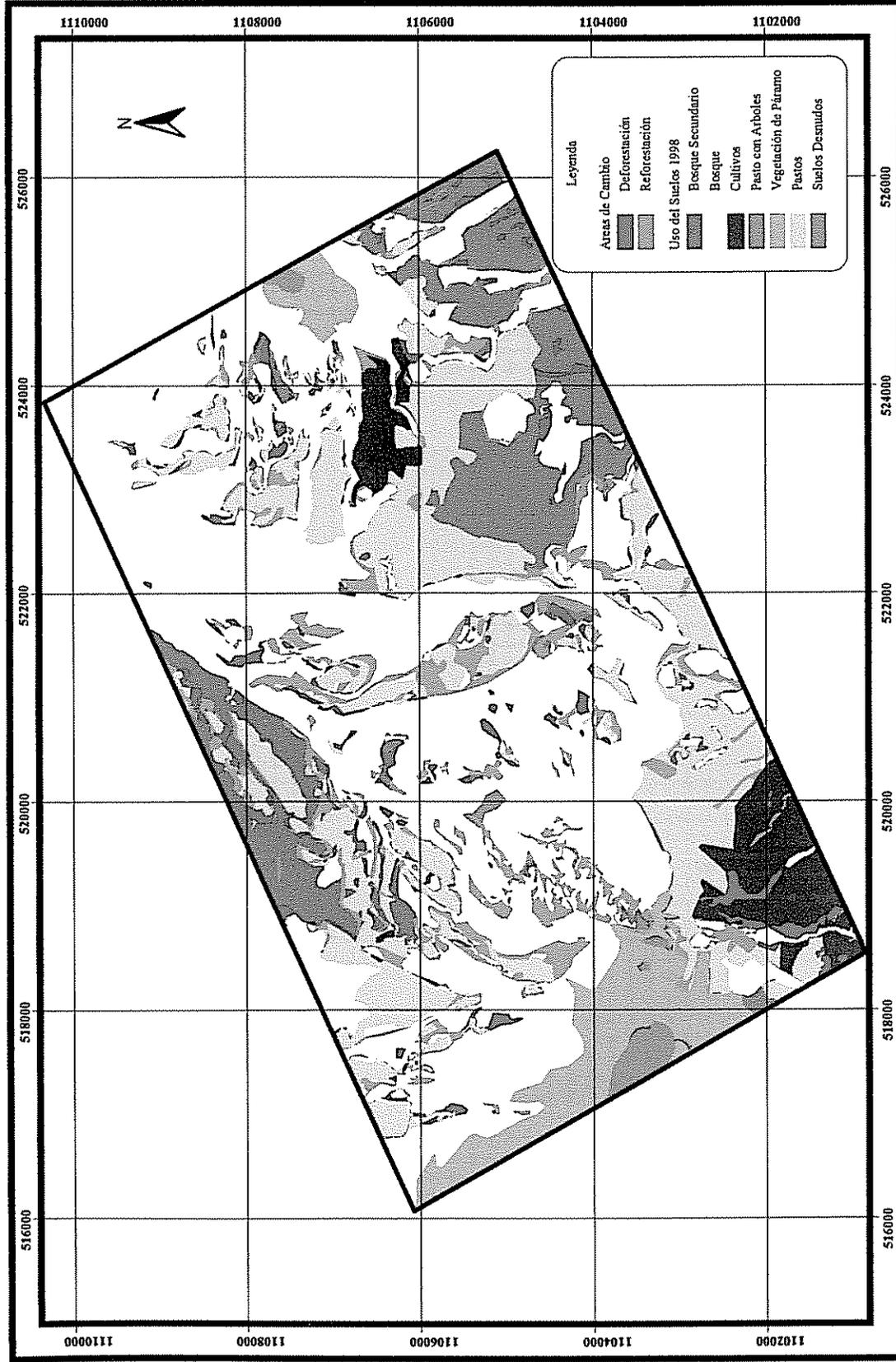




Anexo2. Dsitancia a casas y lecherias (metros), en la zona de estudio

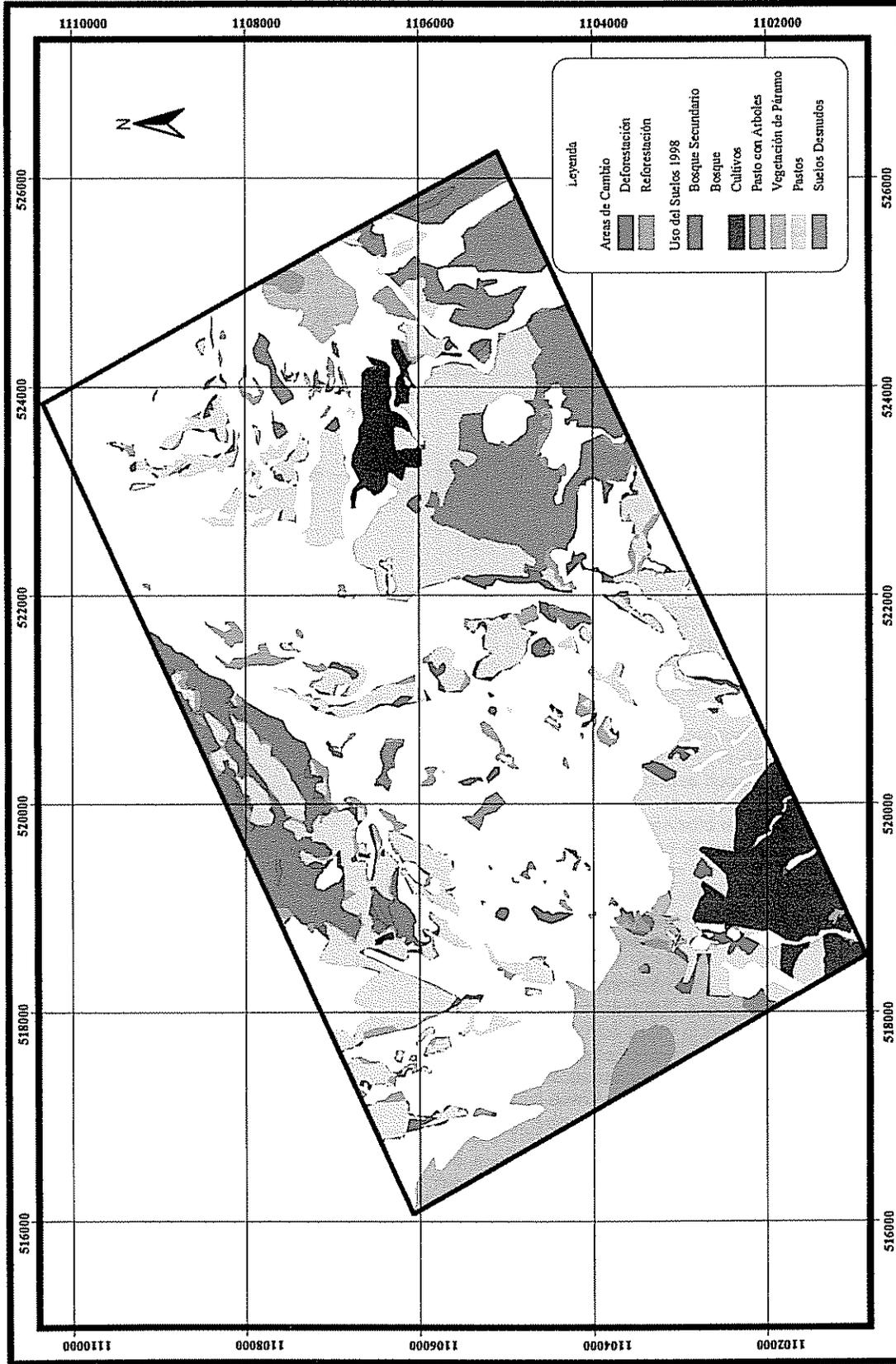


Anexo 3. Distancia como un costo de acceso (metros), en la zona de estudio



Elaborado por: Tania Bermúdez  
Fuente: Proyecto Terra

Anexo 4. Mapa de áreas Reforestadas y Deforestadas entre los años 1978 y 1992.



Elaborado por: Tania Bermúdez  
Fuente: Proyecto Terra

2 0 2 4 Km  
Anexo 5. Mapa de áreas Reforestadas y Deforestadas entre los años 1992 y 1998.

Anexo 6. Índices descriptivos utilizados para el paisaje estudiado.

Medida	Formula	Descripción
Total del área por clase	$CA = \sum_{j=1}^n a_{ij} \left( \frac{1}{10000} \right)$	CA es igual a la suma de las áreas (m <sup>2</sup> ) de todos los fragmentos por tipos de uso/cobertura, dividido entre 10000 (para convertir a hectáreas) <i>a<sub>ij</sub></i> = área por fragmento <i>ij</i>
Porcentaje del paisaje	$P_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} (100)$	<i>P<sub>i</sub></i> es igual a la suma de las áreas (m <sup>2</sup> ) de todos los fragmentos por tipos de uso/cobertura, dividido por el área total del paisaje (m <sup>2</sup> ), multiplicado por 100. <i>P<sub>ij</sub></i> = Porción del paisaje ocupado por cada tipo de fragmento <i>i</i> <i>a<sub>ij</sub></i> = área por fragmento <i>ij</i> , <i>A</i> = área total del paisaje <b>Valores de cero a 100</b>
Índice de shanon	$SHDI = - \sum_{i=1}^m (P_i \ln P_i)$	SHDI es igual a menos la suma de todos los tipos de fragmentos en proporción a la abundancia de cada tipo de fragmento multiplicado por cada proporción <i>P<sub>i</sub></i> = Proporción del paisaje ocupado por cada tipo de fragmento <i>i</i> Los valores van de <b>cero a sin límites</b> . Cero indica que el paisaje solo contiene un tipo de uso /cobertura o sea no-diversidad. A medida que aumenta el valor, este indica mayor número de usos con distribución proporcional
Índice de simpson	$SIDI = 1 - \sum_{i=1}^m P_i^2$	SIDI es igual a 1 menos la suma de todos los tipos de fragmentos en proporción a la abundancia de cada tipo de fragmento al cuadrado <i>P<sub>i</sub></i> = Proporción del paisaje ocupado por cada tipo de fragmento <i>i</i> El índice de Simpson representa la probabilidad de que algún pixel o celda seleccionada al azar pueda ser de diferentes tipos de uso / cobertura. Los valores de simpson van de <b>cero a 1</b> . Cero indica que el paisaje solo esta dominado por un tipo de uso, a medida que se acerca a 1 aumenta el número de usos diferentes con una distribución proporcional.
Dominancia	$D = \frac{H_{\max} + \sum_{i=1}^m (P_i) \log(P_i)}{H_{\max}}$	<i>D</i> = La desviación para un máximo posible de diversidad de paisaje o hábitat <i>m</i> = Número de tipos de usos observados en un mapa <i>P<sub>i</sub></i> = proporción de el uso <i>i</i> en el paisaje <i>H<sub>max</sub></i> = log( <i>m</i> ), máximo de diversidad, donde todos los usos están presentes en igual proporción Valores cercanos a <b>1</b> indican que el paisaje está dominado por uno o pocos usos, valores cercanos a <b>cero</b> indica proporciones casi iguales para todos los usos en el paisaje
Índice de contagio	$C = \frac{K_{\max} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (q_{ij}) \log(q_{ij})}{K_{\max}}$	<i>C</i> = Adyacencia de los tipos de uso/ cobertura <i>K<sub>max</sub></i> = <i>m</i> log( <i>m</i> ) y es el valor absoluto de la suma de ( <i>q<sub>ij</sub></i> ) log( <i>q<sub>ij</sub></i> ) donde todas las posibles adyacencias ocurren en igual probabilidades. Un valor cercano a <b>cero</b> indica patrones altos de dispersión y que todas las posibles adyacencias ocurren en igual proporción. Valores iguales o cercanos a <b>1</b> indican un paisaje con usos coberturas agrupados.

(McGarigal y Marks 1995)