

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA
PROGRAMA DE ENSEÑANZA PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACION
ESCUELA DE POSGRADUADOS

PROHIBIDO

**DINAMICA DE FACTORES ASOCIADOS AL USO DE LA TIERRA E
IMPLICACIONES SOBRE EL COLAPSO AMBIENTAL DE 1999 EN LA
COSTA NORTE DE VENEZUELA**

POR

FELIPE SANTIAGO BARITTO LOZANO

CATIE

Turrialba, Costa Rica
2000

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

DIC 2000

RECIBIDO

**DINAMICA DE FACTORES ASOCIADOS AL USO DE LA TIERRA
E IMPLICACIONES SOBRE EL COLAPSO AMBIENTAL DE 1999
EN LA COSTA NORTE DE VENEZUELA**

Tesis sometida a la consideración de la Escuela de Posgrado, 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:

Magíster Scientiae

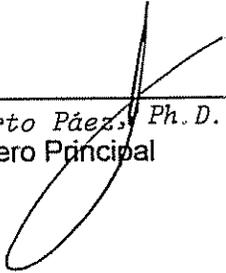
Por
Felipe Santiago Baritto Lozano

Turrialba, Costa Rica
2000

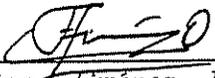
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma, por el Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación y la Escuela de Posgraduados del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante como requisito parcial para optar por el grado de:

MAGISTER SCIENTIAE

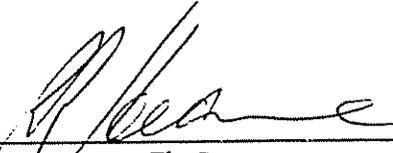
FIRMANTES:



Gilberto Páez, Ph.D.
Consejero Principal



Francisco Jiménez, Ph.D.
Miembro Comité Consejero

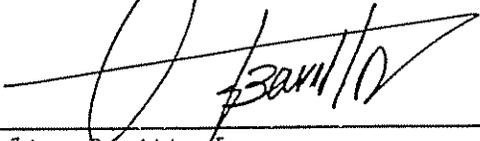


Robert Hearne, Ph.D.
Miembro Comité Consejero

Miembro Comité Consejero



Gilberto Páez, Ph.D.
Director y Decano de la Escuela de Posgraduados



Felipe Baritto Lozano
Candidato

AGRADECIMIENTOS

A mi querida esposa Omaira y a mi adorada hija Erika, les estaré eternamente agradecido por la maravillosa oportunidad de compartir la vida con ustedes y por apoyarme en todo momento.

A mis padres, Felipe Baritto González y Verónica Delia de Baritto, y a mis suegros Félix Ernesto Planas y Rosario de Planas, por su cariño, confianza y apoyo. A mis hermanos y a todos los familiares que de alguna u otra forma nos han apoyado durante este tiempo, así como al Sr. Nabor Pérez por su importante colaboración durante las labores de campo.

A mi Consejero Principal, Dr. Gilberto Páez, por acompañarme estrechamente durante la ejecución de este trabajo, por la excelente atención brindada y por sus enseñanzas y dedicación a tiempo completo.

A los miembros de mi Comité Asesor: Dr. Lucio Pedroni, Dr. Robert Hearne, Dr. Francisco Jiménez, Dr. Alan González, y el Dr. Markku Kanninen, por sus contribuciones y excelentes orientaciones.

Al Dr. Mario Piedra, por su excelente apoyo técnico y por creer profundamente en nuestro trabajo.

A mis asesores externos, Miguel Carriquiry M. Sc., Victor Ojeda M. Sc., Gral. Orlando Navas, y a todo el personal del IICA en Venezuela, especialmente a Doris Poleo y Juana Andrade, por todo el apoyo recibido durante mi estadía en Venezuela.

A mis amigos y colegas Luis Graterol y Vladimir Valera, por su confianza y apoyo incondicional.

Al personal del Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales (MARN), especialmente a Eduardo Szeplaki, Alfredo Arteaga, José Carlos Rodríguez, Prof. Oswaldo Centeno, Marisol Salazar, Laila Iskandal, Carlos Urbina y Luz Elena Rivas, por apoyarnos con el suministro de información básica y durante el trabajo realizado en Venezuela.

A Sergio Velásquez y Alexander Salas, por apoyarnos en el procesamiento de información.

A los Dres. Francisco Alpizar y Gunnar Kohlin, por financiar parte de este trabajo a través del Convenio CATIE-SIDA-Universidad de Göteborg.

A los Dres. Juan Vicente Salas y Juan Francisco Lupini, por su confianza y por apoyarme en la realización de mis estudios de maestría y trabajo de tesis.

Al Servicio Autónomo de Geografía y Cartografía Nacional (SAGECAN), especialmente al Cnel. Romer Mena Navas, Cap. Ricardo Negrón, Lic. Michel Cunil, Geog. Alicia Moreau y a María Luisa Dolande, por el suministro de información básica y por donar parte de la información requerida.

Al Cnel. Chacón Labrador por todo su apoyo y gestiones realizadas en Venezuela; y a la Fundación Gran Mariscal de Ayacucho por el financiamiento de mis estudios de maestría.

A todos mis amigos y compañeros del CATIE, especialmente a las familias Santos Morales (Guatemala), Aguilar Obregón (Nicaragua) y Rodríguez Cardona (Colombia), de quienes recibimos siempre su incondicional apoyo y excelente amistad.

A todo el personal de la Biblioteca Orton y de la Escuela de Posgrado del CATIE.

Al Dr. Yegang Wu del South Florida Water Management District, por sus orientaciones.

CONTENIDO

Agradecimientos	iii
Contenido	iv
Lista de Cuadros.....	vii
Lista de Figuras.....	x
Lista de Anexos.....	xiii
Lista de Abreviaturas.....	xv
Resumen	xvi
Summary	xvii
1 INTRODUCCION	1
1.1 Caracterización del problema.....	1
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo general.....	4
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
1.3 Hipótesis.....	4
2 REVISIÓN DE LITERATURA	6
2.1 Antecedentes de desastres naturales en la Cordillera de La Costa.....	6
2.2 Características del evento de diciembre de 1999	10
2.3 Crecimiento de la población y patrón de ocupación del espacio.....	14
2.4 Cambios en el uso de la tierra: aspectos básicos.....	16
2.4.1 Factores que influyen en el cambio de uso de la tierra	17
3 MATERIALES Y METODOS.....	23
3.1 Localización de la investigación	23
3.2 Análisis espacial	25
3.2.1 Unidad de información.....	25
3.2.2 Fuentes de información básica y preparación de la información	26
3.2.3 Generación de datos espaciales.....	30
3.2.4 Diseño de los modelos de análisis.....	33

3.2.4.1	Estimación de la probabilidad de cambios en el uso de la tierra previo al evento de 1999 (modelos de transición).....	34
3.2.4.1.1	Probabilidad de los eventos de transición (Y)	40
3.2.4.1.2	Relaciones entre las probabilidades de transición y los factores considerados	42
3.2.4.1.3	Efecto espacial de los factores de la matriz de incidencia en los modelos de transición	50
3.2.4.1.4	Estabilidad de los parámetros estimados en el tiempo.....	51
3.2.4.2	Respuesta de áreas al evento de 1999	52
3.3	Caracterización de la periodicidad de eventos extremos de precipitación en el área de estudio.....	57
4	RESULTADOS Y DISCUSION	61
4.1	Clasificación del uso o cobertura de la tierra en cada uno de los instantes t_h considerados	61
4.2	Cambios en el uso/cobertura de la tierra entre 1958 y 1994.....	65
4.3	Modelos de transición del uso de la tierra previo al evento de 1999.....	69
4.3.1	Estabilidad en el tiempo de los parámetros estimados	71
4.3.2	Efectos de la matriz de factores sobre los cambios de estado en el uso de la tierra estimados con los modelos de transición	72
4.3.2.1	Efectos marginales sobre las transiciones a uso urbano.....	76
4.3.2.2	Efectos marginales sobre las transiciones a usos agrícolas y vegetación secundaria	77
4.3.2.3	Efectos marginales sobre las transiciones a cobertura boscosa y arbustiva	79
4.3.2.4	Efectos marginales sobre las transiciones a cobertura herbácea y suelos sin cobertura definida o escasa cobertura vegetal	81
4.4	Implicaciones de los cambios en el uso de la tierra respecto al proceso de ocupación e intervención del área de estudio.....	82
4.5	Respuesta de áreas al evento de 1999.....	84
4.6	Caracterización de la periodicidad de eventos extremos de precipitación.....	89

5	CONCLUSIONES.....	95
5.1	Generales.....	95
5.2	Específicas.....	95
5.2.1	El evento de diciembre de1999.....	96
6	RECOMENDACIONES.....	98
6.1	Generales.....	98
6.2	Específicas.....	98
7	BIBLIOGRAFIA.....	99
8	ANEXOS.....	104

LISTA DE CUADROS

		Página
Cuadro 1:	Antecedentes de desastres naturales relacionados con deslizamientos de tierra y aludes torrenciales para el área de estudio.	7
Cuadro 2:	Factores directrices del cambio en el uso de la tierra considerados por varios autores.	19
Cuadro 3:	Estimación de la superficie de las cuencas hidrográficas prioritarias incluidas dentro del área de estudio.	23
Cuadro 4:	Información básica de sensores remotos.	29
Cuadro 5:	Clasificación convencional de patrones de uso de la tierra.	33
Cuadro 6:	Matriz de transición de estados entre dos instantes (t_h, t_{h+1}).	36
Cuadro 7:	Definición de la matriz de probabilidades markovianas de transición (MPT) para cambios ocurridos entre dos instantes (t_h, t_{h+1}).	37
Cuadro 8:	Matriz de incidencia de factores reguladores del cambio en el uso de la tierra (\mathbf{x}).	46
Cuadro 9:	Dirección esperada en los efectos marginales sobre las probabilidades estimadas de transición en el uso de la tierra, con cambios en las variables de la matriz de incidencia ($\partial F/\partial X$)	51
Cuadro 10:	VARIABLES explicativas consideradas en el análisis de la respuesta de áreas al evento de diciembre de 1999.	55
Cuadro 11:	Unidades litológicas identificadas en el área de estudio por Urbani <i>et al</i> (2000)	56

	Página
Cuadro 12: Estaciones meteorológicas del MARN utilizadas como referencia para el análisis de eventos extremos de precipitación.	57
Cuadro 13: Resumen de la clasificación de tipos de uso de la tierra para la muestra $n=3770$ y estimación de la proporción de superficie de cada uso dentro del área de estudio	62
Cuadro 14: Matriz de probabilidades markovianas de transición (MPT) para el período 1958 y 1973	67
Cuadro 15: Matriz de probabilidades markovianas de transición (MPT) para el período 1973 y 1983	67
Cuadro 16: Matriz de probabilidades markovianas de transición (MPT) para el período 1983 y 1994	68
Cuadro 17: Características de los factores que coadyuvan al cambio diferenciado	69
Cuadro 18: Precisión de la estimación de transiciones ocurridas a partir del modelo multinomial logístico (1958-1973).	70
Cuadro 19: Precisión de la estimación de transiciones ocurridas a partir del modelo multinomial logístico para el período 1973-1983.	70
Cuadro 20: Precisión de la estimación de transiciones ocurridas a partir del modelo multinomial logístico para el período 1983-1994.	71
Cuadro 21: Evaluación indirecta de la estabilidad en el tiempo de los parámetros β_x estimados en los modelos de transición de uso de la tierra.	72

		Página
Cuadro 22:	Parámetros estimados en el modelo multinomial logístico para las transiciones ocurridas entre 1958 y 1973	73
Cuadro 23:	Efectos marginales (EM) con cambios en la matriz de incidencia para las transiciones ocurridas entre 1958 y 1973.	73
Cuadro 24:	Parámetros estimados en el modelo multinomial logístico para las transiciones ocurridas entre 1973 y 1983	74
Cuadro 25:	Efectos marginales (EM) con cambios en la matriz de incidencia para las transiciones entre 1973 y 1983.	74
Cuadro 26:	Parámetros estimados en el modelo multinomial logístico para las transiciones ocurridas entre 1983 y 1994	75
Cuadro 27:	Efectos marginales (EM) con cambios en la matriz de incidencia para las transiciones ocurridas entre 1983 y 1994.	75
Cuadro 28:	Parámetros estimados para la evaluación de la respuesta de áreas al evento de diciembre de 1999.	86
Cuadro 29:	Efectos marginales (EM) con cambios en las variables explicativas en el modelo de respuesta de áreas al evento de diciembre de 1999.	86
Cuadro 30:	Resultados de la prueba de Bartlett's Kolmogorov-Smirnov (B-K-S) para evaluar si las series de eventos extremos de precipitación $P_{MAX,t}$ representan ruido blanco	92

LISTA DE FIGURAS

		Página
Figura 1:	Tendencia de la normal de precipitación mensual (1968-1992) y comparación con los valores mensuales registrados en el año 1999 en la Estación Maiquetía, según datos de SINAHIME, Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales.	11
Figura 2:	Precipitación diaria en diciembre de 1999 en dos estaciones meteorológicas del área de estudio (Maiquetía y Mamo) y comparación con el evento de febrero de 1951.	13
Figura 3:	Evolución del número de habitantes en los centros poblados de Maiquetía-Catia La Mar, La Guaira, Macuto, Caraballeda, y Carmen de Uria; según los censos realizados en los años 1940 a 1990, y estimaciones de OCEI para el año 1999.	15
Figura 4:	Localización de la investigación.	24
Figura 5:	Representación gráfica de la unidad de información definida para el estudio, con base en el establecimiento de una red arbitraria de celdas en el espacio (grid-cells).	26
Figura 6:	Esquema metodológico seguido para la generación y procesamiento de información básica, y elaboración de los modelos de análisis espacial.	27
Figura 7:	Cobertura de unidades de información (muestra $n=3770$)	32
Figura 8:	Proceso de cambio en el uso de la tierra: $\Delta UT/\Delta t = (UT_j - UT_i) / (t_{h+1} - t_h)$	35
Figura 9:	Alternativas de transiciones (Y) entre instantes	39

	Página	
Figura 10:	Diagrama del proceso espacio-temporal de cambio en el uso de la tierra para el área de estudio, y su relación con las fuerzas o factores directrices considerados	44
Figura 11:	Tendencia de la magnitud de la varianza muestral en función del tamaño de muestra (n) para las interpretaciones de uso/cobertura de la tierra en cada uno de los años considerados.	63
Figura 12:	Influencia de los factores altitud y condición de área protegida (Parque Nacional) sobre las probabilidades de transición a uso agrícola y vegetación secundaria (p_{+AGVS}) en los tres períodos analizados.	78
Figura 13:	Influencia del régimen de precipitación anual y la condición de área protegida (Parque Nacional) sobre las probabilidades de transición a cobertura boscosa (p_{+BOS}) en los tres períodos analizados.	80
Figura 14:	Influencia del régimen de precipitación anual y la condición de área protegida (Parque Nacional) sobre las probabilidades de transición a cobertura arbustiva (p_{+ARB}) en los tres períodos analizados.	81
Figura 15:	Influencia de la distancia a vías de acceso y la condición de área protegida (Parque Nacional) sobre las probabilidades de transición a cobertura herbácea (p_{+CHSD}) en los tres períodos analizados.	82
Figura 16:	Influencia de la pendiente y la distancia a cauces de ríos y quebradas sobre las probabilidades de (i) deslizamientos de tierra en laderas, y (ii) sin daños aparentes.	89

		Página
Figura 17:	Series de eventos extremos de precipitación ($PMAX_t$) en tres estaciones meteorológicas ubicadas en la Cordillera de La Costa (litoral central)	90
Figura 18:	Periodogramas de eventos extremos de precipitación ($PMAX_t$) en tres estaciones meteorológicas ubicadas en la Cordillera de La Costa (litoral central)	91
Figura 19:	Primeras diferencias ($PMAX_{(t)} - PMAX_{(t-1)}$) de la serie de eventos extremos de precipitación y gráfico de autocorrelación (correlograma) para datos de la Estación Naiguatá.	93
Figura 20:	Primeras diferencias ($PMAX_{(t)} - PMAX_{(t-1)}$) de la serie de eventos extremos de precipitación y gráfico de autocorrelación (correlograma) para datos de la Estación Carayaca.	93
Figura 21:	Primeras diferencias ($PMAX_{(t)} - PMAX_{(t-1)}$) de la serie de eventos extremos de precipitación y gráfico de autocorrelación (correlograma) para datos de la Estación Mamo.	94

LISTA DE ANEXOS

		Página
Anexo 1A:	Pendiente del terreno (inclinación en °)	105
Anexo 2A:	Altitud (m.s.n.m)	106
Anexo 3A:	Régimen de precipitación anual (Isoyetas)	107
Anexo 4A:	Areas pertenecientes al Parque Nacional El Avila	108
Anexo 5A:	Distancia mínima horizontal a cauces de ríos y quebradas	109
Anexo 6A:	Distancia mínima horizontal a vías de acceso	110
Anexo 7A:	Unidades litológicas, según Urbani <i>et al</i> (2000)	111
Anexo 8A:	Tendencias de los valores de probabilidad de transición en el uso/cobertura del suelo con cambios en las variables explicativas (Período 1958-1973).	112
Anexo 9A:	Tendencias de los valores de probabilidad de transición en el uso/cobertura del suelo con cambios en las variables explicativas (Período 1973-1983).	113
Anexo 10A:	Tendencias de los valores de probabilidad de transición en el uso/cobertura del suelo con cambios en las variables explicativas (Período 1983-1994).	114
Anexo 11A:	Deslizamientos de tierra y cobertura vegetal en laderas, ocasionados por las lluvias extremas de diciembre de 1999.	115
Anexo 12A:	Detalle de flujo de materiales gruesos (predominantemente rocas) en un segmento de la imagen IKONOS-2.	116

		Página
Anexo 13A:	Detalle de flujo de sedimentos (lodo) en un segmento de la imagen IKONOS-2.	117
Anexo 14A:	Formación de nuevas áreas (conos de deyección) en la franja costera.	118
Anexo 15A:	Patrones típicos de ocupación urbana dentro del área de estudio.	119

LISTA DE ABREVIATURAS

CAF	Corporación Andina de Fomento
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
SEMETFAV	Servicio de Meteorología de la Fuerza Aérea de Venezuela
MARN	Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales
SINAIHME	Sistema Nacional de Información Hidrológica y Meteorológica del Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales
ORCOPLAN	Oficina Regional para la Coordinación de Planes
OCEI	Oficina Central de Estadística e Informática
SAGECAN	Servicio Autónomo de Geografía y Cartografía Nacional

RESUMEN

Palabras claves: Vulnerabilidad, uso de la tierra, modelos logísticos, análisis espacial, precipitación extrema, land-use change, modelos probabilísticos, Venezuela, probabilidad de Markov.

A mediados de diciembre de 1999 la población venezolana fue seriamente afectada por uno de los peores desastres naturales ocurridos en su historia, concentrándose con mayor severidad en la región norte del país y más específicamente en las áreas correspondientes al Estado Vargas en la Cordillera de La Costa por la incidencia de precipitaciones de intensidad y duración extremas que provocaron aludes torrenciales e inundaciones de gran magnitud, dejando como resultado cuantiosas pérdidas económicas y de vidas humanas, y un daño importante a los ecosistemas.

Los antecedentes demuestran que este tipo de fenómenos poseen una alta recurrencia, incluso desde épocas remotas, destacándose particularmente los eventos de 1798, 1914, 1938, 1944, 1948, 1949 y 1951. Sin embargo, las consecuencias generadas fueron significativamente menores debido a la magnitud misma con la que incidieron estos eventos y al tamaño de la población y el patrón de ocupación del espacio en cada uno de estos instantes. A pesar de tales antecedentes, la ocupación e intervención de estas zonas altamente vulnerables se ha mantenido a través del tiempo como parte del proceso de expansión no controlado de estos centros urbanos, determinando la saturación de las escasas áreas planas existentes y el crecimiento de una franja marginal en torno a las laderas en áreas con excesiva pendiente y en proximidades de cursos de ríos y quebradas, que tiende a avanzar sobre el Parque Nacional El Ávila.

En la presente investigación se analizaron tres aspectos básicos relacionados con esta problemática. En primer lugar, se estudió el proceso de ocupación e intervención del espacio previo al evento de 1999, usando como referencia información espacio-temporal contenida en una serie de fotografías aéreas de los años 1958, 1973, 1983 y 1994, e información temática diversa, y la relación de las transiciones en el uso de la tierra expresadas en el paisaje con factores directrices que contribuyen a facilitar o restringir la ocurrencia de cambios, usando modelos multinomiales logísticos. De esta manera, la probabilidad de transición de usos de la tierra en el tiempo fue utilizada como un indicador del proceso de evolución hacia una mayor exposición de la población a condiciones riesgosas y de la intervención del ecosistema.

En segundo lugar, se analizó la respuesta de áreas a la incidencia del evento de 1999 utilizando información del satélite IKONOS-2 y relacionando las diferentes categorías de daños identificadas

en el espacio con factores físicos (relieve, geología, distancia a cursos de agua) y el uso previo de la tierra.

Por último, se analizó la periodicidad de eventos extremos de precipitación, tomando como referencia los valores máximos diarios registrados en dos estaciones meteorológicas localizadas en la parte baja de la Cordillera de La Costa (Mamo y Maiquetía), y una estación ubicada en la parte alta (Carayaca), por medio de análisis armónico de series finitas de Fourier.

En las partes medias a altas de las cuencas analizadas, los cambios ocurridos en el uso de la tierra previo al evento de 1999 fueron menos severos que lo hipotetizado, observándose un paulatino abandono de la intervención por usos agrícolas y una recuperación del ecosistema con vegetación secundaria, en tanto que la dinámica de las partes bajas de las cuencas estuvo dominada por la ocupación con fines urbanísticos a través del tiempo.

Los modelos de transición de uso de la tierra previo al evento de 1999 resultaron altamente significativos ($P < 0.01$) en explicar los valores probabilísticos de cambios y su relación con los factores considerados en los tres períodos analizados (1958 a 1973; 1973 a 1983; y 1983 a 1994).

Uno de los aspectos relevantes encontrados es que la probabilidad de transición a usos urbanos no parece estar regulada por factores normativos (como la condición de área protegida del Parque Nacional El Ávila, y la distancia mínima a cauces de ríos y quebradas) ni por restricciones físicas derivadas del relieve, de manera que cualquier área ubicada en las adyacencias de la frontera de crecimiento de estas zonas pobladas puede potencialmente ser convertida en el futuro con fines urbanos. Esto implica la necesidad de diseñar e implementar medidas integrales para lograr un mejor control de la ocupación de estas áreas vulnerables.

Por otra parte, no se observó un efecto significativo del tipo de uso o cobertura de la tierra sobre la probabilidad de colapso por movimientos de masa ante eventos extremos como el ocurrido en diciembre de 1999, sugiriendo que la magnitud de fenómenos extremos como este se traduce en una respuesta no diferenciada del ecosistema.

El análisis de la periodicidad de eventos extremos de precipitación potencialmente desencadenantes de aludes torrenciales indica que estos no poseen un patrón cíclico claramente diferenciable, por lo que no es posible predecir su ocurrencia. Por ello, se requiere entonces la implementación de estrategias preventivas fundamentadas en la organización comunal e institucional y sistemas de alerta temprana.

SUMMARY

About the middle of December 1999, the Venezuelan population was seriously affected by one of the worse natural disasters that occurred in its history. The disaster occurred with greater severity in the northern region of the country, more specifically in areas of Vargas State in the La Costa Mountain Chain because the incidence of high-intensity and long duration rains that provoked torrential landslides and flooding of great magnitude. The resulting damage was substantial human and economic losses, as well as important damage to the ecosystem.

The type of phenomenon described above, has a high occurrence since immemorial time, particularly in the years 1798, 1914, 1938, 1944, 1948, 1949 and 1951. Nevertheless, the consequences were significantly less due to the magnitude of the events, the population size and the demography in each one of these instances.

In spite of past experience, the continued occupation and intervention in these highly vulnerable zones was maintained as a part of the uncontrolled expansion process of this urban centers, determining the saturation of the very little existing flat lands and occupation on the marginal strips of hillsides in areas with excessive slopes and in close proximity to rivers and creeks, that pass above the El Avila National Park.

In the present study, three basic aspects related to this problem were analyzed. In the first place, the process of spatial occupation and intervention previous to the 1999 event was studied, using time-spatial information contained in a series of aerial photographs of 1958, 1973, 1983 and 1994, information of diverse themes, and the relation of the transitions in the land use expressed in the landscape with factors that contribute to promote or restrict these changes, by using multinomial logit models.

In this manner, the probability of transition of land use through time was utilized as an indicator of the process of evolution towards a greater exposure of the population to risky conditions and ecosystem intervention.

In the second place, the response of the area to the event of 1999 was analyzed using information from IKONOS-2 satellite, and relating the different categories of spatial damages identified with physical factors (relief, lithologic units, distance to the water course) and prior land use.

Finally, the periodicity of the extreme precipitation events was analyzed by means of harmonic analysis of Fourier finite series. The basic information used were the maximum daily values registered per year in two meteorological stations located in the lower part of the La Costa Mountain Chain (Mamo and Maiquetía), and a station located in the upper part (Carayaca).

The changes that occurred in land use previous to the 1999 event, in the middle to upper parts of the analyzed watersheds, were less severe than what was hypothesized. There was a gradual abandonment in intervention through agricultural use and recuperation of the ecosystem with secondary vegetation, while the lower parts of the watersheds were dominated by urbanized occupation through time.

The transition models of land use prior to the 1999 event were highly significant ($P < 0.01$) in explaining the probability values of change and its relation with factors considered in the three periods analyzed (1958 to 1973; 1973 to 1983; and 1983 to 1994). One of the more relevant aspects found is that the probability of transition to urban use was not regulated by normative factors (like the condition of the protected area of the El Avila National Park, and the minimum distance to the river channel and ravines) nor by physical restrictions derived from the relief of the land, so that whatever area located adjacent to the growing border of the populated areas can potentially be converted in the future to urban centers. This implies that there is need to design and implement an integrated set of measures to achieve better control of the occupation of these vulnerable areas.

On the other hand, no significant effect of the previous land-use on the probability of collapse by mass movement was observed for the 1999 event, suggesting that the magnitude of extreme phenomena like this one produce non-differenced responses.

Analysis of the periodicity of extreme precipitation events that could potentially unleash mass movements indicates that these events do not have a clearly defined cyclic pattern, and therefore it is not possible to predict their occurrence. Based on this, the implementation of community based and institutionalized preventive strategies, as well as early warning systems, are required.

1 INTRODUCCION

1.1 Caracterización del problema

A mediados de diciembre de 1999 la población venezolana fue seriamente afectada por uno de los peores desastres naturales ocurridos en su historia, el cual causó daños considerables en ocho entidades federales del territorio nacional, específicamente en los Estados Vargas, Miranda, Carabobo, Yaracuy, Falcón, Zulia, Nueva Esparta, y el Distrito Federal, debido a precipitaciones de intensidad y duración extremas que incidieron sobre la región norte del país, provocando aludes torrenciales e inundaciones de gran magnitud.

Las pérdidas económicas, sociales y ecológicas ocasionadas por este desastre natural fueron de grandes proporciones, reportándose un balance general de unas 15 mil a 20 mil personas desaparecidas o fallecidas; 273 mil personas afectadas; 64 mil viviendas con algún tipo de daño (de las cuales se consideraron destruidas al menos un 38% de éstas); 9 hospitales, 47 ambulatorios y 153 centros educativos también con algún tipo de afectación (CAF-PNUD, 2000; García, 2000), aunque existen contradicciones y opiniones diversas en cuanto a la verdadera magnitud del desastre ocurrido.

La región más drásticamente afectada fue el Estado Vargas, en la vertiente norte de la Cordillera de La Costa, con importantes daños en los centros poblados de Maiquetía, La Guaira, Punta Mulato, Macuto, El Cojo, Camurí Chico, Caraballeda, Tanaguarena, Punta Tigrillo y Carmen de Uria.

Debido a la particular fisiografía de esta parte de la Cordillera de la Costa, caracterizada por un relieve abrupto que alcanza grandes desniveles en cortas distancias horizontales, y a la existencia de condiciones que facilitan la ocurrencia de precipitaciones excepcionales de intensidad y duración extremas, la incidencia de este tipo de fenómenos y sus daños asociados conforman una larga lista de antecedentes a través de la historia, de allí la importancia de estas áreas a las que se ha dirigido la presente investigación.

A pesar de tales antecedentes, la ocupación e intervención de estas zonas altamente vulnerables se ha mantenido a través del tiempo como parte del proceso de expansión no

controlado de estos centros urbanos y que, debido a la necesidad por el uso del espacio, ha conllevado a la ocupación de lugares no adecuados para el asentamiento humano, particularmente en las proximidades de cauces de ríos y en laderas con excesiva pendiente e inestabilidad.

En el ámbito mundial, el tema de la vulnerabilidad ha venido cobrando especial importancia en años recientes, motivado por la creciente incidencia de los desastres naturales y de las consecuencias de su impacto directo sobre la sociedad y sobre los ecosistemas, el cual normalmente se traduce en cuantiosas y lamentables pérdidas en forma prácticamente instantánea.

Sin embargo, la tipificación de estos fenómenos como eventos estrictamente naturales ha sido cuestionada en los últimos años, por lo que ha comenzado a considerarse la cuota de participación del hombre mismo en torno a esta problemática como un componente más del conjunto de factores asociados, bien sea actuando como un agente causal (a través del manejo inadecuado de los recursos y la intervención del ambiente), o a través del incremento en el nivel de exposición a condiciones de alto riesgo por la ocupación de áreas inapropiadas.

Partiendo de este enfoque, la vulnerabilidad del área de estudio fue evaluada desde dos perspectivas básicas relacionadas al problema. En primer lugar, se analizó el proceso espacio-temporal de cambio en el uso y cobertura de la tierra como un indicador de la evolución hacia una mayor exposición de la población a condiciones riesgosas y de la intervención del ecosistema, utilizando la probabilidad de transición en el tiempo como herramienta básica para la estimación de estos cambios.

En este sentido, para la presente investigación la ocupación e intervención de estas áreas por el hombre ha sido entonces entendida como un proceso socio-económico que ocurre a través del tiempo, y que interactúa con los procesos propios del ecosistema expresados por los cambios en el paisaje, por lo que el interés fundamental ha sido dirigido hacia el análisis de esta dinámica como un proceso coadyuvado o restringido por la influencia de factores relacionados a las condiciones o características mismas del medio en términos físico-naturales, y de factores de naturaleza antropogénica.

De esta manera, se estudiaron algunos factores que inciden en los cambios de uso de la tierra a través del tiempo para estas áreas del país con base en la información histórica contenida en fotografías aéreas e información temática diversa, tratando de adaptar algunas metodologías convencionalmente utilizadas para el estudio de la dinámica de cambios en el paisaje con fines ecológicos y empleando métodos econométricos para analizar la influencia de los factores considerados como posibles reguladores de las transiciones de uso de la tierra en el tiempo, y de la evolución hacia la ocupación e intervención del área.

En segundo lugar, se analizaron las características del evento de diciembre de 1999 en términos de la expresión de los daños asociados y su distribución espacial en forma de movimientos de masa (deslizamientos de tierra, daños por flujo de sedimentos y materiales gruesos).

En este sentido, se analizó la influencia de algunos factores relevantes sobre la respuesta de áreas a exhibir condiciones de colapso para este evento de carácter excepcional, incluyendo al uso y cobertura de la tierra como uno de los factores de interés a ser evaluados.

Aunque el evento de 1999 puede ser catalogado como un fenómeno excepcional en cuanto a su magnitud, y por ende difícilmente replicable, se consideró que la respuesta a este evento puede aportar información relevante para la caracterización de la vulnerabilidad extrema del área de estudio desde la perspectiva del riesgo natural que representan estas zonas, tomando en cuenta que los antecedentes sugieren una alta recurrencia de este tipo de fenómenos y de los daños que normalmente se derivan de su ocurrencia.

La periodicidad de eventos extremos de precipitación en el área de estudio fue también analizada, utilizando para ello técnicas de análisis armónico, con la finalidad de evaluar la posible existencia de patrones cíclicos en las series temporales disponibles de precipitación diaria en dos estaciones meteorológicas ubicadas en las partes bajas del área de estudio (Mamo y Naiguatá), y una estación localizada en la parte alta de la Cordillera de La Costa (Estación Carayaca).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Contribuir al conocimiento de la dinámica e incidencia de algunos factores asociados al proceso de cambio del uso de la tierra y de los recursos naturales en las áreas de la región norte de Venezuela más afectadas por el evento de diciembre de 1999, y su relación con la vulnerabilidad e inestabilidad del ecosistema.

1.2.2 Objetivos específicos

- Diseñar un modelo de análisis e interpretación del proceso de cambio espacial en el uso de la tierra previo al colapso de 1999 en las áreas más afectadas del país.
- Estimar la respuesta de las áreas afectadas por el evento en función de los factores físicos y la ocupación del ecosistema afectado.
- Caracterizar la ocurrencia secular de eventos climáticos extremos en la región norte del país, particularmente de las precipitaciones.

1.3 Hipótesis

Las siguientes hipótesis fueron formuladas:

- El asentamiento humano e intervención no planificada en áreas vulnerables se traduce en una respuesta diferenciada del ecosistema.
- Las transiciones en el uso de la tierra a través del tiempo se encuentran reguladas por las restricciones físicas del medio y por factores de carácter socioeconómico y normativo (factores directrices).

- La persistencia del efecto de los factores directrices en determinar las transiciones de uso de la tierra conserva su magnitud y dirección en el tiempo.
- La respuesta de las áreas afectadas en diciembre de 1999, expresada como la probabilidad de exhibir condiciones de colapso, se encuentra regulada por la influencia de factores físicos y el uso previo de la tierra.
- Los eventos extremos de precipitación dentro del área de estudio son recurrentes y poseen un patrón cíclico definido.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Antecedentes de desastres naturales en la Cordillera de La Costa

Desde tiempos remotos, las poblaciones ubicadas en la Cordillera de La Costa han sido afectadas por la ocurrencia de desastres naturales ocasionados por fenómenos de deslizamientos de tierra, aludes torrenciales e inundaciones, que generalmente se asocian a la incidencia de eventos extremos de precipitación. Sin embargo, no existe antecedente alguno comparable al evento ocurrido en diciembre de 1999, lo cual se relaciona al tamaño de la población y a la magnitud misma de cada uno de estos eventos.

Según Pérez (1987), debido a su posición respecto a la franja ecuatorial tropical, Venezuela es influenciada por corrientes húmedas procedentes del Ecuador que determinan la existencia de un período lluvioso, lo cual se combina con la existencia de un sistema cordillerano con orientaciones que favorecen los procesos orográficos-convectivos. Por ello, en la región norte del país pueden generarse precipitaciones de gran intensidad y volumen que, asociado a la litología característica de estas zonas y las pronunciadas pendientes, contribuyen a favorecer la ocurrencia de este tipo de fenómenos geológicos.

En el Cuadro 1 se han resumido algunos de los principales eventos precedentes ocurridos en el área de estudio, con base en la información reportada por Singer *et al* (1983). Como se desprende de esta información, existe una alta recurrencia en la zona en cuanto a la ocurrencia de fenómenos de deslizamientos y movimientos en masa, los cuales normalmente suceden de manera muy localizada como eventos aislados que afectan a algunos centros poblados en forma de deslizamientos y derrumbes en carreteras y áreas urbanizadas.

Otros eventos se han manifestado de manera más generalizada causando daños a nivel regional. Entre los eventos que se tiene referencia, el más importante desastre natural que antecedió al de diciembre de 1999 fue el ocurrido entre los días 15 al 18 de febrero de 1951.

Cuadro 1. Antecedentes de desastres naturales relacionados con deslizamientos de tierra y aludes torrenciales para el área de estudio

Año	Localidad	Sitio	Tipo			Calificación del daño
			AT(1)	AS(2)	D(3)	
1740	La Guaira	Qda. Osorio	X			Destrucción considerable
1780	La Guaira	Qda. Osorio	X			Destrucción considerable
1789	La Guaira	Qda. Osorio	X			219 casas destruidas; 200 fallecidos
1797	La Guaira	Qda. Osorio	X			Daños en edificaciones
1812	La Guaira	Qda. Osorio		X		Daños considerables
1900	La Guaira	Qda. Osorio		X		-
	Maiquetía	Río Escondido		X		Balneario destruido
1938	La Guaira	Qda. Osorio	X			-
	Maiquetía	-	X			Cuantiosas víctimas (no especificado)
1944	La Guaira	Qda. Osorio	X			-
1948	La Guaira	Punta Mulatos	X			Daños considerables
	La Guaira	Qda. Osorio	X			-
	Macuto	El Cojo	X			Daños considerables
1950	La Guaira	El Vigía			X	-
1951	Caraballeda	El Palmar	X			Daños considerables
	Caraballeda	Tanaguarena	X			Daños considerables
	La Guaira	Qda. Osorio	X			300 viviendas destruidas; 7 fallecidos; otros daños
	Macuto	-	X			Daños considerables; vía obstruida
	Maiquetía	Boquerón			X	Interrupción autopista (70%); vía férrea dañada
1955	La Guaira	El Vigía			X	-
1967	Caraballeda	San Julián			X	Grandes derrumbes
	La Guaira	Palmar de Cariaco			X	-
1972	La Guaira	Qda. Osorio	X			-

(1) AT: Alud torrencial; (2) AS: Alud sísmico; (3) D: Derrumbe

Fuente: Adaptado de Singer *et al*, 1983

Cont. Cuadro 1. Antecedentes de desastres naturales relacionados con deslizamientos de tierra y aludes torrenciales para el área de estudio

Año	Localidad	Sitio	Tipo			Calificación del daño
			AT(1)	AS(2)	D(3)	
1973	Macuto	Galipán			X	Vía obstruida
	Naiguatá	Carmen de Uria			X	Vía obstruida
1975	Macuto	-	X			Vía obstruida
1976	La Guaira	El Vigía			X	Interrupción vía al Fortín y San Carlos
1977	La Guaira	El Cantón			X	Vía obstruida. Miles de personas aisladas
	Maiquetía	Guipuzcoana	X			Daños considerables
1978	Caraballeda	Tanaguarena			X	-
	Catía La Mar	-	X			Vía destruida
	Maiquetía	Aeropuerto	X			Pista 008 dañada
	Maiquetía	Barrio Girardot	X			30 Damnificados
	Maiquetía	Cerro Santa Ana			X	Vivienda dañada
	Maiquetía	El Rincón			X	1 fallecido
1979	Catía La Mar	Mirabál	X			19 viviendas destruidas; 2000 damnificados
	Catía La Mar	Urb. Páez	X			Vía interrumpida
	La Guaira	El Cantón			X	Vía interrumpida
	Maiquetía	Canaima	X			Vía interrumpida
	Maiquetía	Montesano	X			1 fallecido
	Maiquetía	Pariata			X	1 vivienda dañada

(1) AT: Alud torrencial; (2) AS: Alud sísmico; (3) D: Derrumbe
Fuente: Adaptado de Singer *et al*, 1983

Según CAF-PNUD (2000), los daños reportados para el evento de 1951 fueron menores a los de 1999 debido a la escasa población que para ese momento ocupaba el Litoral Central.

Otros eventos con características devastadoras han sido reportados por varios autores, entre los cuales destacaron particularmente los de febrero de 1798, enero de 1914,

noviembre de 1938, noviembre de 1944 y el de agosto de 1948 (Hernández Pino, 1939; Röhl, 1949; citados por CAF-PNUD, 2000; García, 2000).

En 1987 ocurre otro desastre natural en la Cordillera de La Costa en las inmediaciones de la población de El Limón, perteneciente al Municipio Mario Briceño Iragorry, Estado Aragua; dejando como consecuencia un millar de personas fallecidas. Bertorelli (1997) destaca como factores relevantes a este evento: i) la geomorfología de la zona; ii) la precipitación acontecida (con una intensidad de 174 mm en apenas 4.5 horas); iii) los incendios forestales, relacionados a la intervención humana; y iv) la sismicidad de la zona.

Adicionalmente, estas áreas se han visto afectadas por otros tipos de fenómenos naturales como sucedió con el terremoto del día 26 de marzo de 1812 el cual afectó a la región central, particularmente a las zonas hoy también afectadas por el desastre de diciembre de 1999, reduciendo la población de aproximadamente 8000 personas a casi 3000, y causando graves daños en las construcciones de la época¹.

De acuerdo a las referencias y antecedentes citados, puede decirse que el evento de 1999 realmente no representó novedad alguna para esta zona, y que por el contrario esta problemática puede considerarse recurrente, aunque la magnitud de su expresión varía en el tiempo.

En este sentido, el desastre natural ocurrido en diciembre de 1999 se destacó significativamente respecto a todos los eventos de los cuales se tiene referencia, no solo por la magnitud misma con la que incidió el factor disparador (lluvias extremas), sino también por las condiciones particulares de ocupación del espacio con las que se encontró el fenómeno, más específicamente por la intervención de las faldas bajas de las laderas de esta parte de la Cordillera y la ocupación de ríos y quebradas fundamentalmente por usos urbanos, siendo precisamente estas las áreas más afectadas en términos de pérdidas humanas y materiales.

¹ Pedro Cunill Grau, Geografía del Poblamiento venezolano del siglo XIX. Tomo I, página 484; citado por Guillermo Moreno en: El nuevo rostro humano, Diario El Nacional (Miércoles 05 de enero del 2000). Caracas, Venezuela.

2.2 Características del evento de diciembre de 1999

En términos de su período de retorno, las inundaciones y movimientos de masa ocurridos en diciembre de 1999 fueron generados por precipitaciones extremas catalogadas por diversos autores como un evento milenario (SEMETFAV, 1999; MARN, 1999; CAF-PNUD, 2000; García, 2000).

Dada la importancia de este factor extremo como agente desencadenante del fenómeno ocurrido, en esta parte se presenta una sucinta descripción de las características del evento, con base en el comportamiento normal de las precipitaciones en el área y su comparación con el evento más cercano que fue el de diciembre de 1951.

Según SEMETFAV (1999), la región norte del país presenta dos períodos climáticos bien definidos, que son determinados principalmente por el patrón de circulación general de la atmósfera y el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCI). Debido a ello, en esta región del país ocurre normalmente un período húmedo que se presenta desde mediados del mes de mayo hasta finales del mes de noviembre, y un período seco que ocurre en los restantes meses del año.

Durante este período seco el territorio nacional presenta normalmente condiciones de cielos despejados o parcialmente nublados y escasas precipitaciones, sin embargo, se encuentra influenciado por los vientos alisios del noreste, por lo que en este período ocasionalmente pueden desplazarse sistemas frontales provenientes del norte, provocando precipitaciones moderadas y fuertes.

Esta influencia ocasional, es comúnmente denominada como "Situación Norte", debido a que dichos sistemas meteorológicos se desplazan desde las latitudes medias septentrionales hacia el trópico, los cuales se asocian con vientos cargados de humedad que al encontrarse con la barrera natural que ofrece la Cordillera de La Costa, ascienden forzosamente por sus laderas montañosas provocando la formación de nubosidad de delgado espesor y en ocasiones de gran desarrollo, y lluvias de mediana intensidad que pueden persistir por varios días (García, 2000).

Esta situación produce una zona de inestabilidad atmosférica marcada en la región centro-norte del país que, para el caso del evento de diciembre de 1999 se presentó de manera acentuada generando una anomalía atmosférica comúnmente conocida como *vaguada*, cuya persistencia se debió a un bloqueamiento de la zona de Alta Presión del Atlántico, de la cual se desprendieron los restos de frente frío que intensificaron su actividad en los primeros veinte días de diciembre (SEMETFV, 1999).

Durante los tres primeros trimestres del año 1999 las precipitaciones mensuales registradas en la zona baja del área de estudio (Estación Maiquetía) indican un comportamiento normal que siguió cercanamente la tendencia mensual promedio registrada entre 1968 a 1992 (Figura 1).

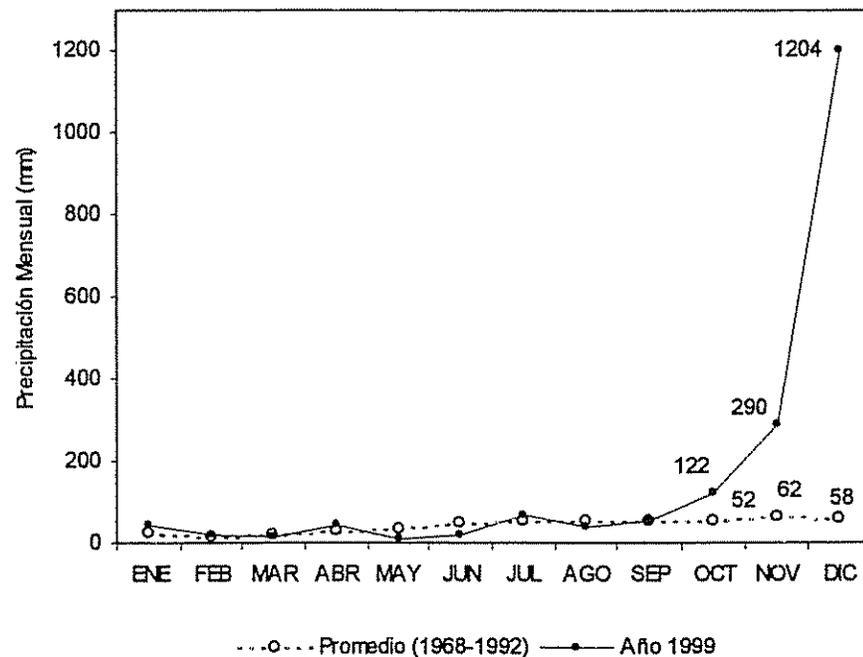


Figura 1: Tendencia de la normal de precipitación mensual (1968-1992) y comparación con los valores mensuales registrados en el año 1999 en la Estación Maiquetía, según datos de SINAIHME, Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales.

De acuerdo a estos registros, el comportamiento atípico de las precipitaciones en el año 1999 había comenzado a manifestarse desde los dos meses anteriores al evento (octubre y noviembre), lo que permite inferir que los suelos del área se encontraban muy húmedos en el momento de ocurrencia de los movimientos de masa.

Lo anterior concuerda con la secuencia cronológica reportada por CAF-PNUD (2000) y la prensa nacional, según la cual las primeras manifestaciones de torrentes desbordados y deslizamientos de tierra en el Estado Vargas habían comenzado a reportarse incluso desde los meses de octubre y noviembre, pero de manera muy localizada, es decir, como eventos aislados en algunos de los centros poblados ubicados dentro del área de estudio.

De acuerdo a la información reportada por la Estación Maiquetía, la cual se encuentra localizada en la parte baja de la Cordillera de La Costa, los mayores valores de precipitación fueron registrados durante los días 14, 15 y 16 de diciembre, con una lámina diaria de precipitación de 120 mm, 381 mm y 410 mm, respectivamente, coincidiendo precisamente con los días en los que ocurrieron los grandes desprendimientos de suelos y aludes torrenciales de manera generalizada en toda el área (Figura 2(A)).

Si se considera que el promedio de 30 años de registros para esta misma estación meteorológica es de 57.7 mm para diciembre (MARN, 1999), puede estimarse que la magnitud del evento de 1999, en apenas 17 días, fue equivalente a 20 veces la cantidad de agua que normalmente reciben estas zonas por precipitación en todo el mes de diciembre (Figura 2 (A)), y un poco más del doble de lo que precipita en promedio durante todo el año (tomando como base el promedio anual de 510.2 mm para el período 1968-1992).

En otra estación cercana al área de estudio (Estación Mamo/Escuela Naval), los valores reportados fueron menores a los observados en Maiquetía, con un máximo de 198 mm para el 16 de diciembre (Figura 2 (B)).

Debe considerarse además que, debido a la gran diferencia altitudinal respecto a las partes bajas (que llega a sobrepasar los 2700 metros), en la parte alta de la cordillera las precipitaciones tienden a superar en dos veces o más los valores de precipitación de las zonas bajas, por lo que según CAF-PNUD (2000) y SEMETFAV (1999) es de esperar que la cantidad de agua precipitada haya sido mayor hacia las cabeceras de las cuencas hidrográficas. Sin embargo, no se dispone de registros de precipitación en otras estaciones del área de estudio que permitan corroborar este hecho.

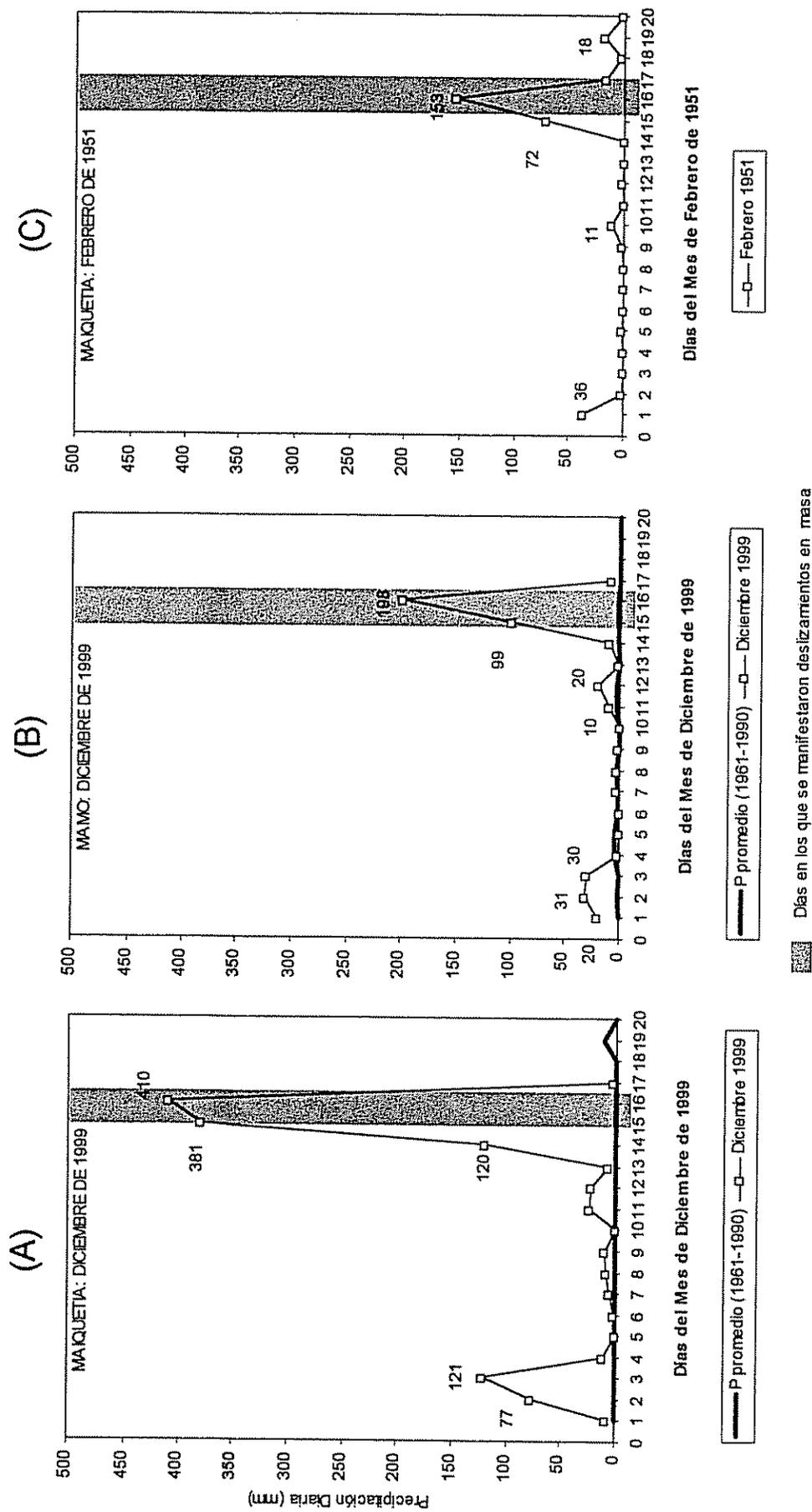


Figura 2: Precipitación diaria en diciembre de 1999 en dos estaciones meteorológicas del área de estudio (Maiquetía y Mamo) y comparación con el evento de febrero de 1951.

Fuente: Sistema Nacional de Información Hidrológica y Meteorológica (SINAIHME) del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales MARN (1999); SEMETFAV (1999); CAF-PNUD(2000).

Esto indica que la distribución en términos espaciales del evento ocurrido no fue homogénea, y que probablemente algunas áreas han de haber recibido mayor o menor cantidad de precipitación, pero este aspecto no podrá nunca conocerse, en vista de que la red hidrometeorológica del área de estudio se encontraba fuera de funcionamiento desde mucho antes de la ocurrencia del evento.

En la Figura 2 (C) se presentan los valores reportados en la Estación Maiquetía para el evento de febrero de 1951. Como se muestra en la curva de precipitación diaria para los primeros días del mes de febrero de ese año, el valor máximo de precipitación para este evento fue incluso inferior al máximo registrado en la Estación Mamo en diciembre de 1999, sin embargo esta cantidad de precipitación y la intensidad con la que ocurrió fueron también suficientes para desencadenar movimientos de masa similares a los de 1999, pero con una magnitud inferior.

2.3 Crecimiento de la población y patrón de ocupación del espacio

El proceso de ocupación e intervención del espacio en el litoral central posee una tradición e historia evolutiva estrechamente relacionada a la época colonial, y particularmente a la existencia del Puerto de La Guaira, formándose inicialmente en torno a este lo que se conoce hoy en día como el Casco Histórico de La Guaira.

Con el tiempo, los estrechos espacios en torno a los valles de los principales ríos y quebradas fueron ocupándose como parte del crecimiento mismo de la población, en tanto que las áreas ubicadas en las partes medias a altas de la Cordillera eran utilizadas con fines agrícolas.

Entre 1940 y 1990, la población ha crecido siguiendo una tendencia lineal (Figura 3), con un período marcado de crecimiento sostenido.

La población total contabilizada dentro del área de estudio, incluyendo a Catia La Mar, pasó de 36.177 habitantes en el año 1940, a 237.083 habitantes para el año 1990 (OCEI, 1941, 1951, 1961, 1971, 1981, 1991), estimándose un total de 254.441 habitantes para el año 1999, lo que implica un crecimiento relativo de 603% respecto a la población total del

año 1940 y una tasa de crecimiento anual estimada en 4.238 nuevos habitantes/año, lo que sugiere además una creciente demanda por el uso del espacio.

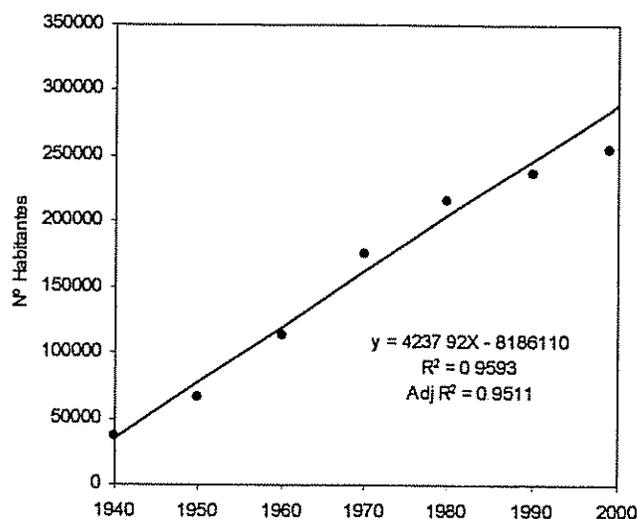


Figura 3: Evolución del número de habitantes en los centros poblados de Maiquetía-Catía La Mar, La Guaira, Macuto, Caraballeda y Carmen de Uria; según los censos realizados en los años 1940 a 1990, y valor estimado por OCEI para el año 1999. Fuente: Oficina Central de Estadística e Informática (OCEI).

Según ORCOPLAN (1983), las características mismas del relieve han jugado un importante papel condicionador del patrón de ocupación del espacio en esta región del país, determinando la saturación de las escasas áreas planas existentes, y la intervención no controlada sobre superficies no aptas que forman un cordón marginal que tiende a presionar y avanzar sobre el Parque Nacional El Avila (MARN, 1996), lo que a su vez ha conllevado grandes dificultades para dotar de servicios y equipamiento a sus pobladores.

Otro factor relevante considerado por ORCOPLAN (1983) en cuanto a la dinámica del proceso de ocupación e intervención de estas áreas ha sido la fuerte vinculación existente entre estos centros poblados y el Area Metropolitana de Caracas.

En este sentido, la cercanía a la ciudad capital, las funciones de puerto y aeropuerto nacional e internacional, y la actividades turístico-recreacionales relacionadas a su posición costera conllevan a una fuerte interacción y dependencia con respecto al dinamismo de la ciudad de Caracas.

Esta estrecha dependencia se traduce además en el hecho de que normalmente estas zonas del país constituyan una especie de ciudad dormitorio, ya que representan una de las alternativas más cercanas a la capital del país, la cual es la principal fuente generadora de empleo de la región central.

2.4 Cambios en el uso de la tierra: aspectos básicos

Normalmente los estudios de cambio en el uso de la tierra tienden a concentrarse en aspectos descriptivos, con la finalidad de documentar las transiciones ocurridas en el espacio en un determinado período de tiempo, y son el primer paso hacia análisis más refinados (Briassoulis, 1999). En estos casos se describen las características cuantitativas y cualitativas de los cambios ocurridos.

Otro tipo de aplicaciones intentan ir más allá del aspecto meramente descriptivo, tratando de contestar algunas interrogantes de interés sobre el *por qué* estos cambios están ocurriendo o han ocurrido, para lo cual se requiere el establecimiento de un conjunto de relaciones entre tales cambios y los factores que se consideran determinantes o sobre los cuales interesa evaluar su participación como coadyuvantes o limitantes de este tipo de procesos que se expresa en la condición del paisaje.

Para ello, existen diversas metodologías documentadas en la literatura científica y las mismas difieren tanto en su base teórica de soporte como en los métodos, procedimientos y herramientas específicas utilizadas para establecer tales relaciones.

La vía utilizada normalmente para este tipo de análisis se fundamenta en la elaboración de modelos capaces de capturar la relación existente entre los cambios expresados en el paisaje y la influencia de los factores que la determinan, existiendo varias alternativas para ello.

A pesar de que las metodologías conocidas para el análisis del cambio en el uso de la tierra y su relación con factores directrices cubren un amplio rango de problemas de estudio (entre los que destacan la deforestación de áreas, la fragmentación de bosques, y

la influencia de la intervención con fines agrícolas), no se tienen referencias de estudios previos en los que este tipo de metodologías hayan sido aplicadas al análisis del proceso de ocupación de áreas y la vulnerabilidad a desastres naturales como ha sido abordado en la presente investigación.

Por ello, y dado el interés en el estudio del proceso previo de ocupación e intervención de las áreas más afectadas por el evento de diciembre de 1999, en esta parte se revisan algunos factores considerados en la literatura como determinantes de los cambios en el uso de la tierra, los cuales sirvieron como referencia para la selección de los factores directrices utilizados en la presente investigación.

2.4.1 Factores que influyen en el cambio de uso de la tierra

Diversos autores han profundizado en el estudio de los cambios en la condición de uso de los recursos y particularmente en el uso de la tierra, por medio del análisis de los cambios expresados en el paisaje y utilizando para ello la información registrada por sensores remotos, como fotografías aéreas e imágenes de satélite.

Aunque el mayor énfasis de este tipo de investigaciones se ha concentrado en el estudio de aspectos ecológicos relacionados con la fragmentación de bosques, diversidad de especies y competencia por el espacio, ha habido también un creciente interés por incorporar en estos estudios la dinámica de ocupación e intervención del espacio por el hombre y la influencia de los factores relacionados a este en determinar tales cambios, siendo algunos ejemplos de ello los trabajos reportados por Turner *et al* (1996), Wear *et al* (1996), Bockstael (1996), Veldkamp *et al* (1992), Veldkamp y Fresco (1997a y 1997b) y Nelson (1999).

El término fuerzas directrices (*driving forces*, por su expresión en Inglés) constituye una denominación comúnmente utilizada en la literatura científica relacionada con el tema para hacer referencia a las variables o factores que explican los cambios en el uso de la tierra, y el interés fundamental consiste precisamente en evaluar la relevancia de su influencia en determinar tales cambios.

En esta investigación, el término *fuerzas directrices* ha sido substituido por el término *factores*, para referirse a las variables espaciales y temporales que influyen en el proceso de ocupación e intervención del espacio por el hombre.

En términos generales, se reconoce que la participación de los aspectos económicos y sociales constituyen quizás los factores de mayor relevancia capaces de introducir cambios en el paisaje a través del tiempo (Turner *et al*, 1996), y que en muchos casos la degradación de tierras es iniciada por cambios en la cobertura del suelo que resultan de la influencia del hombre, más que de la influencia de factores naturales propiamente dichos (Stoorvogel, 1995).

Sanderson y Pritchard (1993) hacen hincapié en la participación humana en torno a estos procesos de cambio, reconociendo que el uso de la tierra, en toda su complejidad subyacente, obedece a la influencia de factores sociales, tales como el desarrollo de la población y de la agricultura. Así, estos autores destacan la existencia de dos ejes básicos de factores incidentes o directrices, que interactúan en torno a un conjunto de modalidades o procesos de conversión de uso de la tierra, siendo estos específicamente factores biofísicos y humanos, que otros autores coinciden en otorgarle la misma importancia que Sanderson y Pritchard (1993) destacan.

Los factores socioeconómicos y biofísicos de mayor relevancia identificados en los estudios consultados han sido resumidos en el Cuadro 2. En algunos de estos estudios, es posible identificar la dirección (signo \pm) y significancia de su influencia sobre las variables de respuesta analizadas, así como los modelos utilizados como base para el análisis que presentan los autores citados.

Así por ejemplo, Turner *et al* (1996) utilizando modelos *Multinomial Logit* para analizar el cambio en la cobertura como una función de las características de los propietarios de la tierra en dos regiones de los Estados Unidos: (i) la Altiplanicie Apalache, en Washington; y (ii) la Península Olímpica (Carolina del Norte); encontraron diferencias importantes en las transiciones ocurridas a través del tiempo, entre propietarios, y entre las dos regiones de estudio.

Cuadro 2. Factores directrices del cambio en el uso de la tierra considerados por varios autores

Fuente:	Área de Estudio	Modelo utilizado	Variable de Respuesta	Factores (drivers) considerados	
				Socioeconómicos	Biofísicos
Bockstael (1996)	Cuenca del Río Patuxent, Washington, D. C. USA.	Precios hedónicos, con una muestra de $n = 15.929$ transacciones Unidad = Bloque de 5 x 5 celdas (250 acres) $Prob > F = 0.0001$ $R^2 = 0,5934$ R^2 -ajustado = 0,5928	1) Estimación del valor de la tierra en usos alternativos (log Precio) 2) Probabilidad condicional de que una parcela sea transformada La información del modelo hedónico es utilizada luego para evaluar las probabilidades de cambio en el uso de la tierra. Un enfoque eminentemente económico del cambio en el uso de la tierra.	<input type="checkbox"/> A. Tamaño del lote (-) ** <input type="checkbox"/> B. Distancia a Washington DC (-) <input type="checkbox"/> C. Interacción A x B (+) <input type="checkbox"/> D. Distancia a Baltimore (+)** <input type="checkbox"/> E. Distancia a centro del pueblo (-)** <input type="checkbox"/> F. Distancia a Autopista (-)** <input type="checkbox"/> G. Ubicación agua (dummy) (+)** <input type="checkbox"/> H. Distancia a Bahía (-)** <input type="checkbox"/> I. % Zonas de baja densidad (-)** <input type="checkbox"/> J. Interacción B x I (-)** <input type="checkbox"/> K. Áreas de conflicto (-) <input type="checkbox"/> L. Aeropuerto (Dummy) (-) <input type="checkbox"/> M. Comunidades planeadas (+)** <input type="checkbox"/> N. Condado Calvert (-)** <input type="checkbox"/> O. Condado Charles (-)** <input type="checkbox"/> P. Condado Howard (+) <input type="checkbox"/> Q. Condado Montgomery (+)** <input type="checkbox"/> R. Condado Prince Georges (-)** <input type="checkbox"/> S. Condado St. Mary (-)**	Fragmentación del paisaje: <input type="checkbox"/> A. % Bosque (+) <input type="checkbox"/> B. Área de cultivo (-)** <input type="checkbox"/> C. Conservación (+)** <input type="checkbox"/> D. Área de pasturas (-)
Berry <i>et al</i> (1996)	Cuenca de Little Tennessee River, y la Península Olympic.	Multinomial logit (LUCAS: Land Use Change Analysis System)	1) Probabilidades de transición (con una matriz de transición)	<input type="checkbox"/> Redes y costos de transporte <input type="checkbox"/> Características del propietario <input type="checkbox"/> Densidad de población	<input type="checkbox"/> Pendiente <input type="checkbox"/> Elevación <input type="checkbox"/> Vegetación de cobertura

** = Significativo; ± = Sentido de la influencia de la variable independiente sobre la variable de respuesta (positivo o negativo; o coadyuvante o limitante)

Cont. Cuadro 2. Factores directrices del cambio en el uso de la tierra considerados por varios autores

Fuente:	Area de Estudio	Modelo utilizado	Variable de Respuesta	Factores (drivers) considerados	
				Socioeconómicos	Biofísicos
Veldkamp y Fresco (1997b)	Costa Rica (como país)	Modelo de regresión lineal múltiple N = 419 Unidad = 56.3 km ² El análisis de factores confirma que los mecanismos y procesos que influyen en el uso de la tierra no cambiaron mucho en 11 años (1973-1984). El crecimiento de la población urbana y rural fueron los factores más relevantes en el modelo.	<ol style="list-style-type: none"> 1) Cambios en usos de la tierra 2) Interrelaciones entre cobertura del suelo y factores potenciales (mediante análisis de factores) 	<input type="checkbox"/> Población rural <input type="checkbox"/> Población Urbana <input type="checkbox"/> Fuerza laboral agrícola	<input type="checkbox"/> Altitud <input type="checkbox"/> Relieve <input type="checkbox"/> Suelos <input type="checkbox"/> Variabilidad climática
Stoorvogel (1995)	Costa Rica. Cordillera de Talamanca y Cordillera Central	Tres métodos fueron analizados: <ol style="list-style-type: none"> 1) Análisis de patrones espaciales en el tiempo. 2) Cadenas de Markov, condicionado por tipo de suelos. 3) Cadenas de Markov, basado en la forma y tamaño de polígonos y uso de la tierra en polígonos adyacentes 	Respectivamente, de acuerdo a la numeración de los métodos: <ol style="list-style-type: none"> 1) Patrones temporales cualitativos de evolución del uso de la tierra 2) Probabilidad de usos sucesivos de la tierra. 3) Cambios en las probabilidades de uso de la tierra 	Claramente especificado para Método (1): <input type="checkbox"/> Colonización <input type="checkbox"/> Deforestación <input type="checkbox"/> Proximidad a ferrocarril (2) y (3) corresponden a simulaciones	Igual, para (1): <input type="checkbox"/> Suelos <input type="checkbox"/> Altitud <input type="checkbox"/> Pendiente

** = Significativo, ± = Sentido de la influencia de la variable independiente sobre la variable de respuesta (positivo o negativo, es decir, coadyuvante o limitante)

Adicionalmente, las diferencias encontradas por estos autores sugieren que otros factores (por ejemplo, cambios en productos maderables o precios agrícolas, o cambios en leyes y políticas) hacen que los individuos o instituciones cambien su formas de manejo de la tierra; encontrándose además que la importancia de las variables independientes utilizadas (pendiente, elevación, distancia a caminos, distancia a mercados y densidad de población) en explicar el cambio en la cobertura del suelo varió también dependiendo del tipo de propietario de la tierra.

Por otra parte, Wear *et al* (1996), al intentar evaluar diferentes escenarios de manejo de ecosistemas en la cuenca sur Apalache (una de las áreas mencionadas anteriormente), utilizando modelos espaciales para simular el cambio en el paisaje, y examinando cómo estos últimos pueden desarrollarse bajo diferentes escenarios que reflejan la dinámica histórica del cambio en el uso de la tierra, estiman que la introducción de cambios en los factores sociales, tanto en tierras públicas como privadas pueden determinar la ocurrencia de un paisaje más boscoso y más estable.

Estos ejemplos, demuestran cómo los factores o variables del entorno social y económico (relacionados con aspectos eminentemente antropogénicos) constituyen elementos determinantes en cuanto a la dinámica de utilización del espacio terrestre en el tiempo.

Según Veldkamp y Fresco (1997a), esta dinámica puede ser reconstruida mediante el estudio de ciertas rutas de evolución seguidas en el tiempo. De esta manera, la *ruta* conformada por la evolución o los diferentes estadios de condiciones en el uso de la tierra para cada instante t_i puede ser interpretada como la *ruta de desarrollo* seguida por la sociedad en el tiempo, la cual se considera influenciada por factores de tipo socio-económico y por las restricciones mismas que establece el medio físico.

Sin embargo, la incorporación del tiempo (t) como una variable explícita dentro de los modelos de cambio de uso de la tierra resulta una limitante importante en términos metodológicos, razón por la cual los estudios reportados en la literatura científica normalmente tienden a concentrarse en el análisis de las relaciones existentes entre el cambio de uso y los factores espaciales en forma estática o al menos entre dos instantes, en tanto que la influencia del tiempo es analizada de manera indirecta mediante la

comparación entre diferentes períodos de análisis. Esto no implica que el tiempo *per se* influya de manera directa provocando cambios, sino más bien este representa una condición necesaria para que algunos factores puedan expresarse.

Una alternativa que parece viable para la incorporación del tiempo (o de los factores que se expresan a través de este) en los modelos de análisis se basa en la utilización de modelos probabilísticos de Cadenas de Markov (Turner, 1987; Callaway y Davis, 1993; Muller *et al*, 1994; Wu *et al*, 1997), y la incorporación posterior de la relación de los cambios así estimados con los factores que inciden de forma espacial. Sin embargo, estas metodologías requieren el establecimiento de muchos supuestos que pueden ser cuestionables o con frecuencia no se dispone de información suficiente para establecer un vínculo adecuado entre el efecto de los factores que influyen espacialmente y los que influyen a través del tiempo (como cambios en políticas, desempleo, crecimiento de la población, etc.). Esto indica que aún queda mucho camino por recorrer en esta área.

Un aspecto importante de los diferentes estudios consultados es que destacan la existencia de múltiples factores de tipo socio-económico, actuando incluso a diferentes escalas que van desde el nivel macroeconómico hasta el nivel local, siendo el objetivo fundamental de estas metodologías la evaluación de la significancia, magnitud y dirección de la influencia de estos factores en determinar los cambios ocurridos en el espacio.

Otro aspecto común a todos estos estudios es que las variables relacionadas a la proximidad de elementos vinculados a la concentración humana y el desarrollo de infraestructuras tienden a explicar muy bien la variabilidad espacio-temporal encontrada en el cambio del uso de la tierra y, en consecuencia, de la condición predominante del paisaje que puede detectarse mediante la utilización de sensores remotos (imágenes de satélites, fotografías aéreas) y utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG).

3 MATERIALES Y METODOS

3.1 Localización de la investigación

El área de estudio se localiza en la vertiente norte de la Cordillera de La Costa de Venezuela, en las áreas del Estado Vargas más afectadas por el evento de diciembre de 1999, ubicadas 30 km al norte de la ciudad capital Caracas.

Se encuentra comprendida entre las coordenadas UTM 720.000 a 745.150 de longitud Este, y entre 1.165.900 a 1.175.400 de latitud Norte, cubriendo una extensión de superficie de 159.3 km² (15.930 ha), que incluye una porción del Parque Nacional El Avila y las áreas pobladas situadas en el pie de monte costero que van desde Carmen de Uria hasta Maiquetía en sentido este-oeste, y desde la línea de costa hasta la Fila Mayor de la cordillera, en sentido norte-sur (Figura 4).

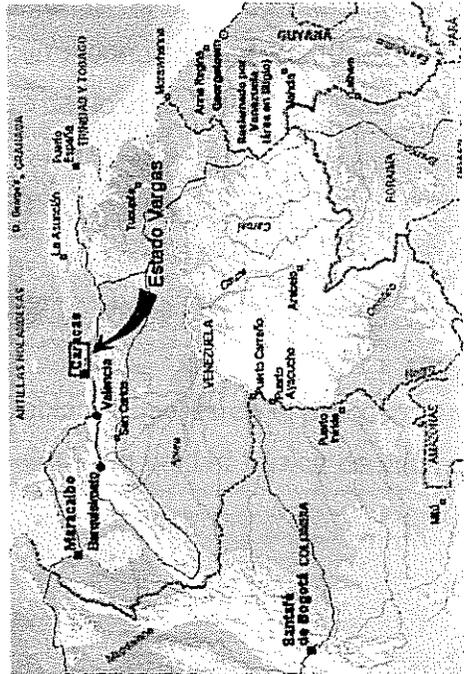
Esta área incluye a las cuencas hidrográficas catalogadas como "prioritarias" por el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales (MARN, 1999) para la región norte del país, específicamente para el litoral central (Cuadro 3), debido a la magnitud y severidad de los daños ocasionados tanto a los centros poblados como al ecosistema.

Cuadro 3. Estimación* de la superficie de las cuencas hidrográficas prioritarias incluidas dentro del área de estudio

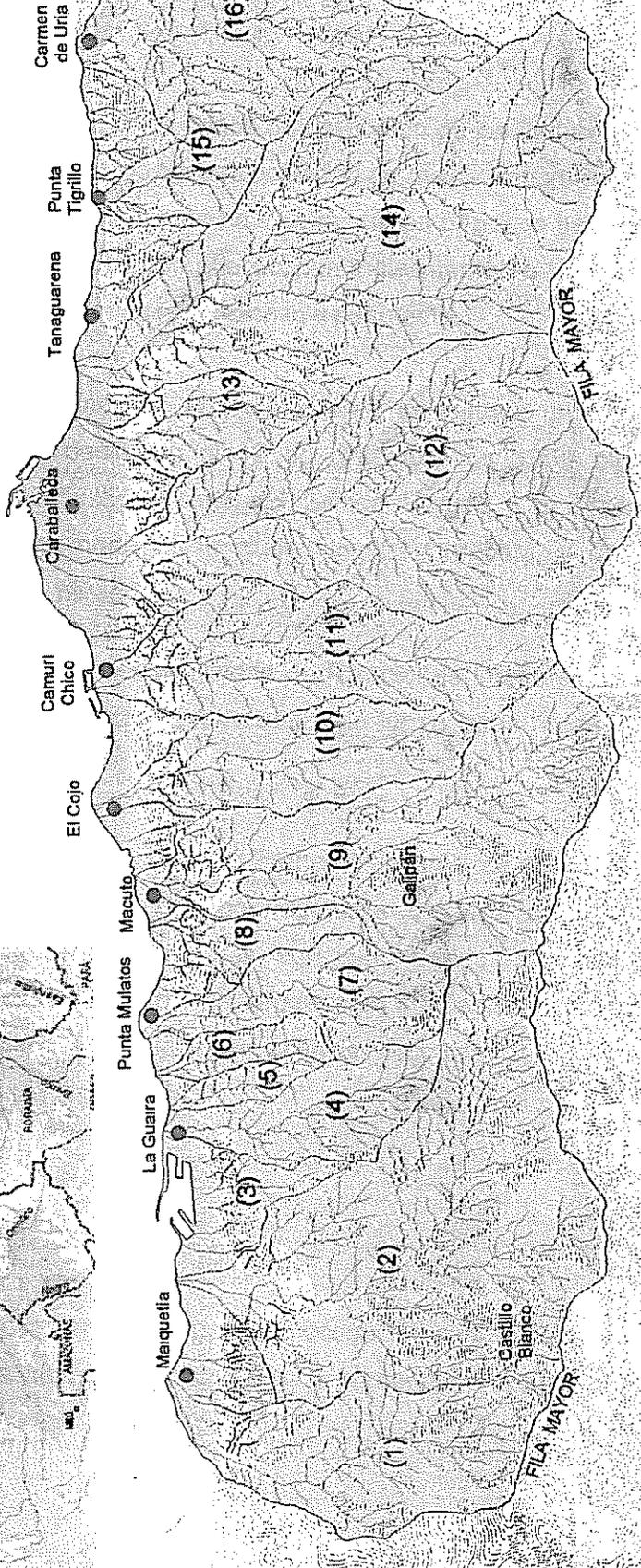
Cuenca	m.s.n.m.**		Superficie (km ²)	Cuenca	m.s.n.m.**		Superficie (km ²)
	h_{min}	h_{max}			h_{min}	h_{max}	
Curucutí	0	1400	9.3	S. J. Galipán	0	2237	15.4
Piedra Azul	0	1919	22.1	El Cojo	0	1870	6.3
El Guarapo	0	936	2.7	Camurí Chico	0	2312	10.2
Osorio	0	1716	4.2	San Julián	0	2599	22.3
Sin nombre	0	784	1.0	Quebrada seca	0	1129	3.1
Sin nombre	0	806	1.3	Cerro Grande	0	2719	25.7
Cariaco	0	1920	4.7	Tanaguarena	0	1027	2.2
Alcantarilla	0	1087	1.8	Río Uria	0	2238	12.6
				Resto del área	-		14.4
SUPERFICIE TOTAL			159.3 km²				

(*) Estimación del autor mediante un SIG y con base en la definición de cuencas prioritarias de MARN (1999), usando la toponimia de las cartas oficiales de SAGECAN a escala 1:25.000. (**) Rango altitudinal desde la cabecera de los cursos de agua (h_{max}) de las cuencas, hasta su desembocadura al mar (h_{min}), expresado en metros sobre el nivel medio del mar (m.s.n.m).

UBICACION A NIVEL NACIONAL



MAR CARIBE



CUENCAS HIDROGRAFICAS CON MAYOR AFECTACION POR EL EVENTO DE DICIEMBRE DE 1999 (SEGUN MARN, 1999)

- (1) Curucuti (3) El Guarapo (5) Sin nombre (7) Canaco (9) S. J. Gallipán (11) Camuri Chico (13) Quebrada seca (15) Tanaguarena
- (2) Piedra Azul (4) Osorio (6) Sin nombre (8) Alcantanilla (10) El Cojo (12) San Julián (14) Cerro Grande (16) Rio Uria

- Centro Poblado
- Areas no pertenecientes al PN El Avila
- Franja de Amortiguamiento
- Porción del Parque Nacional El Avila Incluida



Figura 4: Localización de la investigación

El área se caracteriza por la presencia de un relieve accidentado que cae abruptamente al mar en algunas partes de la franja costera, presentando grandes desniveles en muy cortos tramos de distancia horizontal, lo que determina la existencia de pendientes pronunciadas que pueden alcanzar una inclinación superior a los 50° (ver Anexo 1A).

En las partes bajas conformadas por los conos de deyección de las desembocaduras de los ríos y quebradas se encuentran los centros poblados de mayor importancia del Estado Vargas, que incluyen al casco histórico de La Guaira, cuyos orígenes se remontan a la época colonial, y otros centros poblados que ocupan indistintamente tanto las escasas áreas planas como las zonas periféricas con excesiva pendiente.

La porción de área protegida incluida dentro del área de estudio pertenece a una extensión mayor de territorio declarado el 12 de diciembre de 1958 como Parque Nacional, que cubre en la actualidad parte del Estado Vargas y el Distrito Federal (extendiéndose hasta el límite norte de la ciudad capital Caracas), y una parte del Municipio Higuerote del Estado Miranda.

En el año 1966, según resolución del Ministerio de Relaciones Interiores, esta área es declarada Monumento Histórico Nacional, anexándosele luego otras áreas en los años 1973, 1981 y 1985 (MARN, 1996).

En la actualidad, y debido a la figura legal de Parque Nacional, las partes montañosas altas se encuentran predominante cubiertas por vegetación boscosa, pero persisten aún algunas áreas que son utilizadas con fines agrícolas, específicamente las áreas correspondientes a San José de Galipán y los alrededores de Castillo Blanco, las cuales se dedican fundamentalmente a la producción de cultivos hortícolas y a la floricultura.

3.2 Análisis espacial

3.2.1 Unidad de información

Debido al interés en el proceso espacio-temporal de ocupación e intervención del área de estudio, la unidad básica de información utilizada en la presente investigación posee una

connotación espacial o geográfica, y representa a una parcela o unidad de tierra de 20 x 20 m (0.04 ha) arbitrariamente definida (Figura 5), con referencia a un sistema reticulado que divide al área de estudio en una población de $N = 398.250$ celdas, para un total de 15.930 ha.

Para fines de los análisis posteriores, cada una de estas celdas representa a una entidad con características físico naturales propias (pendiente, altitud, geología), y que se encuentran sometidas al efecto diferencial de los factores antropogénicos y normativos considerados.

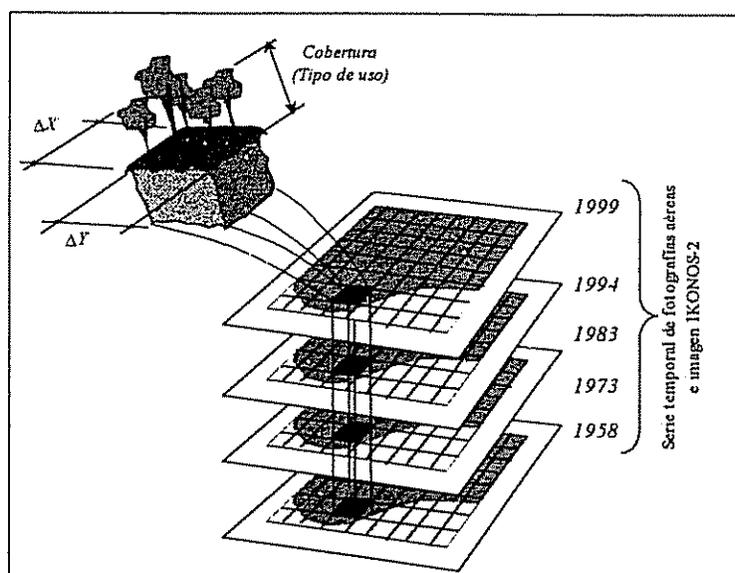


Figura 5: Representación gráfica de la unidad de información definida para el estudio, con base en el establecimiento de una red referencial de celdas en el espacio (grid-cells). ΔX y ΔY corresponden al distanciamiento de 20 x 20 metros especificado.

Las dimensiones de esta unidad de información (20 x 20 m) fueron definidas tomando en cuenta la escala base utilizada (1:25.000) y la resolución mínima necesaria para la identificación y delimitación de áreas afectadas por movimientos de masa.

3.2.2 Fuentes de información básica y preparación de la información

La metodología seguida para la generación, procesamiento y análisis de información se resume en la Figura 6. Seguidamente se describen cada una de las etapas señaladas.

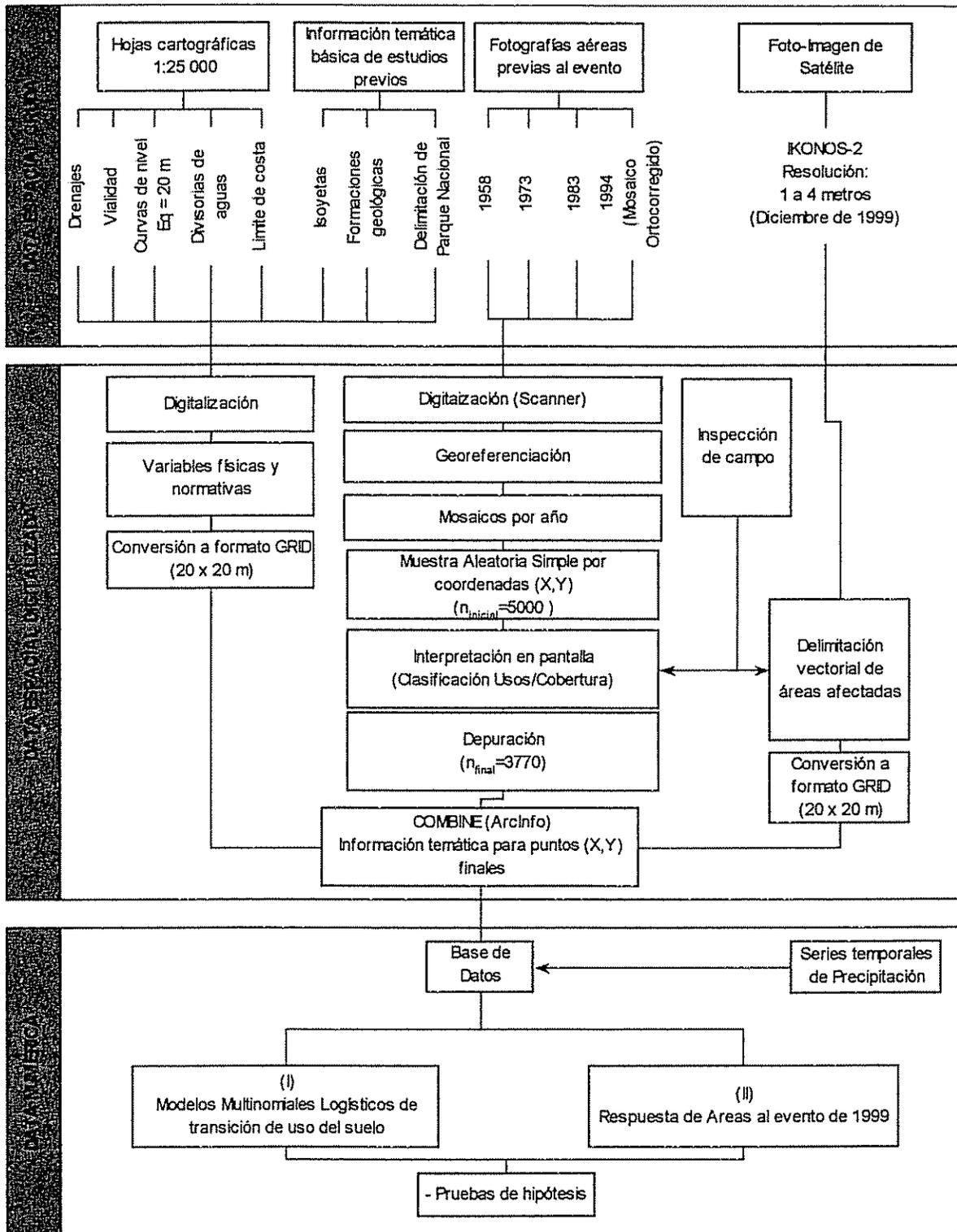


Figura 6: Esquema metodológico seguido para la generación y procesamiento de información básica, y elaboración de los modelos de análisis espacial.

La información básica espacial utilizada proviene de dos fuentes principales: i) cartografía básica y temática del área elaborada por fuentes oficiales y estudios realizados en la zona por otros autores, y (ii) interpretación propia de una serie temporal de fotografías aéreas, y una foto-imagen del satélite IKONOS-2, que cubrió una parte del área de estudio en el mes de enero del año 2000, suministrada por el Servicio Autónomo de Geografía y Cartografía Nacional de Venezuela (SAGECAN).

Toda la cartografía básica y temática utilizada fue elaborada originalmente a una misma escala (1:25.000), con base en las hojas cartográficas 6847-IV-NO, 6847-IV-SO; 6847-IV-NE y 6847-IV-SE.

Esta información fue convertida a formato digital por medio de una mesa digitalizadora, y a partir del procesamiento de las diferentes coberturas temáticas se obtuvieron las variables de interés con apoyo de un Sistema de Información Geográfica, utilizando el software ArcView (ESRI, 1996).

Así, para la obtención de los valores de pendiente y altitud se elaboró un modelo digital de terreno (MDT) a partir de la información de curvas de nivel a 20 metros de equidistancia y la red de drenaje, contenidas en las hojas cartográficas antes mencionadas. Las variables relacionadas a distancias mínimas a elementos cartográficos (como distancia a drenajes y accesibilidad) fueron obtenidas también mediante el procesamiento de la información básica digitalizada, utilizando herramientas de análisis espacial incluidas en el software ArcView.

Toda la información temática fue luego convertida a formato raster para definir de esta manera una cuadrícula (GRID) con celdas espaciadas a una distancia de 20 x 20 metros con georeferenciación común, de tal manera que para cada celda, su localización se mantuviera constante en cada cobertura temática. La totalidad de las celdas ubicadas dentro del área representan a la población objeto de estudio ($N = 398.250$ celdas de 20 x 20 m, para un total de 15.930 ha).

La información sobre uso/cobertura de la tierra previo al evento de 1999 se obtuvo a partir de la interpretación de fotografías aéreas en blanco y negro (1958, 1973, 1983) y un

mosaico digital ortocorregido de fotografías aéreas a color (1994), elaborado por SAGECAN-Proyecto Cartocentro (Cuadro 4).

Cuadro 4. Información básica de sensores remotos

Tipo de sensor	Fecha	Misión	Escala *	Vistas	Nº de Vistas
Fotografías aéreas (Blanco y Negro)	1958	030412	1:25.000	017, 019, 020, 022, 023, 024, 025, 026, 102, 104, 106, 173	12
	1973	0304109	1:16.000	002, 004, 006, 008, 010, 011, 012, 023, 025, 027, 029, 031, 033, 035	14
	1983	0304167	1:20.000	310, 312, 314, 316, 317, 319, 321, 323, 343, 345, 927, 928, 929, 931, 933, 935, 938	17
Mosaico Digital Ortocorregido de fotografías aéreas a color	1994	Cartocentro	1:25.000	6847 (IV) NO 6847 (IV) NE 6847 (IV) SO 6847 (IV) SE	4
Imagen de satélite IKONOS-2	Enero de 1999	-	Resolución: 1-4 metros	-	1

(*) Las fotografías aéreas en blanco y negro se refieren a la escala promedio de las vistas

Luego de digitalizadas, las fotografías aéreas fueron georeferenciadas por medio de una corrección geométrica con el software ArcView (Image Warp), mediante un algoritmo de corrección con un polinomio de segundo orden. Todas las fotografías aéreas fueron así procesadas con base en el mosaico ortocorregido para 1994, empleando como referencia la mayor cantidad posible de puntos de control terrestre comunes (GCP \geq 50).

Las vistas individuales fueron posteriormente integradas en mosaicos para cada año considerado, mediante el software Erdas (Erdas, 1997). De esta manera se construyó una serie temporal que incluyó a los años 1958, 1973, 1983 y 1994, para el análisis del proceso previo de intervención y ocupación del área, y al año 2000 como expresión del efecto producido por las lluvias extremas de diciembre de 1999.

Es importante mencionar que el procedimiento utilizado para la corrección geométrica de las fotografías aéreas no es capaz de eliminar la distorsión característica de este tipo de

sensor remoto por lo que, siempre que fue posible, fue necesario emplear solamente la porción central de cada fotografía cuando el solapamiento entre vistas lo permitía, permaneciendo aún un desplazamiento considerable.

En las zonas planas ubicadas al pie de la cordillera, el error RMS reportado fue considerado aceptable para la escala utilizada (RMS entre 2 a 4 metros), pero en las partes más altas el error puede llegar hasta 20 metros.

En vista de que las partes más altas se encuentran predominantemente cubiertas por vegetación boscosa, se consideró que este desplazamiento no afectaba mayormente la interpretación realizada.

3.2.3 Generación de datos espaciales

Utilizando una computadora, se generó un listado de $n_{inicial} = 5000$ pares de coordenadas (X,Y) seleccionados aleatoriamente. Este listado fue obtenido seleccionando primero 5000 valores aleatorios comprendidos entre el rango este-oeste en coordenadas UTM del área de estudio, lo cual produjo la serie de coordenadas X . Este mismo proceso fue repetido para generar 5000 valores aleatorios ahora comprendidos entre el rango norte-sur del área, obteniéndose la serie aleatoria de coordenadas Y . La combinación de los pares (X,Y) , desde (X_1, Y_1) hasta (X_{5000}, Y_{5000}) , siguiendo el mismo orden en que fueron generados, constituyó la lista inicial de ubicación de unidades a ser muestreadas.

Por medio del software Erdas, se realizó la interpretación del tipo de uso/cobertura para los años considerados, mediante una interpretación visual realizada directamente en pantalla en cada uno de los puntos (X,Y) de la lista de coordenadas aleatorias en un radio no superior a 20 metros con referencia al punto central (X,Y) , siguiendo el orden en que estos fueron generados.

Debido a la deformación ya mencionada en los mosaicos de fotografías aéreas, esta interpretación tuvo que ser realizada comparando la ubicación de cada punto con referencia al mosaico ortocorregido disponible para el año 1994, el cual sirvió siempre de base para la interpretación de todos los años. Esto se hizo visualizando simultáneamente

en pantalla el mosaico a interpretar y el mosaico ortocorregido, vinculando ambas ventanas por medio de sus coordenadas.

Esto permitió reubicar cada punto para disminuir el error de desplazamiento al ser examinado en pantalla, con base en referencias comunes (quebradas, cruces de vías, ríos, etc.) respecto al mosaico ortocorregido.

Aquellos puntos en los que la deformación era muy grande o en los que existía incertidumbre en cuanto al uso/cobertura fueron eliminados de la muestra. De esta manera, la muestra final quedó reducida a un total de $n_{final}=3770$ unidades, excluyendo también las unidades que se ubicaron fuera del área de estudio o en el mar, y aquellas en las que existían vacíos de información para alguno de los años considerados por no existir un adecuado solapamiento entre las vistas (Figura 7).

La representatividad de la muestra fue verificada examinando la varianza muestral de los principales tipos de usos de la tierra interpretados con relación al tamaño de la muestra. El tamaño representativo de la muestra se logró con la estabilización de la varianza muestral, incluso a partir de $n = 2000$, considerándose entonces una representación adecuada de toda el área de estudio.

A pesar de la desventaja que implica la utilización de fotografías aéreas por la distorsión en los bordes y el efecto de paralaje, la ventaja más importante de la utilización de este tipo de información es su capacidad de resolución, lo cual permitió identificar seis tipos de uso/cobertura presentes en el área en los diferentes instantes considerados (Cuadro 5), con base en la inspección de campo y tomando como referencia las categorías de uso/cobertura reportadas por MARN (1996) a partir de imágenes de satélite Landsat y verificación en campo.

La clasificación otorgada a la cobertura vegetal es estrictamente fisionómica, ya que no es posible con los métodos utilizados identificar aspectos estructurales. Sin embargo, se ha tomado como referencia la información reportada por MARN (1996) en cuanto a las posibles especies dominantes en cada una de las clases identificadas.

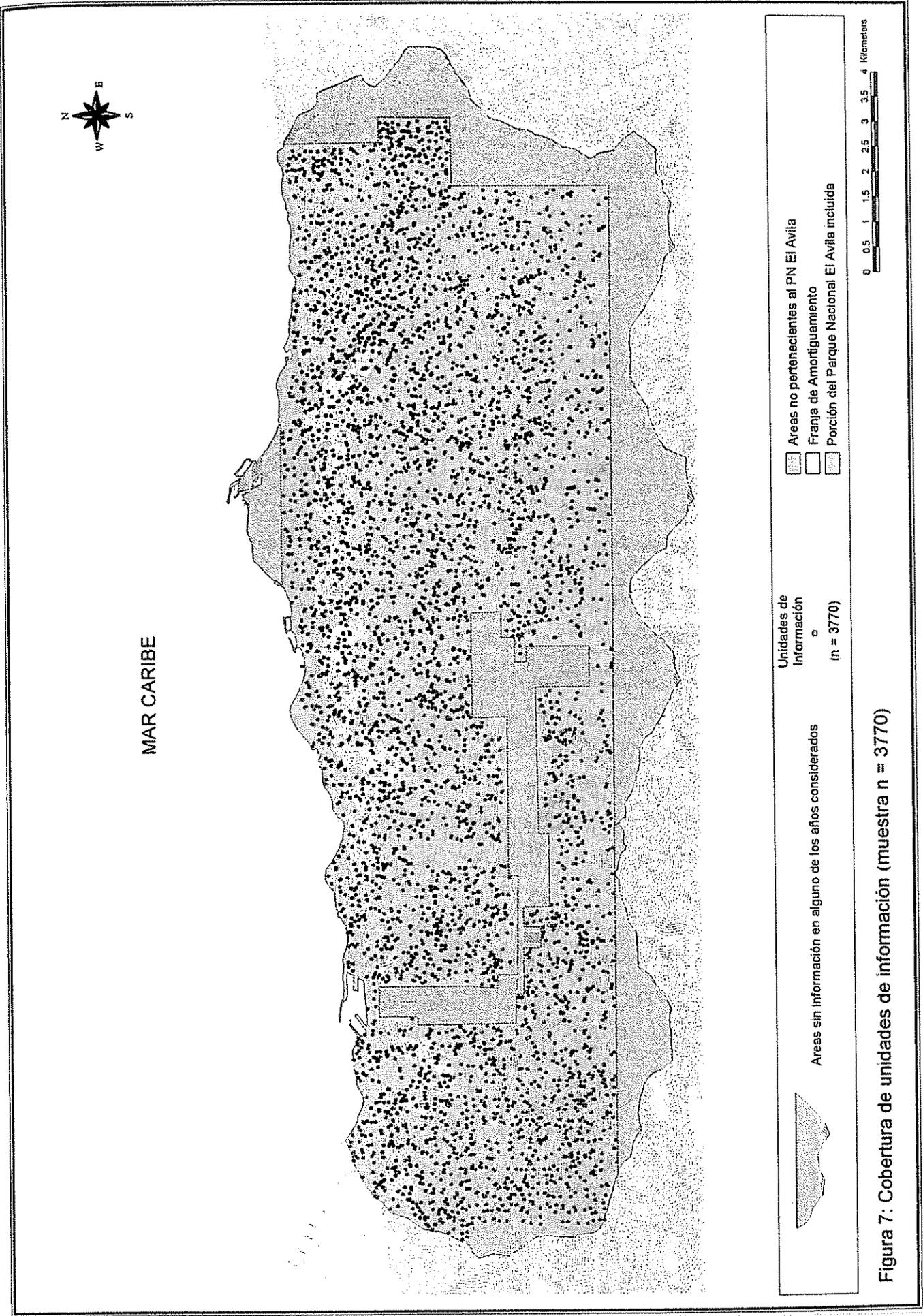


Figura 7: Cobertura de unidades de información (muestra n = 3770)

Cuadro 5. Clasificación convencional de patrones de uso de la tierra

Identificación	Denominación	Descripción
1	Sin cobertura definida	Suelo desnudo, con escasa cobertura vegetal, y otros
2	Uso urbano	Utilización con fines residenciales y turísticos con o sin planificación
3	Uso agrícola en laderas	Agricultura permanente en laderas y agricultura de subsistencia (milpa o conuco)
4	Vegetación secundaria o intervenida	Cobertura arbustiva resultante de la intervención por agricultura y posterior abandono
5	Cobertura herbácea	Incluye sabanas de las partes altas
6	Cobertura arbustiva	Incluye los matorrales y espinares de la franja baja costera
7	Cobertura boscosa	Incluye los bosques altos y densos y las franjas boscosas en galería asociadas a cursos de agua

La información temática relacionada a cada una de las unidades de información fue obtenida mediante una transformación del listado de coordenadas (X,Y) definitivas a una grid de "puntos flotantes" (*floating points*) y, utilizando el comando COMBINE incluido en el software ArcInfo, se extrajo para cada celda la información sobre variables espaciales.

3.2.4 Diseño de los modelos de análisis

Con base en la información extraída de las diferentes coberturas temáticas y la interpretación de información de los sensores remotos utilizados, se conformó una base de datos numéricos para el procesamiento y aplicación de los modelos de análisis requeridos para la muestra n .

De acuerdo al interés del estudio, se elaboraron dos tipos de modelos de análisis: (i) los modelos para el análisis de transiciones en el uso de la tierra previo al evento de 1999

(modelos de transición), y (ii) el modelo de respuesta de áreas al evento de 1999, los cuales se explican seguidamente.

3.2.4.1 *Estimación de la probabilidad de cambios en el uso de la tierra previo al evento de 1999 (modelos de transición)*

Los cambios ocurridos en el uso de la tierra previo al evento de diciembre de 1999 fueron estimados a partir de la información extraída de las fotografías aéreas para los años 1958, 1973, 1983 y 1994, para la muestra de unidades espaciales de 20 x 20 m ($n=3770$).

La clasificación de usos de la tierra en cada uno de estos instantes refleja el estado del ecosistema para ese momento en particular, y la medida de cambio utilizada es la probabilidad de transición de un estado a otro entre dos instantes.

Esta probabilidad de transición fue relacionada con una serie de variables o factores considerados como reguladores de tales cambios, examinando luego la magnitud, dirección y significancia de estos factores en explicar las transiciones ocurridas.

Para un instante determinado (t_h), la clasificación de usos de la tierra otorgada a cada una de las unidades que conforman la muestra solo define el estado del ecosistema en términos estáticos, por lo que la variabilidad encontrada en el paisaje para un año en particular es básicamente espacial.

Si se define a UT como una variable discreta que representa las distintas alternativas de uso en algún instante t_h del tiempo, entre los años 1958 y 1994, estas alternativas se encuentran limitadas a un conjunto $UT = \{1,2,3,\dots, m\}$ de posibles valores categóricos o clases de usos de la tierra.

Dado que el número de categorías de usos de la tierra obtenidas a partir de la muestra n fue $m = 7$ (Cuadro 5), entonces UT quedó definida por el siguiente conjunto de categorías posibles que definen el espacio muestral en cada instante considerado:

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

Donde:

$$UT = \begin{cases} 1 : \text{Sin cobertura definida o escasa cobertura (SCD)} \\ 2 : \text{Uso urbano (URB)} \\ 3 : \text{Uso agrícola (Agricultura en laderas y conucos) (AGR)} \\ 4 : \text{Vegetación secundaria (VS)} \\ 5 : \text{Cobertura herbácea (CH)} \\ 6 : \text{Cobertura arbustiva (CA)} \\ 7 : \text{Cobertura boscosa (CB)} \end{cases}$$

Así, cada uno de los individuos o unidades de información de 20 x 20 m que conforman la muestra aleatoria simple de $n = 3770$ puede tomar alguno de los valores categóricos de uso o cobertura incluidos dentro del intervalo finito definido para $UT = \{1,2,3,4,5,6,7\}$ en un instante determinado, y se asume que existe independencia entre las diferentes alternativas consideradas. Adicionalmente, las categorías de uso o cobertura UT se consideran *nominales*, es decir, no existe ningún ordenamiento o jerarquía específica en los valores que toma la variable UT , debido a que esta clasificación representa opciones de uso mutuamente excluyentes.

Dado el carácter estático de los diferentes estados definidos por UT en cada año considerado, el análisis del cambio ocurrido en el tiempo requirió de la comparación de las posibles transiciones ocurridas de un uso inicial UT_i a un uso posterior UT_j entre al menos un par de instantes (t_h, t_{h+1}) , pasándose entonces de un enfoque estático a otro dinámico, que incluyó la variabilidad expresada en tiempo y espacio.

Las posibles transiciones de UT_i a UT_j entre dos instantes t_h a t_{h+1} pueden representarse por $\Delta UT/\Delta t = (UT_j - UT_i) / (t_{h+1} - t_h)$, tal como se indica en la Figura 8.

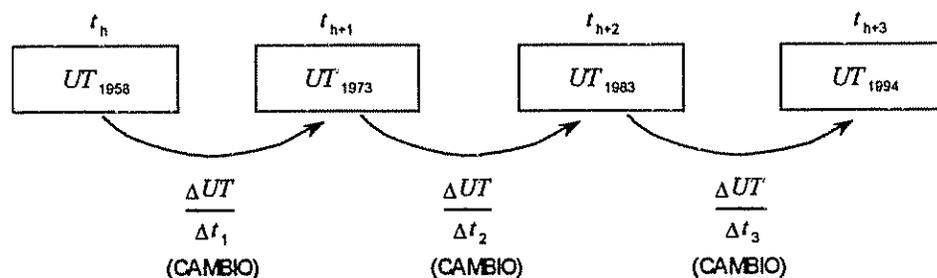


Figura 8: Proceso de cambio en el uso de la tierra: $\Delta UT/\Delta t = (UT_j - UT_i) / (t_{h+1} - t_h)$

Como el conjunto $UT = \{1,2,3,4,5,6,7\}$ estaba definido por valores discretos, $\Delta UT/\Delta t$ generó una matriz entre cada par de instantes, con dimensiones $i = 1,2,3,\dots,I$ filas y $j = 1,2,3,\dots,J$ columnas, compuesta por $m^2 = I \times J$ posibles combinaciones de cambios de un estado a otro, es decir $7^2 = 49$ transiciones posibles en este caso, donde n_{ij} representa la frecuencia con la que ocurren cada una de ellas en la muestra n (Cuadro 6).

Cuadro 6. Matriz de transición de estados entre dos instantes (t_h, t_{h+1}) .

$t_h \backslash t_{h+1}$		UT_j						n_{i+} ↓
		1	2	3	...	J		
UT_i	1	n_{11}	n_{12}	n_{13}	...	n_{1J}	n_{1+}	
	2	n_{21}	n_{22}	n_{2+}	
	3	n_{31}	n_{3+}	
	
	
	
	I	n_{I1}	n_{I2}	n_{I3}	...	n_{IJ}	n_{I+}	
n_{+j} →	n_{+1}	n_{+2}	n_{+3}	...	n_{+J}	n		

En términos conjuntos, la probabilidad p_{ij} de cada una de estas transiciones es definida por:

$$p_{ij} = \frac{n_{ij}}{n} \quad (2)$$

Como se trata de eventos condicionales, es decir, la transición hacia cualquier categoría de uso en el instante j depende del uso previo en el instante i , puede escribirse en forma condicional ($p_{j|i}$):

$$p_{(j|i)} = \frac{n_{ij}}{n_{i+}} \quad (3)$$

Así, la matriz presentada en el Cuadro 7 expresa las posibles transiciones markovianas entre dos instantes, conocida también como Matriz de Probabilidades de Transición (MPT), y se cumple (Feller, 1964; Kapur y Saxena, 1969):

$$P_{i+} = 1 \quad \forall \quad i = 1, 2, 3, \dots, I \quad (4)$$

es decir, la suma horizontal de los valores acumulados en j para cada uso previo i es igual a la unidad (1.0).

Cuadro 7. Definición de la matriz de probabilidades markovianas de transición (MPT) para cambios ocurridos entre dos instantes (t_h, t_{h+1}).

$t_h \backslash t_{h+1}$	UT_j							P_{i+} ↓	
	1	2	3	4	5	6	7		
UT_i	1	$P(1 1)$	$P(2 1)$	$P(3 1)$	$P(4 1)$	$P(5 1)$	$P(6 1)$	$P(7 1)$	1.0
	2	$P(1 2)$	$P(2 2)$	$P(3 2)$	$P(4 2)$	$P(5 2)$	$P(6 2)$	$P(7 2)$	1.0
	3	$P(1 3)$	$P(2 3)$	$P(3 3)$	$P(4 3)$	$P(5 3)$	$P(6 3)$	$P(7 3)$	1.0
	4	$P(1 4)$	$P(2 4)$	$P(3 4)$	$P(4 4)$	$P(5 4)$	$P(6 4)$	$P(7 4)$	1.0
	5	$P(1 5)$	$P(2 5)$	$P(3 5)$	$P(4 5)$	$P(5 5)$	$P(6 5)$	$P(7 5)$	1.0
	6	$P(1 6)$	$P(2 6)$	$P(3 6)$	$P(4 6)$	$P(5 6)$	$P(6 6)$	$P(7 6)$	1.0
	7	$P(1 7)$	$P(2 7)$	$P(3 7)$	$P(4 7)$	$P(5 7)$	$P(6 7)$	$P(7 7)$	1.0

Los valores $P_{j|i}$ en cada celda de esta matriz (Cuadro 7), representan la probabilidad de que una unidad de información de 20 x 20 m con uso inicial i en t_h , pase a otro estado j en el siguiente instante t_{h+1} dada su condición inicial i , con $I = J$ y ambos restringidos al espacio muestral de $UT = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$. La diagonal de esta matriz representa la estabilidad del sistema, es decir, los usos que persisten a través del tiempo sin experimentar cambios.

La elaboración de estas matrices markovianas de transición para cada par de instantes analizados, es decir, $MPT_{(1958-1973)}$, $MPT_{(1973-1983)}$ y $MPT_{(1983-1994)}$, reveló que no todas las 49

posibles transiciones ocurren para la muestra seleccionada, o algunas alternativas de transición poseen una probabilidad muy baja de ocurrencia, por lo cual fue necesario realizar agrupaciones de cambios mediante la construcción de una variable auxiliar o transformada que define la ocurrencia de alguno de los eventos considerados en tales agrupaciones, y que permitiera luego el establecimiento de relaciones funcionales entre los principales cambios ocurridos y las variables explicativas consideradas.

Para ello, se definió una variable categórica o discreta (Y) que expresara los cambios o transiciones de interés señalados en la Figura 9, de manera que esta variable se encuentra definida por cinco posibles niveles o categorías ($Y = \{1,2,3,4,5\}$), dependiendo del tipo y dirección del cambio ocurrido de acuerdo a las posibles alternativas indicadas en la Figura 9.

Para diferenciar de la nomenclatura utilizada en las clasificaciones estáticas de uso de la tierra representadas por la variable UT , se empleó la siguiente nomenclatura para esta variable transformada (Y):

- $Y = 1$: Transiciones a cobertura boscosa (+BOS)
- $Y = 2$: Transiciones a cobertura arbustiva (+ARB)
- $Y = 3$: Transiciones a uso urbano (+URB)
- $Y = 4$: Transiciones a uso agrícola o vegetación secundaria (+AGVS)
- $Y = 5$: Transiciones a cobertura herbácea o suelo con escasa cobertura (+CHSD)

El símbolo (+) hace referencia a la ocurrencia de cambios en el uso de la tierra entre dos instantes hacia la dirección indicada.

Se ha partido de la premisa básica de que los cambios que suceden en el tiempo, representados por la variable Y , reflejan la evolución hacia la ocupación o intervención del área (Turner *et al*, 1996; Wear *et al*, 1996; Veldkamp y Fresco, 1997a y 1997b).

Adicionalmente, como se muestra en la Figura 9, algunos cambios que implican procesos naturales de transición (como por ejemplo, los cambios o transiciones a cobertura boscosa) fueron también incorporados con el propósito de reflejar de manera agregada

tanto el proceso socio-económico de ocupación del espacio como la dinámica general de cambios en el ecosistema.

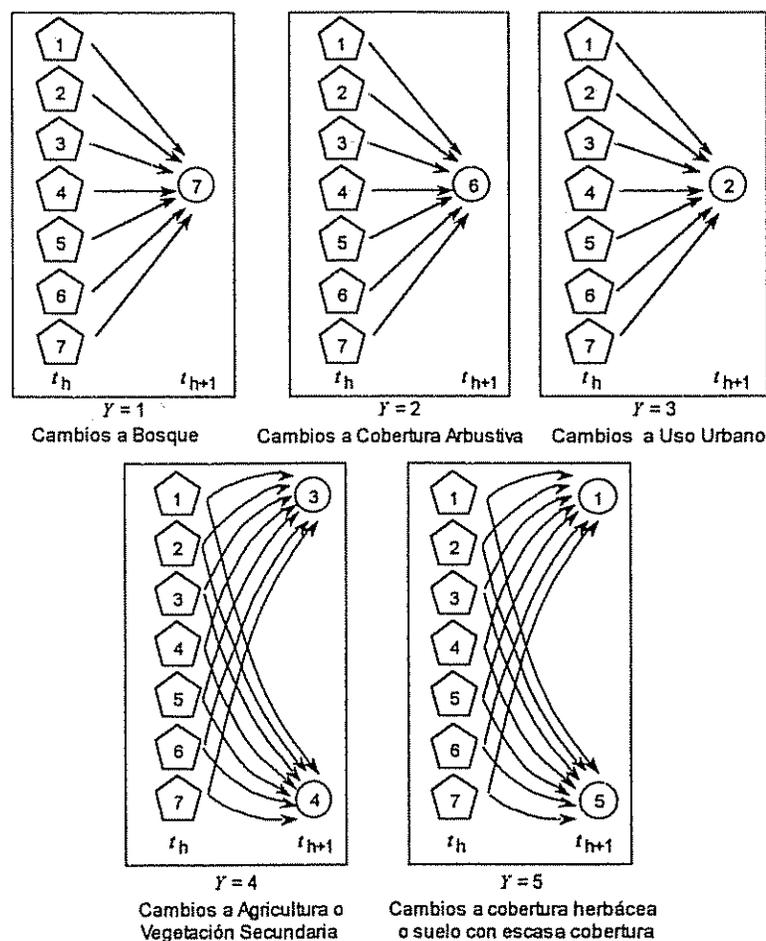


Figura 9: Alternativas de transiciones (Y) entre instantes. Los estados representados dentro de cada recuadro se refieren a los usos de la tierra para cada instante (1 = Sin cobertura definida o escasa cobertura vegetal; 2 = Uso urbano; 3 = Uso agrícola; 4 = Vegetación secundaria; 5 = Cobertura herbácea; 6 = Cobertura arbustiva; 7 = Cobertura boscosa).

La *persistencia* entre dos instantes de un determinado uso fue considerada también como opción válida de transición, es decir, el hecho de que un determinado uso en el instante t_h continúe siéndolo en el siguiente (t_{h+1}) expresa su estabilidad en el tiempo a pesar de la existencia de factores que pueden promover o restringir la probabilidad de que estos usos de la tierra cambien a otra categoría en el siguiente instante.

Así, la *persistencia* se refiere a las transiciones entre dos instantes ($t_i \rightarrow t_{i+1}$) identificadas en la Figura 9 como 1→1; 2→2; 3→3; 4→4; 5→5; 6→6; 7→7 .

3.2.4.1.1 Probabilidad de los eventos de transición (Y)

Los cambios o transiciones en el uso de la tierra representados por la variable transformada Y entre cada par de instantes, llevan también asociados una probabilidad de ocurrencia.

En el caso de categorías binomiales, es decir donde solo se consideran dos posibles alternativas ($Y = \{0,1\}$), la probabilidad de ocurrencia de un evento ($Y = 1$) en una población N puede ser definida como π , mientras que la no ocurrencia ($Y = 0$) será $1-\pi$.

A partir de una muestra tamaño n , π es aproximado a partir de p , de manera que:

$$E(Y) = [1 \cdot Pr_{(Y=1)}] + [0 \cdot Pr_{(Y=0)}] = Pr_{(Y=1)} = p \quad (5)$$

$$p = \hat{\pi} \quad ; \quad E(Y) = \pi \quad (6)$$

con varianza estimada:

$$E(Y^2) = [1^2 \cdot Pr_{(Y=1)}] + [0^2 \cdot Pr_{(Y=0)}] = Pr_{(Y=1)} = p \quad (7)$$

$$\text{Var} (Y) = E(Y^2) - [E(Y)]^2 \quad (8)$$

$$\text{Var} (Y) = p - [p]^2 = p - p^2 = p (1-p) = p q \quad (9)$$

La cual se distribuye binomialmente según (Feller, 1964; Agresti, 1990; Steel *et al*, 1997):

$$f(Y) = \binom{n}{n_1} p^{n_1} (1-p)^{n_2} \quad ; \quad \text{con } n_1 + n_2 = n \quad (10)$$

$$f(Y) = \frac{n!}{n_1! n_2!} p^{n_1} (1-p)^{n_2} \quad (11)$$

donde: n_1 = número de veces que ocurre $Y = 1$

n_2 = número de veces que ocurre $Y = 0$

n = total de individuos que conforman la muestra ($n_1 + n_2$)

Para el caso de estudio, las transiciones representadas por la variable transformada Y pueden tomar más de un valor o categoría ($Y = \{1, 2, \dots, k\}$), con $k=5$). Si la ocurrencia de alguna de estas categorías entre un par de instantes (t_h, t_{h+1}) es considerada como eventos independientes E_1, E_2, \dots, E_k , en una muestra tamaño n pueden ocurrir n_k eventos, siendo estos:

$E_1: n_1$ = número de veces que ocurre $Y = 1$ en la muestra n

$E_2: n_2$ = número de veces que ocurre $Y = 2$ en la muestra n

⋮

$E_k: n_k$ = número de veces que ocurre $Y = k$ en la muestra n

Esta representa entonces una variable aleatoria que se distribuye *multinomialmente* en n individuos o unidades de información independientes aleatoriamente seleccionados del total N que conforma la grid de unidades de información.

Generalizando las definiciones anteriormente presentadas para el caso binomial, en este caso la probabilidad de que en una muestra n resulten los eventos E_1 ocurriendo n_1 veces, E_2 ocurriendo n_2 veces, ..., E_k ocurriendo n_k veces, en un orden determinado, de acuerdo al teorema de probabilidad compuesta (Kapur y Saxena, 1969), será:

$$f(Y) = p_1^{n_1} p_2^{n_2} p_3^{n_3} \dots p_k^{n_k} ; \text{ con } \sum_{i=1}^k n_i = n \quad (12)$$

Como en este caso no interesa el orden en que ocurren los eventos, el número de posibles formas mutuamente excluyentes en que los eventos E_k de transición pueden

ocurrir en las n unidades de información seleccionadas será, de acuerdo al teorema de probabilidad total (Kapur y Saxena, 1969):

$$\binom{n}{n_1, n_2, \dots, n_k} = \frac{n!}{n_1! n_2! n_3! \dots n_k!} \quad (13)$$

y su distribución de probabilidad será:

$$f(Y_1, Y_2, \dots, Y_k) = \frac{n!}{n_1! n_2! n_3! \dots n_k!} p_1^{n_1} p_2^{n_2} p_3^{n_3} \dots p_k^{n_k}; \text{ con } \sum_{i=1}^k n_i = n \quad (14)$$

Así, la variable Y se distribuye multinomialmente, siendo esta distribución multivariada y representa la expansión del término $(p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_{k-1} + p_k)^n$, con k variables $n_1, n_2, n_3, \dots, n_k$; pero solo con $(k - 1)$ de ellas independientes, dado que:

$$\sum_{i=1}^k n_i = n \quad (15)$$

3.2.4.1.2 Relaciones entre las probabilidades de transición y los factores considerados

Desde la perspectiva económica, las transiciones en el uso de la tierra representan decisiones que la sociedad establece entre dos instantes en términos de la utilización del espacio, de manera que el cambio de uso de una parcela a (o unidad de información) del estado i al estado j entre dos instantes del tiempo ocurre cuando:

$$W_{j|t_{h+1}}^a - C_{j|t_{h+1}}^a \geq W_{i|t_h}^a - C_{i|t_h}^a \quad (16)$$

Donde:

a : representa a la parcela sujeta a cambios entre dos instantes con posibles usos $UT = \{1, 2, \dots, m\}$

$W_{i|t_h}^a$: es el valor presente neto de los retornos del tipo de uso i en el instante t_h

C_{i/t_h}^a : el costo de mantener el uso actual i entre dos instantes

$W_{j/t_{h+1}}^a$: el valor presente neto de uso de la tierra bajo la alternativa j en el siguiente instante t_{h+1}

$C_{j/t_{h+1}}^a$: el costo de conversión de la parcela a , del estado i al estado j

Es decir, la conversión del uso i al uso j se produce bajo una racionalidad económica de maximización de beneficios por parte del tomador de decisiones que, en este caso, se encuentra representado por la sociedad en su conjunto.

Dado que $W - C$ no es directamente observable, la modelación del cambio en el uso de la tierra desde una perspectiva econométrica fue realizada por medio del establecimiento de una relación funcional entre las probabilidades de transición de usos de la tierra (que es directamente observable a partir de la interpretación de fotografías aéreas) y un conjunto de atributos físicos específicos de las parcelas o unidades de información y de variables socioeconómicas relacionadas con el control legal derivado de la condición de Parque Nacional en una porción del área de estudio y de la accesibilidad al sitio.

Partiendo del diagrama mostrado en la Figura 8, y considerando a Y como una variable sintética que expresa en forma agregada los principales cambios ocurridos entre dos instantes, se analizó la relación existente entre un conjunto de variables explicativas y las probabilidades de ocurrencia de tales cambios, como se indica en la Figura 10.

De esta manera, se consideró que los cambios expresados entre dos instantes se encuentran determinados por la influencia de fuerzas o factores de naturaleza espacial y temporal.

La siguiente expresión matemática general resume el planteamiento presentado en la Figura 10, e intenta relacionar los cambios ocurridos en el ecosistema (estimados a partir del cambio en el uso de la tierra) con la influencia de los factores hasta ahora mencionados:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_r; z_1, z_2, \dots, z_s; t) \quad (17)$$

Esta expresión indica que, la dinámica del cambio en el uso de la tierra (Y) es función de la acción de una serie de factores (*drivers*) incidentes, entre los que destacan: (i) una serie de atributos o características físico-naturales de la unidad de tierra bajo estudio (x_1, x_2, \dots, x_r); (ii) factores de tipo socio-económico (z_1, z_2, \dots, z_s); y (iii) el tiempo (t) necesario para que estos factores se expresen.

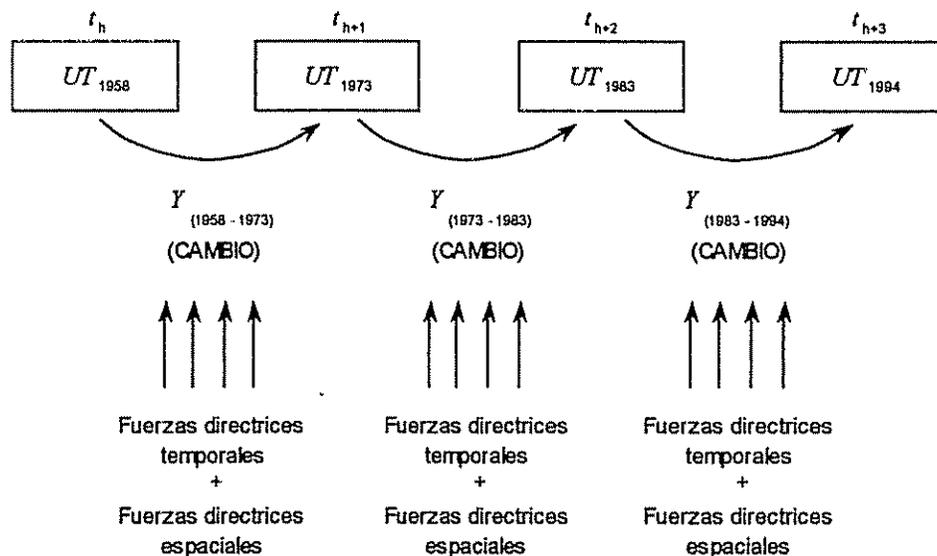


Figura 10: Diagrama del proceso espacio-temporal de cambio en el uso de la tierra para el área de estudio, y su relación con las fuerzas o factores directrices considerados

Debido a que se dispone de series discretas de tiempo que representan instantes irregularmente distanciados en el tiempo, los factores que inciden de forma temporal (tales como cambios en políticas, crecimiento de la población, incremento en los niveles de desempleo, etc.) no pudieron ser incorporados, por lo cual los análisis realizados sólo incluyen factores de naturaleza espacial.

Como la variable Y está definida para un conjunto de valores discretos, no es posible realizar estimaciones de parámetros utilizando métodos de mínimos cuadrados corrientes (LSM)², como normalmente se hace para el análisis de funciones de respuesta continuas que cumplen con ciertos supuestos básicos.

² LSM = Least Square Methods, por su expresión en Inglés

Así, al establecer la relación funcional:

$$p = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad (18)$$

y dado que p es el valor esperado de Y , por LSM puede escribirse:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad (19)$$

En este caso, la utilización de métodos de cuadrados mínimos (LSM) para la estimación de parámetros con base en la probabilidad de ocurrencia de algunas de las categorías de Y implica dos defectos estructurales importantes: (i) Dado que $\text{Var}(Y) = p \times q$, la varianza no será constante y dependerá del valor de p , por lo que los estimadores no cumplen con el supuesto de varianza homogénea y no serán eficientes (mínima varianza); y (ii) Los valores de probabilidad estimados (p) deben limitarse al intervalo $0 \leq p \leq 1$, y esto no necesariamente ocurre cuando la regresión se establece usando LSM, de manera que en estas condiciones las probabilidades que se modelan pueden tomar valores $p < 0$ y $p > 1$, los cuales no tendrían un significado lógico (Steel *et al*, 1997; Agresti, 1990).

Por ello fue necesario la utilización de técnicas basadas en regresiones logísticas y estimación de parámetros por el método de máxima verosimilitud.

La regresión logística describe la relación entre una variable de respuesta categórica y un conjunto de variables explicativas que pueden ser continuas y/o discretas (Agresti, 1990; Stokes *et al*, 1995; Steel *et al*, 1997; Greene, 1998). Además, debido a que las categorías definidas para Y no llevan implícito algún tipo de ordenamiento o jerarquía (no existe un orden específico de interés en la secuencia de $Y = 1,2,3,4,5$), se siguió el método convencionalmente utilizado para categorías nominales, es decir, utilizando lo que se conoce como modelos para logits generalizados (Agresti, 1990).

De esta manera, lo que se modela no es el valor propiamente de la variable categórica Y , sino la probabilidad asociada a la ocurrencia de alguna de las alternativas comprendidas

en esta variable y la relación de dicha probabilidad con el conjunto de variables explicativas consideradas.

La probabilidad fue relacionada con una matriz de variables espacialmente explícitas señaladas en el Cuadro 8, con la finalidad de analizar posteriormente la relevancia de cada una de estas variables y su persistencia en el tiempo, y realizar las respectivas pruebas de hipótesis.

Cuadro 8. Matriz de incidencia de factores reguladores del cambio en el uso de la tierra (\mathbf{x})

Tipo de Factor	Factor/Variable		Unidad	Especificaciones
Físico/natural	x_1	Pendiente (PEND)	Grados	Referida a la inclinación del terreno
	x_2	Altitud (ALT)	m.s.n.m/1000 (km.s.n.m)	Respecto al nivel medio del mar
	x_3	Distribución normal de precipitaciones (PRECIP)	Lámina anual en m	Con base en las Isoyetas del área, y usada como un proxy de la potencialidad de uso con fines agrícolas
	x_4	Uso previo de la tierra (UT_{t-1})	Categorías de uso $U=(1,2,3,4,5,6,7)$	Condición de uso/coertura en el instante anterior de cada período
Antropogénico / Socioeconómico	x_5	Distancia a vías de acceso (DISTACC)	km	Distancia mínima horizontal a la red vial del área (proxy de los costos de acceso)
Normativos	x_6	Ubicación en el Parque Nacional El Avila (PARQUE)	0, 1 (dummy)	0 = Ubicación fuera del Parque Nacional 1 = Ubicación dentro del Parque Nacional
	x_7	Distancia Mínima a cauce de quebrada o río (DRENA)	km	Distancia mínima horizontal de cada punto a la red de drenaje

Esta matriz de variables explicativas fue denominada *matriz de incidencia de factores (\mathbf{x})*, compuesta por las variables independientes indicadas en el Cuadro 8, más una constante unitaria para cada uno de los n sitios considerados en la muestra con uso inicial i , las cuales representan fuerzas directrices de tipo físico-natural y socio-económico que regulan los procesos de cambio dentro del área en el tiempo.

En los Anexos 1A al 6A se presenta la distribución espacial de las variables explicativas incluidas en la matriz de incidencia, con base en la cartografía temática utilizada.

La modelación de la relación de variables de respuesta categóricas en función de variables explicativas que pueden ser discretas o continuas, requiere la aplicación de lo que se conoce como el logit (L), el cual es el logaritmo natural del chance ($\text{Odds} = p/(1-p)$) de ocurrencia de alguna de las alternativas comprendidas en Y . Para el caso binomial, la relación con las variables explicativas se establece según:

$$L = \ln \left(\frac{p}{1-p} \right) = \beta'x \quad (20)$$

De esta manera es posible obtener valores de probabilidades relacionados a las variables explicativas, que se encuentren restringidos al intervalo $0 \leq p \leq 1$, despejando p de la ecuación (20) (Steel *et al*, 1997):

$$\begin{aligned} e^L &= \left(\frac{p}{1-p} \right) = e^{\beta'x} \\ p &= e^{\beta'x} - p e^{\beta'x} \\ 1 &= \frac{e^{\beta'x}}{p} - e^{\beta'x} \\ p(x) &= \frac{e^{\beta'x}}{1 + e^{\beta'x}} \quad ; \text{ con } 0 \leq p \leq 1 \end{aligned} \quad (21)$$

Para el caso multinomial, utilizando categorías nominales³, existirán varios p (p_1, p_2, \dots, p_k), por lo que pueden construirse $(K-1)$ logits no redundantes tomando a uno de ellos como referencia, y β_k vectores de parámetros para cada logit (incluyendo interceptos individuales - β_{0k} -).

Dado que la variable transformada Y que expresa las transiciones de uso de la tierra es multinomial, se definió entonces:

³ Es decir, no existe un orden específico en los valores que toma la variable categórica de respuesta

$p_k = Pr_{(Y=k)}$; la probabilidad de que ocurra alguna de las opciones de Y , con $k = \{1,2,3,4,5\}$

$\mathbf{x} = (1, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7)$; la matriz de incidencia de factores (Cuadro 8)

$p_k(\mathbf{x}) = \hat{\pi}_k(\mathbf{x})$; la probabilidad estimada de Y como función de las variables incluidas en \mathbf{x}

Según Agresti (1990), en términos de la función de distribución de cada opción, el modelo de logits generalizados será:

$$p_k(\mathbf{x}) = F_k(\beta_k' \mathbf{x}) \quad (22)$$

$$p_k(\mathbf{x}) = \frac{e^{\hat{\beta}_k' \mathbf{x}}}{\sum_{h=1}^K e^{\hat{\beta}_h' \mathbf{x}}} \quad ; \forall k = \{1,2,\dots, K\} \quad (23)$$

Donde: e : es la base de los logaritmos naturales

$\hat{\beta}_k$: es un conjunto de vectores de parámetros estimados de dimensión 8×1 (incluyendo el intercepto), asociados a los factores de la matriz de incidencia, específico para cada p_k .

$k = \{1,2,\dots, K\}$: representa el conjunto de posibles valores que toma Y

K : es el número máximo de categorías comprendidas en el conjunto k , en este caso $K = 5$

De esta manera, la probabilidad de cambio en el uso de la tierra se definió como una función de las variables o factores que conforman la matriz de incidencia.

Debido a que el modelo es para logits generalizados, con $k = \{1,2,3,\dots, K\}$ categorías es posible construir $K - 1$ logits entre las alternativas comprendidas en la variable Y , tomando el nivel más bajo como referencia ($k=1$), es decir, considerando a p_{+BOS} como denominador común en todas las expresiones, por lo cual se genera de esta manera el siguiente conjunto de parámetros estimados:

$$L_1 = \ln \left(\frac{P_{(+ARB)}}{P_{(+BOS)}} \right) = \hat{\beta}_{01} + \hat{\beta}_{11}x_1 + \hat{\beta}_{21}x_2 + \hat{\beta}_{31}x_3 + \hat{\beta}_{41}x_4 + \hat{\beta}_{51}x_5 + \hat{\beta}_{61}x_6 + \hat{\beta}_{71}x_7 \quad (24)$$

$$L_2 = \ln \left(\frac{P_{(+URB)}}{P_{(+BOS)}} \right) = \hat{\beta}_{02} + \hat{\beta}_{12}x_1 + \hat{\beta}_{22}x_2 + \hat{\beta}_{32}x_3 + \hat{\beta}_{42}x_4 + \hat{\beta}_{52}x_5 + \hat{\beta}_{62}x_6 + \hat{\beta}_{72}x_7 \quad (25)$$

$$L_3 = \ln \left(\frac{P_{(+AGVS)}}{P_{(+BOS)}} \right) = \hat{\beta}_{03} + \hat{\beta}_{13}x_1 + \hat{\beta}_{23}x_2 + \hat{\beta}_{33}x_3 + \hat{\beta}_{43}x_4 + \hat{\beta}_{53}x_5 + \hat{\beta}_{63}x_6 + \hat{\beta}_{73}x_7 \quad (26)$$

$$L_4 = \ln \left(\frac{P_{(+CHSD)}}{P_{(+BOS)}} \right) = \hat{\beta}_{04} + \hat{\beta}_{14}x_1 + \hat{\beta}_{24}x_2 + \hat{\beta}_{34}x_3 + \hat{\beta}_{44}x_4 + \hat{\beta}_{54}x_5 + \hat{\beta}_{64}x_6 + \hat{\beta}_{74}x_7 \quad (27)$$

Luego, las probabilidades de transición para cada una de las alternativas k consideradas, tomando al nivel inferior ($Y = 1$) como referencia, se estimaron de acuerdo a las siguientes expresiones específicas para el caso multinomial (Greene, 1998):

$$P_{(+BOS)} = p_1 = Pr_{(Y=1)} = \frac{1}{1 + e^{\hat{\beta}_2' \mathbf{x}} + e^{\hat{\beta}_3' \mathbf{x}} + e^{\hat{\beta}_4' \mathbf{x}} + e^{\hat{\beta}_5' \mathbf{x}}} \quad (28)$$

$$P_{(+ARB)} = p_2 = Pr_{(Y=2)} = p_1 \cdot e^{\hat{\beta}_2' \mathbf{x}} \quad (29)$$

$$P_{(+URB)} = p_3 = Pr_{(Y=3)} = p_1 \cdot e^{\hat{\beta}_3' \mathbf{x}} \quad (30)$$

$$P_{(+AGVS)} = p_4 = Pr_{(Y=4)} = p_1 \cdot e^{\hat{\beta}_4' \mathbf{x}} \quad (31)$$

$$P_{(+CHSD)} = p_5 = Pr_{(Y=5)} = p_1 \cdot e^{\hat{\beta}_5' \mathbf{x}} \quad (32)$$

$$\sum_{k=1}^K p_k = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 = 1 \quad (33)$$

Los modelos de transición fueron estimados mediante el método de máxima verosimilitud con el software econométrico LIMDEP (Greene, 1998) y el paquete estadístico SAS (SAS Institute Inc., 1989).

De esta manera, se estimaron tres modelos de transición que expresan los cambios ocurridos entre los cuatro instantes considerados (1958 a 1973, 1973 a 1983, y 1983 a 1994), los cuales fueron utilizados para la estimación de parámetros y el análisis de la influencia de los factores o fuerzas directrices sobre el cambio en tiempo y espacio.

3.2.4.1.3 Efecto espacial de los factores de la matriz de incidencia en los modelos de transición

La influencia de los factores considerados en la matriz de incidencia en determinar o regular las posibles transiciones de uso en el tiempo fue evaluada probando la significancia de los modelos en términos de su precisión en la estimación de los cambios ocurridos en la muestra, y luego revisando la significancia, magnitud y dirección (signo) individual de cada uno de estos parámetros.

Según Turner *et al* (1996), con el modelo multinomial los coeficientes estimados y sus varianzas no corresponden necesariamente al signo, magnitud relativa o significancia de las probabilidades de transición, por lo que resulta necesario analizar más bien los *efectos marginales* los cuales son calculados con base en la función de densidad estimada y la matriz de varianza-covarianza para los β_k , según:

$$\text{Efectos Marginales} = EM = \partial F / \partial X \quad (34)$$

Estos representan la contribución marginal en la probabilidad de transición con cambios unitarios en las variables independientes x . El software utilizado genera un test conservador con base en el promedio de los valores de x , y su respectiva significancia en el modelo, los cuales fueron utilizados como criterio para el análisis de la relevancia de los diferentes factores considerados.

En el Cuadro 9 se resumen los efectos esperados en cuanto a la participación de cada uno de los factores considerados para el análisis del proceso de cambio en el tiempo. De esta manera, los efectos esperados de los factores incluidos en el análisis fueron definidos como facilitadores (+) o limitadores (-) de un determinado cambio específico.

Cuadro 9. Dirección esperada en los efectos marginales sobre las probabilidades estimadas de transición en el uso de la tierra, con cambios en las variables de la matriz de incidencia ($\partial F/\partial X$)

Tipo de Factor	Variable considerada	Dirección esperada de los EM = $\partial F/\partial X$				
		Transiciones a cobertura boscosa (+BOS)	Transiciones a cobertura arbustiva (+ARB)	Transiciones a uso urbano (+URB)	Transiciones a uso agrícola (+AGVS)	Transiciones a cobertura herbácea (+CHSD)
Físico-natural	Pendiente	+	+	-	-	-
	Altitud	+	-	-	+	-
	Régimen de precipitación	+	-	-	+	-
Antropogénico	Distancia a vías de acceso	+	-	-	+	-
Normativos	Parque Nacional	+	-	-	-	-
	Distancia a cursos de agua	-	+	+	-	+

3.2.4.1.4 Estabilidad de los parámetros estimados en el tiempo

Se realizó una comparación entre modelos estimados para cada período (1958 a 1973 vs. 1973 a 1983, y 1973 a 1983 vs. 1983 a 1994) con la finalidad de evaluar la estabilidad de los parámetros estimados en el tiempo.

Esta comparación fue realizada siguiendo una metodología indirecta propuesta por Turner *et al* (1996) por medio de una Razón de Verosimilitud (RV), partiendo de la hipótesis nula de que no existen diferencias significativas en los coeficientes estimados en un período con respecto a los del siguiente período, y una hipótesis alternativa de que al menos uno de los parámetros entre ambos períodos analizados es diferente, según:

$$RV = -2 (\text{LFV modelo 2} - \text{LFV modelo 1}) \quad (35)$$

Donde:

LFV modelo 1 = Logaritmo del valor de máxima verosimilitud del modelo 1

LFV modelo 2 = Logaritmo del valor de máxima verosimilitud del modelo 2

De acuerdo a Turner *et al* (1996), R^2 tiene una distribución χ^2 , con grados de libertad igual al número de parámetros que se compara (28 grados de libertad en este caso).

3.2.4.2 Respuesta de áreas al evento de 1999

Para evaluar la respuesta de áreas al evento ocurrido en diciembre de 1999, se elaboró un modelo multinomial logístico en el que las probabilidades de ocurrencia de alguna de las categorías de daños provocados fue relacionada a un conjunto de factores vinculados a las características físico-naturales del área y el uso o cobertura de la tierra, tomando como referencia la condición del ecosistema identificada en la muestra $n=3770$ en la cobertura inmediatamente anterior al evento (1994), con la finalidad de examinar la relevancia de estos factores en explicar el fenómeno.

Este análisis fue realizado con base en la información extraída de la imagen del satélite IKONOS-2 para enero del año 2000, suministrada por el Servicio Autónomo de Geografía y Cartografía Nacional de Venezuela, y las diferentes coberturas temáticas disponibles.

Debido a que la imagen disponible no cubría la totalidad del área de estudio, la muestra final utilizada para este análisis fue de $n=3505$, es decir, 265 unidades de información quedaron excluidas del análisis.

Una de las limitaciones más importantes del análisis es que no se incorpora la influencia del factor extremo causal del fenómeno ocurrido (precipitaciones extremas) como una variable explicativa, debido a la inexistencia de este tipo de información en el área. A partir del año 1996, la red hidro-meteorológica del Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales que operaba en la zona, y que incluía a las estaciones Los Venados, Teleférico, Caraballeda, Macuto, Naiguatá, Osma, fue desactivada, lo que implica que nunca será posible conocer en forma cuantitativa la distribución espacial y magnitud del evento atmosférico ocurrido en diciembre de 1999 en esta región del país.

Los únicos datos existentes para esta parte de la Cordillera de La Costa fueron los registrados por la estación Aeropuerto de Maiquetía, la cual cumple funciones de apoyo aeronáutico, y los registrados en una estación naval localizada fuera del área definida para el estudio (Estación Mamo/Escuela Naval). Sin embargo, esta información no permite realizar inferencias en términos del efecto diferencial al que pudieron haber estado sometidas las diferentes áreas afectadas.

Ante la inexistencia de esta información, una de las alternativas evaluadas para la realización del análisis fue partir del supuesto de tratamiento homogéneo en toda el área, lo que implicaba suponer que todas las unidades de la muestra recibieron el mismo efecto de las precipitaciones ocurridas.

Aunque, en buena medida, este supuesto está soportado por los reportes meteorológicos sobre el evento, en los cuales se indica que las anomalías atmosféricas para esta época del año fueron más o menos generalizadas para la región norte del país, las referencias revisadas y la información de precipitaciones disponible indican que, debido a las grandes diferencias altitudinales en la zona, normalmente existen diferencias importantes en cuanto al patrón de distribución espacial de las precipitaciones, razón por la que cabe esperar que este evento debe haber tenido también una distribución no homogénea en toda la zona.

Por ello, se consideró prudente al menos tomar como referencia el patrón normal de distribución de las precipitaciones en el área de estudio, con base en las isoyetas de precipitación anual disponibles, como una aproximación que permitiera descontar el efecto de lo que pudo haber sido la distribución espacial de las lluvias en 1999.

Se definió una variable categórica de respuesta multinomial ($Y_c = 1,2,3,4$), donde 1 = Sin daños aparentes; 2 = Daños por deslizamiento de tierra; 3 = Daños por flujo de sedimentos, y 4 = Daños por flujo de materiales gruesos (rocas de gran magnitud), los cuales fueron identificados sobre la imagen y delimitados vectorialmente.

La cobertura vectorial obtenida con los daños identificados fue posteriormente convertida a formato GRID, manteniendo la resolución utilizada para las unidades de información (20

x 20 m), y con el comando COMBINE del software ArcInfo se extrajo la información específica para cada unidad de la muestra considerada para este análisis ($n=3505$).

La probabilidad de ocurrencia de los eventos considerados en la variable categórica Y_c fue denominada p_c , y esta se relacionó a un conjunto de variables explicativas de tipo físico-natural (unidades litológicas, pendiente, altitud, proximidad a drenajes naturales) y al tipo de uso y cobertura previo al evento, con base en la información de uso/cobertura para el último instante disponible en la serie de mosaicos de fotografías aéreas (1994).

Debido a que el modelo elaborado para este análisis es también para logits generalizados, en esta parte aplican las mismas consideraciones descritas en los modelos multinomiales utilizados para el análisis de transiciones en el uso de la tierra, pero en este caso se definió:

\mathbf{x} = una matriz de variables explicativas (Cuadro 10)

$p_c(\mathbf{x}) = \hat{\pi}_c(\mathbf{x})$; la probabilidad estimada de las alternativas comprendidas por Y_c

De manera que el modelo de respuesta de áreas al evento de 1999 quedó definido por la siguiente expresión:

$$p_c(\mathbf{x}) = \frac{e^{\hat{\beta}_c' \mathbf{x}}}{\sum_{h=1}^C e^{\hat{\beta}_h' \mathbf{x}}} \quad ; \forall c = \{1, 2, \dots, C\} \quad (36)$$

Donde: e : es la base de los logaritmos naturales

$\hat{\beta}_c$: es un conjunto de vectores de parámetros estimados, de dimensión 7 x 1 (incluyendo el intercepto), asociados a las variables explicativas descritas en el Cuadro 10, y específico para cada p_c .

$c = \{1, 2, \dots, C\}$: representa el conjunto de posibles valores que toma Y_c

C : es el número máximo de categorías comprendidas en el conjunto c , en este caso $C = 4$

Cuadro 10. Variables explicativas consideradas en el análisis de la respuesta de áreas al evento de diciembre de 1999.

	Variable	Unidad	Especificaciones
x ₁	Pendiente (PEND)	Grados	Referida a la inclinación del terreno
x ₂	Altitud (ALT)	m.s.n m/1000 (km.s.n.m)	Respecto al nivel medio del mar
x ₃	Distribución normal de precipitaciones (PRECIP)	Lámina anual en m	Utilizada como una aproximación de la distribución espacial del evento de 1999
x ₄	Uso previo de la tierra (UT94)	Categorías de uso UT=(1,2,3,4,5,6,7)	Condición de uso/coertura en el instante anterior de cada período
x ₅	Distancia Mínima a cauce de quebrada o río (DRENA)	km	Distancia mínima horizontal de cada punto a la red de drenaje
x ₆	Unidades litológicas (LITO)	Clases (1,2,3,4,5,6,7)	Con base en el estudio de Urbani et al, 2000.

La nomenclatura utilizada para cada probabilidad p_c estimada fue la siguiente:

$$p_1 = Pr(x_c = 1) = \text{Sin daño aparente} = p_{(\text{NO DAÑO})}$$

$$p_2 = Pr(x_c = 2) = \text{Deslizamiento de tierra} = p_{(\text{DESLIZ})}$$

$$p_3 = Pr(x_c = 3) = \text{Daño por flujo de sedimentos} = p_{(\text{FSED})}$$

$$p_4 = Pr(x_c = 4) = \text{Daño por flujo de materiales gruesos (rocas)} = p_{(\text{FROCAS})}$$

Tomando como referencia la categoría más baja, $p_{(\text{NO DAÑO})}$, los logits generalizados construidos para cada evento espacialmente explícito fueron los siguientes:

$$L_1 = \ln \left(\frac{p_{(\text{DESLIZ})}}{p_{(\text{NO DAÑO})}} \right) = \hat{\beta}_{01} + \hat{\beta}_{11}x_1 + \hat{\beta}_{21}x_2 + \hat{\beta}_{31}x_3 + \hat{\beta}_{41}x_4 + \hat{\beta}_{51}x_5 + \hat{\beta}_{61}x_6 \quad (37)$$

$$L_2 = \ln \left(\frac{p_{(\text{FSED})}}{p_{(\text{NO DAÑO})}} \right) = \hat{\beta}_{02} + \hat{\beta}_{12}x_1 + \hat{\beta}_{22}x_2 + \hat{\beta}_{32}x_3 + \hat{\beta}_{42}x_4 + \hat{\beta}_{52}x_5 + \hat{\beta}_{62}x_6 \quad (38)$$

$$L_3 = \ln \left(\frac{p_{(\text{FROCAS})}}{p_{(\text{NO DAÑO})}} \right) = \hat{\beta}_{03} + \hat{\beta}_{13}x_1 + \hat{\beta}_{23}x_2 + \hat{\beta}_{33}x_3 + \hat{\beta}_{43}x_4 + \hat{\beta}_{53}x_5 + \hat{\beta}_{63}x_6 \quad (39)$$

Al igual que en el caso de los modelos de transición de uso de la tierra, el análisis de la contribución de cada variable explicativa incluida en el modelo se realizó por medio de la interpretación de los efectos marginales sobre las probabilidades de ocurrencia de cada una de las alternativas de la variable Y_c . Los parámetros fueron estimados mediante el método de máxima verosimilitud utilizando el paquete estadístico SAS (SAS Institute Inc., 1989), por medio del procedimiento PROC CATMOD.

La información sobre unidades litológicas fue obtenida a partir de un estudio geológico semi-detallado elaborado por Urbani *et al* (2000), que incluyó la elaboración de un mapa 1:25.000 en el que se delimitaron las unidades descritas en el Cuadro 11 (ver Anexo 7A).

Cuadro 11. Unidades litológicas identificadas en el área de estudio por Urbani *et al* (2000).

Abreviatura	Unidades litológicas	Valor asignado a la variable (LITO)	Superficie (ha)
QAL	Aluvión	1	842.6
ME	Fase Tacagua-Mármoles, esquistos calcáreos actinolíticos y epidóticos	2	2463.4
SP	Serpentinitas	3	1006.6
GE	Esquistos de San Julián-Gneises y esquistos feldespásticos	4	9065.7
AU	Augengneis de Peña de Mora-Gneis cuarzo micáceo.	5	981.5
EQ	Fase Antímano-Mármoles cuarcíferos, esquistos calcáreos	6	476.7
EA	Fase Nirgua-Anfibolitas y esquistos anfíbolíticos	7	670.2
MG	Metagranito de Naguayatá	8	424.1

Los aspectos estructurales de las diferentes unidades litológicas descritas por estos autores representan un alto grado de complejidad en términos de la interpretación de sus características y del grado diferencial de susceptibilidad a colapsar por movimientos de masa.

Para los fines del análisis realizado, más que revisar exhaustivamente la respuesta en cada una de estas unidades litológicas, el interés fundamental se ha dirigido a la evaluación de la significancia de este factor como variable explicativa.

3.3 Caracterización de la periodicidad de eventos extremos de precipitación en el área de estudio

Las series disponibles de precipitación diaria fueron interpretadas por medio de un análisis armónico (también conocido como análisis de Fourier), con la finalidad de evaluar la existencia de patrones cíclicos de ocurrencia de eventos extremos.

La información básica fue suministrada por la Dirección de Hidrología y Climatología, y la Oficina Nacional de Diversidad Biológica del Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales (MARN), para las estaciones meteorológicas indicadas en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Estaciones meteorológicas del MARN utilizadas como referencia para el análisis de eventos extremos de precipitación

Estación	Serial	Latitud	Longitud	Altitud (msnm*)	Serie disponible de precipitación diaria	n (años)
Naiguatá	5005	10° 37' 25"	66° 44' 08"	49	1954 - 1983	43
Mamo	9308	10° 35' 45"	67° 02' 50"	81	1959 - 1983	25
Carayaca	9311	10° 32' 00"	67° 08' 00"	900	1967 - 1996	30

*msnm: metros sobre el nivel medio del mar

La identificación de eventos extremos se hizo seleccionando los valores máximos de precipitación diaria dentro de cada año en las series de tiempo disponibles, y a este valor se le sumaron luego los valores de precipitación registrados en el día anterior y el día posterior a cada uno de estos eventos.

Los valores anuales para cada $PMAX_t$ fueron obtenidos según:

$$PMAX_t = P_t^{d_0-1} + P_t^{d_0} + P_t^{d_0+1} \quad (40)$$

Donde:

$PMAX_t$ = Valor de precipitación de eventos extremos (mm) para cada año t

$P_t^{d_0} =$ Lámina máxima de precipitación diaria (mm/día) para cada año t en la serie de tiempo, registrada en el día d_0

$P_t^{d_0-1} =$ Lámina de precipitación registrada el día anterior a d_0 (mm/día) en cada año t

$P_t^{d_0+1} =$ Lámina de precipitación registrada el día siguiente a d_0 (mm/día) en cada año t

De esta manera, se construyó una serie temporal de eventos extremos ($PMAX_t$) que representan valores máximos de precipitación con potencial de producir movimientos de masa, definida por el siguiente conjunto de valores anuales:

$$PMAX_t = \{PMAX_1, PMAX_2, \dots, PMAX_n\} \quad (41)$$

Donde: $t = 1, 2, \dots, n$ representa a cada uno de los años en la serie anual
 $n =$ el número de años que compone la serie de eventos extremos para cada estación analizada

Para evaluar la periodicidad o existencia de patrones cíclicos anuales de estos eventos extremos, se realizó un análisis espectral con los datos crudos de $PMAX_t$, obtenidos con base en las ecuaciones (40) y (41), usando un procedimiento incluido en el software estadístico SAS (SAS Institute Inc, 1989) denominado PROC SPECTRA.

Las densidades espectrales fueron estimadas utilizando una transformación finita de Fourier mediante la cual se obtuvieron los periodogramas correspondientes a cada estación analizada en los que se expresa la existencia o no de patrones de recurrencia en los eventos extremos.

La transformación finita de Fourier descompone la serie de datos en una suma de ondas de seno y coseno de diferentes amplitudes y longitudes de onda, obteniéndose la siguiente expresión (SAS Institute Inc, 1989):

$$PMAX_t = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^m [a_k \cos(\omega_k t) + b_k \text{sen}(\omega_k t)] \quad (42)$$

Donde:

- t es el tiempo en años ($t = 1, 2, \dots, n$)
- $P_{MAX,t}$ son los valores de los eventos extremos, según la ecuación (41)
- n es el número de observaciones en la serie de tiempo
- m es el número de frecuencias en la descomposición de Fourier, con $m = n/2$ si n es par, o $m = (n-1)/2$ si n es impar
- a_0 es el término promedio, $a_0 = 2\overline{P_{MAX}}$
- a_k son los coeficientes del coseno
- b_k son los coeficientes del seno
- ω_k son las frecuencias de Fourier, $\omega_k = \frac{2\pi k}{n}$

Las funciones de los coeficientes a_k y b_k son graficadas contra los períodos, y de esta manera se obtienen los periodogramas, los cuales pueden ser interpretados como la contribución del k -ésimo armónico ω_k al total de la suma de cuadrados (en el sentido de un análisis de varianza), para la descomposición del proceso en componentes de dos grados de libertad para cada una de las frecuencias.

El procedimiento SAS utilizado produce el estadístico Bartlett's Kolmogorov-Smirnov para probar la existencia de ruido blanco (*white noise*, por su expresión en Inglés) en la serie temporal, el cual compara el periodograma acumulado normalizado con la función de distribución acumulada de una variable uniforme (0,1) aleatoria. Si el estadístico excede el valor crítico $s\sqrt{1/(m-1)}$, se rechaza la hipótesis nula de que la serie evaluada constituye un ruido blanco, con $s = 1.36$ o $s = 1.63$ para una significancia de 5% o 1%, respectivamente.

El término ruido blanco es una expresión normalmente empleada en el análisis de patrones cíclicos de sonidos e imágenes, y representa una combinación de ondas igualmente intensas para todas las frecuencias del espectro que se analiza, pero este término es también utilizado en el análisis de series temporales. Una característica del

ruido blanco es que este no tiene periodicidad, de manera que representa patrones no reconocibles en términos de su recurrencia.

Para corroborar los resultados obtenidos por el procedimiento anterior y remover la posible existencia de tendencias de largo plazo en las series de tiempo, se calcularon las primeras diferencias en las series anuales de eventos extremos ($PMAX_{(t)} - PMAX_{(t-1)}$), y con estos valores se realizaron estimaciones de autocorrelación en las series de tiempo.

La autocorrelación es una medida de la persistencia entre dos observaciones adyacentes en una serie de tiempo. La función de autocorrelación, $r_{xx}(k)$, de la serie de eventos máximos de precipitación $PMAX_t$ al rezago k , será (Kendall, 1976; Box y Jenkins, 1976):

$$r_{xx}(k) = \frac{c_{xx}(k)}{c_{xx}(0)}, \quad (43)$$

donde $c_{xx}(k)$ es el estimado de la función de auto-covarianza al rezago k dado por:

$$c_{xx}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (PMAX_t - \overline{PMAX})(PMAX_{t+k} - \overline{PMAX}), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (44)$$

Al graficar la función de autocorrelación contra los rezagos en el tiempo se producen los correlogramas, en los cuales se expresa la existencia de periodicidad en la serie de tiempo y su significancia se evalúa con base en el límite establecido por ± 2 EE, con EE=Error estándar.

4 RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Clasificación del uso o cobertura de la tierra en cada uno de los instantes t_i considerados

Debido a que la clasificación del tipo de uso/cobertura de la tierra en los diferentes instantes considerados representa el insumo básico para el análisis del cambio de uso y su relación con factores directrices, en esta parte se presentan los resultados obtenidos de la clasificación realizada a partir de la muestra tamaño $n=3770$, con base en la interpretación de la serie de fotografías aéreas disponibles.

En el Cuadro 13 se presentan los resultados para las clasificaciones de uso/cobertura de la tierra en los años 1958, 1973, 1983 y 1994, y la estimación de la proporción de cada uno de estos usos identificados respecto a la superficie total del área de estudio.

Como puede observarse en la Figura 11, la varianza reportada por el muestreo realizado tiende a caer drásticamente hasta $n = 1000$, y a partir de este punto comienza a estabilizarse en todos los años considerados, lo cual indica una relativa homogeneidad de la varianza con incrementos en n . De acuerdo a esta tendencia en la varianza muestral, es posible inferir que el tamaño de muestra ($n = 3770$) es adecuadamente representativo de las condiciones generales del ecosistema para el área de estudio, si se toma en consideración que un incremento en el tamaño de la muestra a partir de $n = 3770$ no influye significativamente en la estimación de las variaciones encontradas en el paisaje, lo cual fue utilizado como criterio para decidir el tamaño final de la muestra.

Tomando en cuenta la proporción estimada de superficie para todos los años considerados, existe un claro predominio de cobertura boscosa en el paisaje, con una proporción estimada entre 57.9% y 59% del área total de estudio y con muy poca variación entre los años analizados.

En esta clase se incluyeron tanto los bosques ubicados en las partes medias y altas del área de estudio como las franjas boscosas asociadas a los cursos de agua, comúnmente denominadas bosques de galería.

Cuadro 13. Resumen de la clasificación de tipos de uso de la tierra para la muestra $n=3770$ y estimación de la proporción de superficie de cada uso dentro del área de estudio

CLASE DE USO/COBERTURA DE LA TIERRA		Número de observaciones por clase de uso o cobertura de la tierra (n_i)				Intervalos de confianza (IC) de la proporción de superficie de cada uso/cobertura (%) para el área de estudio			
		1958	1973	1983	1994	1958	1973	1983	1994
Denominación	UT								
Sin cobertura definida (SCD)	1	220	96	40	28	$p_{1958} = \hat{P}_{1958}$ 5.8% \pm 0.012%	$p_{1973} = \hat{P}_{1973}$ 2.5% \pm 0.008%	$p_{1983} = \hat{P}_{1983}$ 1.1% \pm 0.005%	$p_{1994} = \hat{P}_{1994}$ 0.7% \pm 0.005%
Uso urbano (URB)	2	125	320	385	464	3.3% \pm 0.013%	8.5% \pm 0.021%	10.2% \pm 0.023%	12.3% \pm 0.025%
Uso Agrícola/conucos (AGR)	3	460	308	178	130	12.2% \pm 0.025%	8.2% \pm 0.020%	4.7% \pm 0.015%	3.4% \pm 0.013%
Vegetación secundaria (VS)	4	28	237	332	388	0.7% \pm 0.006%	6.3% \pm 0.022%	8.8% \pm 0.021%	10.3% \pm 0.022%
Cobertura herbácea (CH)	5	96	67	71	66	2.5% \pm 0.011%	1.8% \pm 0.012%	1.9% \pm 0.009%	1.8% \pm 0.009%
Cobertura arbustiva (CA)	6	660	557	540	482	17.5% \pm 0.028%	14.8% \pm 0.032%	14.3% \pm 0.025%	12.8% \pm 0.024%
Cobertura boscosa (CB)	7	2181	2185	2224	2212	57.9% \pm 0.040%	58.0% \pm 0.056%	59.0% \pm 0.040%	58.7% \pm 0.040%
TOTALES		3770	3770	3770	3770	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

* IC(95%) = Intervalo de confianza al 95% = $\pm (t_{\alpha/2} * s/\sqrt{n})$

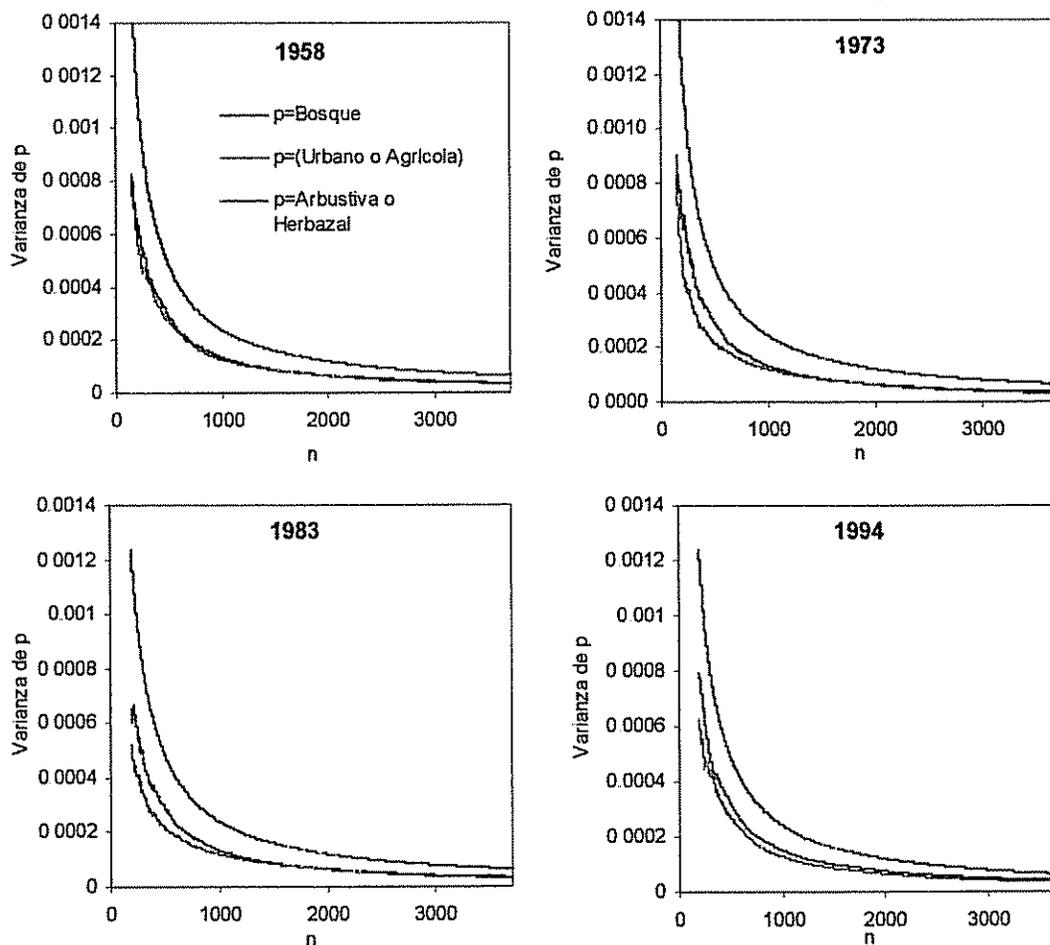


Figura 11: Tendencia de la magnitud de la varianza muestral en función del tamaño de muestra (n) para las interpretaciones de uso/cobertura de la tierra en cada uno de los años considerados.

Según Steyermark y Huber (1978), las especies que generalmente conforman la mayoría de estos bosques son: *Gynerthera caribensis* y otras especies pertenecientes a las familias Moraceae (*Ficus sp*) y Podocarpaceae (*Podocarpus sp*), aunque MARN (1996) le agrega a esta lista las familias Bignoniaceas (*Tabebuia serratifolia*, *T. Chrysantha*), Papilonáceas (*Machaerium robiniaefolium*, *Lonchocarpus fendleri*) y las Burseráceas (*Bursera simaruba* y *B. tormentosa*).

La vegetación arbustiva constituye el segundo tipo de cobertura importante, e incluye a las franjas bajas denominadas por MARN (1996) como Matorrales y Espinares, las cuales

son formas de vegetación asociadas a condiciones secas, típicas de la parte baja costera de la Cordillera de La Costa.

Estas incluyen las formaciones representadas por vegetación arbustiva xerófila de fisionomía achaparrada, compuesta por especies frecuentemente armadas, asociadas a cactáceas suculentas y especies arbustivas como el Cují.

La vegetación secundaria se refiere a coberturas de vegetación relacionadas al uso previo con fines agrícolas, que son el resultado de la deforestación y el posterior abandono, particularmente por lo que se conoce como *conucos*, los cuales son formas de explotación de la tierra con fines de subsistencia. La vegetación secundaria aparece en las fotografías aéreas en forma de parches asociados a zonas ubicadas en torno a las áreas con uso actual agrícola. Esto fue confirmado al examinar el uso previo de la tierra en las fotografías aéreas anteriores a cada año, es decir, identificando parches de vegetación distintos a la masa boscosa que en el mosaico de fotografías aéreas anteriores a ese instante eran utilizadas con fines agrícolas. Sin embargo, es posible que para el año 1958 existan algunas deficiencias en cuanto a la clasificación de este tipo de cobertura, puesto que en este caso no existía referencia anterior a este año.

La cobertura herbácea representa una muy baja proporción de la superficie total del área de estudio en todos los años considerados, y según MARN (1996) este tipo de cobertura se caracteriza por una fisionomía monoestratificada compuesta por especies gramíneas, las cuales se encuentran asociadas a fuegos periódicos y a la intervención antrópica.

Los usos agrícolas representan una proporción baja del uso actual de la tierra (con un 3.4% de superficie estimada para el año 1994), y se encuentran localizados básicamente en las partes medias a altas del área de estudio en forma más o menos dispersa.

Aunque el uso urbano representa también una baja proporción de superficie estimada, este constituye el uso más importante fuera de los linderos del Parque Nacional El Avila, el cual se ha concentrado en las zonas bajas de esta parte de la cordillera.

4.2 Cambios en el uso/cobertura de la tierra entre 1958 y 1994

De acuerdo a los valores reportados en el Cuadro 13, en términos de cambios agregados las tendencias estimadas indican un relativo equilibrio en la cobertura boscosa a través del tiempo, mientras que los principales cambios ocurridos se concentraron en los usos urbano y agrícola, y en la vegetación secundaria.

Esta dinámica general resume el proceso de ocupación del espacio en esta parte de la Cordillera de La Costa. Particularmente se observó que los usos relacionados a la agricultura han venido disminuyendo en el tiempo, y estas áreas han sido sustituidas en su mayoría por vegetación secundaria.

La condición del paisaje expresada en la serie de fotografías aéreas del año 1958 muestra las condiciones de uso que antecedieron a la creación del Parque Nacional. La interpretación de las fotografías aéreas de este año en particular indica que las partes medias y altas de la cordillera fueron muy intervenidas antes de que estas zonas se declararan áreas protegidas, lo cual se evidenció en la existencia de una gran cantidad de áreas deforestadas en forma de parches dispersos.

Para este mismo año, la proporción de suelo sin cobertura definida o con escasa cobertura vegetal fue relativamente importante, y se observó que estos se encontraban asociados a la construcción de obras de infraestructura en las partes bajas de la cordillera y de vías de penetración hacia las partes altas.

Es posible que parte de estas áreas que aparecen deforestadas o con escasa cobertura en el año 1958 tengan también relación con los deslizamientos y movimientos de masa ocurridos en el año 1951, pero no se dispone de una referencia previa que permita corroborarlo.

En los subsiguientes años, la mayoría de estas áreas intervenidas se observaron cubiertas de vegetación secundaria o por cobertura boscosa, lo que indica que ha existido un paulatino abandono de la actividad agrícola después del año 1958, y una recuperación de la cobertura del suelo en el tiempo.

También para el año 1958, buena parte de las áreas planas bajas eran utilizadas con fines agrícolas, y estas fueron posteriormente reemplazadas por usos urbanos, de tal forma que en los subsiguientes años la existencia de usos agrícolas en estas posiciones del relieve fue prácticamente nula.

La dinámica de transiciones ocurridas en el uso de la tierra para las siete categorías de uso/cobertura identificadas se resume en las matrices de probabilidades de transición mostradas en los Cuadros 14, 15 y 16.

De acuerdo a los valores reportados en estas matrices, el periodo 1958-1973 fue el más activo en cuanto a cambios ocurridos en el uso/cobertura de la tierra, mientras que los dos periodos siguientes (1973-1983 y 1983-1994) se caracterizaron por una tendencia general hacia el equilibrio del ecosistema. En la teoría markoviana, el alcance en el tiempo de estas condiciones de equilibrio es comúnmente denominada *steady-state*.

Esto se refleja en los valores probabilísticos de transiciones de usos y cobertura de la tierra contenidos en la diagonal de estas matrices, los cuales tienden en su mayoría a valores cercanos a la unidad (1.0) en los periodos 1973-1983 y 1983-1994, mientras que en el periodo 1958-1973 la mayoría de las probabilidades de transición ubicadas en la diagonal de la matriz correspondieron a valores bajos a medios (entre 0.143 y 0.618), a excepción de las transiciones a cobertura boscosa (Cuadro 14).

De acuerdo a ello, es posible inferir que si la tendencia hacia la estabilidad en las transiciones se mantuvo después del periodo 1983-1994, las condiciones generales del ecosistema y de la ocupación e intervención del espacio dentro del área de estudio en el instante inmediatamente anterior al desastre de diciembre de 1999 hayan sido muy similares a las encontradas en la referencia utilizada del año 1994.

En todos los periodos analizados las probabilidades de transición de uso urbano a otros tipos de usos o coberturas de la tierra es prácticamente nula, lo que indica que la tendencia de ocupación del espacio con fines urbanos, con o sin planificación urbanística, difícilmente es revertida en el tiempo (con probabilidad muy baja o nula).

Cuadro 14. Matriz de probabilidades markovianas de transición (MPT)
para el período 1958-1973

$UT_i \backslash UT_j$			1973							P_{i+} ↓
			SCD (1)	URB (2)	AGR (3)	VS (4)	CH (5)	CA (6)	CB (7)	
1958	Sin cobertura definida (SCD)	1	0.227	0.309	0.005	0.005	0.050	0.195	0.209	1.0
	Uso Urbano (URB)	2	0.000	0.968	0.000	0.000	0.000	0.032	0.000	1.0
	Uso Agrícola (AGR)	3	0.004	0.024	0.361	0.315	0.002	0.024	0.270	1.0
	Veg. Secundaria (VS)	4	0.000	0.000	0.179	0.143	0.000	0.036	0.643	1.0
	Cob. Herbácea (CH)	5	0.010	0.354	0.083	0.000	0.365	0.094	0.094	1.0
	Cob. Arbustiva (CA)	6	0.058	0.121	0.032	0.015	0.014	0.618	0.142	1.0
	Cob. Boscosa (CB)	7	0.002	0.003	0.049	0.035	0.005	0.037	0.868	1.0

Cuadro 15. Matriz de probabilidades markovianas de transición (MPT)
para el período 1973 -1983

$UT_i \backslash UT_j$			1983							P_{i+} ↓
			SCD (1)	URB (2)	AGR (3)	VS (4)	CH (5)	CA (6)	CB (7)	
1973	Sin cobertura definida (SCD)	1	0.417	0.198	0.021	0.000	0.104	0.177	0.083	1.0
	Uso Urbano (URB)	2	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.0
	Uso Agrícola (AGR)	3	0.000	0.006	0.549	0.308	0.003	0.016	0.117	1.0
	Veg. Secundaria (VS)	4	0.000	0.000	0.000	0.996	0.000	0.000	0.004	1.0
	Cob. Herbácea (CH)	5	0.000	0.090	0.015	0.000	0.881	0.015	0.000	1.0
	Cob. Arbustiva (CA)	6	0.000	0.063	0.000	0.002	0.002	0.928	0.005	1.0
	Cob. Boscosa (CB)	7	0.000	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	0.996	1.0

Cuadro 16. Matriz de probabilidades markovianas de transición (MPT)
para el período 1983-1994

$UT_i \backslash UT_j$			1994							P_{i+} ↓
			SCD (1)	URB (2)	AGR (3)	VS (4)	CH (5)	CA (6)	CB (7)	
1983	Sin cobertura definida (SCD)	1	0.575	0.200	0.000	0.000	0.075	0.100	0.050	1.0
	Uso Urbano (URB)	2	0.000	0.997	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	1.0
	Uso Agrícola (AGR)	3	0.000	0.000	0.601	0.354	0.000	0.017	0.028	1.0
	Veg. Secundaria (VS)	4	0.000	0.000	0.015	0.928	0.000	0.003	0.054	1.0
	Cob. Herbácea (CH)	5	0.000	0.070	0.028	0.000	0.845	0.042	0.014	1.0
	Cob. Arbustiva (CA)	6	0.009	0.109	0.009	0.004	0.006	0.848	0.015	1.0
	Cob. Boscosa (CB)	7	0.000	0.004	0.005	0.007	0.000	0.005	0.979	1.0

Los usos o coberturas de la tierra con mayor probabilidad de ser convertidos a usos urbanos fueron la cobertura arbustiva y las áreas con suelos escasamente cubiertos por vegetación, lo cual se relaciona a la abundancia de este tipo de cobertura en las partes bajas de la cordillera, mientras que la conversión de cobertura boscosa a usos urbanos ocurrió en todos los períodos con valores de probabilidad muy bajos.

Aunque en términos de superficie agregada las tendencias estimadas indican una disminución de los usos relacionados a la agricultura en las laderas de la cordillera en los dos últimos períodos considerados (Cuadro 13), esto no implica que no exista intervención ya que, como lo demuestran las matrices de transición, en todos los períodos existió un valor probabilístico de conversión de otros usos o coberturas a usos agrícolas, aunque esta probabilidad por lo general fue baja.

Esto indica que la disminución de este tipo de usos dentro del área de estudio ha sido el resultado de un balance positivo a favor de la recuperación del ecosistema, es decir, el abandono de la agricultura y posterior conversión a formas secundarias de vegetación es mayor que la incorporación de nuevas áreas deforestadas para usos agrícolas.

4.3 Modelos de transición del uso de la tierra previo al evento de 1999

Los tres modelos de transición de uso de la tierra estimados (1958 a 1973, 1973 a 1983 y 1983 a 1994) resultaron altamente significativos ($P < 0.01$), indicando que la matriz de incidencia de factores explica razonablemente bien las transiciones ocurridas en los períodos analizados, representados por medio de la variable transformada Y . En el Cuadro 17 se presentan las estadísticas descriptivas obtenidas para los factores de incidencia.

Cuadro 17. Características de los factores que coadyuvan al cambio diferenciado ($n=3770$)

Variable	Unidades	Promedio	Mínimo	Máximo	Desv. Estándar	Skewness	Kurtosis	P**
PEND	Grados (°)	23.853	0.000	52.000	9.769	-0.358	-0.097	< 0.01
ALT	msnm/1000*	0.609	0.000	1.931	0.435	0.579	-0.508	< 0.01
PRECIP	Lámina anual (mm/1000)	0.774	0.569	1.200	0.157	0.861	0.028	< 0.01
DISTACC	km	0.605	0.000	3.893	0.754	1.876	3.376	< 0.01
PARQUE	Dummy (0,1)	-	0.000	1.000	-	-	-	-
DRENA	km	0.083	0.000	0.639	0.076	1.993	6.348	< 0.01

*msnm. = Metros sobre el nivel medio del mar

** P = Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov. H_0 = los datos se distribuyen normalmente

La precisión obtenida en los modelos de transición para la estimación de los cambios ocurridos fue 71.3%, 90.5% y 91.9%, para los períodos 1958-1973, 1973-1983 y 1983-1994, respectivamente (Cuadros 18, 19 y 20). Esta precisión es medida con base en el número de transiciones estimadas por medio de los modelos elaborados y su comparación con las transiciones observadas en la muestra, y ha sido expresada en porcentaje de concordancia ($[\text{estimado/observado}] \times 100$) en los Cuadros 18, 19 y 20.

En general, los modelos elaborados para los tres períodos de estudio tienden a predecir bien las transiciones a cobertura boscosa, cobertura arbustiva, uso urbano y formas relacionadas a la intervención por agricultura, mientras que la cobertura herbácea y el

suelo sin cobertura definida (o con escasa cobertura vegetal) son pobremente predichos en cuanto a su ocurrencia en el espacio, lo cual se refleja en muy bajos valores de precisión, con 1.9%, 1.8% y 2.2% para los períodos 1958-1973, 1973-1983 y 1983-1994, respectivamente.

Cuadro 18. Precisión de la estimación de transiciones ocurridas* a partir del modelo multinomial logístico para el período 1958 a 1973

Observado (Y _i) \ Estimado (Y _j)		Estimado (Y _j)					Total
		+BOS (1)	+ARB (2)	+URB (3)	+AGVS (4)	+CHSD (5)	
Transiciones a cobertura boscosa (+BOS)	1	1983 (90.6%)	33	18	154	1	2189
Transiciones a cobertura arbustiva (+ARB)	2	326	145 (26.1%)	53	27	4	555
Transiciones a uso urbano (+URB)	3	11	233	16 (82.5%)	2	293	320
Transiciones a uso agrícola y VS (+AGVS)	4	233	16	2	293 (53.8%)	1	545
Transiciones a cobertura herbácea y SCD (+CHSD)	5	40	34	58	26	3 (1.9%)	161
Total		2593	269	395	503	10	3770 (71.3%)

*Valores entre paréntesis indican la precisión en porcentaje de unidades correctamente estimadas respecto a lo observado

Cuadro 19. Precisión de la estimación de transiciones ocurridas* a partir del modelo multinomial logístico para el período 1973 a 1983

Observado (Y _i) \ Estimado (Y _j)		Estimado (Y _j)					Total
		+BOS (1)	+ARB (2)	+URB (3)	+AGVS (4)	+CHSD (5)	
Transiciones a cobertura boscosa (+BOS)	1	2181 (97.9%)	2	7	38	0	2228
Transiciones a cobertura arbustiva (+ARB)	2	102	404 (75.1%)	15	17	0	538
Transiciones a uso urbano (+URB)	3	3	37	336 (87.3%)	9	0	385
Transiciones a uso agrícola y VS (+AGVS)	4	6	8	9	487 (95.5%)	0	510
Transiciones a cobertura herbácea y SCD (+CHSD)	5	2	34	41	30	2 (1.8%)	109
Total		2294	485	408	581	2	3770 (90.5%)

*Valores entre paréntesis indican la precisión en porcentaje de unidades correctamente estimadas respecto a lo observado

Cuadro 20. Precisión de la estimación de transiciones ocurridas* a partir del modelo multinomial logístico para el período 1983 a 1994

Observado (Y_i) \ Estimado (Y_j)		+BOS (1)	+ARB (2)	+URB (3)	+AGVS (4)	+CHSD (5)	Total
Transiciones a cobertura boscosa (+BOS)	1	2182 (98.5%)	8	3	23	0	2216
Transiciones a cobertura arbustiva (+ARB)	2	50	396 (82.5%)	21	13	0	480
Transiciones a uso urbano (+URB)	3	8	41	409 (88.1%)	6	0	464
Transiciones a uso agrícola y VS (+AGVS)	4	26	8	7	477 (92.1%)	0	518
Transiciones a cobertura herbácea y SCD (+CHSD)	5	0	33	34	23	2 (2.2%)	92
Total		2266	486	474	542	2	3770 (91.9%)

*Valores entre paréntesis indican la precisión en porcentaje de unidades correctamente estimadas respecto a lo observado

4.3.1 Estabilidad en el tiempo de los parámetros estimados

En el Cuadro 21 se presentan los resultados obtenidos de la comparación de los tres modelos de transición de uso de la tierra estimados para los períodos 1958-1973, 1973-1983 y 1983-1994, por medio de una razón de verosimilitud, para la evaluación indirecta de la estabilidad temporal de los parámetros β_k obtenidos.

De acuerdo a los valores obtenidos en esta evaluación indirecta, existen diferencias significativas ($P < 0.01$) en los parámetros estimados entre cada par de instantes, por lo que la hipótesis nula de estabilidad en el tiempo de los modelos de transición elaborados debe ser rechazada.

Esto indica que al menos uno de los parámetros estimados es significativamente distinto al realizar comparaciones entre modelos de transición para los tres períodos, e indica que la influencia de los factores incluidos en la matriz de incidencia (x) sobre las transiciones de uso de la tierra o los estados identificados no puede considerarse constante en el tiempo.

Cuadro 21. Evaluación indirecta de la estabilidad en el tiempo de los parámetros β_k estimados en los modelos de transición de uso de la tierra

Modelos	Período	Log de la Función de Verosimilitud (LFV)	
A	1958 a 1973	-2998.01	
B	1973 a 1983	-1671.44	
C	1983 a 1994	-1489.80	

Comparación	Periodos	Razón de Verosimilitud (RV)*	$P(\chi^2_{gl=28})$
A vs B	(1958 a 1973) vs (1973 a 1983)	2653.13	< 0.01
B vs C	(1973 A 1983) vs (1983 a 1994)	363.29	< 0.01
A vs C	(1958 a 1973) vs (1983 a 1994)	3016.42	< 0.01

* Razón de verosimilitud = $RV = -2 \ln (LFV \text{ modelo } 2 / LFV \text{ modelo } 1)$

4.3.2 Efectos de la matriz de factores sobre los cambios de estado en el uso de la tierra estimados con los modelos de transición

En los Cuadros 22, 24 y 26 se presentan los parámetros estimados para las transiciones ocurridas entre 1958-1973, 1973-1983 y 1983-1994, respectivamente, y en los cuadros 23, 25 y 27 se presentan los efectos marginales ($EM = \partial F / \partial X$) obtenidos con base en dichos parámetros.

Es importante considerar que los parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud en los modelos multinomiales logísticos no ofrecen una interpretación directa respecto a su influencia sobre las probabilidades de transición⁴, por ello la discusión en torno a estos resultados se ha centrado específicamente en la estimación de los efectos marginales derivados de la influencia de cada uno de los factores considerados sobre las probabilidades de transición, es decir, con base en los valores reportados en los Cuadros 23, 25 y 27.

⁴ Los parámetros estimados se relacionan directamente a los logits (ver ecuaciones 24 a 27 en Materiales y Métodos), por lo que su efecto directo sobre las probabilidades se obtiene más bien de la interpretación de los efectos marginales ($\partial F / \partial X$)

Cuadro 22. Parámetros estimados en el modelo multinomial logístico para las transiciones ocurridas entre 1958 y 1973

Logit	Intercepto $\hat{\beta}_0$	PEND $\hat{\beta}_1$	ALT $\hat{\beta}_2$	PRECIP $\hat{\beta}_3$	US-58 $\hat{\beta}_4$	DISTACC $\hat{\beta}_5$	PARQUE $\hat{\beta}_6$	DRENA $\hat{\beta}_7$
$\ln(p_{+ARB}/p_{+BOS})$	6.8819 (0.6394) **	-0.0128 (0.0068) N.S.	-1.0989 (0.4421) **	-6.6972 (0.9540) **	-0.3561 (0.0359) **	-0.4952 (0.1781) **	-0.7189 (0.2534) **	3.2669 (0.8085) **
$\ln(p_{+URB}/p_{+BOS})$	1.6155 (1.9976) N.S.	-0.0817 (0.0139) **	-20.7672 (2.6315) **	7.8663 (3.2788) **	-0.6044 (0.052) **	-6.6809 (2.0060) **	-0.2048 (0.3558) N.S.	5.4564 (1.1389) **
$\ln(p_{+AGVS}/p_{+BOS})$	0.7439 (0.7451) N.S.	-0.0049 (0.0068) N.S.	1.1228 (0.2676) **	-0.9711 (0.6172) N.S.	-0.6816 (0.0304) **	-0.4807 (0.1043) **	1.2160 (0.6291) N.S.	4.0039 (0.7662) **
$\ln(p_{+CHSD}/p_{+B})$	5.8369 (0.9112) **	-0.0295 (0.0113) **	0.9566 (0.6198) N.S.	-3.8328 (1.3924) **	-0.6979 (0.0468) **	-1.3287 (0.3036) **	-2.2593 (0.3220) **	4.9097 (1.1022) **

(Error estándar); ** Significativo ($P \leq 0.05$); N.S. = No significativo ($P > 0.05$); $P |Z| > z$

Cuadro 23. Efectos Marginales (EM) con cambios en la matriz de incidencia para las transiciones ocurridas entre 1958 y 1973

Transición a:	$EM = \partial F / \partial X$							
	Intercepto	PEND	ALT	PRECIP	US-58	DISTACC	PARQUE	DRENA
+BOS $P(Y=1)$	-0.8474 (0.1103) **	0.0024 (0.0011) **	0.0332 (0.0563) N.S.	0.8041 (0.1231) **	0.1169 (0.0069) **	0.1253 (0.0223) **	0.0009 (0.0709) N.S.	-0.8148 (0.1362) **
+ARB $P(Y=2)$	0.7547 (0.0794) **	-0.0013 (0.0008) N.S.	-0.1533 (0.0499) **	-0.7385 (0.1049) **	-0.0248 (0.0042) **	-0.0418 (0.2037) **	-0.0959 (0.0297) **	0.2781 (0.0892) **
+URB $P(Y=3)$	3.4×10^{-7} (1.9×10^{-6}) N.S.	-7.1×10^{-8} (1.1×10^{-7}) N.S.	-1.9×10^{-5} (2.7×10^{-5}) N.S.	8.2×10^{-6} (1.2×10^{-5}) N.S.	-3.9×10^{-7} (5.9×10^{-7}) N.S.	-5.9×10^{-6} (7.6×10^{-6}) N.S.	-1.9×10^{-7} (4.9×10^{-7}) N.S.	3.9×10^{-6} (5.8×10^{-6}) N.S.
+AGVS $P(Y=4)$	-0.0703 (0.0858) N.S.	-0.0002 (0.0008) N.S.	0.1544 (0.0330) **	0.0286 (0.0743) N.S.	-0.0735 (0.0052) **	-0.0429 (0.0128) **	0.1749 (0.0682) **	0.4049 (0.0921) **
+CHSD $P(Y=5)$	0.1630 (0.0332) **	-0.0009 (0.0004) **	0.0322 (0.0206) N.S.	-0.0943 (0.0459) **	-0.0187 (0.0023) **	-0.0406 (0.0088) **	-0.0799 (0.0147) **	0.1318 (0.0376) **

(Error estándar); ** = Significativo ($P \leq 0.05$); N.S. = No significativo ($P > 0.05$); $P |Z| > z$

Cuadro 24. Parámetros estimados en el modelo multinomial logístico para las transiciones ocurridas entre 1973 y 1983

Logit	Intercepto $\hat{\beta}_0$	PEND $\hat{\beta}_1$	ALT $\hat{\beta}_2$	PRECIP $\hat{\beta}_3$	US-73 $\hat{\beta}_4$	DISTACC $\hat{\beta}_5$	PARQUE $\hat{\beta}_6$	DRENA $\hat{\beta}_7$
$\ln(p_{+ARB}/p_{+BOS})$	20.4565 (1.7671) **	-0.0062 (0.0084) N.S.	0.3448 (0.5340) N.S.	-11.7264 (1.3277) **	-2.3808 (0.1179) **	-0.1805 (0.1891) N.S.	-0.4648 (0.2976) N.S.	4.0059 (1.0537) **
$\ln(p_{+URB}/p_{+BOS})$	19.3315 (2.2959) **	-0.0433 (0.0171) **	-17.3973 (2.5468) **	-0.1270 (3.5003) N.S.	-3.4205 (0.1390) **	-6.7115 (2.1090) **	0.9512 (0.4351) **	2.6730 (1.5825) N.S.
$\ln(p_{+AGVS}/p_{+BOS})$	22.2842 (1.5053) **	0.0128 (0.0132) N.S.	4.1694 (0.6250) **	-15.6777 (1.6361) **	-3.6825 (0.1403) **	-0.2965 (0.2083) N.S.	2.8457 (0.7058) **	4.0008 (1.5110) **
$\ln(p_{+CHSD}/p_{+BOS})$	25.3777 (1.6050) **	0.0126 (0.0165) N.S.	3.9179 (0.8479) **	-16.2021 (2.0654) **	-3.4399 (0.1499) **	-0.9152 (0.3378) **	-1.4111 (0.4666) **	1.6833 (1.7554) N.S.

(Error estándar). ** Significativo ($P \leq 0.05$); N.S. = No significativo ($P > 0.05$); $P|Z| > z$

Cuadro 25. Efectos Marginales (EM) con cambios en la matriz de incidencia para las transiciones ocurridas entre 1973 y 1983

Transición a:	$EM = \partial F / \partial X$							
	Intercepto	PEND	ALT	PRECIP	US-73	DISTACC	PARQUE	DRENA
+BOS $P(\gamma=1)$	-5.1889 (0.2745) **	0.0008 (0.0020) N.S.	-0.2671 (0.1222) **	3.0980 (0.3298) **	0.6484 (0.0248) **	0.05878 (0.0429) N.S.	0.0130 (0.0754) N.S.	-0.9583 (0.2574) **
+ARB $P(\gamma=2)$	3.9359 (0.2677) **	-0.0019 (0.0019) N.S.	-0.1120 (0.1232) N.S.	-2.1335 (0.3011) **	-0.4139 (0.0264) **	-0.0218 (0.0436) N.S.	-0.0194 (0.0672) **	0.8281 (0.2261) **
+URB $P(\gamma=3)$	3.3×10^{-5} (4.9×10^{-5}) N.S.	-1.8×10^{-5} (2.7×10^{-5}) N.S.	-7.7×10^{-5} (0.0001) N.S.	2.9×10^{-5} (4.1×10^{-5}) N.S.	-8.4×10^{-6} (1.2×10^{-5}) N.S.	-2.8×10^{-5} (3.4×10^{-5}) N.S.	-4.2×10^{-6} (5.6×10^{-6}) N.S.	2.3×10^{-6} (6.4×10^{-6}) N.S.
+AGVS $P(\gamma=4)$	0.8295 (0.1435) **	0.0011 (0.0008) N.S.	0.2772 (0.0473) **	0.6794 (0.1121) **	-0.1733 (0.0212) **	-0.0128 (0.0133) N.S.	0.2231 (0.0432) **	0.1443 (0.0913) N.S.
+CHSD $P(\gamma=5)$	0.4235 (0.0826) **	9.1×10^{-5} (0.0004) N.S.	0.1020 (0.0272) **	-0.2851 (0.0661) **	-0.0612 (0.0108) **	-0.0241 (0.0092) **	-0.0425 (0.0153) **	-0.0141 (0.0452) N.S.

(Error estándar). ** = Significativo ($P \leq 0.05$); N.S. = No significativo ($P > 0.05$); $P|Z| > z$

Cuadro 26. Parámetros estimados en el modelo multinomial logístico para las transiciones ocurridas entre 1983 y 1994

Logit	Intercepto $\hat{\beta}_0$	PEND $\hat{\beta}_1$	ALT $\hat{\beta}_2$	PRECIP $\hat{\beta}_3$	US-83 $\hat{\beta}_4$	DISTACC $\hat{\beta}_5$	PARQUE $\hat{\beta}_6$	DRENA $\hat{\beta}_7$
$\ln(p_{+ARB}/p_{+BOS})$	23.9073 (1.2047) **	-0.0085 (0.0095) N.S.	0.2066 (0.5384) N.S.	-5.9245 (1.2244) **	-3.6634 (0.1573) **	-0.3541 (0.1893) N.S.	-0.2643 (0.3782) N.S.	1.7019 (1.1610) N.S.
$\ln(p_{+URB}/p_{+BOS})$	27.6859 (2.3485) **	-0.0489 (0.0176) **	-18.3760 (2.4182) **	2.7919 (3.4393) N.S.	-5.1038 (0.1867) **	-8.4572 (2.1465) **	0.9863 (0.4953) **	-0.9831 (1.7063) N.S.
$\ln(p_{+AGVS}/p_{+BOS})$	26.9042 (1.5567) **	-0.0027 (0.0139) N.S.	2.7556 (0.6898) **	-6.2852 (1.6269) **	-5.1743 (0.1834) **	-0.5836 (0.2378) **	1.7041 (0.6474) **	0.5649 (1.6356) N.S.
$\ln(p_{+CHSD}/p_{+BOS})$	28.1759 (1.7158) **	-0.0110 (0.0171) N.S.	2.7013 (0.8830) **	-6.3567 (2.0789) **	-4.7637 (0.1919) **	-1.0289 (0.3460) **	-2.3182 (0.5113) **	0.0241 (1.8059) N.S.

(Error estándar). ** Significativo ($P \leq 0.05$); N.S. = No significativo ($P > 0.05$); $P |Z| > z$

Cuadro 27. Efectos Marginales (EM) con cambios en la matriz de incidencia para las transiciones ocurridas entre 1983 y 1994

Transición a:	$EM = \partial F / \partial X$							
	Intercepto	PEND	ALT	PRECIP	US-83	DISTACC	PARQUE	DRENA
+BOS $P(\gamma=1)$	-3.2818 (0.2882) **	0.0010 (0.0012) N.S.	-0.1180 (0.0682) N.S.	0.7971 (0.1891) **	0.5343 (0.0420) **	0.0596 (0.0246) **	0.0055 (0.0503) N.S.	-0.1788 (0.1555) N.S.
+ARB $P(\gamma=2)$	1.8343 (0.2888) **	-0.0013 (0.0020) N.S.	-0.3356 (0.1137) **	-0.5179 (0.2567) **	-0.1577 (0.0425) **	0.0159 (0.0411) N.S.	-0.1408 (0.0730) N.S.	0.3453 (0.2122) N.S.
+URB $P(\gamma=3)$	1.3×10^{-5} (1.9×10^{-5}) N.S.	-8.2×10^{-8} (1.3×10^{-7}) N.S.	-3.7×10^{-5} (5.2×10^{-5}) N.S.	1.5×10^{-5} (2.2×10^{-5}) N.S.	-3.3×10^{-6} (4.8×10^{-6}) N.S.	-1.6×10^{-5} (1.9×10^{-5}) N.S.	1.9×10^{-6} (2.7×10^{-6}) N.S.	-4.1×10^{-6} (6.4×10^{-6}) N.S.
+AGVS $P(\gamma=4)$	0.9758 (0.1772) **	0.0006 (0.0016) N.S.	0.3269 (0.07817) **	-0.1963 (0.1722) N.S.	-0.2884 (0.0253) **	-0.0332 (0.0271) N.S.	0.2838 (0.6847) **	-0.0939 (0.1732) N.S.
+CHSD $P(\gamma=5)$	0.4717 (0.0913) **	-0.0003 (0.0009) N.S.	0.1268 (0.0468) **	-0.0829 (0.1053) N.S.	-0.0883 (0.0127) **	-0.0422 (0.0180) **	-0.1485 (0.0329) **	-0.0726 (0.0883) N.S.

(Error estándar); ** = Significativo ($P \leq 0.05$); N.S. = No significativo ($P > 0.05$); $P |Z| > z$

En los Anexos 8A, 9A y 10A se presenta el comportamiento de los valores de probabilidad con cambios en las variables explicativas consideradas, estimados a partir de los modelos de transición correspondientes a los períodos 1958-1973, 1973-1983 y 1983-1994, respectivamente.

En los modelos de transición elaborados, se observó que ciertos factores reportaron efectos marginales no significativos en alguno de los tres períodos, sugiriendo una influencia muy baja (o prácticamente nula) sobre las probabilidades de transición estudiadas, y es posible que esta no significancia esté determinada en buena medida por la tendencia general observada hacia la estabilidad del ecosistema en el tiempo, la cual se refleja particularmente hacia los dos últimos períodos considerados (1973-1983 y 1983-1994).

En un estudio similar realizado por Turner *et al* (1996), los resultados obtenidos indicaron también que muchas de las variables explicativas de tipo espacial pueden resultar no significativas al intentar explicar el cambio en el uso de la tierra, por lo que es posible también que otros factores con mayor influencia temporal que espacial puedan contribuir a explicar mejor este tipo de transiciones.

Seguidamente se discuten los aspectos fundamentales vinculados a estos efectos marginales y su relación con las probabilidades de transición para el área de estudio.

4.3.2.1 Efectos marginales sobre las transiciones a uso urbano

Contrario a lo esperado, en ninguno de los tres períodos analizados se encontraron relaciones significativas entre los efectos marginales de las variables explicativas consideradas en la matriz de incidencia (x) y las probabilidades de transición a uso urbano.

En líneas generales, se esperaba que los cambios a este tipo de usos estuvieran al menos regulados por las restricciones físicas que establece el medio, particularmente por el relieve de la zona, y por factores normativos como la ubicación dentro del Parque

Nacional y la distancia mínima a los cauces de ríos y quebradas. Sin embargo, la influencia de estos factores fue prácticamente nula, indicando que el crecimiento de estos centros poblados puede ocurrir en un amplio rango de condiciones que difícilmente pueden predecirse, o al menos así resultó con los factores que se han considerado en la presente investigación.

Lo anterior sugiere la existencia de un crecimiento urbano autónomo que no se encuentra regulado por factores físico-naturales o restricciones del medio, como por ejemplo la pendiente, ni por factores normativos como los que fueron considerados, o al menos el efecto de estos factores fue muy débil.

Esto se expresa en la no significancia general de los efectos marginales en todos los períodos analizados, por lo que estos efectos son reportados en los Cuadros 23, 25 y 27 con valores muy cercanos a cero (efectos marginales nulos), independientemente de que en la mayoría de los casos la dirección de su influencia correspondió con los signos esperados.

Los factores más importantes incluidos en la matriz de incidencia, vinculados a la vulnerabilidad del área por deslizamientos de tierra y movimientos de masa (pendiente y distancia a cauces de ríos y quebradas) no influyeron sobre la probabilidad de que, entre un par de instantes, ocurran transiciones hacia usos urbanos o de que estos persistan en el tiempo.

4.3.2.2 Efectos marginales sobre las transiciones a usos agrícolas y vegetación secundaria

Las probabilidades de transición a usos agrícolas y vegetación secundaria (estas últimas interpretadas como coberturas resultantes de la intervención con fines agrícolas y posterior abandono) se mostraron significativamente influenciadas por factores como la altitud y la condición de Parque Nacional o área protegida, en los tres períodos analizados.

La altitud (medida respecto al nivel medio del mar) influyó positivamente en la probabilidad de transición, coincidiendo con la dirección esperada de su efecto marginal, mientras que la condición de área protegida tuvo un efecto marginal con dirección opuesta a lo esperado.

Debido a que estas transiciones incluyen de manera agregada tanto las transiciones a usos agrícolas como los cambios a vegetación secundaria, y considerando que estos cambios han estado determinados mayormente por estos últimos, se puede inferir que esta tendencia en los efectos marginales explica fundamentalmente la recuperación del ecosistema en las partes medias a altas, producto de la influencia de las restricciones de uso que implica la figura legal del Parque Nacional.

En la Figura 12 se presenta el comportamiento de las probabilidades de transición con base en el efecto marginal de las dos variables explicativas que resultaron con mayor significancia sobre las transiciones hacia usos agrícola y vegetación secundaria.

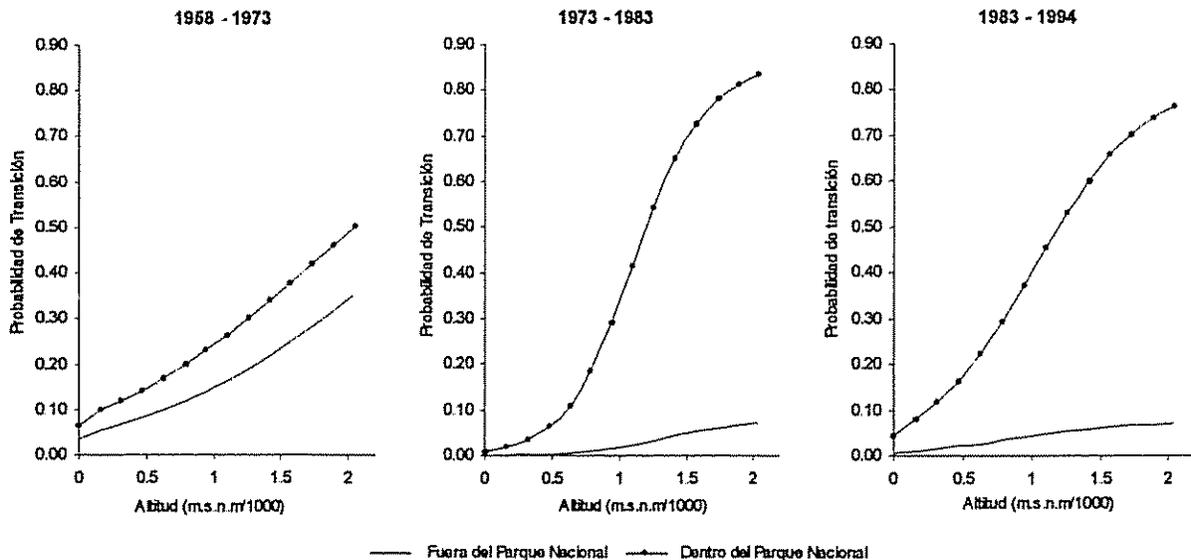


Figura 12: Influencia de los factores altitud y condición de área protegida (Parque Nacional) sobre las probabilidades de transición a uso agrícola y vegetación secundaria (p_{+AGVS}) en los tres periodos analizados.

La distancia a vías de acceso tuvo un efecto marginal significativo sobre las probabilidades de transición en el período 1958-1973, pero en los subsiguientes períodos perdió su significancia.

4.3.2.3 *Efectos marginales sobre las transiciones a cobertura boscosa y arbustiva*

En términos generales, y de acuerdo al comportamiento observado en los efectos marginales de los tres modelos de transición, los factores considerados en la matriz de incidencia (x) tienden a ejercer una influencia importante sobre los cambios o transiciones de tipo natural, como es el caso de las transiciones a cobertura boscosa y arbustiva, y su persistencia en el tiempo. Aunque algunos factores resultaron no significativos en sus efectos marginales, la mayoría de estos correspondieron con los signos o direcciones esperadas.

En el caso de las transiciones a cobertura boscosa, la condición de área protegida del Parque Nacional no mostró una influencia significativa en cuanto a su efecto sobre la probabilidad de cambios a este tipo de cobertura o su persistencia en el tiempo, lo cual puede estar relacionado con la relativa estabilidad general de esta clase de cobertura, incluso en las partes bajas del área de estudio, tal como se demuestra en las matrices de probabilidades markovianas de transición (Cuadros 14, 15 y 16).

Sin embargo, el cambio a cobertura boscosa y su persistencia en el tiempo se mostró sensible a las variaciones en la distribución espacial de la precipitación anual en el área (inferida con base en las isoyetas de precipitación normal anual), y este efecto se manifestó en la dirección esperada (+), es decir, la probabilidad de transición a cobertura boscosa incrementa a medida que el área recibe mayor lámina de precipitación anual, siendo esta influencia consistente para los tres períodos analizados, y su dirección (signo) se mantuvo en el tiempo, de acuerdo al signo esperado.

En la Figura 13 se muestra el comportamiento de las probabilidades de transición a cobertura boscosa con cambios en el régimen de precipitación anual y la condición de área protegida (Parque Nacional).

La influencia de la proximidad a vías de acceso sobre las transiciones a cobertura boscosa tuvo, sin embargo, un comportamiento no consistente en el tiempo, siendo significativo su efecto marginal en los periodos 1958-1973 y 1983-1994, pero no así en el período intermedio (1973-1983).

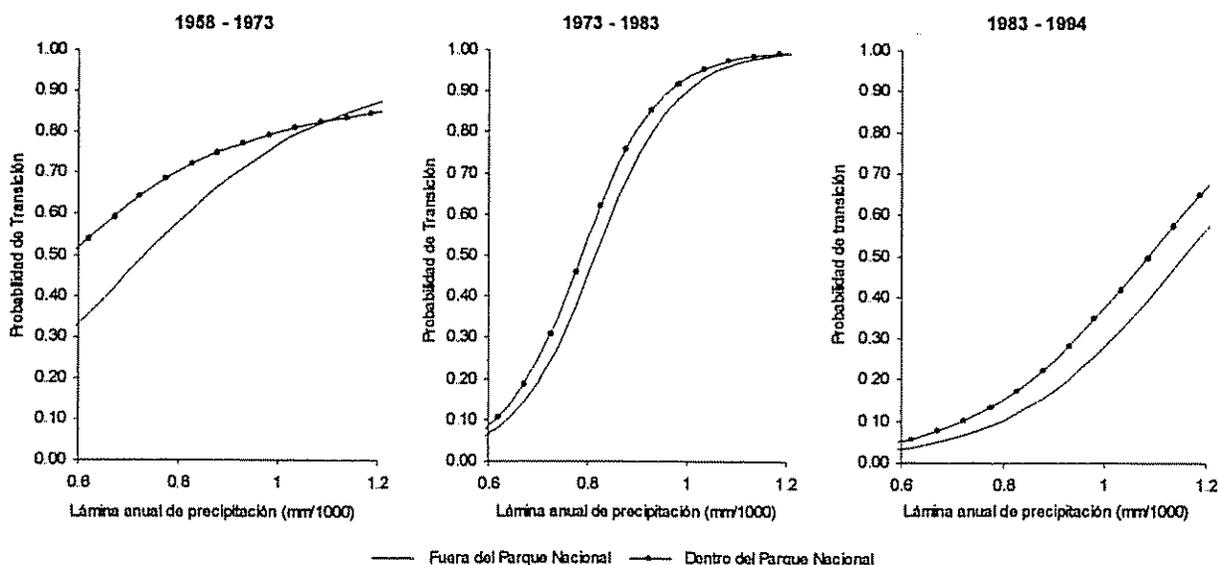


Figura 13: Influencia del régimen de precipitación anual y la condición de área protegida (Parque Nacional) sobre las probabilidades de transición a cobertura boscosa (p_{+BOS}) en los tres periodos analizados.

El efecto marginal del régimen de precipitación sobre las probabilidades de transición a cobertura arbustiva mostró un comportamiento inverso respecto al encontrado para las transiciones a cobertura boscosa.

En el caso de transiciones a cobertura arbustiva y su persistencia en el tiempo, la influencia del régimen de precipitación anual resultó con un efecto marginal negativo (Figura 14), lo cual se corresponde con la dirección de influencia esperada para este factor debido a que este tipo de cobertura vegetal se encuentra asociada fundamentalmente a las partes bajas y secas del área de estudio, y este efecto se mantuvo consistentemente en los tres periodos analizados.

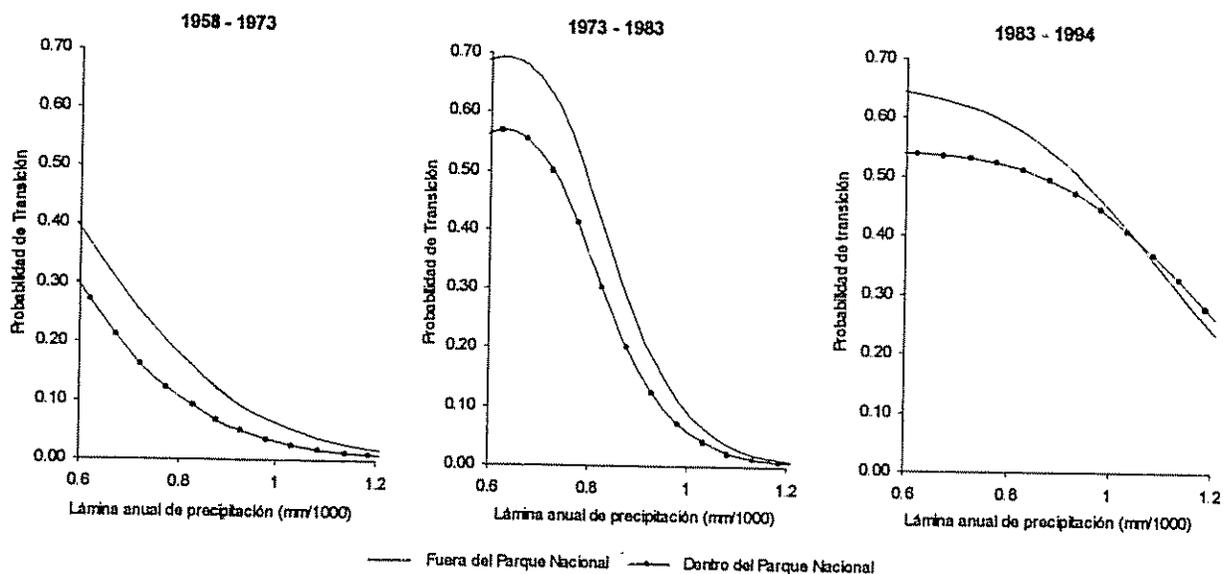


Figura 14: Influencia del régimen de precipitación anual y la condición de área protegida (Parque Nacional) sobre las probabilidades de transición a cobertura arbustiva (P_{ARB}) en los tres períodos analizados.

4.3.2.4 Efectos marginales sobre las transiciones a cobertura herbácea y suelos sin cobertura definida o escasa cobertura vegetal

A pesar de que estas clases de coberturas del suelo representan una muy baja proporción del área de estudio, limitando así la capacidad de predicción de su distribución espacial mediante los modelos de transición elaborados (ver Cuadros 18, 19 y 20), el análisis del efecto marginal de los factores que conforman la matriz de incidencia (x) demostró que las probabilidades de transición a estos tipos de coberturas se encuentran influenciadas significativamente y de manera consistente en los tres períodos analizados por los factores correspondientes a la proximidad a vías de acceso y la condición de área protegida del Parque Nacional El Avila, y esta influencia mantiene su dirección en el tiempo.

Esto sugiere que las transiciones hacia estas coberturas y su persistencia en el tiempo tiene relación con la influencia antropogénica y la intervención del espacio, si se toma en consideración que las probabilidades asociadas a estas incrementan significativamente

con la proximidad a vías de acceso. Además, la condición de área protegida contribuye significativamente a disminuir la probabilidad de las transiciones a estos tipos de coberturas en los tres periodos analizados, como se muestra en la Figura 15.

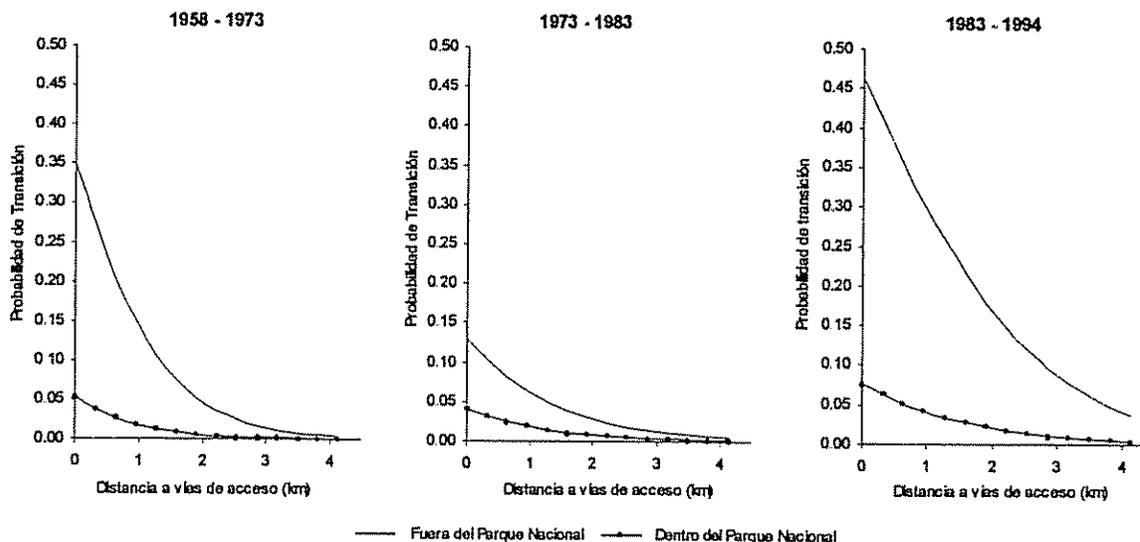


Figura 15: Influencia de la distancia a vías de acceso y la condición de área protegida (Parque Nacional) sobre las probabilidades de transición a cobertura herbácea y suelo con escasa cobertura vegetal ($p+CHSD$) en los tres periodos analizados.

Otro factor que influyó sobre las probabilidades de transición a cobertura herbácea y suelo con escasa cobertura fue el régimen de precipitación anual, el cual se expresó en la dirección esperada, indicando que estas probabilidades incrementan significativamente en la medida que la precipitación anual es menor, es decir, hacia las partes más secas de la cordillera. Sin embargo, este efecto no se mostró significativo para el período 1983-1994.

4.4 Implicaciones de los cambios en el uso de la tierra respecto al proceso de ocupación e intervención del área de estudio

Con base en los resultados obtenidos, se puede afirmar que el proceso de ocupación e intervención del espacio y las transiciones ocurridas en el ecosistema a través de los últimos 42 años dentro del área de estudio, han sido menos severos que lo hipotetizado.

Al menos en lo que respecta a las partes medias y altas de esta porción de la Cordillera de La Costa, más que la evolución hacia un estado de intervención indiscriminada de los recursos y exposición del suelo a la influencia adversa de las precipitaciones, puede decirse que la evolución de este ecosistema en el tiempo, incluyendo dentro de esta definición al hombre y sus formas de ocupación del espacio, venían siguiendo una tendencia marcada hacia la recuperación y estabilización antes del evento ocurrido en diciembre de 1999, si se le compara con la línea base utilizada (año 1958), la cual mostró un alto grado de intervención por la deforestación de áreas con fines agrícolas y la construcción de vías de penetración hacia las laderas ubicadas en las partes medias a altas, y que esta condición fue desapareciendo a través del tiempo.

Esta estabilidad general ha sido particularmente importante en el caso de la cobertura boscosa del área, que además de representar la mayor proporción en el área, ha experimentado muy pocas variaciones a lo largo del tiempo tanto en su superficie total como en la dinámica de transiciones que involucran a este tipo de cobertura.

Tal como se demuestra en los resultados obtenidos, la condición de área protegida derivada de la existencia del Parque Nacional El Avila ha sido uno de los factores más significativos en explicar este proceso de disminución del nivel de intervención en las cuencas medias y altas, así como el consiguiente mejoramiento del sistema y su estabilidad en el tiempo, si se toma en consideración la significancia de su efecto marginal en explicar las transiciones a vegetación secundaria y la disminución significativa de los usos agrícolas dentro de la zona.

Sin embargo, hacia las partes bajas de las cuencas hidrográficas incluidas dentro del área de estudio existe una dinámica totalmente distinta, que indica una influencia mucho mayor de la actividad humana a través de la ocupación del espacio, por lo que los cambios más importantes identificados en estas zonas se han centrado básicamente hacia la ocupación con fines urbanísticos.

A pesar de la importancia de este proceso de ocupación del espacio, en términos de frecuencia de ocurrencia en la muestra, uno de los aspectos más relevantes encontrados en esta investigación ha sido la inexistencia de efectos marginales significativos en

ninguno de los factores incluidos en la matriz de incidencia al intentar explicar las transiciones ocurridas en el tiempo para este tipo de usos.

Si se toma en consideración que los modelos elaborados permiten una adecuada precisión en la estimación general de las transiciones ocurridas en todos los períodos (a excepción de los cambios hacia cobertura herbácea y suelo con escasa cobertura vegetal), puede decirse que este comportamiento encontrado en las transiciones a usos urbanos difiere de las expectativas iniciales respecto a este tipo de transiciones.

De acuerdo a lo anterior, cualquier espacio disponible en las adyacencias de la frontera de crecimiento de estos centros poblados puede ser convertido en el futuro a usos urbanos, independientemente de cuan accesible este sea, de las características mismas del relieve en la que se encuentre y de su ubicación o no dentro del Parque Nacional.

Esto último es de gran importancia, si además se considera que la condición de área protegida facilita el libre acceso a los recursos, ya que en este caso los derechos de propiedad no están claramente definidos (es un bien de dominio público), constituyendo de esta manera un área susceptible a la ocupación por usos urbanos marginales sin planificación y en condiciones de alta vulnerabilidad, dadas las características del relieve.

Debe tomarse en cuenta también que la tendencia de crecimiento de la población para esta parte del país antes del evento de 1999 mostró un comportamiento lineal significativamente creciente, que de mantenerse en el futuro, implicará también un crecimiento en la demanda por el uso del espacio específicamente para fines urbanos, siendo estas zonas periféricas la opción inmediata de ocupación, en virtud de la saturación existente en las zonas planas del área de estudio.

4.5 Respuesta de áreas al evento de 1999

De acuerdo a los informes meteorológicos y los registros de precipitación sobre el evento de diciembre de 1999, las precipitaciones extremas constituyeron el factor causal o disparador del desastre natural ocurrido.

En virtud de su particular magnitud y persistencia, es posible que las anomalías atmosféricas que originaron los masivos deslizamientos de tierra en toda el área sean difícilmente replicables, pero de acuerdo a los antecedentes históricos revisados la recurrencia de este tipo de problemas en mayor o menor grado siempre estará presente, en vista de que las características fisiográficas de la Cordillera de La Costa facilitan su ocurrencia.

Debido a que el evento puede catalogarse como extremo, en términos de su magnitud e intensidad, las conclusiones derivadas del modelo de análisis de la respuesta de áreas al evento de diciembre de 1999 permiten una caracterización de lo que puede considerarse también como vulnerabilidad extrema, es decir, las probabilidades estimadas de ocurrencia en el espacio de los tipos de daños considerados se encuentran referidas a la respuesta de áreas a eventos de gran magnitud como el sucedido en diciembre de 1999.

En los Anexos 11A al 15A se presentan ejemplos de los tipos de daños característicos de los movimientos de masa ocurridos en diciembre de 1999, en algunos segmentos de la imagen IKONOS-2 utilizada para la investigación.

El modelo elaborado para el análisis de la respuesta de áreas al evento de diciembre de 1999 resultó significativo ($P < 0.01$), lo cual indica que las variables consideradas explican razonablemente los valores probabilísticos asociados al tipo de daño ocurrido en el área de estudio por este evento.

Las interacciones de segundo orden resultaron no significativas en el modelo, a excepción de las interacciones entre el régimen de precipitación normal del área (inferida a partir de las isoyetas) y los factores altitud, distancia a cauces de ríos y quebradas, y la pendiente.

Debido a que la variable correspondiente a distribución de precipitaciones fue utilizada como una aproximación a lo que pudo haber sido la distribución espacial de las lluvias extremas en diciembre de 1999, estas interacciones no fueron consideradas importantes, y por ello en esta parte se presentan los resultados obtenidos solo para el modelo de efectos principales.

En el Cuadro 28 se presentan los valores de los parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud, y en el Cuadro 29 se muestran los efectos marginales de las variables incluidas en el modelo sobre los valores de probabilidad p_c .

Cuadro 28. Parámetros estimados para la evaluación de la respuesta de áreas al evento de diciembre de 1999

Logit	Intercepto $\hat{\beta}_0$	ALT $\hat{\beta}_1$	DRENA $\hat{\beta}_2$	PEND $\hat{\beta}_3$	US-94 $\hat{\beta}_4$	LITO $\hat{\beta}_5$	PRECIP $\hat{\beta}_6$
$\ln(p_{\text{DESLIZ}}/p_{\text{NO DAÑO}})$	0.0663 (0.4281) N.S.	-0.1624 (0.2339) N.S.	-2.9211 (0.7584) **	0.0281 (0.0063) **	-0.0428 (0.0308) N.S.	0.0114 (0.0535) N.S.	-2.7221 (0.6682) **
$\ln(p_{\text{FSED}}/p_{\text{NO DAÑO}})$	-4.6794 (1.9260) **	-9.6892 (1.9835) **	-2.0209 (1.1754) **	-0.0911 (0.0168) **	0.0024 (0.0675) N.S.	-0.1768 (0.1480) N.S.	8.5489 (3.2638) **
$\ln(p_{\text{FROCAS}}/p_{\text{NO DAÑO}})$	-2.9573 (2.8642) N.S.	-4.4031 (2.7646) N.S.	-12.0903 (3.0016) **	-0.0551 (0.0238) **	0.0329 (0.0880) N.S.	-1.7379 (0.3351) **	8.2452 (4.7733) N.S.

(Error estándar). ** Significativo ($P \leq 0.05$); N.S. = No significativo ($P > 0.05$); $P |Z| > z$

Cuadro 29. Efectos marginales (EM) con cambios en la matriz de variables explicativas, en el modelo de respuesta de áreas al evento de diciembre de 1999.

Tipo de daño:	$EM = \partial F / \partial X$						
	Intercepto	ALT	DRENA	PEND	US-94	LITO	PRECIP
NO DAÑO $P(Y=1)$	-0.0023 (0.0507) N.S.	0.0299 (0.0279) N.S.	0.3519 (0.0889) **	-0.0032 (0.0007) **	0.0050 (0.0036) N.S.	-0.0005 (0.0064) N.S.	0.3102 (0.0778) **
DESLIZ $P(Y=2)$	0.0087 (0.0506) N.S.	-0.0175 (0.0277) N.S.	-0.3446 (0.0888) **	0.0033 (0.0007) **	-0.0051 (0.0036) N.S.	0.0015 (0.0063) N.S.	-0.3239 (0.0777) **
FSED $P(Y=3)$	-0.0051 (0.0029) N.S.	-0.0104 (0.0042) **	-0.0017 (0.0015) N.S.	-0.0001 (0.00006) N.S.	0.000009 (0.00007) N.S.	-0.0002 (0.0002) N.S.	0.0096 (0.0053) N.S.
FROCAS $P(Y=4)$	-0.0014 (0.0015) N.S.	-0.0021 (0.0012) N.S.	-0.0056 (0.0040) N.S.	-0.00003 (0.000025) N.S.	0.00002 (0.00004) N.S.	-0.0008 (0.0006) N.S.	0.0041 (0.0031) N.S.

(Error estándar); ** = Significativo ($P \leq 0.05$); N.S. = No significativo ($P > 0.05$); $P |Z| > z$

Algunas de las variables explicativas resultaron no significativas en cuanto a su efecto marginal sobre las probabilidades, independientemente del tipo de daño al que se haga

referencia. En este sentido, se observó que la contribución del tipo de unidad geológica y el uso previo de la tierra no muestran relación alguna con la probabilidad de ocurrencia en ninguno de los tipos de daños considerados.

Por otra parte, los daños provocados por flujo de sedimentos y materiales gruesos son pobremente explicados en el modelo, lo cual se evidencia en el Cuadro 29 por los valores cercanos a cero en la mayoría de los efectos marginales obtenidos, aunque la contribución marginal de la altitud sobre la probabilidad de ocurrencia de daños por flujo de sedimentos resultó significativa, pero este efecto es también prácticamente nulo.

Es importante considerar que el modelo elaborado no toma en cuenta la movilidad y dinámica espacial de los movimientos de masa, y esto es particularmente importante para el caso de los daños ocasionados por flujos de sedimentos y materiales gruesos (rocas), ya que en este caso las áreas afectadas se constituyen en una especie de receptores de los desprendimientos de suelo y cobertura vegetal ocurridos en las laderas, de manera que se establece en este caso una relación causa:efecto difícilmente capturable en un modelo de análisis espacial.

Esto hace que la interpretación de los efectos marginales de los diferentes factores analizados sea algo confusa, y no permite obtener conclusiones sólidas sobre la participación de las variables consideradas en cuanto a su explicación sobre las probabilidades de ocurrencia en el espacio de estos dos tipos de daños observados, expresándose además en una no significancia general de las variables explicativas incluidas en el modelo, por lo cual los resultados referidos a estas dos categorías deben ser interpretados cuidadosamente.

Así por ejemplo, el análisis de la contribución marginal del tipo de unidad litológica y del uso o cobertura de la tierra sobre la probabilidad de ocurrencia de estos dos tipos de daños en el espacio no parece tener una lógica clara.

Por ello, el mayor valor del modelo elaborado en cuanto a su aporte en la explicación de la respuesta observada, se basa en las estimaciones probabilísticas correspondientes a las categorías "sin daño aparente" y "daños por deslizamientos", ya que estos constituyen

esencialmente la expresión en el espacio de la resistencia del ecosistema y de la susceptibilidad a ceder ante eventos extraordinarios como el ocurrido, respectivamente.

Por esta razón, la discusión abordada en esta parte se basa específicamente en estas dos categorías de respuesta del modelo elaborado, ya que son las que presentan una mayor consistencia en términos de la interpretación de sus efectos marginales.

Al examinar la contribución de un conjunto de factores de tipo espacial sobre la respuesta de áreas al evento de diciembre de 1999, uno de los aspectos más resaltantes encontrado fue la no significancia del tipo de uso de la tierra en explicar la probabilidad que un área determinada no sea afectada por movimientos de masa y de la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos de suelo y cobertura vegetal.

Esto indica que la respuesta de las áreas a este evento no puede considerarse diferenciable en términos del tipo de uso o de la cobertura que soportan, lo cual posiblemente esté relacionado a la relativa abundancia de dos tipos principales de usos de la tierra dentro del área de estudio, específicamente la cobertura boscosa y arbustiva, las cuales no mostraron un determinado patrón de respuesta al evento ocurrido.

Este mismo comportamiento se observó para la altitud y las unidades geológicas identificadas por Urbani *et al* (2000), en cuanto a la ausencia de significancia en sus efectos marginales sobre la probabilidad de que un área determinada no sea afectada o que ocurran deslizamientos de tierra.

En términos de sus implicaciones sobre la vulnerabilidad extrema del área, los factores con mayor relevancia identificados fueron la pendiente o inclinación del terreno y la distancia a cauces de ríos y quebradas, lo cual de alguna manera refuerza el planteamiento de que el relieve de la zona es quizás el aspecto más importante en determinar la susceptibilidad a desastres naturales dentro del área de estudio ante eventos extremos como el ocurrido en diciembre de 1999.

Los resultados indican una alta significancia ($P < 0.05$) en el efecto marginal de la pendiente y la distancia al cauce principal de ríos y quebradas en relación a la

probabilidad de que una determinada área no muestre evidencias de daño, siendo mayor la magnitud de la contribución marginal de este último factor; y las direcciones de estos efectos marginales se invierten para el caso de la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos de tierra (Figura 16).

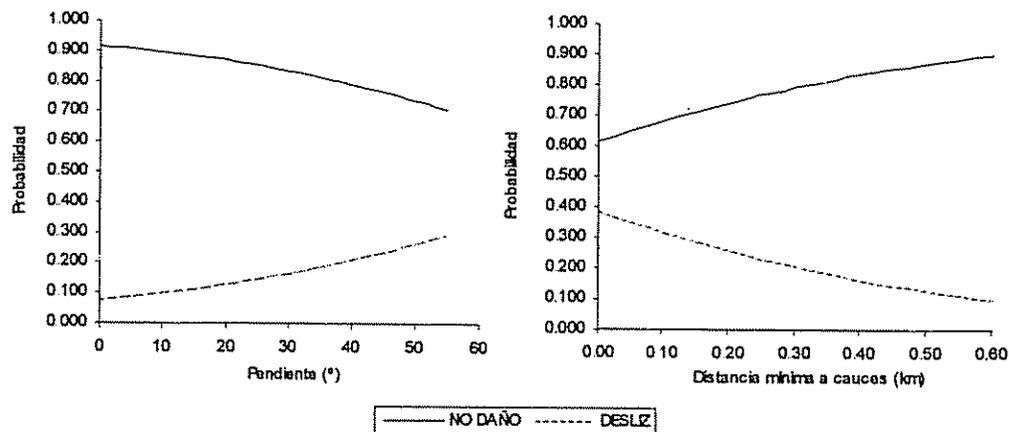


Figura 16: Influencia de la pendiente y la distancia a cauces de ríos y quebradas sobre las probabilidades de (i) deslizamientos de tierra en laderas (DESLIZ), y (ii) sin daños aparentes (NO DAÑO).

De acuerdo a ello, y para un evento como el ocurrido en diciembre de 1999, la respuesta en términos de probabilidades de que un área no resulte afectada por alguno de los tipos de daños considerados se relaciona directamente con la distancia a la que esta se encuentre de un cauce de río o quebrada, e inversamente a la pendiente (Figura 16).

4.6 Caracterización de la periodicidad de eventos extremos de precipitación

En la Figura 17 se presentan las series de eventos extremos (P_{MAX_t}) obtenidas para las tres estaciones analizadas, y en la Figura 18 se muestran los periodogramas obtenidos mediante el PROC SPECTRA del programa estadístico SAS (SAS Institute Inc., 1989).

Los eventos de precipitación máxima (P_{MAX_t}) para las series disponibles no muestran una periodicidad o patrón cíclico claramente diferenciable. De hecho, en las series de precipitación máxima para las tres estaciones analizadas los datos representaron ruido blanco, de acuerdo con el criterio de prueba utilizado (Bartlett's Smirnov-Kolmogorov) para un nivel P de 0.05, como se muestra en el Cuadro 30.

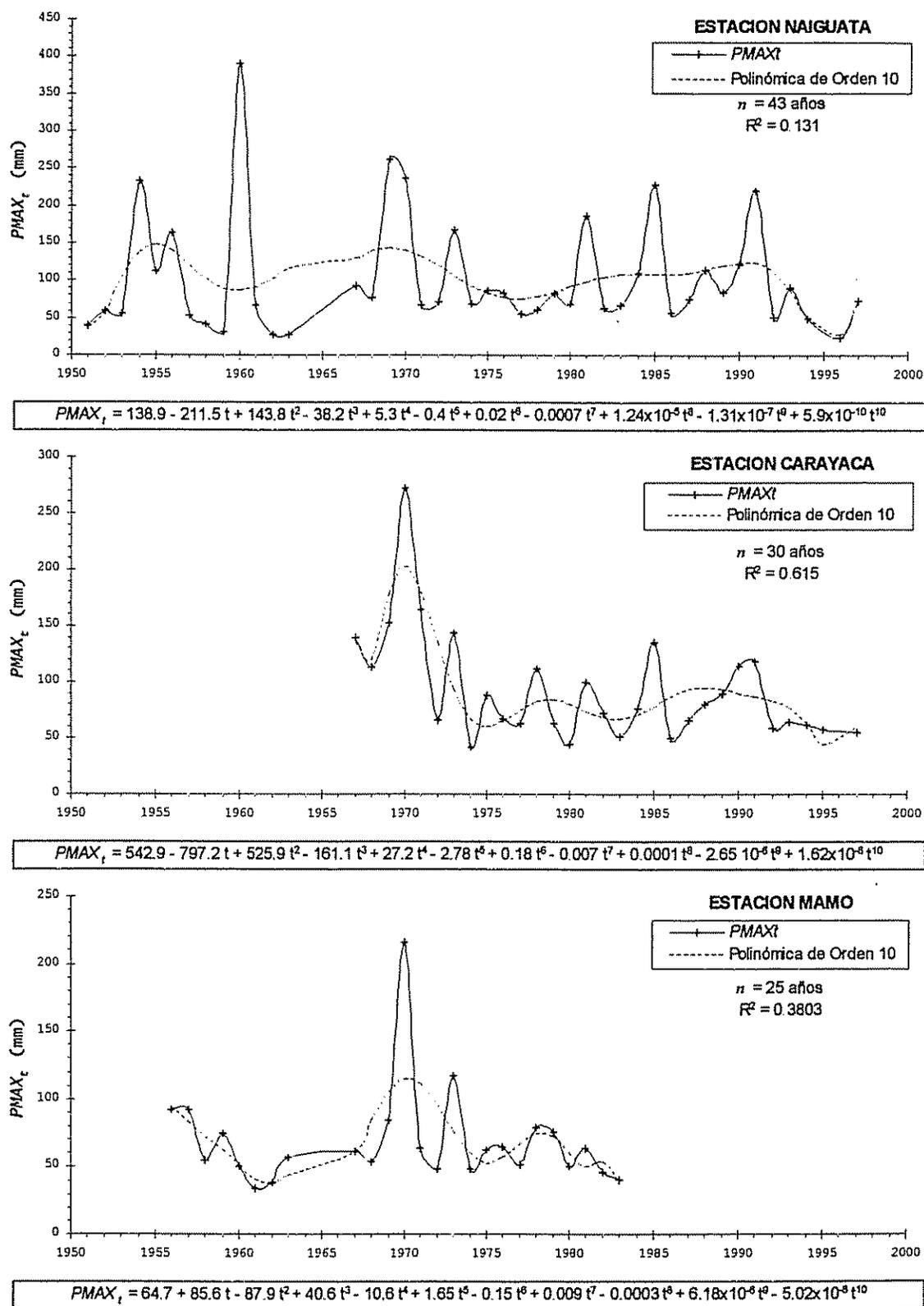


Figura 17: Series de eventos extremos de precipitación (P_{MAX_t}) en tres estaciones meteorológicas ubicadas en la Cordillera de La Costa (litoral central).

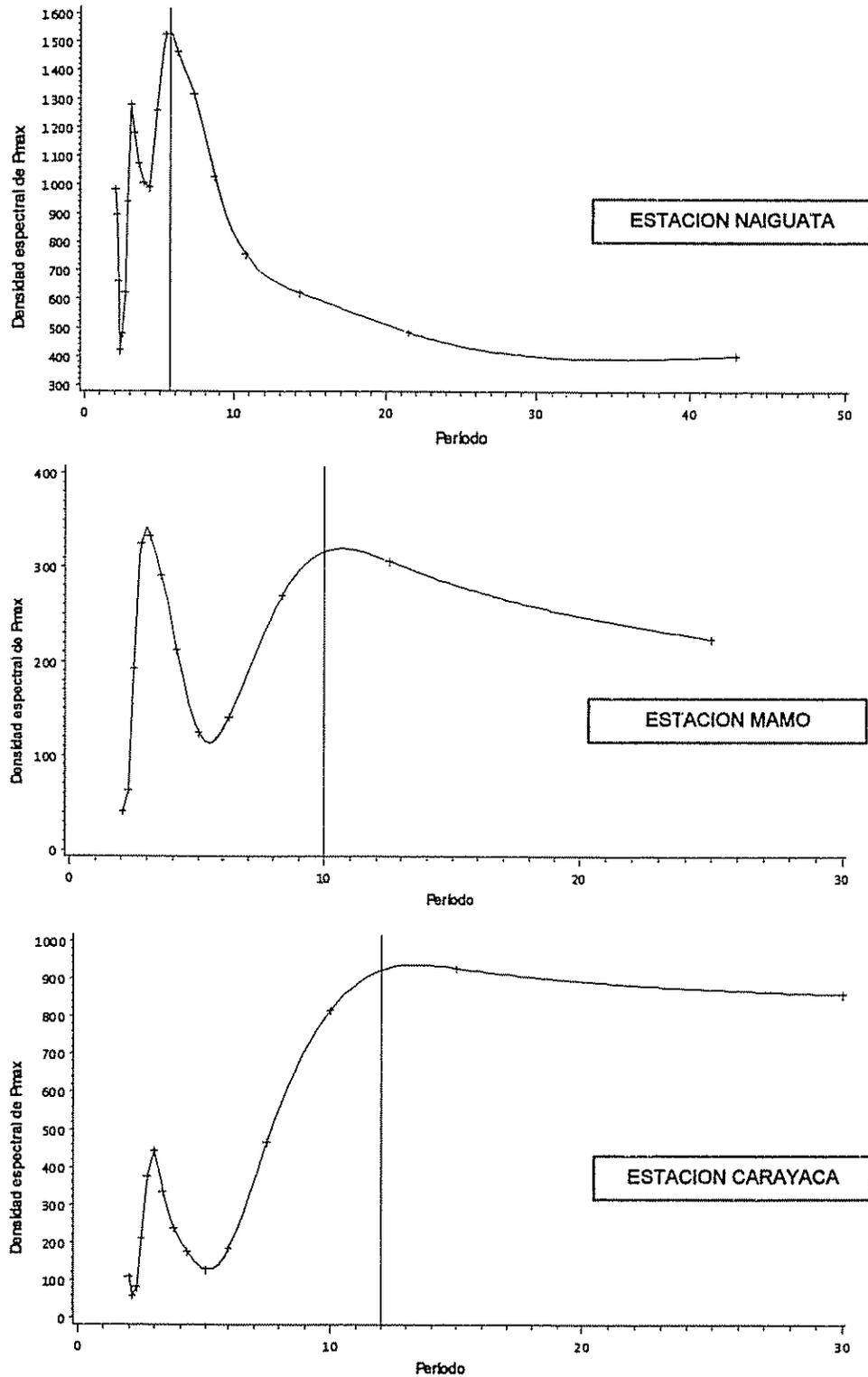


Figura 18: Periodogramas de eventos extremos (P_{MAX}) en tres estaciones meteorológicas ubicadas en la Cordillera de La Costa (litoral central).

Cuadro 30. Resultados de la prueba Bartlett's Kolmogorov Smirnov (B-K-S) para evaluar si las series de eventos extremos de precipitación $PMAX_t$ representan ruido blanco (*white noise*).

Estación	Serie $PMAX_t$	n	m^*	Estadístico B-K-S obtenido	Valor crítico de (B-K-S) $s\sqrt{1/(m-1)}$ **	Ruido Blanco	Periodicidad
Naiguatá	1959-1983	43	21	0.1507	0.3041	SI	NO
Mamo	1954-1996	25	12	0.1905	0.4105	SI	NO
Carayaca	1967-1996	30	15	0.3754	0.3772	SI	NO

* $m = n/2$ si n es par, $m=(n-1)/2$ si n es impar

** con $\alpha = 1.36$ para $P = 0.05$

De acuerdo a los periodogramas obtenidos para las series crudas de $PMAX_t$ (Figura 18), los datos correspondientes a la estación Naiguatá muestran una tendencia débil hacia la recurrencia de eventos extremos con una periodicidad de seis años. Sin embargo, esta tendencia no es definitiva.

En las otras estaciones analizadas (Carayaca y Mamo) la respuesta fue aún más variable, por lo que resulta difícil discernir algún patrón claro.

En la Figura 17 se muestra una estimación de la tendencia de estas series de eventos extremos de precipitación con base en una ecuación polinómica de orden 10. Como puede observarse, el ajuste de estos modelos es muy débil debido a la gran variabilidad en el patrón de ocurrencia de estos eventos.

Las series de primeras diferencias ($PMAX_{(t)} - PMAX_{(t-1)}$) y sus correspondientes valores de autocorrelación (Figuras 19, 20 y 21) confirman la existencia de un pseudo-período de 6 años en la estación Naiguatá obtenida por medio de análisis espectral, y detecta un pseudo-período de 3 años en la Estación Mamo, pero igualmente estos patrones son relativamente débiles como para aceptar definitivamente la hipótesis de periodicidad en las series de eventos extremos de precipitación.

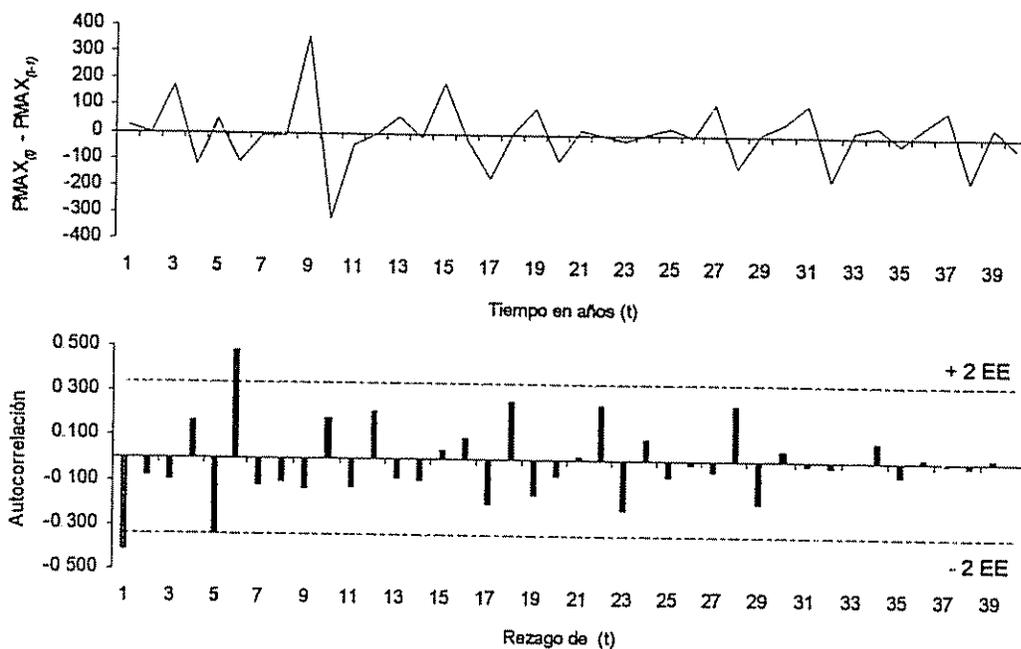


Figura 19: Primeras diferencias ($PMAX_{(t)} - PMAX_{(t-1)}$) de la serie de eventos extremos de precipitación y gráfico de autocorrelación (correlograma) para datos de la Estación Naiguatá. EE=Error estándar.

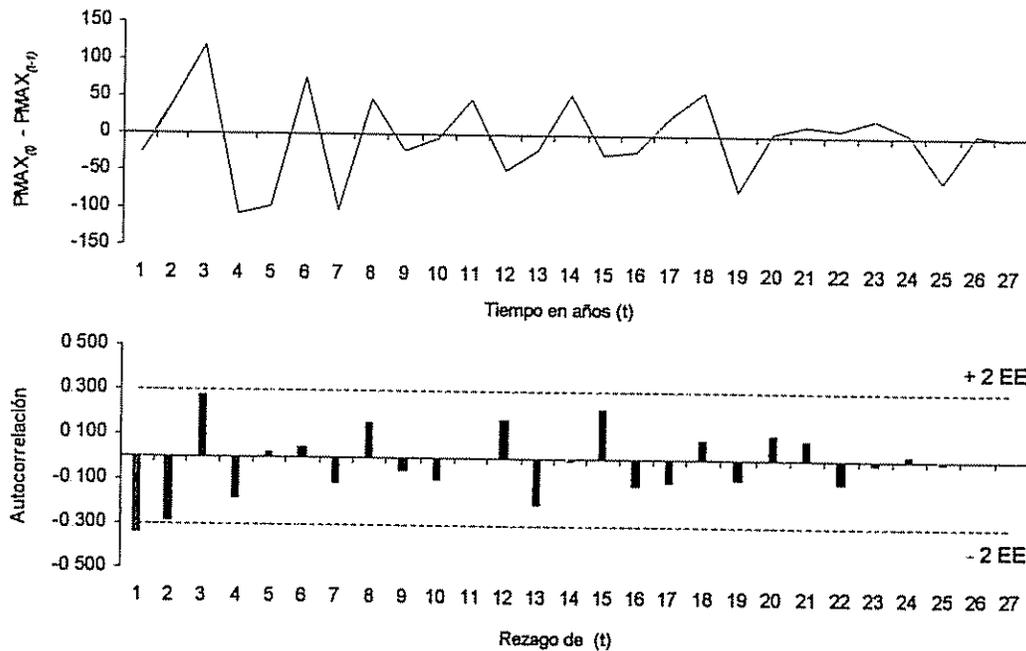


Figura 20: Primeras diferencias ($PMAX_{(t)} - PMAX_{(t-1)}$) de la serie de eventos extremos de precipitación y gráfico de autocorrelación (correlograma) para datos de la Estación Carayaca. EE=Error estándar.

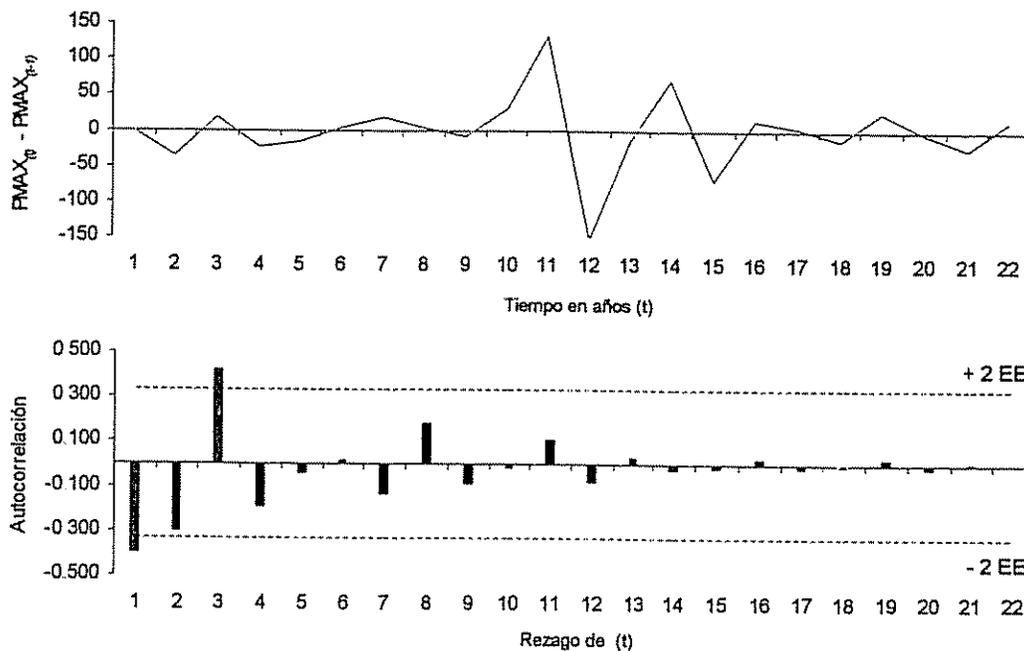


Figura 21: Primeras diferencias ($PMAX_{(t)} - PMAX_{(t-1)}$) de la serie de eventos extremos de precipitación y gráfico de autocorrelación (correlograma) para datos de la Estación Mamo. EE=Error estándar.

Además, los valores de autocorrelación en la serie de primeras diferencias ($PMAX_{(t)} - PMAX_{(t-1)}$) indica que el comportamiento típico de los eventos extremos en un año determinado tienden a ser opuestos para el siguiente, es decir, normalmente un pico de máxima precipitación tiende a estar precedido de un valor más bajo.

Es posible que esta ausencia de un patrón cíclico claramente diferenciable se deban al limitado número de observaciones en las series disponibles, ya que normalmente, y de acuerdo a la literatura revisada, los eventos extremos capaces de generar fenómenos de deslizamientos de masa para el área de estudio poseen períodos de retorno mucho más largos.

Por otra parte, debido a que los eventos extremos como el de diciembre de 1999 son normalmente producidos por anomalías atmosféricas de mayor escala, es posible que no estén siendo adecuadamente representadas por las series disponibles. Esto permite concluir que no existe un patrón claro de recurrencia en los eventos extremos de precipitación, de manera que los mismos resultan difícilmente predecibles.

5 CONCLUSIONES

5.1 Generales

- La utilización de fotografías aéreas, dentro del contexto metodológico y propósito perseguido en la presente investigación, constituyen una fuente importante de información, particularmente si se requiere cubrir períodos de tiempo que van más allá de la cobertura satelital. Sin embargo, este medio implica un gran consumo de tiempo y el trabajo es relativamente arduo.
- La distorsión característica de la información derivada de este tipo de sensor remoto disminuye la precisión, particularmente cuando el relieve es muy escarpado, por lo que el RMS puede ser muy grande.
- La ventaja más importante de la utilización de fotografías aéreas en este tipo de aplicaciones es su resolución, y esto es particularmente útil cuando se requiere un mayor nivel de detalle y las áreas bajo estudio son relativamente pequeñas en términos de su superficie.

5.2 Específicas

- La intervención de las cuencas medias y altas ubicadas dentro del área de estudio ha sido menos intensa que lo hipotetizado, aunque esto no implica que no exista.
- Dentro del período analizado, este ecosistema ha venido mostrando una tendencia general hacia la recuperación y el equilibrio, observándose una importante disminución de los usos agrícolas y áreas deforestadas en las laderas, de manera que en estas partes medias a altas de las cuencas estudiadas no es posible hablar de intervención indiscriminada o degradación de recursos como factor causal de los movimientos de masa ocurridos en diciembre de 1999.

- La contribución del Parque Nacional, como figura legal, quedó demostrada en términos de su aporte en el direccionamiento de las transiciones en el uso de la tierra relacionadas con este tipo de intervención en las partes medias y altas de las cuencas.
- Los factores directrices causales del cambio en el uso de la tierra demostraron tener, en términos generales, un adecuado poder explicativo en cuanto a las transiciones del uso de la tierra ocurridas en el período de 42 años analizado. Sin embargo, su influencia no ha sido constante en el tiempo, lo cual puede estar demostrando que existen factores adicionales que podrían explicar mejor el conjunto de transiciones analizadas, los cuales no fueron considerados en los modelos elaborados (como crecimiento de la población, nivel de desempleo, cambios en políticas, cambios en el valor de la tierra, nivel de desempleo, y nivel de actividad económica local).
- En las partes bajas de las cuencas estudiadas, la dinámica de ocupación con fines urbanos es uno de los aspectos más relevantes encontrados en el conjunto de transiciones analizadas, y las mismas no parecen estar reguladas por restricciones físicas del medio ni factores normativos, o al menos la relación existente es muy débil, de manera que cualquier área localizada en la frontera de crecimiento de estas zonas urbanas puede ser potencialmente utilizada con estos fines, independientemente de las características vulnerables de esta zona.

5.2.1 El evento de diciembre de 1999

- La respuesta de las áreas analizadas al evento de diciembre de 1999 resultó débilmente relacionada al uso o cobertura previo de la tierra, sugiriendo que cualquier uso o cobertura puede ceder igualmente ante eventos extremos como el ocurrido, por lo que esta respuesta es difícilmente diferenciable. Sin embargo, es posible que la cobertura boscosa haya funcionado más bien como un amortiguador del impacto directo de las lluvias extremas y que si esta no estuviera presente la magnitud del

desastre hubiera sido mucho mayor, pero no se dispone de referencias o áreas testigo que permitan concluir satisfactoriamente al respecto.

- Las contribuciones más significativas sobre la probabilidad de que un área determinada no muestre condiciones de colapso por movimientos de masa o que sea afectada por deslizamientos de tierra, para un evento como el de 1999, están estrechamente relacionadas a las características del relieve (específicamente la pendiente) y la distancia a la que esta área se encuentre de un cauce de río o quebrada.
- Dentro de períodos relativamente cortos (30 a 40 años) la distribución anual de eventos extremos de precipitación para el área de estudio no muestra un patrón de comportamiento cíclico o periódico, de manera que no es posible la estimación de la ocurrencia de este tipo de eventos con base en su comportamiento histórico.

6 RECOMENDACIONES

6.1 Generales

- Se requiere avanzar aún más para lograr modelos que permitan integrar el efecto de factores espaciales y de factores que inciden a través del tiempo (como cambios en políticas, cambios en precios, nivel de desempleo, etc.)
- Otro aspecto importante a abordar con estas metodologías en futuros estudios es la integración de los procesos de cambio como un proceso continuo en el tiempo partiendo de una línea base, y no como instantes discretos. Los procesos estocásticos y el uso de cadenas no estacionarias de Markov parecieran ser una alternativa para ello.

6.2 Específicas

- El proceso de reconstrucción de las áreas afectadas no debe limitarse al diseño de obras de ingeniería para mitigar el impacto de eventos similares al de 1999 en las partes bajas de las cuencas. Es necesario también considerar este como un problema social que implica la implementación de medidas efectivas para evitar que las zonas periféricas de estos centros poblados continúen siendo ocupadas y avanzando hacia el Parque Nacional El Avila, o en las proximidades de ríos y quebradas.
- Dado que los antecedentes demuestran que eventos incluso menores pueden desencadenar fenómenos de movimientos de masa, y en virtud de la inexistencia de patrones de comportamiento predecibles, la organización comunal e institucional para la prevención de desastres y la implementación de sistemas de alerta temprana constituyen una necesidad que debe ser atendida.

7 BIBLIOGRAFIA

- Agresti, A. 1990. *Categorical data analysis*. Jhon Wiley & Sons, Inc., New York. 558 p.
- Briassoulis, H. 2000. *Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches*. [En línea]. Department of Geography. University of the Aegean. Lesvos, Greece. [Consultado Noviembre de 2000]. Disponible en: <http://www.rii.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm>.
- Bertorelli, G. 1987. A diez años del alud torrencial ocurrido en El Limón, Maracay, Estado Aragua. [En línea]. Coloquio presentado en Maraven, S.A. (Filial de Petróleos de Venezuela, S.A.). Septiembre de 1997. [Consultado enero de 2000]. Disponible en: <http://www.geocities.com/rainforest/vines/7195/index.html>
- Bockstael, N. 1996. Modeling Economics and Ecology: The importance of a spatial perspective. *American Journal of Agricultural Economics*. 78:1168-1180.
- Box, G. E. P.; Jenkins, G. M. 1976. *Time series analysis: forecasting and control*. Revised Edition. Holden-Day, Inc. Oakland. California. 575 p.
- Callaway, R. M.; Davis, F. W. 1993. Vegetation dynamics, fire, and the physical environment in Coastal Central California. *Ecology*. 74(5): 1567-1578.
- Corporación Andina de Fomento (CAF); Programa de Las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). 2000. Efectos de las lluvias caídas en Venezuela en diciembre de 1999. CDB Publicaciones. Caracas, Venezuela. 224 p.
- ERDAS. 1997. *Erdas Field® Guide™*. Fourth Edition Erdas, Inc. USA. 656 p.
- Environmental Systems Research Institute, Inc (ESRI). 1996. *Using ArcView GIS*. ESRI, Inc. 340 p.

- Feller, W. 1964. An introduction to probability theory and its applications. Volume I. Second Edition. Wiley. New York. 461 p.
- García, L. F.; Perdomo, E. 2000. Situación meteorológica generadora de las inundaciones y flujo de lodo en el nor-centro de Venezuela, con especial énfasis en la Costa Norte (16 de diciembre de 1999). CVG-EDELCA, ARMADA, CONICIT, FONAIAP, MARN, SEMETFAV, UCV Y VENEHMET. Caracas, Venezuela. Mayo del 2000.
- Greene, W. H. 1998. LIMDEP. Versión 7.0. User's Manual. Revised Edition. Econometric Software, Inc. New York.
- Kapur, J.N.; Saxena, H.C. 1969. Mathematical statistics. Fifth Edition. S. Chand & Co. Delhi. 472 p.
- Kendall, M. Time-series. Second Edition. Charles Griffin & Co Ltd. Great Britain. 197 p.
- Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales (MARN). 1996. Memoria descriptiva del mapa de vegetación del Parque Nacional El Avila, Distrito Federal y Estado Miranda. Escala 1:100.000. Caracas, Venezuela. Abril de 1996.
- _____. 1999. Análisis de la precipitación extrema del mes de diciembre de 1999 en la Región Norte Costera de Venezuela. Dirección de Hidrología y Meteorología. Caracas, Venezuela.
- _____. 2000. Informe de la Comisión para la evaluación y tratamiento integral de las cuencas torrenciales en el Estado Vargas. Dirección de Cuencas Hidrográficas. Caracas, Venezuela.
- Muller, M. R.; Middleton, J. 1994. A Markov model of land-use change dynamics in the Niagara Region, Ontario, Canada. *Landscape Ecology*. 9(2): 152-157.

Nelson, G. C. 1999. Spatial econometrics analysis and project evaluation: Modeling Land Use Change in the Darién. Report to the Inter-American Development Bank. Washington D.C.

OFICINA CENTRAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA (OCEI). 1941. VII Censo general de población y vivienda. Año 1940. Distrito Federal. Presidencia de la República de Venezuela.

_____. 1951. VIII Censo general de población y vivienda. Año 1950. Distrito Federal. Presidencia de la República de Venezuela.

_____. 1961. IX Censo general de población y vivienda. Año 1960. Distrito Federal. Presidencia de la República de Venezuela.

_____. 1971. X Censo general de población y vivienda. Año 1970. Distrito Federal. Presidencia de la República de Venezuela.

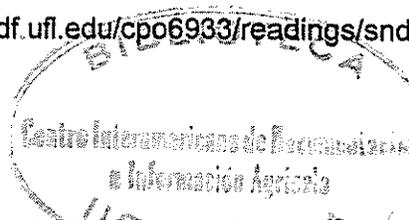
_____. 1981. XI Censo general de población y vivienda. Año 1980. Distrito Federal. Presidencia de la República de Venezuela.

_____. 1991. XII Censo general de población y vivienda. Año 1990. Distrito Federal. Presidencia de la República de Venezuela.

ORCOPLAN. 1983. Plan de Coordinación Urbanística (PCU) Región Capital. Síntesis de los estudios base. Junio de 1983. Caracas, Venezuela. 115 p.

Pérez Hernández, D. 1987. El problema de las inundaciones en Venezuela. Primer Seminario de Ingeniería de Emergencia. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Marzo de 1987.

Sanderson, S.; Pritchard, L. Jr. 1993. The human dynamic of land use and cover change in comparative perspective. [En Línea]. University of Florida. [Consultado Dic de 1999]. Disponible en: <http://www.cdf.ufl.edu/cpo6933/readings/sndrprit.html>

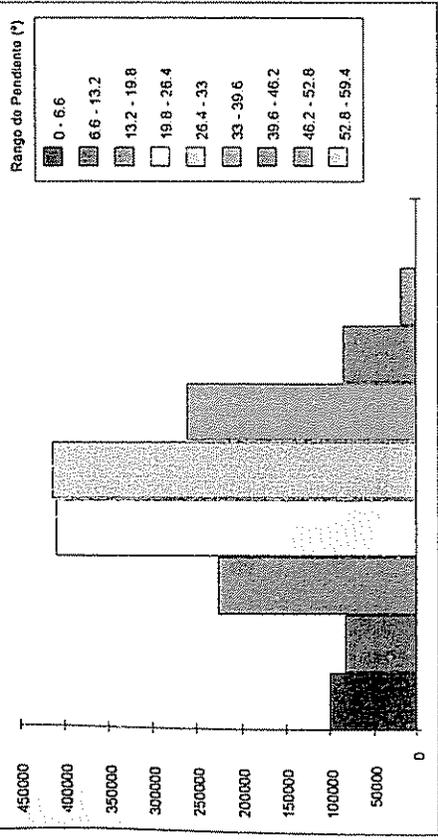


- SAS Institute Inc. 1989. SAS/STAT User's Guide, Versión 6, Fourth Edition. Volume 1. Cary, NC: SAS Institute Inc., 943 p.
- Servicio de Meteorología de la Fuerza Aérea de Venezuela (SEMETFV). 1999. Análisis de las situaciones meteorológicas que afectaron el área Norte Costera del país durante el mes de diciembre de 1999. FAV. Caracas, Venezuela.
- Singer, A.; Rojas, C.; Lugo, M. 1983. Inventario Nacional de Riesgos Geológicos. Departamento de Ciencias de la Tierra. Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas. FUNVISIS. Caracas. Venezuela.
- Steel, R. G. D.; Torrie, J. H.; Dickey, D.A. 1997. Principles and procedures of statistics: a biometrical approach. Third Edition. McGraw-Hill Inc. New York. 338 p.
- Stoorvogel, J. J. 1995. Geographical information systems as a tool to explore land characteristics and land use with reference to Costa Rica. Ph. D. Thesis. University of Wageningen.
- Stokes, M. E.; Davis, C. S.; Koch, G. G. 1995. Categorical data analysis using the SAS System. SAS Institute, Inc. NC, USA.
- Turner, D.; Wear, D.; Flamm, R. 1996. Land Ownership and Land-cover change in the Southern Appalachian Highlands and the Olympic Peninsula. *Ecological Applications*. 6(4). 1996. 1150-1172.
- Turner, M. G. 1987. Spatial simulation of landscape changes in Georgia: A comparison of three transition models. *Landscape Ecology*. 1(1): 29-36.
- Urbani, F.; Navarro, E.; Vignali, M.; Salcedo, D. 2000. Mapas geológicos a escala 1:25.000 y mapas de procesos geodinámicos a escala 1:10.000. Escuela de Geología. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela (UCV).

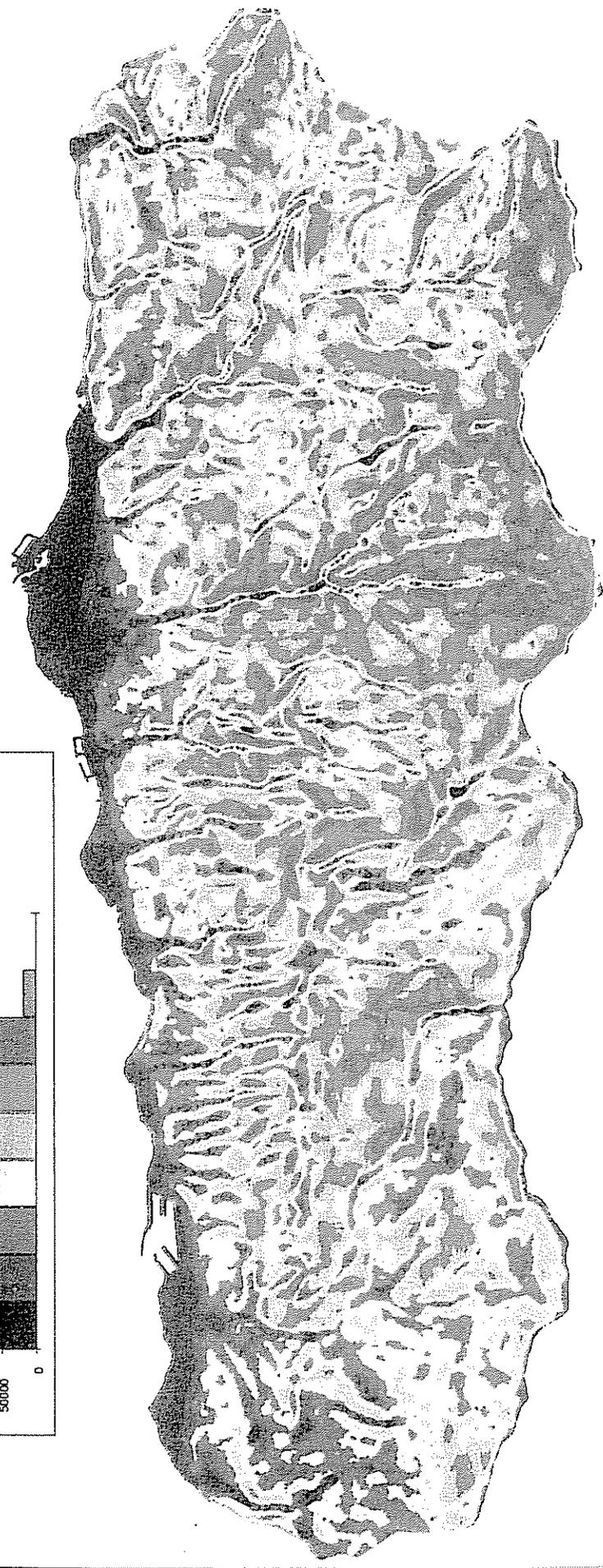
- Veldkamp, A; Fresco, L. O. 1997a. Exploring Land Use scenarios, an alternative approach based on actual land use. *Agricultural Systems*. 55(1). 1-17.
- Veldkamp, A; Fresco, L. O. 1997b. Reconstructing land use drivers and their spatial scale dependence for Costa Rica (1973 and 1984). *Agricultural Systems*. 55(1). 19-43
- Veldkamp, E; Weitz, A. M.; Staritsky, I. G.; Huising, E. J. 1992. Deforestation trends in the Atlantic zone of Costa Rica: a case study. *Land Degradation and Rehabilitation*. 3: 71-84.
- Wear, D.; Turner, M.; Flamm, R. 1996. Ecosystem Management with multiple owners: Landscape dynamics in a southern appalachian watershed. *Ecological Applications*. 6(4). 1996. 1173-1188.
- Wu Yegang; Sklar, F. H.; Rutchey, K. 1997. Analysis and simulation of fragmentation patterns in the Everglades. *Ecological Applications*. 7(1): 268-276.
- Wijkman, A.; Timberlake, L. 1984. Natural disasters: Acts of God or acts of Man?. International Institute for Environment and Development. Earthscan. 148 p.

8 ANEXOS

Histogram of Pendiente (N° de unidades 20 x 20 m por rango de pendiente). Valor



MAR CARIBE

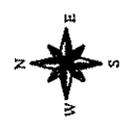
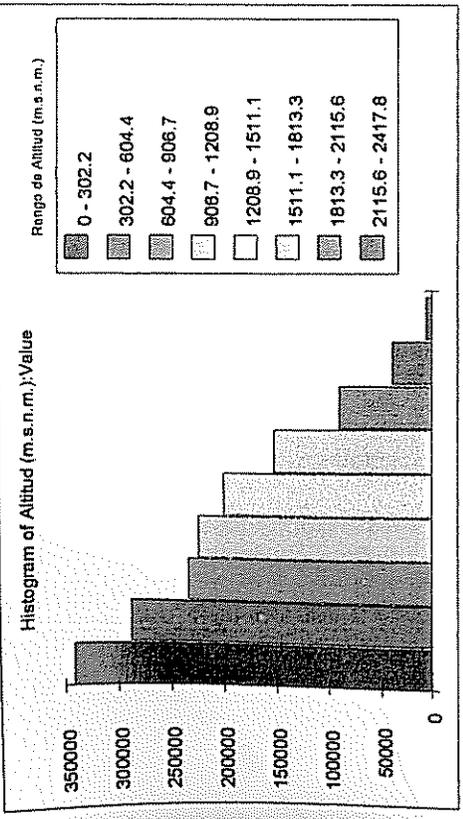


Fuente: Elaboración propia con base en la curvas de nivel de las hojas cartográficas 6847-IV-NO, 6847-IV-AE, 6847-IV-SO, 6847-IV-SE, del Servicio Autónomo de Geografía y Cartografía Nacional, Venezuela

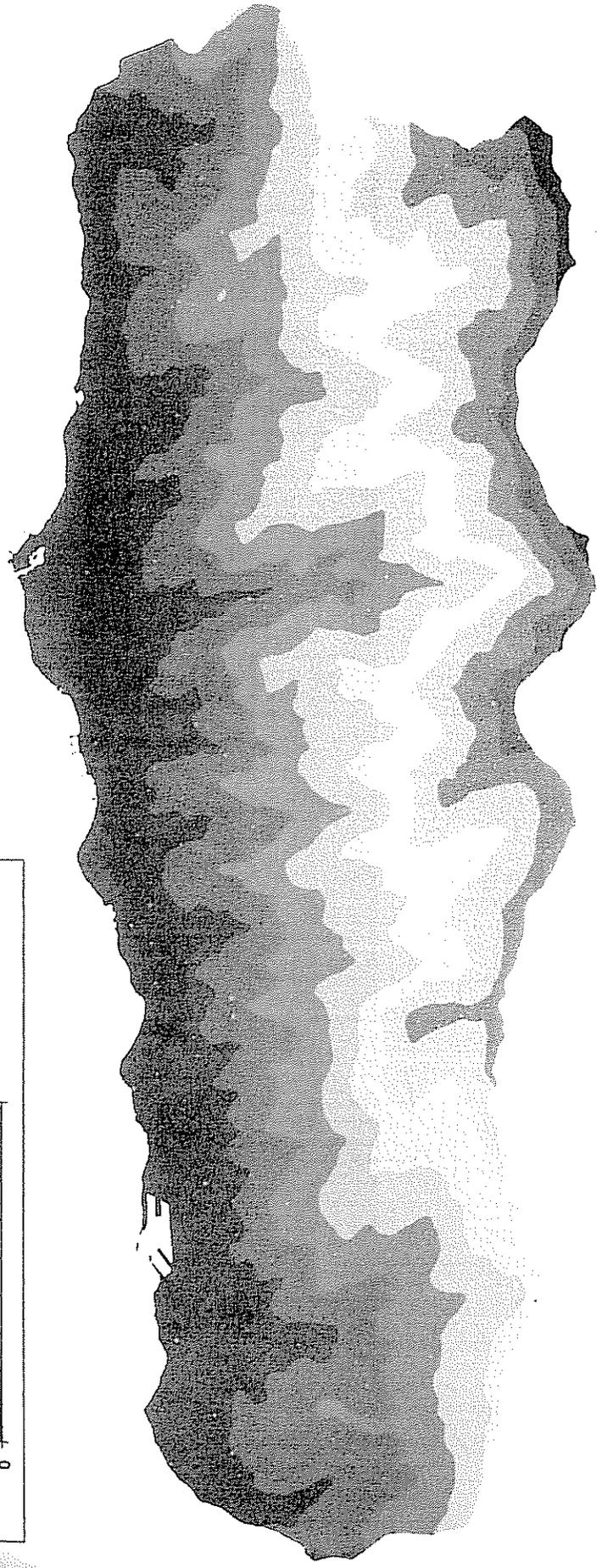
Escala Gráfica



Anexo 1A: Pendiente del terreno (inclinación en °)

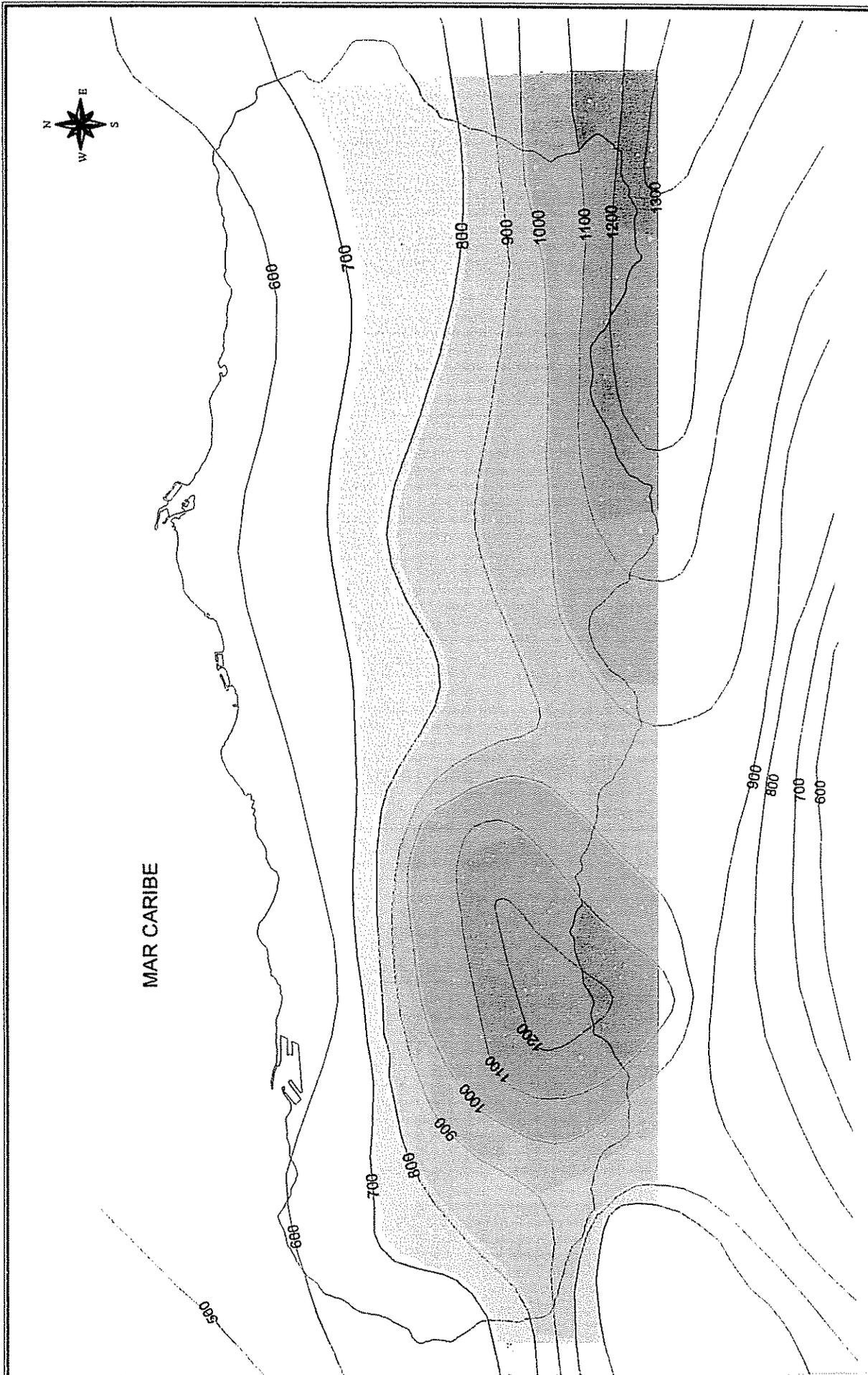


MAR CARIBE



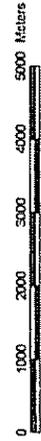
Fuente: Elaboración propia con base en las hojas cartográficas 6647-IV-NC, 6647-IV-NE, 6647-IV-SO, 6647-IV-SE, del Servicio Autónomo de Geografía y Cartografía Nacional, Venezuela

Anexo 2A: Altitud (m.s.n.m.)



MAR CARIBE

Escala Gráfica



Fuente: Elaboración propia con base en las isoyetas de la región norte de Venezuela

Anexo 3A: Régimen de precipitación anual -ISOYETAS- (mm)



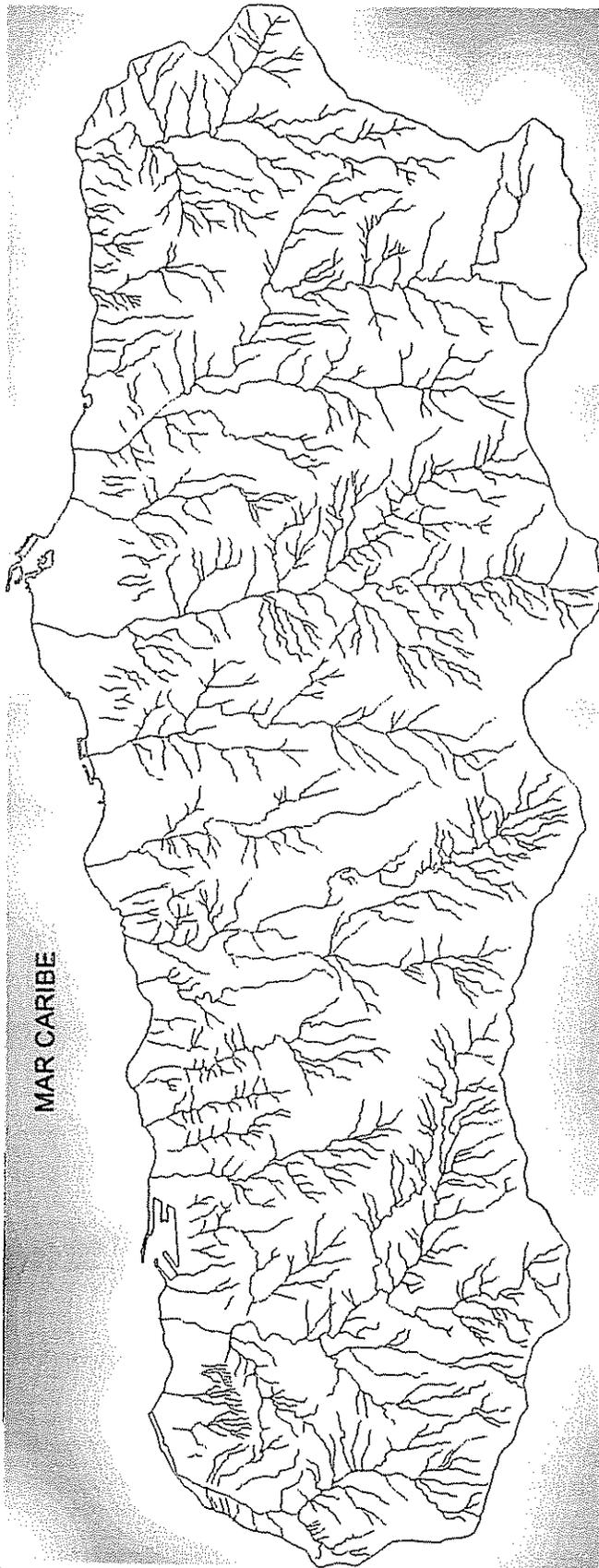
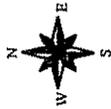
- Leyenda
- Franja de Amortiguación
 - No Parque
 - Parque Nacional El Avila
 - No Data

MAR CARIBE

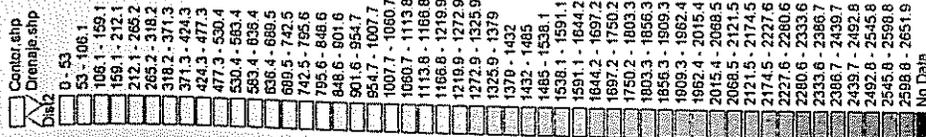


Fuente: Instituto Nacional de Parques
(INPARQUES)
Venezuela

Anexo 4A: Areas pertenecientes al Parque Nacional El Avila



MAR CARIBE



Escala Gráfica

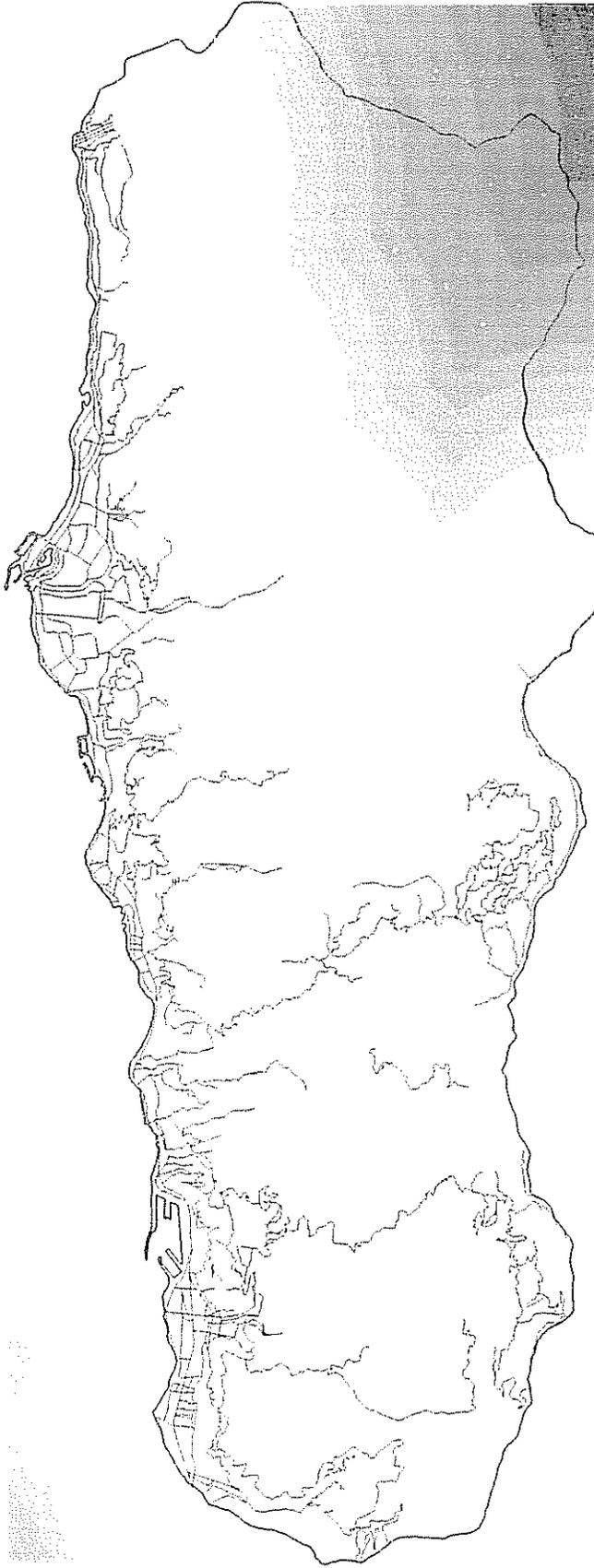


Anexo 5A: Distancia minima horizontal a cauces de rios y quebradas (m)



MAR CARIBE

- Contorno
- Vias94.shp
- Distancia horizontal
- 0 - 158.6
- 158.8 - 317.2
- 317.2 - 475.9
- 475.9 - 634.5
- 634.5 - 793.1
- 793.1 - 951.7
- 951.7 - 1110.4
- 1110.4 - 1269
- 1269 - 1427.6
- 1427.6 - 1586.2
- 1586.2 - 1744.8
- 1744.8 - 1903.5
- 1903.5 - 2062.1
- 2062.1 - 2220.7
- 2220.7 - 2379.3
- 2379.3 - 2538
- 2538 - 2696.6
- 2696.6 - 2855.2
- 2855.2 - 3013.8
- 3013.8 - 3172.4
- 3172.4 - 3331.1
- 3331.1 - 3489.7
- 3489.7 - 3648.3
- 3648.3 - 3806.9
- 3806.9 - 3965.6
- 3965.6 - 4124.2
- 4124.2 - 4282.8
- 4282.8 - 4441.4
- 4441.4 - 4600
- 4600 - 4758.7
- 4758.7 - 4917.3
- 4917.3 - 5075.9
- 5075.9 - 5234.5
- 5234.5 - 5393.2
- 5393.2 - 5551.8
- 5551.8 - 5710.4
- 5710.4 - 5869
- 5869 - 6027.8
- 6027.8 - 6186.3
- 6186.3 - 6344.9
- 6344.9 - 6503.5
- 6503.5 - 6662.1
- 6662.1 - 6820.8
- 6820.8 - 6979.4
- 6979.4 - 7138
- 7138 - 7296.6
- 7296.6 - 7455.2
- 7455.2 - 7613.9
- 7613.9 - 7772.5
- 7772.5 - 7931.1
- No Data



Escala Gráfica



Anexo 6A: Distancia mínima horizontal a vías de acceso (m)

- Unidades Litológicas
- Aluvión
 - Fase Tacagua
 - Serpentinitas
 - Esquistos de San Julián
 - Augengneis de Peña de Mora
 - Fase Antimano
 - Fase Nirgua
 - Metagranito de Naiguatá
 - No data



MAR CARIBE



Escala Gráfica

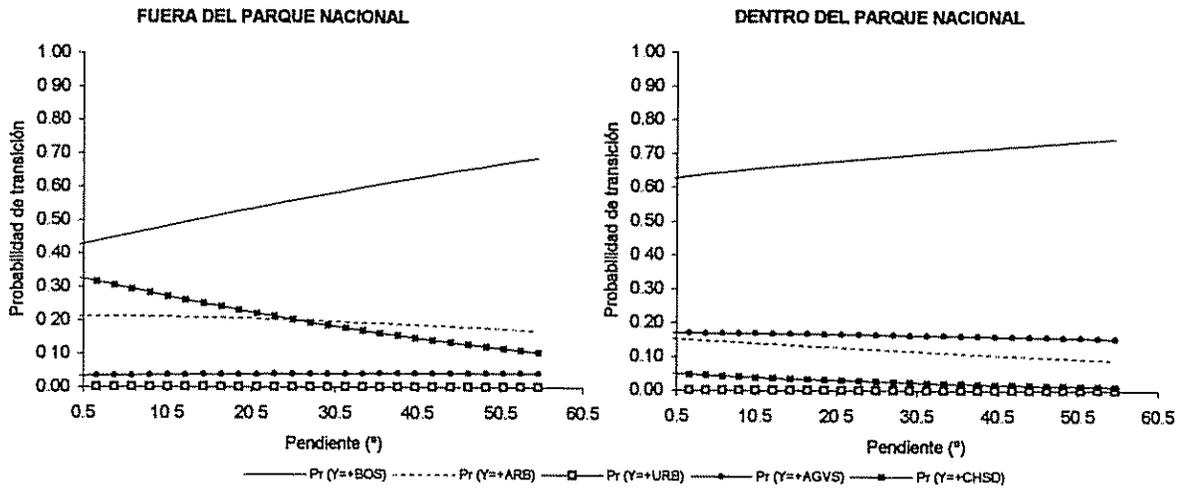


Fuente: Urbani et al, 2000

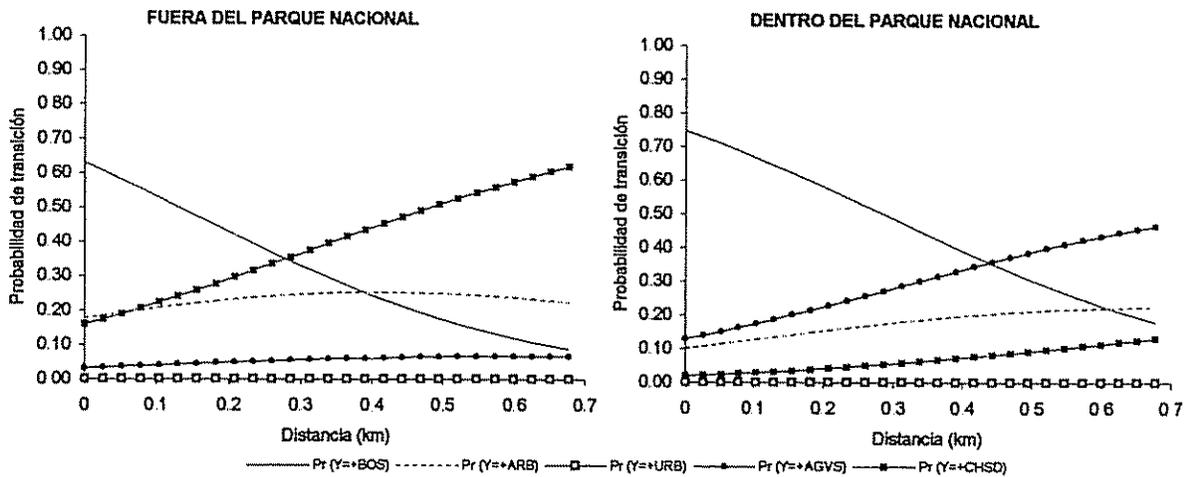
Anexo 7A: Unidades litológicas

Anexo 8A: Tendencias de los valores de probabilidad de transición en el uso/cobertura del suelo con cambios en las variables explicativas (Período 1958-1973)

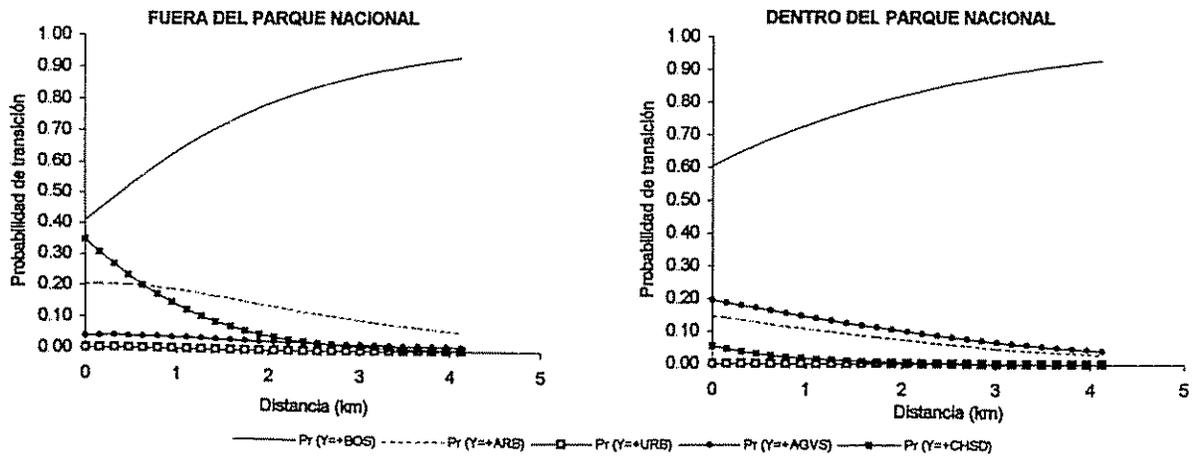
CAMBIO EN PROBABILIDADES EN FUNCION DE LA PENDIENTE



CAMBIO EN PROBABILIDADES EN FUNCION DE LA DISTANCIA A CAUCES DE RIOS Y QUEBRADAS

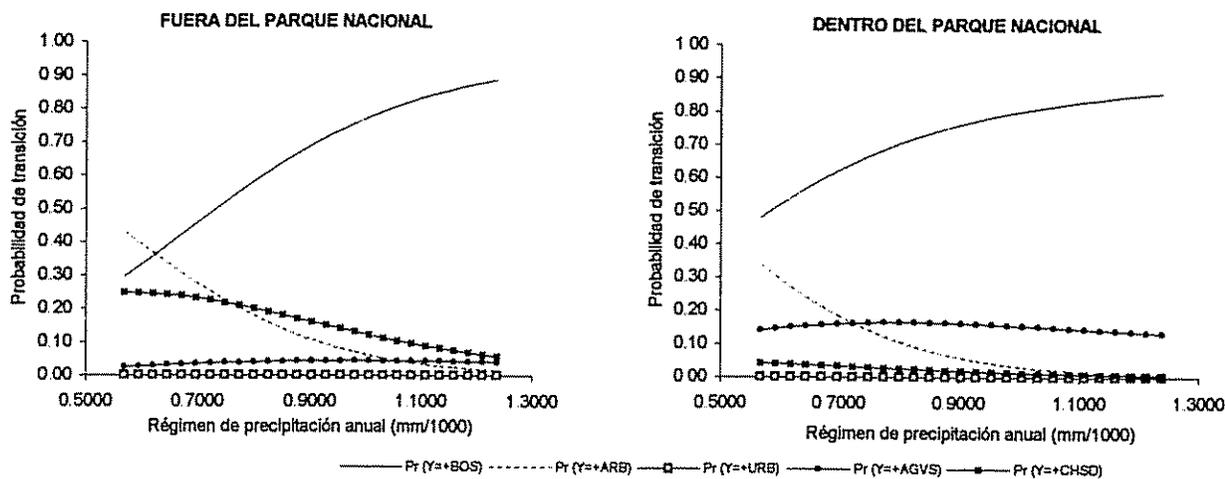


CAMBIO EN PROBABILIDADES EN FUNCION DE LA DISTANCIA MINIMA A VIALIDAD O CAMINOS

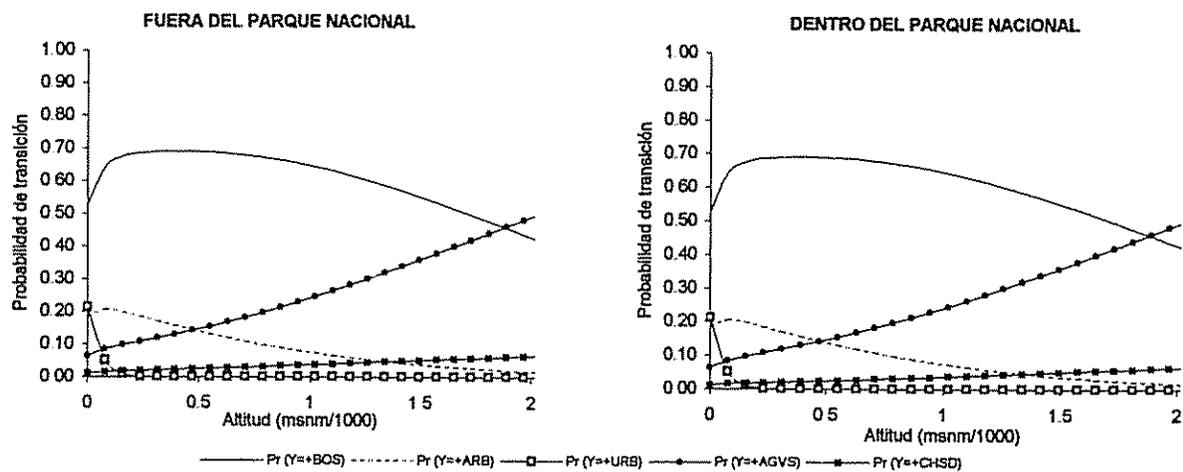


Anexo 8A: Tendencias de los valores de probabilidad de transición en el uso/cobertura del suelo con cambios en las variables explicativas (Período 1958-1973)

CAMBIO EN PROBABILIDADES EN FUNCION DEL REGIMEN DE PRECIPITACION ANUAL

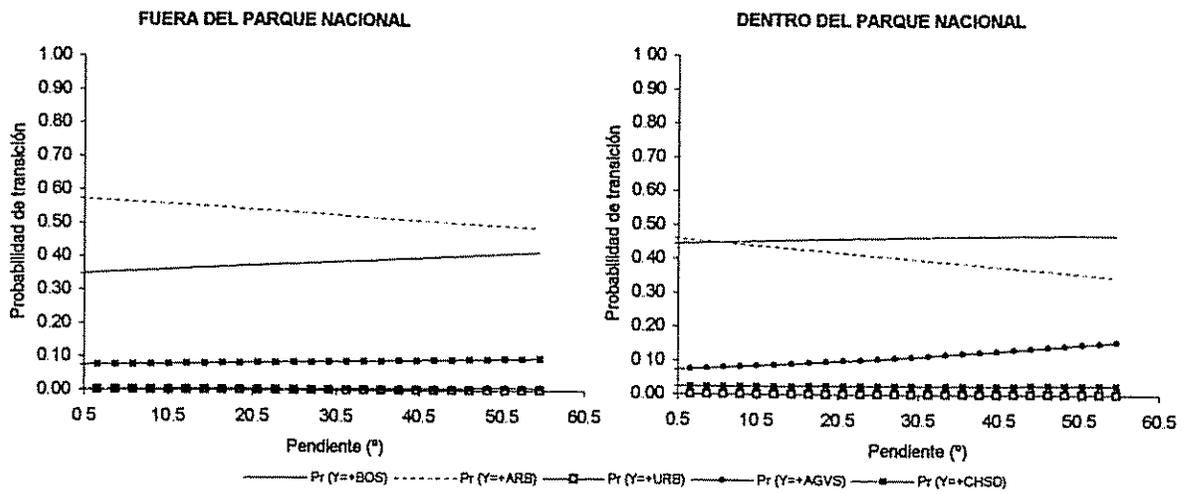


CAMBIO EN PROBABILIDADES EN FUNCION DE LA ALTITUD

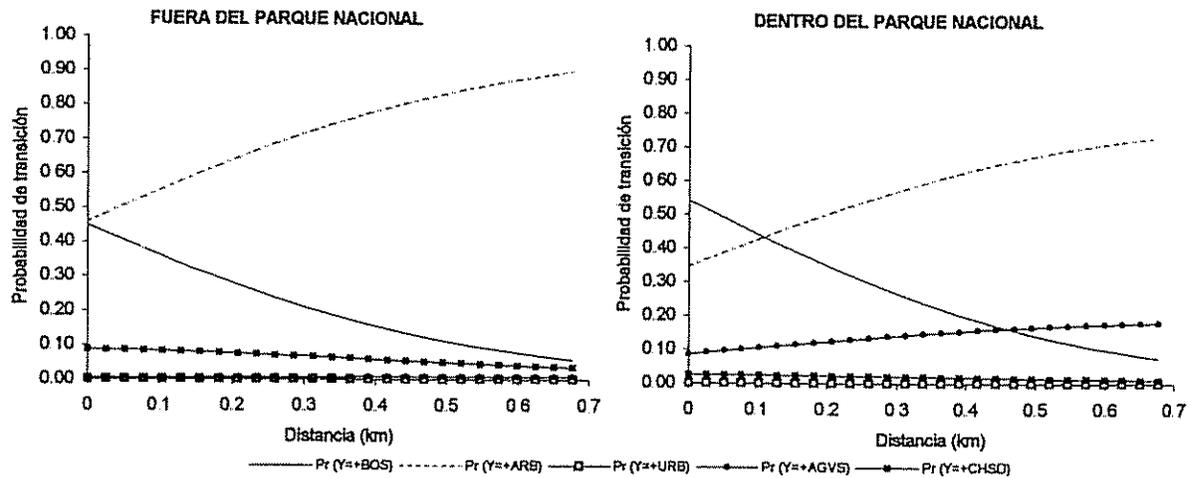


Anexo 9A: Tendencias de los valores de probabilidad de transición en el uso/cobertura del suelo con cambios en las variables explicativas (Período 1973-1983)

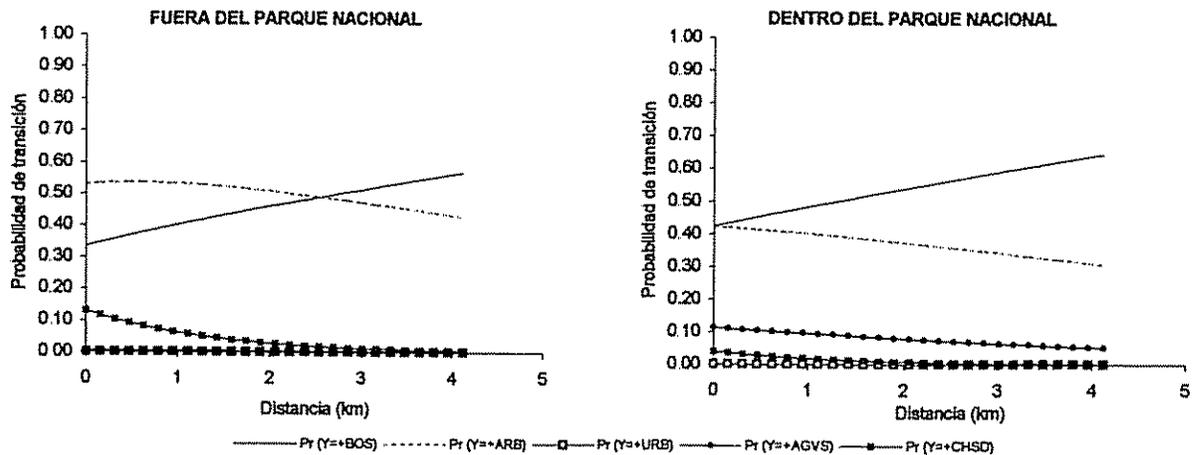
CAMBIO EN PROBABILIDADES EN FUNCION DE LA PENDIENTE



CAMBIO EN PROBABILIDADES EN FUNCION DE LA DISTANCIA A CAUCES DE RIOS Y QUEBRADAS

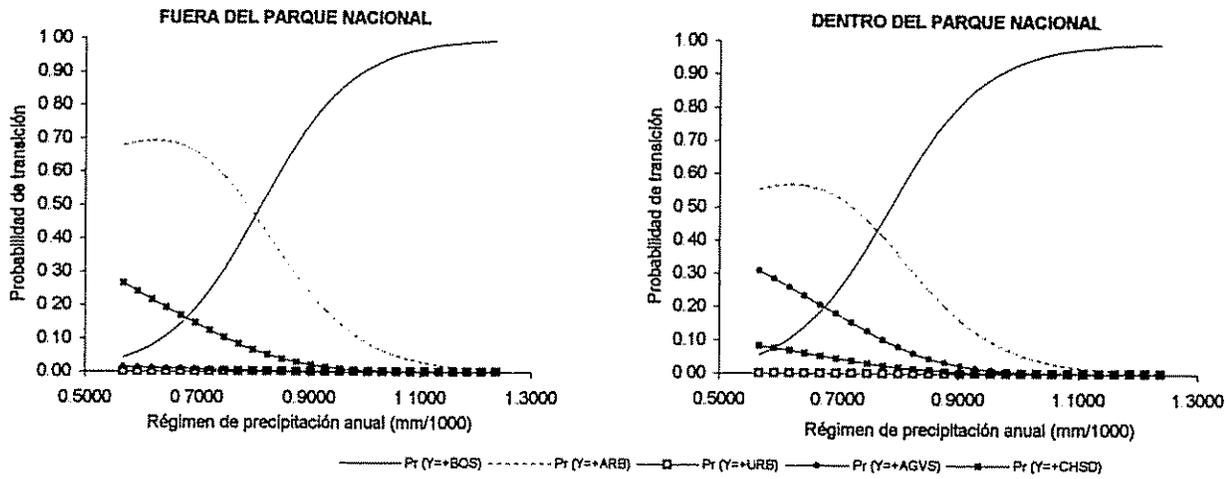


CAMBIO EN PROBABILIDADES EN FUNCION DE LA DISTANCIA MINIMA A VIALIDAD O CAMINOS

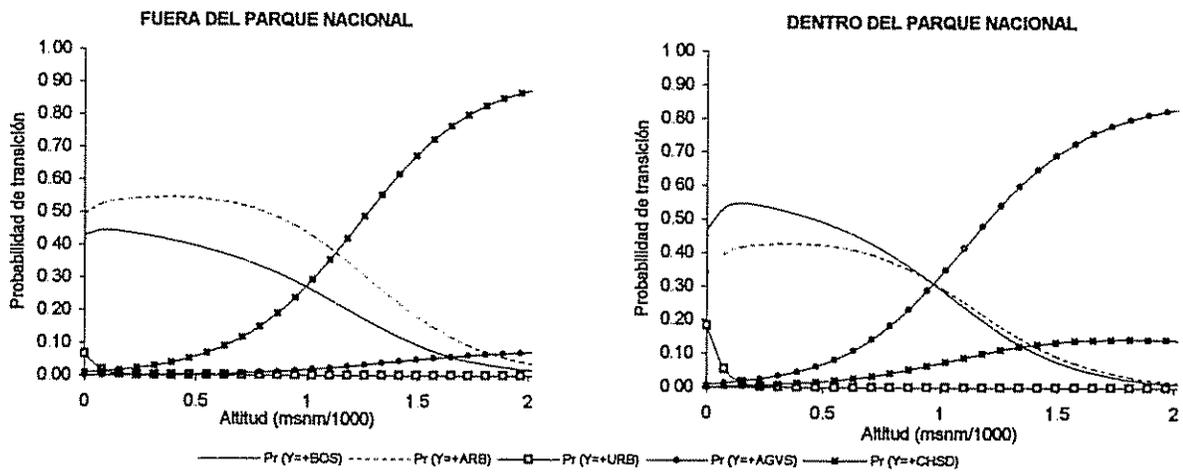


Anexo 9A: Tendencias de los valores de probabilidad de transición en el uso/cobertura del suelo con cambios en las variables explicativas (Período 1973-1983)

CAMBIO EN PROBABILIDADES EN FUNCION DEL REGIMEN DE PRECIPITACION ANUAL

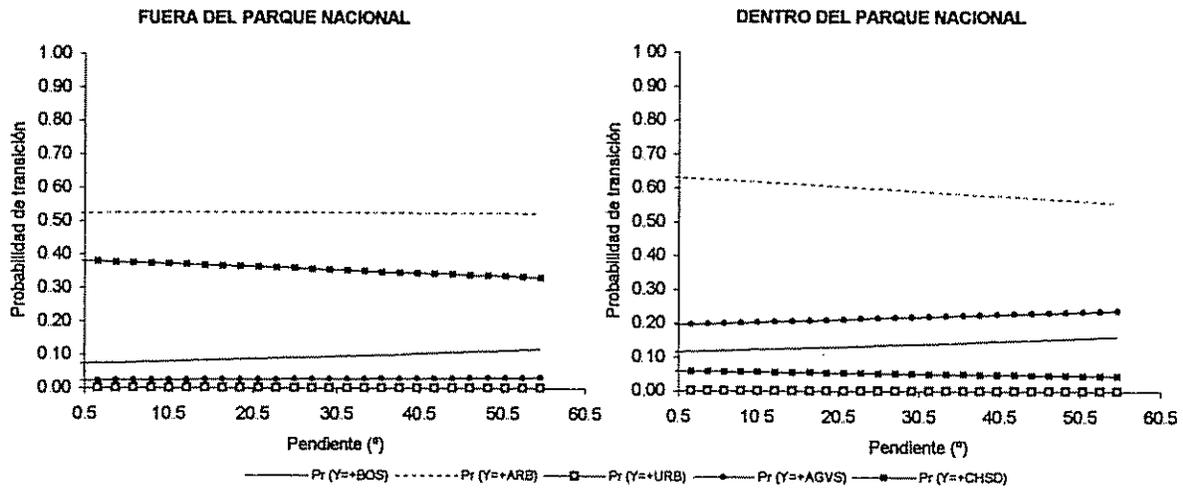


CAMBIO EN PROBABILIDADES EN FUNCION DE LA ALTITUD

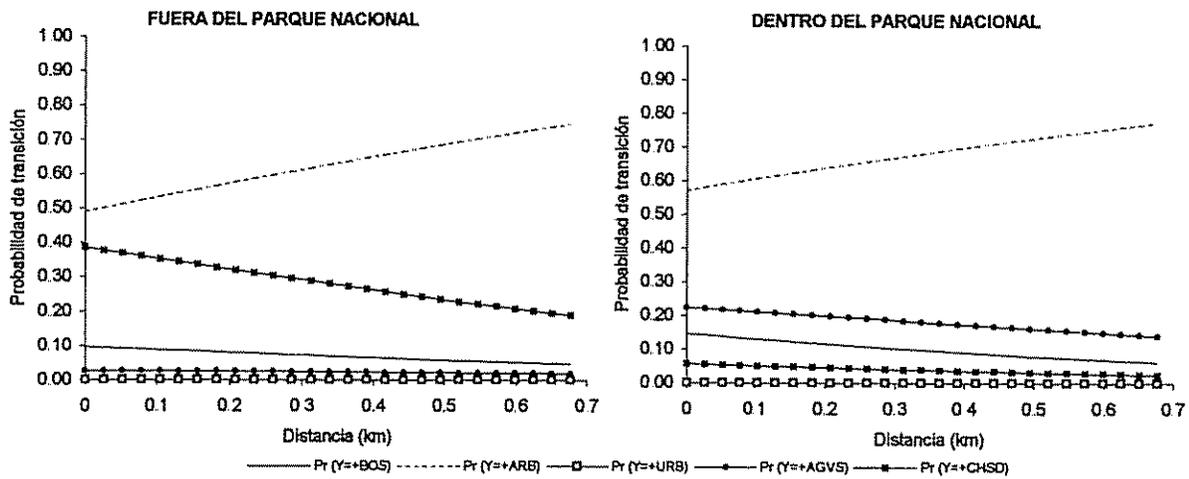


Anexo 10A: Tendencias de los valores de probabilidad de transición en el uso/cobertura del suelo con cambios en las variables explicativas (Período 1983-1994)

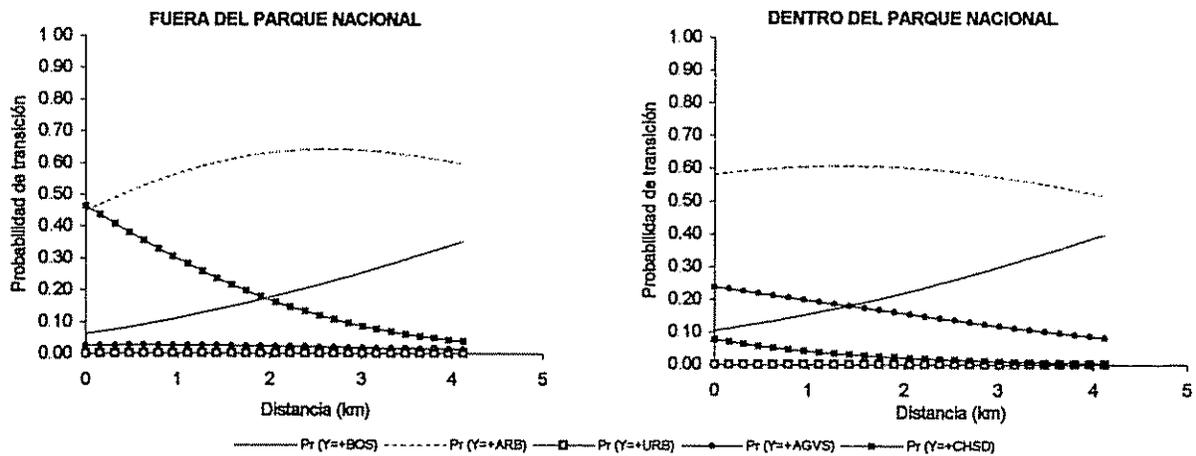
CAMBIO EN PROBABILIDADES EN FUNCION DE LA PENDIENTE



CAMBIO EN PROBABILIDADES EN FUNCION DE LA DISTANCIA A CAUCES DE RIOS Y QUEBRADAS

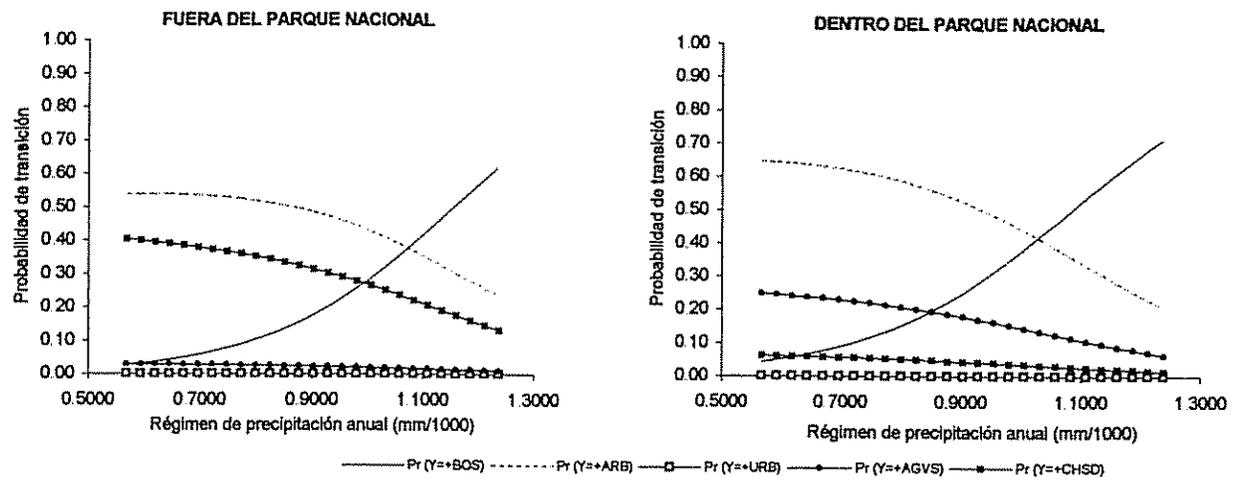


CAMBIO EN PROBABILIDADES EN FUNCION DE LA DISTANCIA MINIMA A VIALIDAD O CAMINOS

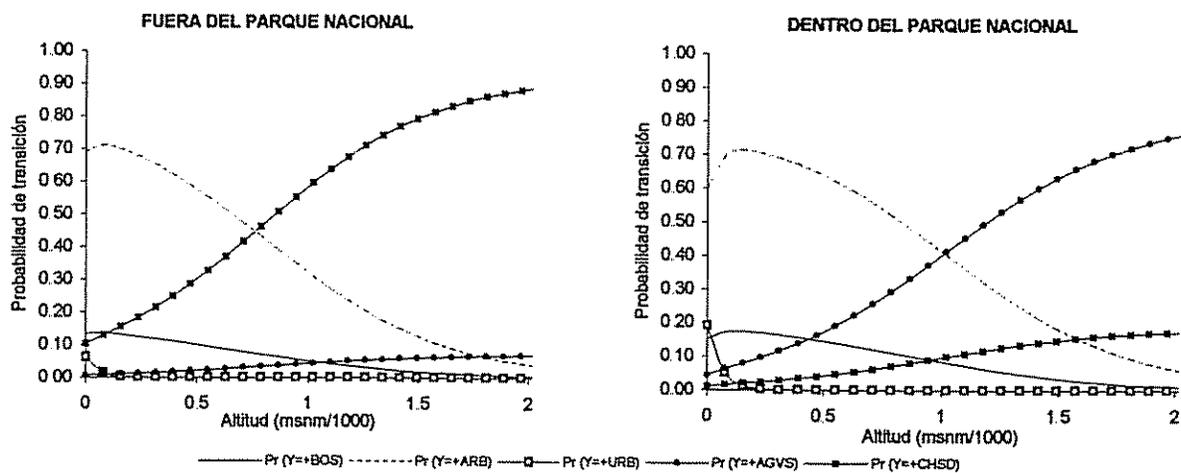


Anexo 10A: Tendencias de los valores de probabilidad de transición en el uso/cobertura del suelo con cambios en las variables explicativas (Período 1983-1994)

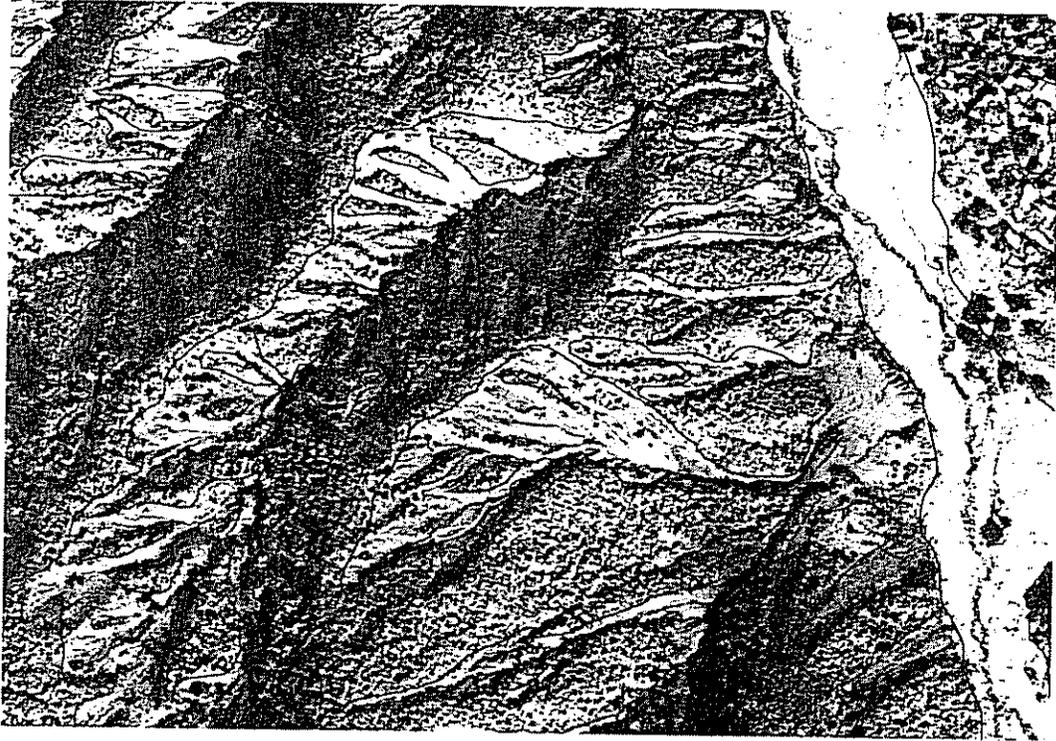
CAMBIO EN PROBABILIDADES EN FUNCION DEL REGIMEN DE PRECIPITACION ANUAL



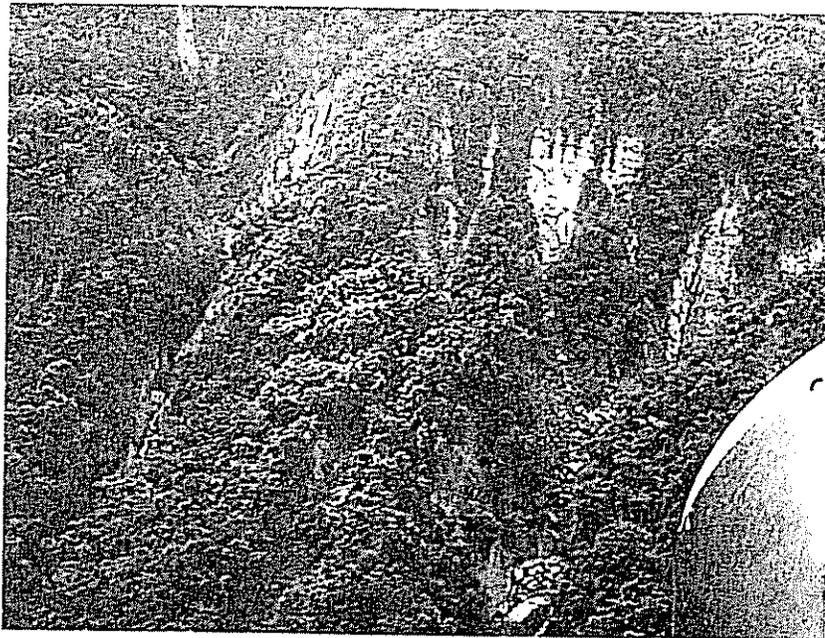
CAMBIO EN PROBABILIDADES EN FUNCION DE LA ALTITUD



Anexo 11A. Deslizamientos de tierra y cobertura vegetal en laderas, ocasionados por las lluvias extremas de Diciembre de 1999.

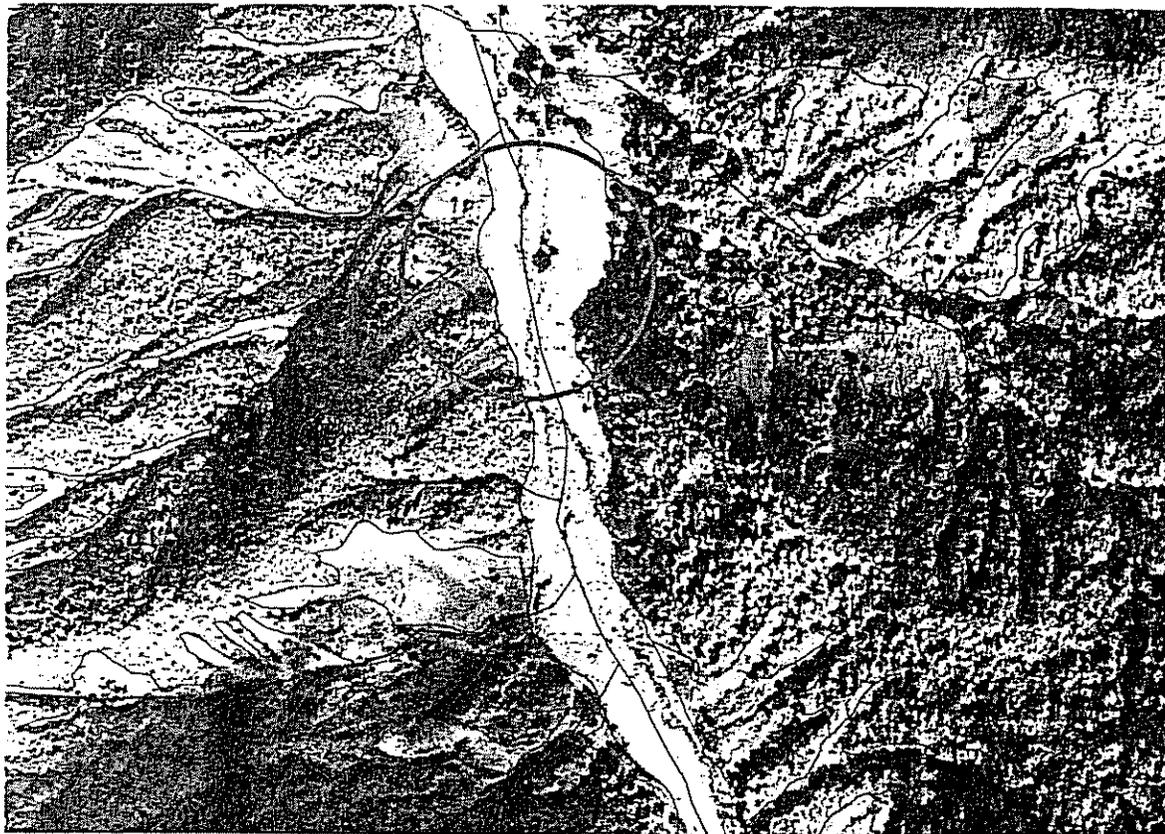


Segmento de la Imagen IKONOS-2 en las partes medias de la Cuenca del Río San Julián (Caraballeda)



Vista de deslizamientos típicos en las partes altas del área de estudio. Obsérvese el delgado espesor del suelo superficial, y el afloramiento de material rocoso.

Anexo 12A. Detalle de flujo de materiales gruesos (predominantemente rocas) en un segmento de la imagen IKONOS 2.

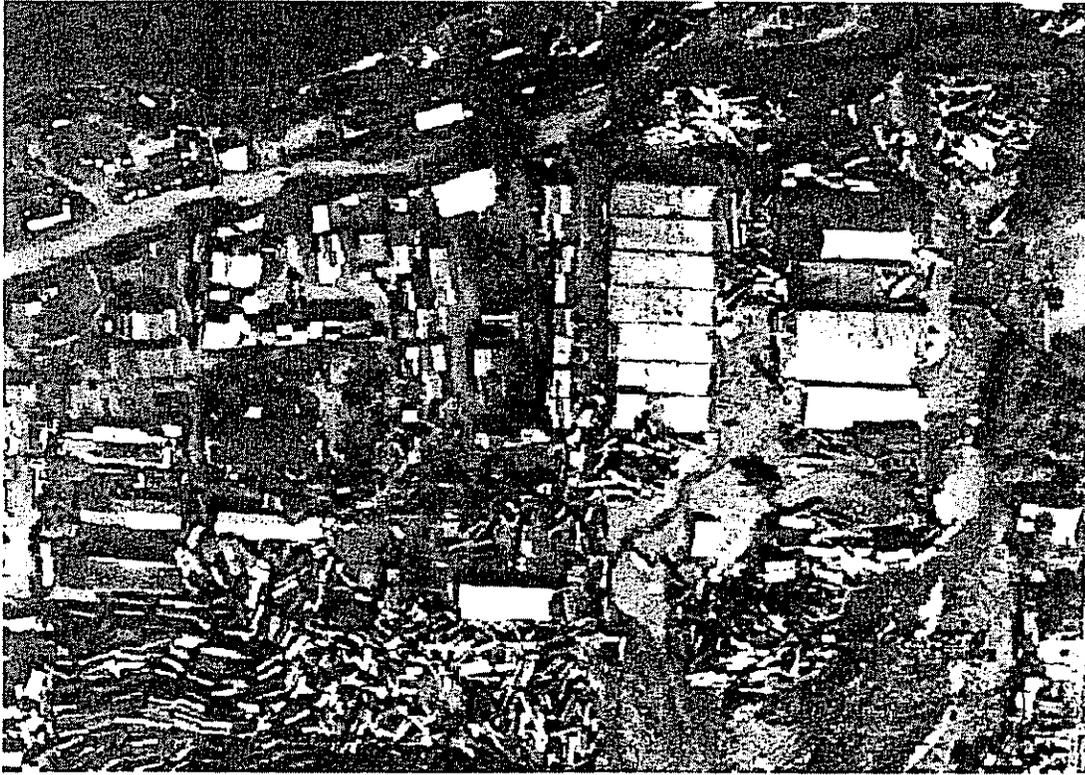


Segmento de la Imagen IKONOS-2 mostrando la delimitación vectorial de áreas afectadas (en rojo) y la red de drenaje (azul) utilizada como referencia a partir de las cartas 1:25.000 de SAGECAN. El círculo verde muestra el detalle de materiales rocosos reconocibles en la imagen de satélite.

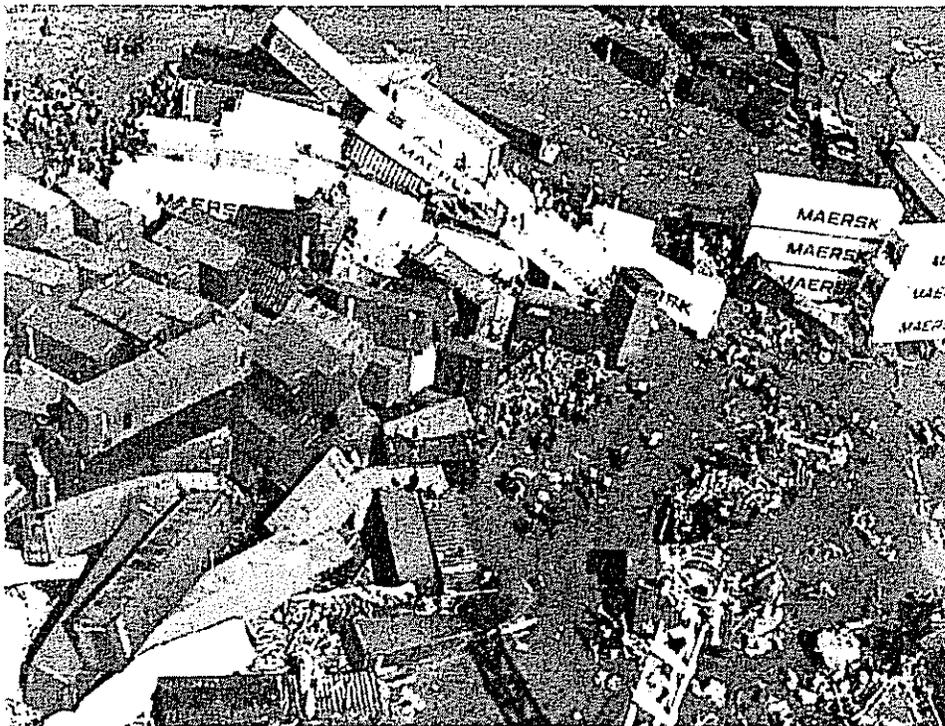


Daños típicos por flujo de materiales predominantemente rocoso en las partes bajas de las cuencas (Sector Los Corales)

Anexo 13A. Detalle de flujo de sedimentos (lodo) en un segmento de la imagen IKONOS 2.

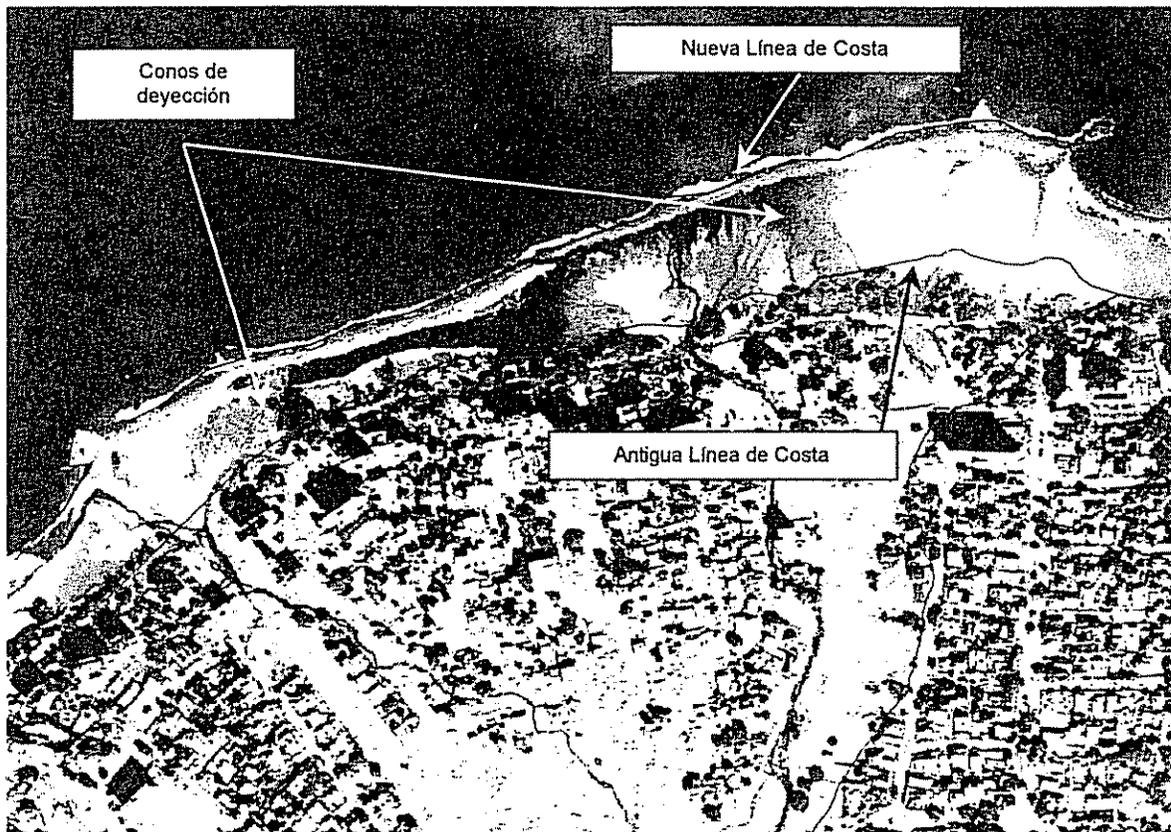


Segmento de la Imagen IKONOS-2 mostrando el arrastre por flujo de sedimentos (lodos) en el Puerto de La Guaira.



Arrastre producido por flujo de sedimentos (lodo) en el Puerto de La Guaira

Anexo 14A. Formación de nuevas áreas (conos de deyección) en la franja costera



Segmento de la Imagen IKONOS-2 mostrando la formación de nuevas áreas por deposición de materiales en las desembocaduras de ríos y quebradas.

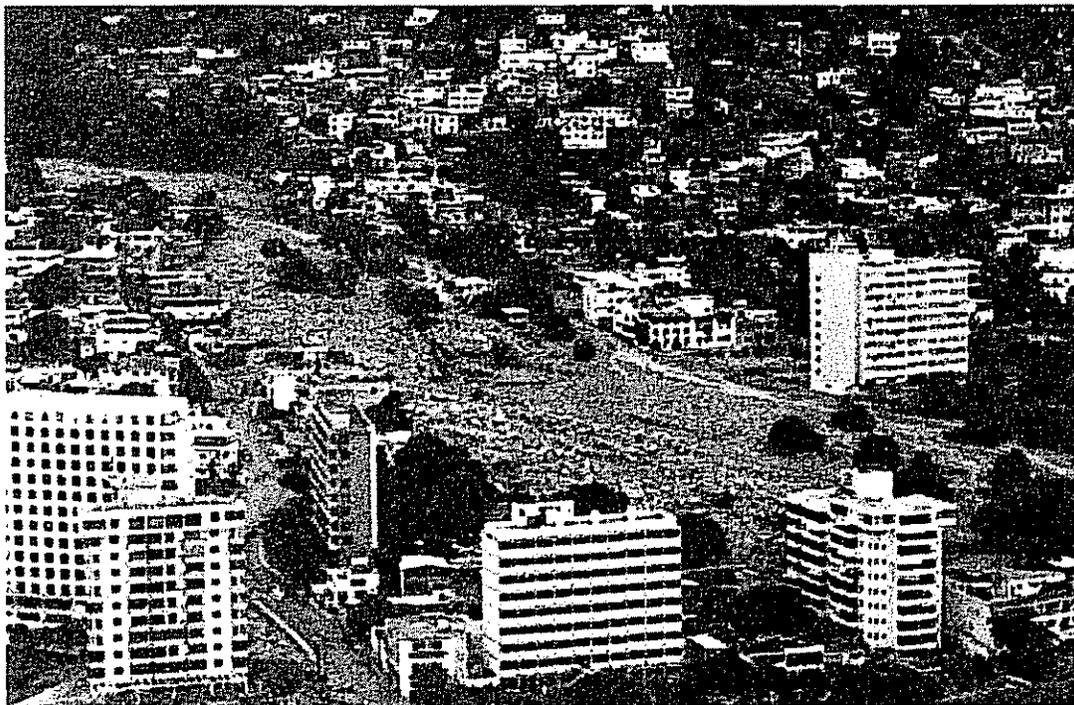


Vista aérea de conos de deyección en la franja costera (sector Caraballeda)

Anexo 15A. Patrones típicos de ocupación urbana dentro del área de estudio



Zonas marginales de crecimiento urbano en laderas y cauces de ríos y quebradas



Ocupación de áreas planas en los antiguos conos de deyección. Al fondo se muestra el patrón típico de crecimiento urbano no controlado hacia las laderas del Parque Nacional El Avila.