CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

PROGRAMA DE EDUCACIÓN PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACIÓN

ESCUELA DE POSGRADO

DINÁMICA DEL USO DE LA TIERRA Y DE LA OFERTA HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO GUACERIQUE, TEGUCIGALPA, HONDURAS

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 como requisito parcial para optar al grado de:

Magister Scientiae

Por

ALEXANDER JAVIER HERNÁNDEZ CÁCERES

Turrialba, Costa Rica
2003

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

MAGISTER SCIENTIAE

FIRMANTES:

Sergio Velásquez, M.Sc.
Consejero Principal

Francisco Jiménez, Dr.
Miembro Comité Consejero

Jorge Faustino, Ph.D.
Miembro Comité Consejero

Glen Galloway, Ph.D.
Director Programa de Educación y
Decano de la Escuela de Posgrado

Alexander Javier Hernández Cáceres
Candidato

DEDICATORIA

A las tres mujeres más importantes de mi vida:

Mi madre, mi bella esposa y mi hija.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por concederme la vida en cada instante; misma que ha sido un devenir de alegrías y triunfos, al que se suma la culminación de estudios de Posgrado.

A los profesores Sergio Velásquez, Francisco Jiménez y Jorge Faustino en CATIE, quienes como miembros del comité asesor contribuyeron con sus valiosas sugerencias en un marco orientador para enriquecer el presente trabajo de investigación. A Samuel Rivera en Honduras por su apoyo y amistad.

Al Proyecto de Fortalecimiento de la Capacidad Local para el Manejo de Cuencas y la Prevención de Desastres Naturales FOCUENCAS por haberme otorgado la beca de estudios en CATIE, agradecimientos especiales.

Al personal del Departamento de Manejo de Cuencas del Servicio Autónomo de Acueductos y Alcantarillados SANAA, en especial a Don Oscar Torres y Leonardo Irías, sin cuya amistad y apoyo incondicional no se hubiera podido obtener los resultados de este estudio. Agradecimientos sinceros y muy especiales a Don Oscar, extensivos a los miembros de la sección de Hidrología de SANAA.

Al Doctor Valerio Gutiérrez, cuyos aportes en el inicio y transcurso de la realización de este trabajo fueron excelentes para orientar las actividades.

Al personal del CIEF de AFE-COHDEFOR por proporcionar datos de interés, así como a la gente de INFOAGRO en la SAG, gracias especiales por su ayuda.

A los Ingenieros Carlo Foletti y Alden Rivera del Proyecto de Administración de Áreas Rurales PAAR, así como a los miembros del SINIT por su apoyo incondicional y valiosas sugerencias para enriquecer y orientar este estudio.

A mis profesores en CATIE por contribuir a mi especialización. Al personal de la Escuela de Posgrado y de la Biblioteca Orton por su gran cooperación.

A mis amigos de la promoción, por compartir buenos momentos. Gracias a todas las personas que directa o indirectamente contribuyeron a este logro.

CONTENIDO

DEDICATORIA ..... *iii*
AGRADECIMIENTOS ..... *iv*
CONTENIDO ..... *v*
LISTA DE CUADROS ..... *vii*
LISTA DE FIGURAS ..... *viii*
LISTA DE MAPAS ..... *ix*
LISTA DE ANEXOS ..... *ix*
RESUMEN ..... *x*
SUMMARY ..... *xi*

1. INTRODUCCIÓN 1

1.1 PROBLEMA 1
1.2 JUSTIFICACIÓN 2
1.3 OBJETIVOS 2
1.3.1 General *2*
1.3.2 Específicos *2*
1.4 HIPÓTESIS 3

2. REVISIÓN DE LITERATURA 4

2.1 CONCEPTUALIZACIÓN 4
2.2 DINÁMICA DE USO DE LA TIERRA VERSUS PRODUCCIÓN DE AGUA 5
2.3 USO DE MODELOS FÍSICOS PARA EVALUACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA 10
2.3.1 El modelo SWAT *13*

3. MATERIALES Y MÉTODOS 16

3.1 ÁREA DE ESTUDIO 16
3.1.1 Ubicación *16*
3.1.2 Fisiografía *16*
3.1.3 Clima *17*
3.1.4 Geología y suelos *17*
3.1.5 Red hídrica *18*
3.1.6 Caracterización socioeconómica básica *18*
3.1.7 Carácter legal de la cuenca *20*
3.2 RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN Y PROCESOS 20
3.2.1 Patrones de uso de la tierra *21*
3.2.1.1 Captura de información base *21*
3.2.1.2 Estimación de cobertura por tipo de uso *23*
3.2.1.3 Análisis de transición *26*
3.2.1.4 Factores directrices de la dinámica de uso *27*
3.2.2 Identificación de áreas críticas *29*
3.2.2.1 Método utilizado *29*
3.2.2.2 Recolección de información y matrices de decisión *30*
3.2.3 Modelación hidrológica *33*
3.2.3.1 Entorno general *33*
3.2.3.2 Captura y arreglo de insumos requeridos *33*
3.2.3.3 Procesos principales y salidas en el uso del modelo *37*
3.2.3.4 Evaluación del ajuste de datos de salidas del modelo *41*
3.3 LINEAMIENTOS PARA PROPUESTA DE ACCIONES TÉCNICAS 44
3.3.1 Antecedentes *44*

3.3.2 Consideraciones político-institucionales *44*
3.3.3 Propuesta metodológica *47*

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN **54**
4.1 USOS DE LA TIERRA EN LA CUENCA DEL RÍO GUACERIQUE 54
4.1.1 Escenario 1980-1991 ..... *58*
4.1.2 Escenario 1991-2003 ..... *61*
4.1.3 Cambios en el patrón del paisaje *63*
4.1.4 Análisis de factores directrices *66*
4.2 ZONIFICACIÓN DE ÁREAS CRÍTICAS EN LA CUENCA DEL RÍO GUACERIQUE 69
4.3 OFERTA HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO GUACERIQUE 74
4.3.1 Análisis de registros hidro-climáticos *74*
4.3.2 Modelación hidrológica *80*
4.3.2.1 Evaluación de la bondad de ajuste del modelo *84*
4.3.3 Implicaciones de la dinámica temporal de uso *88*
4.4 MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RÍO GUACERIQUE. PROPUESTA 89
4.4.1 Segmentación administrativo-biofísica *89*
4.4.2 Ordenamiento hidrológico *90*
4.4.3 Priorización de unidades diferenciadas *92*
4.4.4 Concesión de la oferta disponible por unidad *93*

5. CONCLUSIONES **95**

6. RECOMENDACIONES **98**

7. LITERATURA CONSULTADA **100**

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Distribución fisiográfica porcentual en la cuenca.....17
Cuadro 2. Series de suelo en la cuenca.....18
Cuadro 3. Red de drenaje superficial y características 18
Cuadro 4. Información básica de los escenarios analizados 21
Cuadro 5. Clasificación convencional de patrones de uso.....23
Cuadro 6. Varianza estimada de *p* (probabilidad de cambio) para la categoría de bosque conífera por tamaño de muestra n_i evaluado.....24
Cuadro 7. Variables consideradas como reguladoras de la dinámica de uso.....28
Cuadro 8. Matriz para obtención de capa de potencial erosivo. 30
Cuadro 9. Protección al suelo según tipo de cobertura.....30
Cuadro 10. Matriz para obtención del estado erosivo en la cuenca.....31
Cuadro 11.Sistema de clasificación de tierras por capacidad de uso.....31
Cuadro 12. Calificación del tipo de conflicto presente en la cuenca.....32
Cuadro 13. Calificación de los riesgos de degradación en la cuenca.....32
Cuadro 14. Redefinición de los usos en la cuenca de acuerdo a tipología usada por SWAT.....34
Cuadro 15. Principales estadígrafos requeridos para la calibración del generador climático 36
Cuadro 16. Estaciones climatológicas utilizadas en el estudio. 37
Cuadro 17. Puntos de aforo o salida de subcuencas consideradas en el estudio. 38
Cuadro 18. Tipo de resultados a considerar del SWAT.....40
Cuadro 19. Factores considerados para el ordenamiento hidrológico de la cuenca.....48
Cuadro 20. Existencias por tipo de uso en la Cuenca del Río Guacerique.....54
Cuadro 21. Dinámica de uso en el escenario 1980-1991 58
Cuadro 22. Matriz de transiciones markovianas para el período 1980-1991 60
Cuadro 23. Dinámica de uso en el escenario 1991-2003.....61
Cuadro 24. Matriz de transiciones markovianas para el período 1991-2003 62
Cuadro 25. Cambios en la cobertura entre los períodos 1980 y 2003 en la cuenca del Río Guacerique.....64
Cuadro 26. Cambios en la contigüidad espacial de las zonas boscosas como indicadores de fragmentación de hábitat e irregularidad hidrológica entre los períodos 1980 y 2003 en la cuenca del Río Guacerique.....65
Cuadro 27. Estados erosivos en la cuenca.....69
Cuadro 28. Distribución de los riesgos de degradación en la cuenca.....71
Cuadro 29. Análisis de la Varianza (SC tipo III) del régimen pluvial en la cuenca.....74
Cuadro 30. Análisis de la Varianza (SC tipo III) de la variabilidad estacional de los caudales...76
Cuadro 31. Estadísticos anuales de bondad de ajuste entre series observadas y simuladas por SWAT para el período 1999-2003.....85
Cuadro 32. Segmentación territorial propuesta y características generales.....90
Cuadro 33. Cobertura por tipo de riesgo identificado por subcuenca.....92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Guacerique, Honduras. 16
Figura 2. Suministro de agua (magnitud, porcentaje) por tipo de fuente en las poblaciones de la cuenca..... 19
Figura 3. Comportamiento de la varianza muestral y del modelo de regresión $Y ? ? ? ?_1 n ? ?_2 n^2$ estimado en función del número de muestras en la probabilidad de cambio p. 25
Figura 4. Representación gráfica del proceso de sobreposición de los escenarios de uso y la captura de atributos tabulados para cada parcela de la muestra $n = 2440$ 26
Figura 5. Matriz de probabilidades markovianas de transición MPT de un período t_h a t_{h+1}. 26
Figura 6. Diagrama de transformación de categorías y transiciones esperadas. 29
Figura. 7. Proceso metodológico seguido para la obtención de áreas críticas 30
Figura. 8. Entrada y salida de la extensión Perfil Suelos para ajuste de la cobertura y su uso en SWAT. 36
Figura. 9. Representación del alcance espacial de análisis por subcuenca en SWAT..... 38
Figura. 10. Insumos requerido, procesos principales y salidas en la interfase de SWAT 43
Figura. 11. Proceso metodológico propuesto para el ordenamiento hidrológico en la cuenca del Río Guacerique..... 51
Figura. 12. Inserción del proceso de ordenamiento hidrológico propuesto en la estructura de autoridad de cuenca. 52
Figura.13. Diagrama consolidado de fases del estudio 53
Figura 14. Dendrograma de tipos de conglomerados en las variables reguladoras de la dinámica de uso..... 66
Figura 15. Biplot de componentes principales en el modelo de transición 91-03. 67
Figura 16. Categorías del potencial erosivo en la cuenca..... 69
Figura 17. Comportamiento de la precipitación promedio mensual en la cuenca durante los escenarios analizados. 74
Figura 18. Caudales medios mensuales de Guacerique II en la estación seca..... 75
Figura 19. Caudales medios mensuales de Guacerique II en la estación lluviosa..... 76
Figura 20. Caudales medios mensuales en estaciones de aforo Batallón y Guacerique II. 77
Figura 21. Caudales medios medidos en puntos antes y después de bombas succionadoras de instalaciones militares. 79
Figura 22. Delimitación de subcuencas por SWAT, ubicación de estaciones hidrométricas existentes y de aforo generada por el modelo. 80
Figura 23. Comportamiento mensual de los caudales en la estación hidrométrica Guacerique II y los generados por SWAT contenido en el escenario de los años 80. 81
Figura 24. Comportamiento mensual de los caudales en la estación hidrométrica Guacerique II y los generados por SWAT contenidos en el escenario de los años 90. 82
Figura 25. Comportamiento mensual de los caudales en la estación hidrométrica Quiebramontes y los generados por SWAT contenidos en el escenario de los años 2000. 82
Figura 26. Comportamiento mensual de los caudales en la estación hidrométrica Guacerique II y los generados por SWAT contenidos en el escenario de los años 2000. 83
Figura 27. Comportamiento mensual de los caudales en la estación hidrométrica El Batallón y los generados por SWAT contenidos en el escenario de los años 2000. 84
Figura 28. Comportamiento de la probabilidad por punto de aforo y por estación hidrológica del año. 87

LISTA DE MAPAS

Mapa 1. Uso del suelo durante el escenario 1980. 55
Mapa 2. Uso del suelo durante el escenario 1991. 56
Mapa 3. Uso actual del suelo 2003. 57
Mapa 4. Gradiente cualitativa de los estados erosivos en la cuenca..... 70
Mapa 5. Conflictos del uso de la tierra en la cuenca. 71
Mapa 6. Gradiente cualitativa de áreas críticas o zonas de riesgo a la erosión en la cuenca..... 73
Mapa 7. Segmentación administrativa propuesta para el ordenamiento hidrológico. 89
Mapa 8. Contribución a la oferta hídrica por estación climática para unidades hidrológicas diferenciadas y representación espacial de áreas críticas identificadas. 91

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Mapa geológico..... 105
Anexo 2. Mapa de series de suelo generado durante el trabajo de investigación 106
Anexo 3. Clasificación hidrológica de las series de suelo en la cuenca. 107
Anexo 4. Mapa de ubicación de puntos de muestreo generados aleatoriamente 108
Anexo 5. Mapa de ubicación de estaciones hidro-climáticas utilizadas 109
Anexo 6. Ejemplos de técnicas de restauración hidrológica forestal. 110
Anexo 7. Mapa de ubicación de red de estaciones de monitoreo de calidad de agua..... 111
Anexo 8. Listado de instituciones participantes en comisión interinstitucional..... 112

RESUMEN

HERNANDEZ CÁCERES, AJ. 2003. Dinámica del uso de la tierra y de la oferta hídrica en la cuenca del Río Guacerique, Tegucigalpa, Honduras.

Palabras claves: Honduras, Uso de la tierra, Modelación hidrológica, Teledetección, SWAT, Producción de agua.

Los cambios multitemporales del uso de la tierra y la respuesta cuantitativa de la oferta de agua en la cuenca del río Guacerique fueron analizados. Esta cuenca provee 25% de la demanda de agua potable para Tegucigalpa a través del embalse "Los Laureles" y está sujeta a grandes presiones socioeconómicas. Mediante el uso de teledetección y cadenas de Markov se obtuvieron tres escenarios de uso (1980, 1991, 2003) y las probabilidades de transición correspondientes. El análisis estadístico de la oferta de agua fue realizado para evaluar su patrón de comportamiento durante los escenarios. Asimismo, la herramienta para la evaluación de suelos y aguas SWAT fue usada para simular el balance hídrico en cada escenario y evaluar su eficiencia de tal forma que pueda ser incluida en un proceso de toma de decisiones. Los resultados muestran que los cambios en la composición de las clases de uso ha sido significativa ($p<0,05$). La cobertura total de bosques de conífera y mixtos ha decrecido 17,14%, mientras que un patrón opuesto se da en el bosque latifoliado que incrementó 15,38%. Los usos agropecuarios y urbano-desnudos cubren un 24,42% y un 5,32% de la cuenca respectivamente. Aunque la cobertura de los bosques es de 63,41%, esta muestra un paisaje altamente fragmentado. Una prueba ANDEVA mostró que no hay diferencias estadísticas entre los promedios de precipitación de los tres escenarios. Sin embargo, la misma prueba indicó diferencias ($p<0,01$) entre los caudales promedios de la época luviosa y se encontró una tendencia hacia la disminución de los caudales de la temporada seca, desde un promedio de 0,16 m^3 s^{-1} en 1980 a un reducido 0,06 m^3 s^{-1} en 2003. Las comparaciones gráficas y los coeficientes de eficiencia en la modelación de los caudales medidos versus observados exhiben que el modelo los sobre-estima, especialmente en la época lluviosa. Por otra parte, su eficiencia disminuye cuando la evaluación comienza en estaciones aguas arriba hacia estaciones aguas abajo; comportamiento hipotéticamente inferido por las extracciones de agua que se dan para irrigación e industria en las partes bajas. No obstante, esta situación no fue integrada en la simulación por la falta de información precisa de las extracciones, ya que estas no son controladas o medidas por ninguna institución. Un enfoque metodológico para el ordenamiento territorial se propone, utilizando los resultados del modelo con las áreas críticas identificadas y el marco legal para establecer una línea base para la toma de decisiones. Considerándose que se debe dar énfasis a los aspectos de: regulación de las extracciones de agua, relaciones intermunicipales e institucionales y la concesión del servicio.

SUMMARY

HERNANDEZ CÁCERES, AJ. 2003. Land use and streamflow dynamics in the Guacerique River Watershed, Tegucigalpa, Honduras.

Key words: Honduras, Hydrologic modeling, Land use change, Remote Sensing, SWAT Streamflow.

Multitemporal land use change and quantitative water yield responses in the Guacerique River watershed were analyzed. This watershed provides 25% of the demand for Tegucigalpa's drinking water through "Los Laureles" reservoir, and it is subject to great socioeconomic pressure. Remote sensing and Markov chain techniques were used to obtain three land use scenarios (1980, 1991, and 2003) and the corresponding transition probabilities. Streamflow data analyses were conducted to assess its behavioral pattern during the scenarios. Also, the Soil and Water Assessment Tool Model (SWAT) was used to simulate the water balance in each scenario in order to evaluate its efficiency to be included in an ongoing decision-making process. Results show that changes in the composition of land use classes have been significant (p<0,05). Total coverage of coniferous and mixed forests has decreased 17,14%, whereas an opposite pattern is found in the broadleaf forest which increased 15,38%. Farming land use and urban-bare ground classes cover 24,42% and 5,32% of the watershed area respectively. Despite an actual forest coverage of 63,41%, it shows a highly fragmented landscape. An ANOVA test yielded no significant differences among rainfall averages during the three scenarios. However, the same test showed significant differences (p<0,01) among yearly streamflow averages with a descending trend in the dry season, ranging from an average 0,16 m^3 s^{-1} in 1980 to a depleted 0,06 m^3 s^{-1} in 2003. Graphical comparison and coefficients of modeling efficiency of simulated versus observed streamflow values exhibited that the model over-predicts streamflow, especially in the wet season. Furthermore, its efficiency decreases as the evaluation starts in an upstream hydrometric station to a downstream station. This behavior has hypothetically been inferred due to massive water extractions taken directly from the river for irrigation and industrial purposes, particularly in the lowlands. Nevertheless, this situation was not integrated during the simulation, due to lack of precise information as the extractions are not controlled, measured or charged by any institution. A methodological approach for an appropriate territorial planning of water resources is proposed, using the model's output with identified critical areas and a review of legal framework to establish a base-line for the decision-making process. Emphasis should be placed on aspects like water extractions regulation, inter municipal and institutional relationships and water concession.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Problema

El crecimiento demográfico, comercial e industrial de las poblaciones en los países en vías de desarrollo - usualmente no planificado – ejerce una seria presión sobre los recursos naturales, proveedores de diversos servicios ambientales (agua, oxígeno, belleza escénica). El más crítico, probablemente, es el acceso al agua para consumo humano. Las proyecciones a nivel mundial muestran un panorama desalentador, dado que en caso de no modificarse las tendencias actuales, la cantidad de agua dulce disponible por habitante será de 4800 m^3 $año^{-1}$ en el año 2025, siendo en la actualidad de 6800 m^3 $año^{-1}$ (UNESCO, 2002). Para el caso específico de Honduras, la dinámica temporal del acceso al agua muestra que en 1950 la disponibilidad era 62195 m^3 $año^{-1}$ per cápita y en 1990 de 19852 m^3 $año^{-1}$ per cápita (TRAGUA, 2002).

La presencia de fenómenos climáticos recurrentes como El Niño y la Oscilación Sur (ENOS) puede llevar la situación a estados caóticos, ya que se predisponen temporadas de sequía y/o se alteran significativamente los patrones de precipitación, en una forma tal que no permite la recuperación de las zonas de recarga acuífera. Siendo entonces, causante de diversos factores como los incendios forestales que pueden indirectamente alterar la oferta hídrica de una región.

Este problema se magnifica cuando no se establecen estrategias de corto, mediano y largo plazo para el ordenamiento territorial de las actividades en la cuenca hidrográfica. Debido a que se generan conflictos desencadenadores de procesos degradantes, cuando el uso de la tierra excede la capacidad de uso, principalmente en las zonas media y alta; mismas que son las principales áreas de recarga (Richters, 1995).

Ejemplo de este tipo de situaciones se observa en la cuenca del Río Guacerique, Honduras, que abastece la represa “Los Laureles”; proveedora del 25% de agua potable a la población de Tegucigalpa (SANAA, 2000). Esta cuenca presenta un deterioro ambiental por la tala forestal, el avance de la agricultura, los incendios forestales, la extracción de leña, el sobrepastoreo y la presión urbana (Romero y Martínez, 1990).

Lo anterior, repercute en la cantidad y calidad del agua, afectando a una numerosa población, que han enfrentado en las últimas décadas déficit críticos en la oferta hídrica recibida. Por esta razón, las autoridades encargadas del manejo del agua se ven en la obligación de poner en práctica planes de racionamiento. Esta situación se agrava año con año, en perjuicio de la población cada vez más vulnerable a la falta del agua en cantidad y calidad (Salgado, 1996).

1.2 Justificación

Tegucigalpa es la capital de Honduras, sede del gobierno central y la ciudad más poblada del país con aproximadamente 922.000 habitantes (INE, 2002). La connotación de sus problemas de escasez de agua potable afecta a la mayoría de la población todos los años, situación que se vuelve más crítica con el paso del tiempo. En este sentido, se justifica la realización de estudios conducentes a servir como instrumentos de identificación y análisis de este problema en las cuencas hidrográficas adyacentes a la ciudad; tal es el caso del Río Guacerique que abastece la represa "Los Laureles". Asimismo, los resultados del estudio pueden servir a las autoridades técnicas, políticas y administrativas como soporte para la toma de decisiones.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Evaluar los patrones de cambio temporal y espacial en el uso de la tierra y la oferta hídrica de la cuenca del Río Guacerique, Tegucigalpa Honduras.

1.3.2 Específicos

?? Determinar el uso de la tierra en un marco multitemporal de análisis que caracterice la situación actual y la dinámica de los cambios espaciales de la cuenca.

?? Identificar áreas críticas de incidencia en la oferta hídrica.

?? Analizar diferentes escenarios de uso de la tierra y la oferta hídrica resultantes de modelación hidrológica, para la definición de tendencias que se puedan utilizar en el proceso de toma de decisiones.

?? Proponer lineamientos para priorizar áreas de captación y esquemas para el ordenamiento hidrológico-administrativo en la cuenca.

1.4 Hipótesis

H_{A1}: Los patrones de uso de la tierra en la cuenca del Río Guacerique han sido significativamente dinámicos en los períodos bajo análisis.

H_{A2}: Las transiciones del uso de la tierra en la cuenca del Río Guacerique se encuentran reguladas por restricciones de carácter biofísico y socioeconómico.

H_{A3}: Los cambios en el uso de la tierra alteran el régimen de oferta hídrica de la cuenca del Río Guacerique y pueden ser simulados en el tiempo y espacio.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Conceptualización

Oferta hídrica

La oferta hídrica superficial se define como la tasa de flujo o descarga de agua por unidad de tiempo (Ej. m^3 $seg.^{-1}$) a lo largo de un canal natural. Su representación básica tradicional lo constituye el hidrograma, el cual es una gráfica o tabla que muestra la tasa de flujo como función del tiempo en un lugar dado de la corriente, por lo que es "una expresión integral de las características fisiográficas y climáticas que rigen las relaciones entre la lluvia y la escorrentía de una cuenca de drenaje particular" (Chow *et al.*, 1994). Se constituye entonces en el componente del ciclo hidrológico que transfiere el agua -que originalmente fue precipitada como lluvia o nieve sobre la cuenca o zona de captación- desde las superficies terrestres a los océanos (Mosley y McKerchar, 1993). El componente de oferta hídrica o caudal en un punto particular del canal está compuesto por (a) flujo superficial o porción de la precipitación que alcanzó el suelo y fluye sobre éste sin infiltrarse en ningún punto hasta el canal; (b) flujo sub-superficial o movimiento lateral del agua infiltrada hasta las redes hídricas superficiales; (c) flujo base o el agua que se logró percolar o fluir profundamente después de la infiltración, alcanzando los acuíferos subterráneos y liberándose gradualmente de éstos hacia los canales por contacto de los niveles o napa freática con estos últimos y; (d) agua precipitada directamente sobre los canales (Chow *et al.*, 1994; Villón 2002).

Sistemas de información geográfica SIG y Modelación hidrológica

Fedra (1993) define los SIG como "herramientas basadas en sistemas de cómputo para capturar, manipular, procesar y desplegar datos espaciales o georeferenciados. Conteniendo datos geométricos (coordenadas e información topológica) y datos de atributos o información que describe las propiedades de objetos geométricos como puntos, líneas y áreas". Considerando que los SIG proveen representaciones de las características espaciales de la tierra, que la modelación hidrológica se ocupa de los flujos de agua y sus constituyentes sobre la superficie terrestre y el ambiente subsuperficial; existe entonces, una obvia y cercana conexión entre ambos (Maidment, 1993). En este

contexto, el autor explica que los SIG proveen a los modelos hidrológicos el potencial de incrementar el grado de definición de las subunidades espaciales en número y detalle descriptivo. Asimismo, este enlace permite la evaluación de procesos a escalas regionales o continentales cuya hidrología no podría haberse modelado de otra forma.

Dinámica temporal y espacial del uso de la tierra

La magnitud de los cambios en el uso de la tierra varía con el período de análisis y con el área geográfica. Asimismo, las evaluaciones de estos cambios dependen de las fuentes, las definiciones de tipos de uso, las agrupaciones espaciales y los datos usados (Briassoulis, 2001). La autora hace referencia a los propósitos de análisis multitemporal de cambios en el uso de la tierra, entre los cuales están:

a. Explicar por que ocurren los cambios y la descripción de los factores o fuerzas que producen estos cambios directa o indirectamente;

b. Predicción de cambios futuros o tendencias en el uso de la tierra, indicando que estas predicciones pueden ser: incondicionales o en caso de continuar las tendencias actuales y condicionales en las que se proponen condiciones hipotéticas del uso de la tierra;

c. Evaluación de impactos ambientales y socioeconómicos en varios niveles espaciales;

d. Proponer patrones de uso de la tierra para alcanzar un fin determinado (preservación ambiental, prosperidad económica, equidad social, etc.);

e. Evaluación de cambios en patrones (pasados, presentes o futuros) del uso de la tierra en término de ciertos criterios como la degradación ambiental, declinación económica o pobreza social. Estas evaluaciones pueden ser usadas para sugerir alternativas de uso.

2.2 Dinámica de uso de la tierra versus producción de agua

En el contexto de los efectos de la cobertura o uso de la tierra sobre la oferta hídrica, Bruijnzeel (1991) expone acerca del rol que desempeña el bosque, sus suelos y el humus presente en un área de captación, interactuando como esponjas al absorber el agua durante las estaciones lluviosas y liberándola gradualmente durante las épocas secas. Expresa asimismo, que aunque los suelos con cubierta forestal tienen más capacidad de infiltración y almacenamiento que otras coberturas, mucha del agua será interceptada por los árboles y evaporada en lugar escurrir superficialmente, sin contribuir a las reservas hídricas del suelo. Describe como la remoción de bosques húmedos tropicales ha

resultado en incrementos del caudal total durante los primeros tres años que van desde 125 – 820 mm año^{-1} después de la tala; afirmando que el aumento en el rendimiento hídrico es proporcional a la fracción de biomasa removida, tendencia observada en estudios realizados en cuencas pareadas.

Nik (1988) analizó los cambios durante 9 años (1977 – 1986) en la producción de agua como resultado de convertir bosques a usos agrícolas en cuencas pequeñas de Malasia peninsular. Después de un período de toma de datos y calibración de 5 años en que las tres cuencas de estudio presentaban bosque, éste fue cambiado por cultivos agrícolas (cacao y palma de aceite) en dos de las cuencas, sirviendo la tercera de testigo. Los resultados mostraron incrementos significativos del rendimiento hídrico en las dos cuencas tratadas (157% y 470%) después de dos años de la intervención, haciendo la salvedad que existieron períodos con precipitaciones más altas que el promedio y que las intervenciones en las dos cuencas no fueron simultáneas y no se establecieron los dos cultivos en cada una. El autor hace referencia a las implicaciones que este tipo de conversión o dinámica de uso tiene sobre el manejo del agua; indicando que aunque grandes cantidades de este líquido se hacen disponibles para otros usos en la cuenca, los impactos y degradación ambiental que representa (altas tasas de erosión, sedimentación y baja calidad del agua), deben tomarse en cuenta y evaluarse antes de ponderar los beneficios incrementales en la oferta hídrica.

Un análisis del impacto que traen los aprovechamientos forestales y preparación de sitios previo a la plantación con coníferas es presentada por Swindel *et al*. (1983), encontrándose incrementos inmediatos en los flujos superficiales por evento lluvioso. Sin importar la técnica de corte de los árboles (mecanizado o manual). Los incrementos fueron explicados por (a) disminución de la capacidad del suelo para almacenar agua; (b) interrupción del proceso de infiltración e (c) incremento del área de escorrentía. La comparación de balances hídricos de *Eucalyptus sp*. y *Pinus radiata* en Australia es analizada por Feller (1981) quien estimó las pérdidas por evapotranspiración como menores en los eucaliptos y revisó que menos agua alcanzaba el suelo mineral bajo los

pinos por su alta intercepción, en estas condiciones, él sugiere que los reemplazos de bosques de eucalipto por pino llevará a un declinamiento en la producción de agua.

La reforestación de áreas degradadas o dedicadas anteriormente a usos agrícolas o ganaderos presenta por lo general un decrecimiento de los caudales totales; esencialmente si se utilizan especies exóticas de rápido crecimiento. Se han registrado disminuciones de 100 – 200 mm año^{-1} en zonas con rangos altitudinales de 1500 – 2000 msnm, sin embargo, es de prever reducciones más pronunciadas en las tierras bajas (Bruijnzeel, 1991). El autor expone que la sustitución de la vegetación natural por especies exóticas como *Eucalyptus sp*, no debe ser realizada en depresiones o a lo largo de los cursos de agua especialmente si tienen contacto con la capa freática. Los resultados obtenidos por Bosch y Smith (1989) en Transvaal, Sudáfrica, refuerzan estas implicaciones; al cambiar bosques de chaparral en un 83% del área bajo estudio por plantaciones de *Eucalyptus sp* causó una disminución del 48% del flujo medio antes del tratamiento. Lo anterior se explica por los mayores niveles de intercepción y por el mayor consumo hídrico de la especies plantadas en comparación con vegetación herbácea común en sistemas agropecuarios; situación que puede conllevar a déficit (Galloso e Iroume, 1995). Se puede considerar que la producción de agua aumentará con: (a) la remoción o raleo de los bosques, (b) la conversión de la vegetación de especies de raíces profundas a especies de raíces superficiales y (c) el cambio de la cobertura vegetativa de especies con altas capacidad de intercepción a especies de baja capacidad (Brooks *et al.*, 1991).

El humus del suelo condicionado por el microclima del bosque y la ausencia de usos intensivos facilita el proceso de infiltración del agua y regula su percolación a capas más profundas del suelo. Esto es importante ya que previene la acumulación y flujo superficial excesivo que desencadena en procesos de arrastre de sedimentos o erosión (De Las Salas, 1987; Stadtmüller, 1994). El fuego puede tener un impacto importante en las tasas de infiltración; Hudson *et al.* (1983) evaluaron la respuesta de la escorrentía superficial y la pérdida de suelo en un rodal de *Pinus oocarpa* en la región central de Honduras, a las quemas prescritas en diferentes rangos de pendiente, encontrando una tasa de escorrentía media como porcentaje de la precipitación total de 1.73% en las

parcelas testigo y 5.03% en las quemadas; la pérdida promedio de suelo interpolada durante el mismo período fue de 40 kg ha $^{-1}$ año^{-1} en las parcelas testigo y 887 kg ha $^{-1}$ año^{-1} en las quemadas.

La gravedad del impacto que la carga excesiva de sedimentos puede provocar en un reservorio es presentada por Chávez *et al*. (1987). El estudio trata sobre el embalse El Níspero en el occidente de Honduras y la pérdida de su capacidad de almacenamiento y poder de generación hidroeléctrica. Debido al sobre uso experimentado en la cuenca, la tasa de sedimentos se calculó en cinco veces superior a lo esperado durante los primeros 3.5 años de funcionamiento, redundando en una pérdida de captación útil de 231.000 m³. Es obvia la implicación económica para el país que este tipo de problemas acarrea.

Más importante que los aumentos o decrecimientos de la oferta hídrica es la consideración del régimen estacional de los flujos superficiales, especialmente en la época seca. Desde la perspectiva del balance hídrico, si las oportunidades de infiltración después de la deforestación han decaído a un extremo que el incremento del agua que deja el área de captación como escorrentía excede el aumento en la recarga de agua subterránea asociada con la transpiración reducida, entonces una disminución del flujo superficial de la época seca resultará (Sandströn, 1998; Bruijnzeel, 1989). Las intervenciones en los trópicos secos pueden romper el balance que existe entre las propiedades hidráulicas del suelo, las intensidades de lluvia y la topografía. Por lo general los suelos se caracterizan por texturas finas y contienen poca materia orgánica y son susceptibles a la erosión y degradación cuando se expone a precipitaciones intensas. Si el balance se rompe por alteraciones en el paisaje, generará un incremento en la escorrentía que incide en una reducción de la infiltración, menos recarga de agua subterránea y pérdida de las fuentes de agua para la época seca (Sandströn, 1998).

Brooks *et al.* (1991) exponen la relevancia de que aunque la deforestación incide por lo general en un aumento de la producción de agua, se debe ser cuidadoso en la respuesta cuantitativa temporal de los flujos. A este respecto exponen varios puntos: (1) la remoción del bosque o su cambio por plantas con pérdidas anuales bajas de transpiración

e intercepción puede incrementar la magnitud de los picos de caudal o volúmenes muy altos en cortos períodos; (2) las actividades que reducen la capacidad de infiltración de los suelos, como el pastoreo intensivo, construcción de caminos y el aprovechamiento forestal pueden aumentar la escorrentía; por ende el flujo de las corrientes responde mucho más rápidamente a los eventos de precipitación en forma de picos de descarga más altos en menos tiempo; y (3) las intervenciones antropogénicas descritas anteriormente, al romper el balance, inciden en que el volumen de agua durante los períodos de estiaje (verano), sea más bajo que el encontrado en zonas forestadas.

Las implicaciones del análisis estacional de los caudales para la cuenca del río Guacerique son explicadas por Quezada (1986). El autor plantea que por las condiciones climáticas y geomorfológicas de la cuenca, el manejo debe ejecutarse cuidadosamente, ya que la distribución de caudales entre el período de lluvias y la estación seca es muy marcada, los coeficientes de escorrentía muy bajos y los aportes de caudal base muy reducidos. Asimismo, enfatiza en que lo anterior hace que las obras de aprovechamiento hidráulico sean muy costosas ya que requieren una muy buena regulación, haciendo físicamente necesario contar con grandes volúmenes de almacenamiento para lograr una buena regulación de flujos durante la época lluviosa; implicando mayor potencial de inundaciones y de arrastre de sedimentos.

En un contexto general, Bruijnzeel (1991) considera que la mayoría de los estudios realizados corresponden a áreas de captación relativamente pequeñas y con un cambio unidireccional (cambio de un uso a otro sin volver al anterior). Aunque proveen datos sobre reducción ó incremento de los flujos totales y su estacionalidad, los mismos efectos son muy difíciles de discernir en cuencas más grandes que incluyen una variedad de usos de la tierra en diferentes estados vegetativos (variación espacial). En este mismo orden de ideas, Sandströn (1998) hace énfasis que cualquier cambio en el paisaje de las cuencas (de o reforestación) tendrá efectos hidrológicos positivos o negativos basados en el tiempo (variación temporal), por lo que los efectos completos tomarán mucho tiempo para ser visualizados apropiadamente.

2.3 Uso de modelos físicos para evaluación de la oferta hídrica

Los modelos hidrológicos físicos basados en programas de computadora han sido diseñados para el estudio de las ofertas hídricas superficiales, subterráneas o ambas. El funcionamiento de estos modelos consiste principalmente en el análisis en tiempo de toda la precipitación que cae en la cuenca y el movimiento del agua hasta su salida o punto de aforo. Durante los períodos secos, se analiza el agotamiento del agua almacenada en la cuenca, con énfasis en la humedad del suelo, evapotranspiración y flujos sub-superficiales de las zonas de recarga subterránea. En este contexto, se analiza los parámetros que describen los procesos hidrológicos (precipitación, evapotranspiración, infiltración, escurrimientos superficiales, sub-superficiales y subterráneos) y su variación espacial, que gobiernan el movimiento del agua a través de su permanencia temporal en la cuenca. Esta variabilidad es modelada a través de la segmentación de la cuenca en microcuencas individuales y la prescripción o respuesta de las características hidrológicas (tasas de evapotranspiración diferentes por tipo de cobertura vegetal, tipos de suelos, factores fisiográficos, entre otras) de los procesos anteriormente mencionados (DeVries y Hromadka, 1993).

Los modelos hidrológicos de base física requieren gran cantidad de datos en su proceso de ajuste a las condiciones locales para que su resultado sea similar al observado en campo y puedan efectuarse simulaciones o predicciones (DeVries y Hromadka, 1993). Por lo anterior, estos modelos en lugar de incorporar ecuaciones de regresión teóricas para describir las relaciones hidrológica en una cuenca, requieren información específica del clima, propiedades del suelo, topografía, vegetación y prácticas de manejo de la tierra que ocurren en la zona de captación en estudio; entonces, los procesos físicos asociados con el movimiento del agua y sedimentos, cultivos, ciclaje de nutrientes, etc, son modelados directamente al usar la información antes mencionada (Arnold, 2001).

Sin embargo y por lo general, la información no está disponible por su costo y dificultad de adquisición. En este sentido, el factor de escala se constituye en una barrera para su aplicación, ya que este “no sólo está relacionado con el costo de la recopilación de datos para la calibración de los modelos, sino que es también fundamental para la capacidad de

extrapolar principios útiles de ordenación que puedan aplicarse a zonas más amplias" (FAO, 1998). Debido a que los resultados del modelo son aplicables a nivel de cuenca; donde los factores ambientales como suelo o precipitación presentan una gran variabilidad espacial, que incide en la precisión, ésta dependerá de la confiabilidad de los datos y del grado en que la estructura del modelo se ajuste o represente apropiadamente los procesos hidrológicos particulares (DeVries y Hromadka, 1993).

Este tipo de modelos se utilizan en combinación o como interfaces de sistemas de información geográfica (SIG´s) para la evaluación de la producción hídrica en cantidad y calidad en diversos marcos temporales (días, meses, años) y espaciales (cuencas, subcuencas, microcuencas). En este contexto, "los SIG´s proporcionan un marco integrador para los modelos, ya que organizan la información espacial, permiten que sea desplegada como mapas, tablas o gráficas. Asimismo, proveen técnicas para analizar información del paisaje (uso de la tierra, suelos, focos contaminantes, captación de agua, etc) y las relaciones que existen en el mismo y que afectan de una u otra manera la producción de agua en cantidad y calidad" (EPA, 2000).

La literatura consultada es abundante en referencia a las aplicaciones que han sido desarrolladas en países con altos niveles de desarrollo económico y que cuentan con suficientes bases de datos físicos – geográficas para la aplicación de los modelos. Esto ocurre por lo general en zonas templadas, con menor incidencia en cuencas hidrográficas tropicales. No obstante, el Instituto Nacional de Ecología en México (2001) reporta la utilización del modelo SWAT en la evaluación ambiental comparativa de dos sitios considerados para la ubicación del nuevo aeropuerto internacional de la Ciudad de México. Debido a la no disponibilidad de datos sobre la topografía y secciones transversales de los cauces, se utilizó SWAT para predecir el incremento en el escurrimiento superficial ocasionado por los cambios en el uso del suelo, mediante la comparación de diversos escenarios espaciales de área urbana. De esta forma, partiendo del análisis de los resultados sobre aumentos o disminuciones de escorrentía total, se pudo reconocer con antelación zonas críticas y verter recomendaciones técnicas.

Ayala (2001) utilizó el mismo modelo en la cuenca del río Khenko Mayu, provincia de Cochabamba, Bolivia. El autor realizó un ejercicio para la estimación de caudales futuros disponibles para riego, una vez que se finalizara la construcción de tres represas sobre el río. Para su ejecución, se calibró el modelo en un escenario "sin proyecto" o previo a la construcción de las obras físicas, de tal forma que el resultado de escurrimiento proporcionado por el modelo fuera similar o con pequeñas variaciones a las reportadas por registros históricos de caudales. Con el modelo calibrado, se procedió a evaluar diversos escenarios futuros de uso de la tierra y prácticas de manejo en la cuenca que permitieran analizar el comportamiento de los caudales con el proyecto operando en un 100%. Asimismo, determinó los excedentes hídricos en épocas de estiaje que permitan la implementación de una potencial nueva zona de riego, las implicaciones técnicas para facilitar la eficiencia del sistema y la ponderación de probables problemas con las respectivas recomendaciones para su solución.

Cooke *et al*. (2002) describen las virtudes del SWAT como una versión mejorada de SWRRB Simulator for Water Resources in Rural Basins (Simulador de recursos hídricos en cuencas rurales); entre las que se pueden mencionar: (a) simulación simultánea de hasta 2500 subcuencas, (b) simulación mejorada del movimiento lateral del agua subterránea y de acuíferos superficiales, (c) simulación del movimiento de sedimentos y de químicos a través de ríos y reservorios y (d) poder de conexión con otros modelos para la evaluación de focos puntuales de contaminación. Los autores enfatizan en la necesidad de observar la aplicabilidad de los modelos en cuanto a que los datos de entrada requeridos puedan ser obtenidos y los resultados del modelo puedan ser evaluados para compararlos a los datos observados en campo. Asimismo, exponen que este grado de aplicabilidad dependerá de cómo el modelo representa las propiedades espaciales y temporales de los parámetros de la oferta hídrica. También, explican que los datos de entrada deben cuantificar apropiadamente las condiciones del área de estudio y que en caso de no ser disponibles, deben ser colectados en programas de monitoreo o estimados de la literatura existente y relacionada al sitio de estudio. En cuanto al análisis de los resultados del modelo, sugieren que estos deben ser evaluados gráfica y estadísticamente para ver que tan cerca están de los datos observados en campo, exponiendo que aunque

los modelos son aproximaciones matemáticas de los procesos hidrológicos naturales, éstos son afectados por fenómenos naturales y por lo tanto, nunca representarán exactamente todos los procesos que afectan la oferta hídrica.

En Colombia se reporta el desarrollo del modelo de balance hídrico espacial (SWBM por sus siglas en inglés Spatial Water Budget Model) por Luijten *et al.* (2000). Los autores utilizaron este modelo como parte de una metodología para evaluar la respuesta de la disponibilidad de agua y su uso bajo diferentes configuraciones del paisaje en la cuenca del río Cabuyal (3246 ha) en la zona de los Andes. La simulación de la escorrentía u oferta hídrica obtuvo una muy buena correspondencia con las mediciones de campo. El estudio comprendió asimismo, la simulación de tres escenarios (bosque, cultivos anuales y suelo desnudo) y su impacto en la producción de agua, encontrándose respuestas hidrológicas muy diferentes para cada cambio de uso de la tierra. En referencia a los estudios que se realizan en zonas tropicales de laderas, mismas que tienen patrones hidrológicos muy distintos a las zonas templadas, los autores indican que, los modelos deben cumplir con al menos cinco requisitos:

?? Debe poseer parámetros de modelación distribuida para la simulación continua;
?? Adaptarse a la abrupta topografía de las cuencas de laderas en América Latina;
?? Capacidad para delinear los cursos de los ríos y quebradas ;
?? Simular embalses, ya que son considerados factores para el desarrollo en la región y;
?? Requerir pocos datos, ya que en Latinoamérica son poco disponibles.

2.3.1 El modelo SWAT

SWAT es el acrónimo en inglés para Soil and Water Assessment Tool. La siguiente descripción básica del modelo se obtuvo de Chanasyk *et al*., 2003; Di Luzio *et al*., 2002 y Neitsch *et al*., 1999.

Para la modelación, SWAT divide la cuenca en subcuencas, al hacerlo se diferencian áreas lo suficientemente diferentes en suelos o usos para impactar la hidrología del área de estudio. La información para cada subcuenca se agrupa u organiza en categorías de clima, unidades de respuesta hidrológica URH, reservorios, agua subterránea y el cauce

principal. Las URH son áreas que comprenden características únicas de cobertura de la tierra, tipo de suelo, topografía del terreno y condiciones de manejo. La base conceptual del modelo para indicar lo que pasa en la cuenca es predecir el comportamiento del ciclo hidrológico. Los procesos principales se dividen en dos etapas: fase terrestre y la fase hídrica o de desplazamiento.

Fase terrestre: En esta etapa el modelo calcula la cantidad de agua, sedimentos y concentraciones de nutrientes que son descargadas al cauce principal procedentes de cada subcuenca. Los insumos necesarios son: datos de precipitación diarios, uso de la tierra, tipos de suelos, modelo digital de elevación y red hidrológica. El ciclo hidrológico es simulado por SWAT basado en la ecuación del balance hídrico:

$$SW_t ? SW_o ? ? \sum_{i?1}^{t} (R_{day} ? Q_{surf} ? E_a ? W_{seep} ? Q_{gw}) \qquad (1)$$

Donde SW_t es el contenido final de agua en el suelo(mm H_2O), SW_o es el contenido inicial de agua y suelo en el día *i* (mm H_2O), t es el tiempo (días), R_{day} es la cantidad de precipitación en un día *i* (mm H_2O), Q_{surf} es la cantidad de escorrentía superficial en un día i (mm H_2O), E_a es la cantidad de evapotranspiración en un día *i* (mm H_2O), W_{seep} es la cantidad de agua entrando la zona vadosa en un perfil del suelo en un día *i* (mm H2O), y Q_{gw} es la cantidad de flujo de retorno en un día *i* (mm H_2O).

La subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar diferencias en evapotranspiración para varios cultivos y suelos. La escorrentía se estima separadamente para cada URH y puesta en ruta para obtener la escorrentía total de la cuenca. Esto incrementa la precisión y da una mejor descripción física del balance de agua. El volumen de escorrentía superficial se calcula usando una modificación del método de número de curvas SCS (Sevicio de Conservación de Suelos USDA) o el método de infiltración Green & Ampt. En el método de número de curvas, las curvas varían de manera no lineal con el contenido de humedad del suelo. El método Green & Ampt requiere datos de precipitación diaria y calcula la infiltración como una función matriz potencial y conductividad hidráulica efectiva. Así, el agua que no logra infiltrarse se convierte en escorrentía superficial. El modelo hidrológico ofrece estimados de volumen de

escorrentía y tasas máximas de escorrentía, las cuales, con el área de la subcuenca, son usados para calcular la variable de energía erosiva de la escorrentía. El factor de manejo de cultivos es recalculado cada día que la escorrentía ocurre.

Fase hídrica: Esta fase comprende el movimiento del agua, sedimentos, etc. A través de la red de canales o cauces en la cuenca hasta su salida o punto de aforo. El Desplazamiento en el cauce principal puede dividirse en cuatro componentes: agua, sedimentos, nutrientes y químicos orgánicos.

Agua: Con el flujo del agua pendiente abajo, una porción puede perderse debido a evaporación y transmisión a través del lecho del cauce. Otra pérdida potencial se debe a la remoción del agua del cauce para uso agrícola o humano. El caudal puede ser suplementado por la lluvia caída directamente sobre el cauce y la proveniente de fuentes puntuales. El flujo es dirigido a través del cauce usando un método variable de coeficientes de almacenamiento.

Sedimentos: El transporte de sedimentos en el cauce es controlado por la operación simultánea de dos procesos: deposición y degradación. El SWAT utiliza ecuaciones simplificadas y la cantidad máxima de sedimentos que puede ser transportada desde un segmento es una función de la velocidad máxima del cauce. La energía de la corriente disponible es usada para reentrar el material suelto y depositado hasta que todo el material sea removido. El exceso de energía de la corriente causa degradación del lecho del cauce. La degradación del lecho es ajustada por la erodabilidad del lecho de la corriente y su cobertura.

En el presente estudio, la escorrentía fue estimada usando el método SCS. Este estipula que el cálculo:

$$Q ? \frac{(R ? 0.2s)^2}{(R ? 0.8s)}, R ? 0.2s \qquad (2)$$

$$S ? 254\frac{(100)}{(CN)} ? 1 \qquad (3)$$

Donde: Q = Escurrimiento diario, R = Lluvia diaria, S = Parámetro de retención en mm y CN = Número de la curva.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

3.1.1 Ubicación

La cuenca del Río Guacerique es de segundo orden, pertenece al sistema de la Hoya de Tegucigalpa o cabeceras del Río Choluteca que drena al Océano Pacífico (SAG, 1989). Se encuentra localizada al oeste de Tegucigalpa, Honduras, entre las coordenadas 87°12´24´´ y 87°26´19´´ Longitud Oeste; 14°01´09´´ y 14°09´19´´ Latitud Norte, tiene una superficie de 194,08 km² hasta el sitio de aforo definido en el presente estudio o salida del embalse Los Laureles. Pertenece al ámbito territorial de los municipios del Distrito Central (83,74%) y Lepaterique (16,26%), Departamento de Francisco Morazán, Honduras.

Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Guacerique, Honduras.

3.1.2 Fisiografía

La topografía es característica de tierras de ladera con una pendiente promedio ondulada, la máxima elevación es de 2000 msnm y la mínima de 1.020 msnm, elevación media de 1.420 msnm. A continuación, un detalle de la configuración del terreno en la cuenca, derivado del análisis del modelo digital de elevación.

Cuadro 1. Distribución fisiográfica porcentual en la cuenca

Clase de Inclinación	Area Km^2	Porcentaje
Menor que 15 %	84,40	43,49
De 15 a 30 %	62,58	32,24
De 30 a 45 %	31,33	16,14
De 45 a 60 %	11,85	6,11
Mayor que 60 %	3,92	2,02

3.1.3 Clima

El régimen climático se caracteriza por una época seca de diciembre a abril y una lluviosa de mayo a noviembre, siendo lo meses más húmedos junio y septiembre y el período de enero a marzo el más seco; la precipitación promedio anual es de 1.142 mm y la temperatura media de 18,5 ºC (Quezada, 1986).

3.1.4 Geología y suelos

La digitalización del mapa de unidades estratigráficas (IGN, 1993) muestra que la composición geológica de la cuenca está mayormente compuesta de la formación Padre Miguel (72,7%) que consiste principalmente de rocas volcánicas piroclásticas ácidas, comprendiendo sucesiones de ignimbritas interstratificadas con sedimentos fluviales y lacustres del Mioceno. Los aluviones, planicies de inundación y coladas de basaltos cubren el 24,12% de la superficie, radicando su formación en el período Cuaternario. En el resto del área se encuentra la formación Matagalpa (2,91%) con base en el Oligoceno que consiste de series de coladas andesíticas muy alteradas; así como Cuerpos de agua (0,27%) con una laguna formada sobre un cono de basalto en volcán extinguido del Cuaternario (Laguna El Pedregal) y un embalse artificial (Embalse Los Laureles) sobre ignimbritas con una matriz de fracturación intensa y vertical (IGN, 1990; IGN, 1993). Ver anexo 1. De acuerdo a la información revisada (Komives *et al*., 1986) y el estudio de campo ejecutado durante el desarrollo del presente estudio, se determinó que los suelos en la cuenca corresponden a las series de Milile, Ojojona, Yauyupe, Salalica, Chandala, Cocona y Suelos del Valle. Siendo característicos por el tipo de pendientes onduladas a fuertes, profundidad efectiva limitada a excepción de la serie Milile y restricciones variadas por estructura, drenaje, humedad, pedregosidad para los usos agrícolas. La descripción hidrológica de las series puede verse en el anexo 3, el mapa resultante del

trabajo de campo en el anexo 2. Para ver las características edafológicas de las series se puede consultar a Simmons (1969) y FHIS (2002).

Cuadro 2. Series de suelo en la cuenca

Serie de Suelo	Area (ha)	Porcentaje
Chandala	169,29	0,87
Cocona	3287,52	16,94
Milile	3974,67	20,48
Ojojona	3780,36	19,48
Salalica	7294,59	37,58
Suelos de Valle	827,55	4,26
Yauyupe	75,69	0,39

3.1.5 Red hídrica

El drenaje superficial en la cuenca del Río Guacerique se presenta de forma dendrítica; modelo que se caracteriza "por una ramificación irregular de corrientes tributarias que recuerda al modelo ramificado de un árbol caducifolio" (Tarbuck y Lutgens, 2000). Estos autores mencionan que los modelos dendríticos se forman donde la roca subyacente es relativamente uniforme como en las rocas ígneas masivas o estratos sedimentarios planos. La red hídrica en la cuenca está conformada por varias corrientes principales:

Cuadro 3. Red de drenaje superficial y características

Corriente	Area de drenaje (ha)	Densidad de drenajes (km/km^2)	Elevación media (msnm)	Pendiente Media (%)
Guaralalao	4408,08	0,76	1309	21
Quiscamote	3220,48	0,64	1460	20
Quiebramontes	2928,64	0,81	1420	23
Guajire-Mateo	4221,12	0,87	1461	19
Guacerique bajo	4629,68	0,90	1080	18

3.1.6 Caracterización socioeconómica básica

De acuerdo al XVI Censo de Población y V de Vivienda del INE (2002) existen en la cuenca 49 asentamientos humanos o caseríos. La población alcanza la magnitud de 10.168 habitantes de los cuales el 51,42% es del sexo masculino y el resto 48,58% femenino. La composición de la población por edades registra una alta proporción (53,7%) en estado juvenil menor que 20 años, un 36,6% entre las edades de 20 a 50 años y el resto (9,7%) en edades superiores a los 50 años. Se cuenta con 2.313 viviendas, de

las cuales el 80,76% (1.868) están ocupadas permanentemente, resultando en una densidad promedio de 5,44 personas por vivienda. Las fuentes de energía para cocción de alimentos está fuertemente sesgada hacia el uso de leña (79,39%) y electricidad (12,20%), el resto (8,41%) utiliza otras fuentes como kerosene, gas lpg y otros. El acceso al agua en las viviendas ocupadas es surtido de diferentes fuentes: tubería, pozo, bomba, directa del río, provista por vendedores y otros (figura 2).

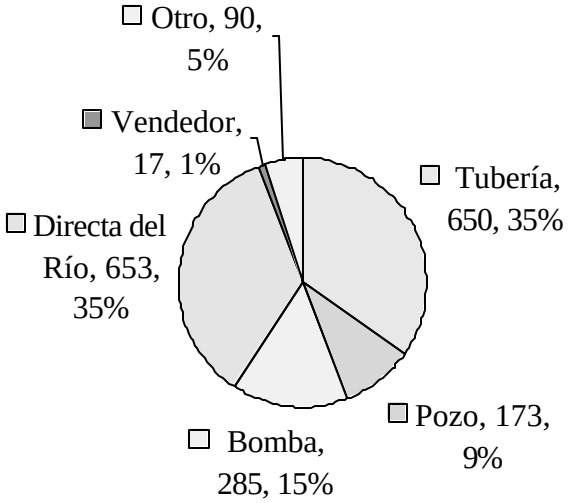


Figura 2. Suministro de agua (magnitud, porcentaje) por tipo de fuente en las poblaciones de la cuenca.

Los servicios sanitarios son diversos. La gran mayoría utiliza letrinas con pozo simple (49,4%), una gran proporción afirma **No** tener (28,71%). El resto utiliza pozos sépticos (15,26%), alcantarillados (5,61%) y descargas directas al río (0,99%). El grado de alfabetismo en la cuenca alcanza el 76,29%. De esta población con capacidad para leer y escribir, la gran mayoría (82,22%) sólo había participado hasta un grado de primaria y un 12,98% a uno de secundaria. La asistencia a educación técnica suma un 0,62% y la universitaria un 4,17%. En otro contexto, la población económicamente activa empleada alcanza la proporción de 3.421 o un 33,64%. De ésta, dos fuentes de empleo acogen una gran masa; la privada (37,33%) y la independiente (37,27%). El resto se desempeña en algún tipo de entidad pública (9,7%), familiar (7,13%) y otros domésticos (8,56%).

La red vial se extiende por aproximadamente 65,38 km, de los cuales aproximadamente 8,5 km son pavimentados, 16,2 km son afirmados sólidos transitables todo el tiempo y el resto 40,6 km son vías transitables únicamente en verano (IGN, 1991). El cubrimiento de la red telefónica es de 294 abonados o un 15,26% del total de viviendas (INE, 2002).

3.1.7 Carácter legal de la cuenca

La importancia de la cuenca del Río Guacerique como zona productora de agua para Tegucigalpa y las implicaciones de contar con un marco legal que ampare la protección de sus recursos naturales fue definida desde principios de los años 70. En este contexto, la totalidad del área de la cuenca cuenta con una categoría de "Zona Forestal Protegida" ZFP, estipulada en el decreto 72 de Junio de 1972. Esta categoría, según la Ley Forestal se refiere a las "zonas de gran importancia para la conservación del paisaje, de las aguas o de los suelos, de manera que se permita solamente un aprovechamiento limitado según planes de ordenación forestal". Se cuenta también con el respaldo del acuerdo 03 de Enero de 1973 que recapitula su estatus y señala disposiciones de cooperación interinstitucional entre el Servicio Autónomo de Acueductos y Alcantarillados SANAA como ente encargado de su manejo y la Administración Forestal del Estado AFE-COHDEFOR encargada de su custodia. Por otra parte, se cuenta con diferentes artículos contenidos en la Ley Forestal vigente de 1971, artículos del decreto 87-87 de Julio de 1987 y el artículo 33 de la Ley General del Ambiente. En este orden de ideas, la nueva "Ley Marco del Sector Agua Potable y Saneamiento" que se aprobó en Julio de 2003 replantea que el manejo de bs sistemas de agua a cargo del SANAA, serán transferidos gradualmente a las Municipalidades correspondientes que expresen voluntad y estén en condiciones de asumir su operación. Para el caso específico de la Cuenca del Río Guacerique, se prevé que este proceso de traspaso dure aproximadamente 5 años, período durante el cual, el SANAA dará asistencia a las municipalidades para su capacitación en aspectos técnicos y administrativos relacionados con la operación de los servicios.

3.2 Recopilación de información y procesos

Para el presente trabajo fue necesario recopilar diferentes tipos de datos, mismos que dependían del objetivo específico o actividad macro a la cual aportaban. En este contexto, se identifican 3 grupos a los cuales la información generada y los procesos contribuyeron:

- ?? Datos y procesos requeridos para analizar patrones de uso de la tierra
- ?? Datos y procesos para la identificación de áreas críticas
- ?? Datos y procesos necesarios para efectuar la modelación hidrológica

3.2.1 Patrones de uso de la tierra

3.2.1.1 Captura de información base

Se analizaron tres escenarios de uso que dependieron de la disponibilidad de información confiable, grado de detalle, espaciamiento temporal uniforme y cobertura total de la cuenca. La cobertura temporal comprende un período de 22 años. No fue posible obtener información previa al escenario de 1980, dada la carencia de levantamientos aerofotogramétricos que tuvieran completa cobertura.

Cuadro 4. Información básica de los escenarios analizados

Escenario	Escala de trabajo	Tipo de sensor	Observaciones
1980	1:20.000	Fotografías pancromáticas aéreas de los años 1975, 1977 y 1979	Contexto de elaboración Proyecto Macizo Central AFE-COHDEFOR. Comprobación de campo en 1980.
1991	Resolución de píxel 30 metros	Imagen satelital Landsat TM Path.18 Row 50. Abril de 1991.	Proyecto de Plan de manejo Maestro Cuenca Río Guacerique SANAA. Comprobación de campo en 1990-91.
2003	Resolución de píxel 30 metros	Imagen satelital Landsat TM Path.18 Row 50. Marzo del 2000.	Definición de clases y comprobación de campo en estación seca de 2003.

La captura de información en el primer escenario (1980) requirió homogenizar o delimitar las clases de uso consideradas para este estudio; dado que la clasificación original era numerosa, consistiendo en un proceso de reducción del número de clases. Los mapas ya preparados y las fotografías aéreas fueron escaneados con un mínimo de resolución de 450 ppi. Los archivos de imagen fueron vectorizados automáticamente con el software Raster2Vector 3.4, lo cual redujo considerablemente tiempos empleados en digitalización manual y los errores que esto acarrea. Los datos de salida fueron archivos en formato DXF. Estos fueron exportados al formato de shapefile propio de Arcview 3.3, donde fueron georectificados tomando como base confluencia de ríos, picos de elevación e intersección de caminos, lográndose un error RSM máximo de 1,7 m; proceso ultimo realizado con la extensión ShapeWarp. Los archivos fueron finalmente sometidos a un proceso exhaustivo de edición y exportados a formato de cobertura de Arc info para generar su condición topológica y adición de atributos.

El mapa de uso para el escenario del 2003 consistió en el tratamiento de una porción de la imagen satelital con información de 7 bandas del espectro electromagnético, la cual fue tratada utilizando el software Erdas Imagine 8,5, siendo georeferenciada utilizando un algoritmo de corrección con un polinomio de segundo grado. A partir de la imagen, se generó una clasificación no supervisada con el algoritmo isodata, el cual produce repetidamente o itera una clasificación entera y recalcula las estadísticas descriptivas, usando la fórmula de mínima distancia espectral para formar conglomerados. Después de una serie de iteraciones que concluyen cuando el máximo número de éstas se alcanza o se llega al máximo porcentaje de píxeles sin cambio entre 2 iteraciones, produce una imagen de una sola banda de tipo temática con el número de clases requeridas (Erdas, 1999).

Para este estudio, se indicó diferenciar un número arbitrario de 15 clases y un umbral de convergencia del 95%, con lo que se pudo llevar a cabo una evaluación en campo. Así, se pudo aprobar la pureza de la clasificación y tomar muestras de las diferentes clases de uso que se planificaron discriminar mediante la utilización de un geoposicionador. Terminado el proceso de reconocimiento preliminar de campo, se procedió a generar una clasificación supervisada, utilizando un mínimo de 20 firmas espectrales por clase de uso a discriminar. La imagen resultante de tipo temático, fue llevada a campo para comprobar el grado de precisión o aciertos. De esta forma se identificaron zonas o clases de uso cuyo porcentaje de aciertos: ([estimado/observado] * 100) no era apropiado (menor que 90%). Este problema se solucionó considerablemente aumentado el número de firmas espectrales en aquellas clases con pocos aciertos. Una vez que se corrieron diferentes clasificaciones, la evaluación de criterios como separabilidad y contingencia (Erdas, 1999) resultó satisfactoria y el porcentaje de aciertos en campo superó el 90% se consideró terminado el mapa de uso para el escenario 2003.

Para el escenario de 1991 se corrieron los procesos anteriores; con la excepción que no fue necesaria una clasificación no supervisada y su correspondiente trabajo de campo. En este contexto, se generó directamente una clasificación supervisada tomando como fuentes para la definición de firmas espectrales el mapa de uso 2003 y fotografías aéreas de 1989 a la escala 1:20.000. Básicamente, el criterio de clasificación consistió en definir centroides de las poligonales de uso; partiendo de la premisa que son las zonas más

alejadas de focos de intervención antropogénica y por ende menos susceptibles a sufrir cambios. Dada esta condición, se puede asumir estabilidad temporal de estas zonas y considerarse aptas para integrarse como una firma espectral para una clasificación supervisada, la cual fue afinada utilizando fotos aéreas de 1989 que sirvieron de comparación y ajuste, obteniéndose un porcentaje de aciertos del 91%.

La leyenda uniformizada para los 3 escenarios responde a la clasificación generalmente aceptada de SANAA y AFE-COHDEFOR para la cuenca (SAG, 2001).

Cuadro 5. Clasificación convencional de patrones de uso

identificador	Denominación	Descripción
1	Bosque de coníferas	Zonas cubiertas por vegetación mayor del género *Pinus sp*.
2	Bosque latifoliado	Áreas con bosques de hoja ancha, especialmente *Quercus sp*.
3	Bosque mixto	Áreas con existencias de bosques de conífera y latifoliado en igualdad de cobertura.
4	Vegetación Arbustiva y Matorrales	Cobertura arbustiva resultante de intervención antropocéntrica y posterior abandono, principalmente de *Quercus sp*. y *Mimosa sp*.
5	Agricultura	Zonas con cultivos agrícolas de carácter extensivo e intensivo (hortícola)
6	Pastos - sabanas	Pastizales naturales o cultivados.
7	Cuerpos de agua	Espejos de agua de lagos, lagunas y embalses.
8	Áreas urbanas – desnudo	Zonas de utilización con fines residenciales, con escasa cobertura vegetal o suelo desnudo.

3.2.1.2 Estimación de cobertura por tipo de uso

En este estudio, la unidad básica de información está representada por una parcela o píxel de dimensiones 30 m x 30 m (0,09 ha), definida para mantener homogeneidad de análisis con el escenario del 2003. Lo anterior con referencia de cuadrícula o reticulado (grid) que divide la cuenca en una población N = 215.644 celdas, para un total de 194,08 km^2.

Es conveniente apuntar que las estimaciones de superficies por tipo de uso discriminado pueden ejecutarse directamente con el uso del SIG. Sin embargo, se decidió realizar un muestreo con puntos o pares de coordenadas (X, Y) generadas aleatoriamente, cuyo número o tamaño n se calculó de acuerdo al comportamiento de la varianza s^2 de la probabilidad de cambio en la clase de uso seleccionada arbitrariamente "bosque conífera"

entre dos escenarios seleccionados. El objetivo del muestreo obedece al hecho de que se analizó las transiciones de cambio entre escenarios por medio de cadenas de Markov para evaluar las transiciones en términos probabilísticos (Bell, 1998) ya que con el SIG se puede analizar directamente el 100% de la población *N* y con cadenas Markovianas una muestra representativa de esta población. Asimismo, para llevar a cabo un análisis de variables reguladoras.

De esta forma, tenemos (Scheaffer y Mendenhall, 1987): $? \; {}^{2}_{n} \; ? \; \frac{pq}{n \; ? \; 1}$ (4)

Donde: s_n^2 = Varianza estimada de la probabilidad de cambio, *p* = proporción de la muestra con probabilidad de cambio, *q = 1-p* o probabilidad de no cambio y *n* = número de parcelas contenidas en cada categoría evaluada.

Con la extensión Random Point Generator v.1.24 de Arcview ®, se generaron una serie de tamaños de muestra o puntos aleatorios n_i (Cuadro 6) para encontrar un tamaño óptimo que al ser evaluado pudiera disminuir la varianza.

Cuadro 6. Varianza estimada de *p* (probabilidad de cambio) para la categoría de bosque conífera por tamaño de muestra n_i evaluado

Número de puntos	**Puntos en Bosque Conífera**	**Parcelas sin Cambio**	**Parcelas con Cambio**	**q**	**p**	$? \; {}^{2} \; ? \; \frac{pq}{n \; ? \; 1}$
520	190	128	62	0,674	0,326	0,001163142
1016	400	272	128	0,680	0,320	0,000545363
1493	563	391	172	0,694	0,306	0,000377531
1990	764	530	234	0,694	0,306	0,000278471
2534	989	664	325	0,671	0,329	0,000223307
3119	1185	820	365	0,692	0,308	0,000180019
3624	1340	923	417	0,689	0,311	0,000160084

El número de puntos y la varianza obtenida fueron evaluados en un modelo de regresión cuadrático (Figura 3) utilizando el software estadístico SAS. Así, de la función de 2do grado o primera derivada entre la varianza y el tamaño muestral que minimiza la varianza ($ds/dn \; ? \; ? \; ?_1 / 2?_2$), se pudo estimar el tamaño óptimo de la muestra *n* en 2.433 parcelas o puntos aleatorios a generar, el cual fue aproximado a 2.440.

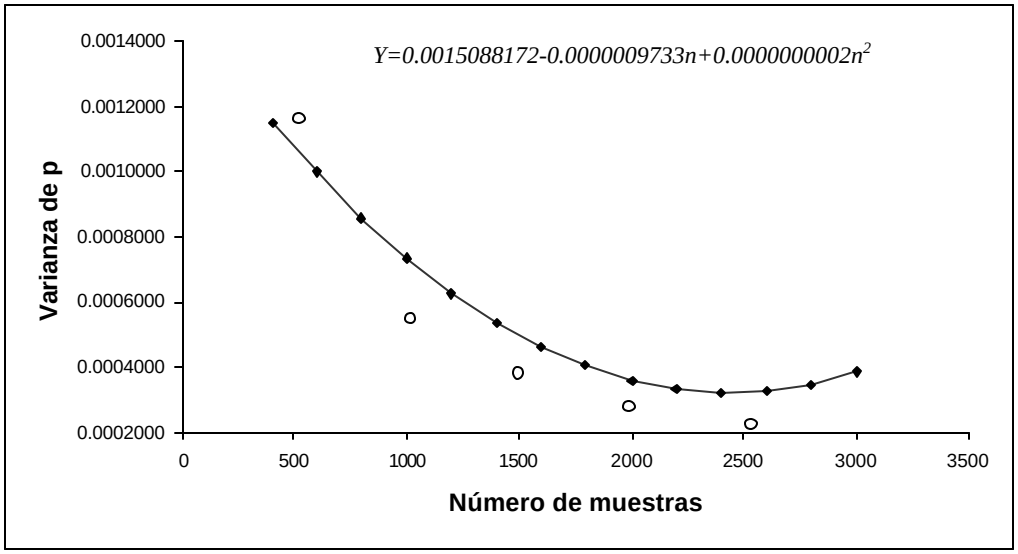
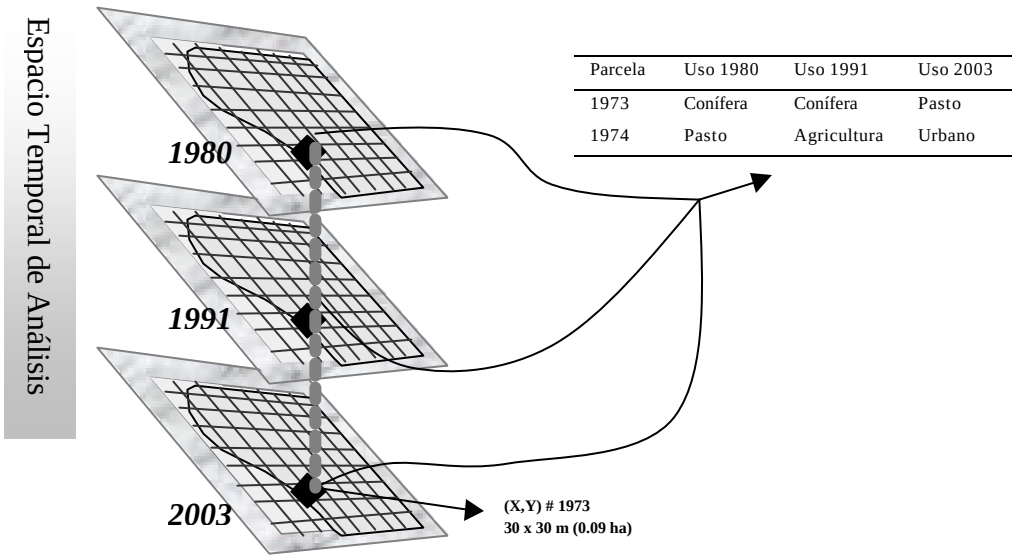


Figura 3. Comportamiento de la varianza muestral y del modelo de regresión $Y ? ? ? ?_1 n ? ?_2 n^2$ estimado en función del número de muestras en la probabilidad de cambio p.

El anexo 4 presenta la ubicación final de los puntos aleatoriamente generados en el contexto territorial de la cuenca del Río Guacerique. Esta cobertura de puntos fue convertida a formato grid, píxel de 30 x 30 m y mediante la operación Combine de la extensión Grid Analyst v.1.0 pudo ser extraída para cada uno de los puntos la información sobre el uso de la tierra en cada escenario analizado.



Parcela	Uso 1980	Uso 1991	Uso 2003
1973	Conífera	Conífera	Pasto
1974	Pasto	Agricultura	Urbano

Figura 4. Representación gráfica del proceso de sobreposición de los escenarios de uso y la captura de atributos tabulados para cada parcela de la muestra $n = 2440$

De esta forma, se obtuvieron las frecuencias o peso relativo con las que cada tipo de uso se presentaba en cada escenario, relacionando esta magnitud con el encontrado al analizar el total de la población $N = 215.644$.

3.2.1.3 Análisis de transición

La transición de clases de uso entre los diferentes escenarios fue analizada mediante la generación de matrices Markovianas de transición (Baritto, 2000; Bell, 1998), las cuales presentan las probabilidades de transición entre categorías de un estado al otro. En este contexto está dado que para un determinado instante (t_h) el uso de la tierra es estático y la variabilidad encontrada en el paisaje es espacial. Asimismo, descritas las clases de uso discriminadas como Unidades de Tierra UT, las posibles transiciones de UT_i a UT_j entre dos instantes (t_h,t_{h+1}) generará una matriz con dimensiones $i = 1,2,3,\ldots,I$ filas y $j = 1,2,3,\ldots,J$ columnas, compuestas por $m^2 = I \ x \ J$ posibles combinaciones de cambios de estado. En ésta n_{ij} representa la frecuencia con la que ocurre cada evento de transición y dado que la transición de una clase de uso en el instante t_{h+1} depende del uso previo en t_h, la probabilidad condicional ($p_{j|i}$) será: $P_{(j|i)} = \dfrac{nij}{ni\ ?}$ (5)

t_h \ t_{h+1}		UT_j				$p_{i?}$
		1	2		J	
UT_i	1	$p_{(1\|1)}$	$p_{(2\|1)}$	?	$p_{(J\|1)}$	1.0
	2	$p_{(1\|2)}$	$p_{(2\|2)}$	?	?	?
	?	?	?	?	?	?
	I	$p_{(1\|I)}$	?	?	$p_{(J\|I)}$	1.0

Figura 5. Matriz de probabilidades markovianas de transición MPT de un período t_h a t_{h+1}. Adaptado de Baritto (2000).

Baritto (2000) explica que "la suma horizontal de los valores acumulados en j para cada uso previo i es igual a la unidad (1.0). Los valores $p_{j\ |\ i}$ representan la probabilidad de que

una unidad de información o parcela de estudio 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. La diagonal de esta matriz representa la estabilidad del sistema, es decir, los usos que persisten a través del tiempo".

En este caso particular las probabilidades de transición (p_{ij}) son estimadas por la ecuación: $p_{ij} \; ? \; a_{ij} / ?_{j}^{i} \; a_{ij}$ (6)

Donde a_{ij} representa la frecuencia de ocurrencia de la transición de la UT_i del instante t_h a la UT_j del instante th_{+1}. En este estudio se generaron dos matrices para los períodos 1980-1991 y 1991-2003. Se presentan dos tipos, las que contienen el comportamiento en términos probabilísticos y las que lo presentan por superficie, dado que se analizó la totalidad del área y la muestra representativa.

3.2.1.4 Factores directrices de la dinámica de uso

Utilizando la muestra representativa de n = 2.440 puntos aleatorios y el valor continuo que toma cada punto de una serie de variables biofísicas y socioeconómicas consideradas como directrices de cambio en el presente estudio, se analizaron las relaciones de interdependencia entre variables métricas por medio de la técnica estadística de Componentes Principales, utilizando el software estadístico Infostat. "El análisis de componentes principales (ACP) trata de encontrar, con pérdida mínima de información, un nuevo conjunto de variables no correlacionadas que expliquen la estructura de variación en las filas de la tabla de datos. El ACP y los gráficos conocidos como *biplot* son técnicas generalmente utilizadas para reducción de dimensión. Estas técnicas permiten examinar todos los datos en un espacio de menor dimensión que el espacio original de las variables" Infostat (2003). Los biplots permiten visualizar observaciones y variables en un mismo espacio, así es posible identificar asociaciones entre observaciones, entre variables y entre variables y observaciones. Infostat (2003).

De esta forma, se pudo analizar en forma gráfica el grado de influencia que las variables consideradas ejercen sobre la dinámica de uso que se presenta en la cuenca. Asimismo,

las interrelaciones entre las mismas variables y como la variabilidad explicada por los componentes principales pueden separar las transiciones de uso de la tierra en ejes ortogonales que faciliten la interpretación del peso o fuerza vectorial que cada variable reguladora ejerce sobre el patrón de cambios entre categorías de uso de la tierra.

Cuadro 7. Variables consideradas como reguladoras de la dinámica de uso

Tipo de regulador	Variable	Unidades	Especificaciones	Fuente
Biofísicas	Pendiente	Porcentaje	Inclinación del terreno	Modelo digital de elevación elaborada durante este estudio.
	Altitud	msnm	Altitud sobre el nivel del mar	Ídem.
	Precipitación	mm./año	Lámina de agua anual	Promedios anuales obtenidos de las estaciones pluviométricas analizadas en este estudio.
Socioeconómica	Alfabetización	Porcentaje	Proporción de la población total que sabe leer y escribir	Interpolación de datos fuente por caseríos contenidos en Censo Nacional de Población y Vivienda 2001.
	Uso de Leña	Porcentaje	Proporción de la población total que utiliza leña como fuente principal de energía	Ídem.
	Densidad	Hab./Km^2	Habitantes por unidad de área	Ídem.
	Accesibilidad a mercados	Minutos	Tiempo destinado hacia centros de comercialización	Atlas de Honduras. CIAT 1999.
Normativa	Distancia a ríos	Metros	Distancia horizontal de cada punto a las redes de drenaje	Álgebra de mapas aplicado a la cobertura digital de ríos obtenida en este estudio.

Nota: Para la captura de información de cada variable para cada una de las parcelas de muestreo $n = 2.440$ y su conformación tabular se siguió el mismo proceso explicado en el acápite 3.2.1.2 y figura 4.

Dado que las variables socioeconómicas disponibles (alfabetización, uso de leña, densidad y acceso a mercados) fueron obtenidas a partir de datos actuales (1994 y 2001) se prefirió abordar únicamente el modelo de transición de 1991-2003, considerado más válido de explicar. En este contexto, se creó una variable sintética o transformada donde en lugar de tener todas los tipos de transición (8x8 = 64), se tuvieran sólo nueve (transiciones entre las tres categorías sintéticas y la persistencia dentro de las mismas), ya que como se pudo observar en las matrices markovianas, muchas de las transiciones no se

presentaban o tenían una probabilidad muy baja de ocurrir. La figura siguiente explica la transformación de categorías de uso y su respectiva reasignación.

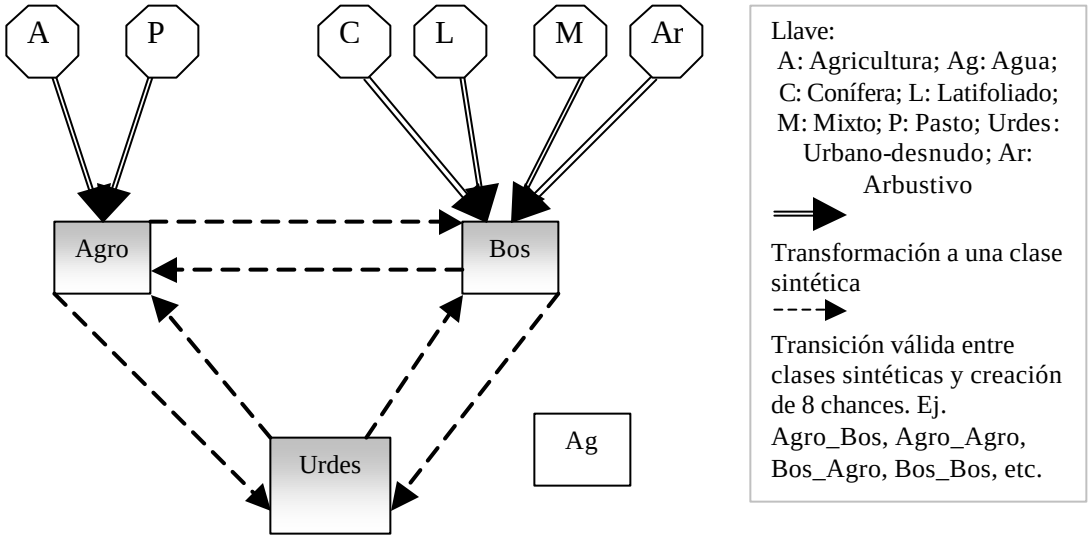


Figura 6. Diagrama de transformación de categorías y transiciones esperadas.

Cabe apuntar que debido a que sólo se disponía de información que representa instantes estáticos temporales, la influencia de factores que inciden en forma periódica como cambios de políticas no pudo ser incluida en el análisis. Limitándose el estudio a las variables cuya naturaleza intrínseca las convierte en espacialmente representables.

3.2.2 Identificación de áreas críticas

3.2.2.1 Método utilizado

La metodología utilizada fue la implementada por Sáenz *et al*. (1997).

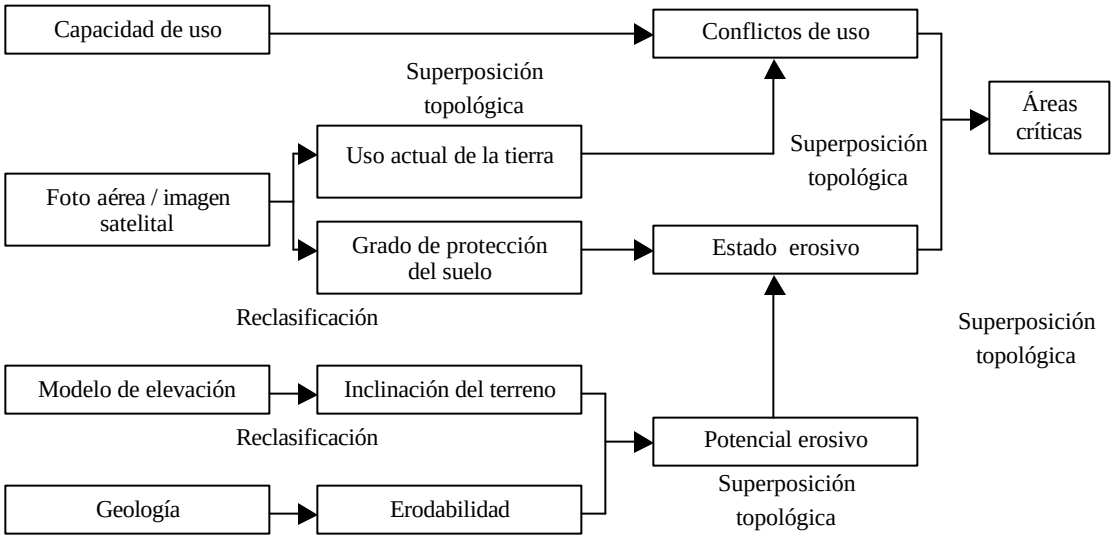


Figura. 7. Proceso metodológico seguido para la obtención de áreas críticas (tomado de Sáenz *et al*., 1997.)

El concepto de área crítica obedece a las zonas con incidencia en la cantidad de agua y su calidad; como son: zonas riparias, zonas de amortiguamiento de ríos y zonas de recarga hídrica, estas propician condiciones negativas por su baja capacidad de infiltración, alto escurrimiento superficial y aporte a la vulnerabilidad ecológica con respecto a los procesos erosivos.

3.2.2.2 Recolección de información y matrices de decisión

Para aplicar la metodología a la situación particular de la cuenca fue necesario un proceso de consultas con expertos locales. A continuación un desglose de las condicionantes principales para obtener las capas, siendo todas generadas en formato grid y con técnicas de álgebra de mapas usando Arcview 3.3 ®.

Potencial erosivo:

Cuadro 8. Matriz para obtención de capa de potencial erosivo[1].

Pendiente	Clases Litológicas					
	Aluviones, grava y deslizamientos Qal-Qt-S	Rocas clásticas y Lutitas Tpmn-Tpmp	Coladas de basalto y riolitas Qb-Tpmy1	Coladas dacíticas vítricas Tpmy3	Tobas, cenizas e ignimbritas riolíticas Tpmt-Tpmi-Tpm	Coladas andesíticas con lahares Tm
0-15%	Medio	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	Medio
15-30%	Alto	Alto	Medio	Medio	Bajo	Medio
30-45%	Muy Alto	Alto	Alto	Medio	Medio	Alto
45-60%	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto	Alto	Alto	Alto
> 60%	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto	Alto	Muy Alto

Grado de protección al suelo:

Del mapa de uso 2003, fue obtenida una nueva capa por reclasificación, tal y como sigue:

Cuadro 9. Protección al suelo según tipo de cobertura[2].

Clase de Uso	Coeficiente Protección	Grado de Protección
Agricultura	0,20	Bajo
Agua	0,00	Agua
Bosque Conifera	0,80	Alto
Bosque Latifoliado	0,80	Alto
Bosque Mixto	1,00	Muy Alto

Arbustivo secundario	0,40	Medio
Pastos	0,30	Medio
Urbano Desnudo	0,10	Bajo

[1] Consulta con Geóloga Claudia Quinteros. Tegucigalpa, Honduras
[2] Formulación a partir de consultas con técnicos de SANAA y AFE-COHDEFOR

Estado erosivo:

Fue formulado a partir de la capa de potencial erosivo antes creada y la de protección al suelo. La matriz fue ajustada conforme al original presentada por Sáenz *et al*. (1997).

Cuadro 10. Matriz para obtención del estado erosivo en la cuenca.

	Protección al Suelo				
Potencial Erosivo	Muy Alto	Alto	Medio	Bajo	Agua
Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo	Bajo	Medio	NA
Medio	Muy Bajo	Bajo	Medio	Grave	NA
Alto	Bajo	Medio	Medio	Grave	NA
Muy Alto	Bajo	Medio	Grave	Muy Grave	NA
Agua	NA	NA	NA	NA	Agua

Capacidad de Uso:

Se decidió utilizar la metodología propuesta por Michaelsen en 1977 [3] para ajustarse a las normativas que se siguen en el Departamento de Manejo de Cuencas de SANAA.

Cuadro 11.Sistema de clasificación de tierras por capacidad de uso[3].

Profundidad del suelo	**Tipo de Pendiente**				
	Suave. <12%	Moderada 12-30%	Fuerte 30-50%	Muy Fuerte 50-60%	Muy Escarpado >60%
Profundo >90 cm	C_1	C_2	C_3	A	F
Moderado 50-90 cm	C_1	C_2	C_3	A/F	F
Superficial 20-50 cm	C_1	C_2/P	P	F	F
Bajo <20 cm	C_1/P	P	P	F	F

La descripción resumida de cada clase es: (Richters, 1995).

C_1: Terreno cultivable sin necesidad de prácticas intensivas de conservación de suelos.

C_2: Terreno cultivable donde se necesitan algunas prácticas de conservación como terrazas de banco, miniterrazas y se permite algún tipo de mecanización.

C_3: Terreno cultivable con grandes exigencias de medidas de conservación, mecanización limitada a tractores pequeños o tracción con fuerza humana.

A: Árboles frutales sobre terrazas de huerto

P: Pastizales mejorados

F: Terreno forestal.

Conflictos de Uso:

[3]Aplicación de Sheng (1971) citado por Richters (1995) para Honduras. Metodología para tierras marginales montañosas de zonas tropicales

A partir de la sobreposición de las capas de uso actual y capacidad de uso se obtuvo la de conflictos de uso, haciendo hincapié en favorecer los estados que propician la conservación en lugar de la maximización económica, dada la categoría de protección legal que tiene la cuenca.

Cuadro 12. Calificación del tipo de conflicto presente en la cuenca.

Clase de Uso	**Capacidad de Uso**							
	A	A/F	C1	C2	C2/P	C3	F	P
Agricultura	Sobre Uso	Sobre Uso	Pleno Uso	Sobre Uso	Sobre Uso	Sobre Uso	Sobre Uso	Sobre Uso
Conifera	Pleno Uso	Pleno Uso	Pleno Uso	Pleno Uso	Pleno Uso	Pleno Uso	Pleno Uso	Sub Uso
Latifoliado	Pleno Uso	Pleno Uso	Pleno Uso	Pleno Uso	Pleno Uso	Pleno Uso	Pleno Uso	Sub Uso
Mixto	Pleno Uso	Pleno Uso	Pleno Uso	Pleno Uso	Pleno Uso	Pleno Uso	Pleno Uso	Sub Uso
Arbustivo	Sub Uso	Sobre Uso	Sub Uso	Sub Uso	Sub Uso	Sub Uso	Sobre Uso	Sub Uso
Pasto		Sobre Uso	Sub Uso	Sub Uso	Pleno Uso	Sub Uso	Sobre Uso	Pleno Uso
Urbano-Desnudo		Sobre Uso	Sobre Uso	Sobre Uso	Sobre Uso	Sobre Uso	Sobre Uso	Sobre Uso

Áreas Críticas:

La capa final se obtuvo al sobreponer topológicamente la información espacial de estado erosivo y conflictos de uso con el objetivo de obtener una cobertura digital de riesgos de degradación.

Cuadro 13. Calificación de los riesgos de degradación en la cuenca.

Conflicto de Uso	**Estado Erosivo**			
	Muy Bajo	Bajo	Medio	Grave
Pleno Uso	Sin Riesgo	Muy Bajo	Bajo	Bajo
Sobre Uso	Bajo	Medio	Alto	Alto
Sub Uso	Muy Bajo	Bajo	Medio	Medio

El resultado final es un mapa donde se observan zonas con diferentes riesgos de degradación, seleccionando como críticas aquellas que observaron niveles de riesgo medio y alto. Este mapa fue llevado al campo donde se validó el grado de precisión del mismo en contraste con lo que se observado en la realidad, proceso que fue acompañado por personal del SANAA, dado que disponen de un conocimiento profundo de la cuenca. Al mismo tiempo, se llevó un registro fotográfico y geoposicional de las áreas visitadas, de tal forma que se disponga de información actualizada que coadyuve los esfuerzos que se destinen hacia la restauración hidrológico-forestal de estas zonas.

3.2.3 Modelación hidrológica

3.2.3.1 Entorno general

Para analizar el comportamiento hidrológico de la cuenca del Río Guacerique en función de la dinámica de uso de la tierra se utilizó el modelo hidrológico SWAT. La base teórica del modelo es abundante y en el acápite 2.3.1 se introdujeron solamente algunos puntos de esta base conceptual. En este contexto, el proceso metodológico que se expone más adelante se ocupará solamente de los procesos incurridos para generar insumos al modelo, el arreglo de los mismos para su uso y las principales consideraciones tomadas en cuenta al momento de correr el modelo.

3.2.3.2 Captura y arreglo de insumos requeridos

La figura 10 nos muestra un panorama de las bases de datos requeridas como entrada al modelo. A continuación una descripción por tipo de insumo, los cuales fueron trabajadas en formato grid y con tamaño de píxel de 30x30 m, conservando las mismas características que en el análisis multitemporal.

Modelo digital de elevación MDE:

Fue obtenido de la digitalización de curvas a nivel con espaciamiento vertical de 20 m y de hojas cartográficas 1:50.000. Constituye una superficie de respuesta continua que representa los cambios o variaciones de la topografía en la cuenca. No es necesario practicarle ningún tipo de arreglo previo a su uso en el modelo.

Red hidrográfica:

Se obtuvo de la digitalización de hojas cartográficas 1:50.000 y del análisis de drenaje visual ejecutado sobre la imagen satelital y fotografía aérea pancromática 1:20.000. No es necesario discernir entre cauces permanentes o intermitentes ya que el modelo lo utiliza sólo en aquellas áreas demasiado planas como para identificar apropiadamente los parteaguas. Tampoco es necesario practicarle ajuste alguno. Esta cobertura digital es la única que se utiliza en formato vectorial o shapefile.

Uso de la tierra:

Se utilizaron los mismos escenarios (1980, 1991 y 2003) cuya elaboración fue descrita en el acápite 3.2.1.1. SWAT requiere de una serie de coeficientes para simular el efecto del uso de la tierra en los componentes de evapotranspiración e infiltración. Asimismo, dispone de una base de datos compleja para numerosos tipos de cobertura. En este contexto, fue necesaria una revisión exhaustiva de los tipos de uso discriminados por SWAT y su similitud con los tipos de uso encontrados en la cuenca, proceso que fue acompañado con la consulta a expertos locales. A partir de lo anterior, la clasificación a ser utilizada en el modelo fue redefinida como se presenta en el cuadro siguiente.

Cuadro 14. Redefinición de los usos en la cuenca de acuerdo a tipología usada por SWAT.

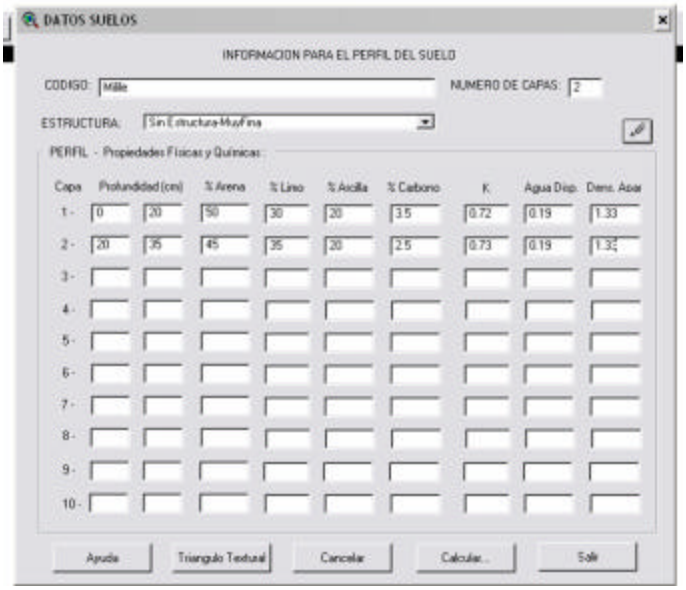
Código de uso	Tipología de uso	Redefinición en SWAT	Código en SWAT
1	Bosque de coníferas	PINE	PINE
2	Bosque latifoliado	FOREST DECIDUOS	FRSD
3	Bosque Mixto	FOREST-MIXED	FRST
4	Arbustiva y Matorrales	RANGE-BRUSH	RNGB
5	Agricultura	AGRICULTURAL LAND GENERIC	AGRL
6	Pastos y Sabanas	PASTURE	PAST
7	Cuerpos de Agua	WATER	WATR
8	Áreas urbanas y desnudas	URBAN LOW DENSITY	URLD

Suelos:

Inicialmente se había previsto la utilización del mapa de suelos de Honduras preparado por Simmons (1969) a la escala 1.000.000, debido a que era la única fuente disponible para la zona de estudio. Sin embargo, la representación espacial demasiado generalizada

por la escala y la ausencia de información requerida a nivel de horizonte; se tradujo en una salida del modelo completamente inutilizable cuando se realizaron las primeras pruebas. Por lo anterior, fue necesaria una búsqueda exhaustiva de datos, aunque no estuvieran cartografiados. Subsecuentemente, se tuvo acceso a la base nacional de suelos preparada por la Dirección Ejecutiva de Catastro DEC bajo distintos estudios, información puntual obtenida de calicatas y desagregada por horizonte. Con los datos anteriores se logró preparar un mapa de suelos para la cuenca, utilizándose además otros recursos como: (a) Fotografía aérea, (b) Mapa de suelos preparado a solicitud del SANAA en 1993 del cual no se tenía informe ni leyenda que lo respaldara, (c) Personal del SANAA con amplio conocimiento de la zona (d) Servicios de un especialista en suelos y (e) seis días de trabajo de reconocimiento de perfiles, elaboración de calicatas y análisis de propiedades físicas requeridas. El producto puede ser visto en el anexo 2.

Para su uso en SWAT, era fundamental obtener datos como apreciación textural, estructura, dimensión de horizontes y contenido de carbono, información que fue recabada en campo y complementada con los datos obtenidos de la DEC. Dado que la compilación de estos datos para su uso en SWAT es dificultosa, se utilizó la extensión Perfil Suelos desarrollada por la sección de análisis de cuencas del Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT. Esta posee una interfase amigable (figura 8) y tiene la ventaja que además de calcular los parámetros requeridos por SWAT los envía a un archivo de tipo *.dbf con el arreglo necesario para ser utilizado en el modelo. La interfase trabaja muy bien, ya que los resultados de la clasificación hidrológica de los suelos fue compatible 100% con la clasificación nacional preparada por FHIS (2002).



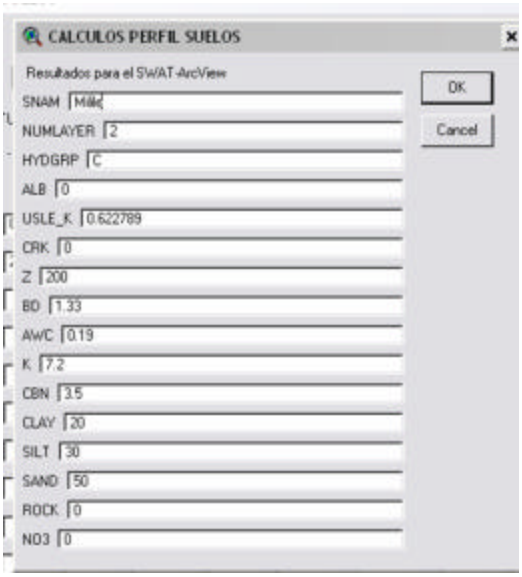


Figura. 8. Entrada y salida de la extensión Perfil Suelos para ajuste de la cobertura y su uso en SWAT.

Base de datos meteorológica:

Los requerimientos del SWAT en este sentido son numerosos. Sin embargo, existe flexibilidad en que cuando no existan registros para algunas variables, el modelo las pueda simular a partir de un generador climático. En este contexto, se considera que al menos se puedan obtener registros de: precipitación diaria, temperaturas mínima y máxima diarias, velocidad del viento y radiación solar mensuales. A continuación un breve desglose de los estadígrafos requeridos para el generador climático, los cuales debe calcularse en un patrón mensual y para cada una de las estaciones consideradas.

Cuadro 15. Principales estadígrafos requeridos para la calibración del generador climático [4].

Condición climática	Estadígrafo requerido	Unidades	Observaciones
Precipitación	Promedio de la precipitación	mm.	Obtenida a partir de datos diarios. Con preferencia de estaciones dentro de la cuenca o en sus vecindades.
	Desviación estándar de la precipitación diaria	mm.	Ídem.
	Coeficiente de sesgo de la precipitación diaria		Ídem.
	Probabilidades: ?? De un día húmedo seguido de un día seco ?? De un día húmedo seguido de un día	$0<p<1$	Solamente son necesarias sino se puede calcular el promedio del número de días húmedos.
	Promedio del número de días húmedos	Días	Días con precipitación superior a 0,1 mm de lluvia o más.
	Lámina máxima de ½ hora de lluvia para todo el período de registro	mm.	Utilizada para calcular escorrentías pico.
Temperatura	Temperatura ambiente máxima promedio	ºC.	Obtenida a partir de datos diarios. Con preferencia de estaciones dentro de la cuenca o en sus vecindades.
	Temperatura ambiente mínima promedio	ºC.	Ídem.
	Desviación estándar para la temperatura ambiente máxima	ºC.	Ídem.
	Desviación estándar para la temperatura ambiente mínima	ºC.	Ídem.
Radiación solar	Promedio de la radiación diaria	MJ/m^2	Pueden utilizarse datos de estaciones en

			día	el rango del país.
Velocidad del viento	Promedio de la velocidad del viento		m/s	Ídem.

Un punto de importancia al momento de implementar el generador climático es tratar en lo posible de verificar la confiabilidad de los datos a través de pruebas de aleatoriedad, independencia y homogeneidad (FHIS, 2002). De tal forma que el consolidado estadístico mensual sea lo más preciso posible, debido a que el generador climático presenta la ventaja que cuando existen datos perdidos en las series diarias, puede simular estos a partir del comportamiento estadístico mensual local que se ingresa. Para este estudio, se usaron ocho estaciones con registros pluviométricos y dos con registros de temperatura. Los datos de velocidad del viento y radiación solar se estimaron de una. Todas las estaciones, a excepción de la de Tegucigalpa son administradas por el SANAA. La ubicación espacial de las mismas puede ser visualizada en el anexo 5.

[4] Debe contarse con un mínimo recomendado de 5 años de registros climáticos.

Cuadro 16. Estaciones climatológicas utilizadas en el estudio.

Estación	Longitud	Latitud	Elevación msnm	Años de registro considerados	Precipitación promedio anual mm	Promedio de días de lluvia	Temp. máxima promedio ºC	Temp. mínima promedio ºC
El Batallón	87,2575	14,0678	1064,00	33	923,56	103,30	*	*
La Brea	87,3914	14,0542	1654,00	17	1346,86	114,99	*	*
Concepción	87,2650	13,9862	1146,00	12	969,95	105,27	27,43	16,29
Lepaterique	87,4500	14,0500	1500,00	33	1089,56	97,70	*	*
Ocote Bonito	87,4275	14,1956	1485,00	17	1202,60	122,04	*	*
Quiebramontes	87,3039	14,0876	1114,00	13	1088,91	107,30	27,58	15,74
San Matías	87,3433	14,1398	1342,00	17	999,45	157,65	*	*
Tegucigalpa	87,2194	14,0577	1000,00	33	842,22	126,44	*	*

* Existen datos de temperatura pero no pudieron obtenerse.

3.2.3.3 Procesos principales y salidas en el uso del modelo

La figura 10 nos muestra las entradas requeridas por el modelo (antes discutidas), los procesos principales, momento de decisión y las salidas que proporciona. A continuación se brinda una breve descripción de los procesos ejecutados y las salidas del modelo.

Delimitación de subcuencas: Utilizando el MDE se definen umbrales de superficie en hectáreas para definir el grado de detalle de las subcuencas, en este punto el SWAT

puede apoyarse de la red hidrológica para definir parteaguas en zonas muy planas. El criterio principal utilizado en este estudio fue un mínimo de 2.000 ha que permitiera obtener cinco subcuencas que se ajustaran a las subdivisiones establecidas por el SANAA. Este proceso incluye también la definición de "outlets" o puntos de aforo de toda la cuenca y subcuencas discriminadas. A continuación un detalle de los puntos de aforo considerados y su representación espacial.

Cuadro 17. Puntos de aforo o salida de subcuencas consideradas en el estudio.

Punto	Denominación	Coordenadas m		Observaciones
		Oeste	Norte	
1	El Batallón	472.647	1.554.989	Estación hidrométrica con registros extemporáneos y lugar de toma de datos del 2003. Aforo total de la cuenca por SWAT
2	Guaralalao y Quiscamote	464.081	1.560.189	Punto de salida subcuencas de Guaralalao y Quiscamote. Aforo generado con SWAT.
3	San Mateo	467.061	1.556.569	Punto de salida subcuencas de Quiebramontes y San Mateo. Aforo por SWAT. Concentra caudales de subcuencas anteriores.
4	Quiebramontes	466.150	1.558.048	Estación hidrométrica con registros diarios continuos desde 1990. Punto de aforo adicional generado con SWAT.
5	Guacerique II	467.647	1.556.510	Estación hidrométrica con registros diarios continuos desde 1982. Punto de aforo adicional generado con SWAT.

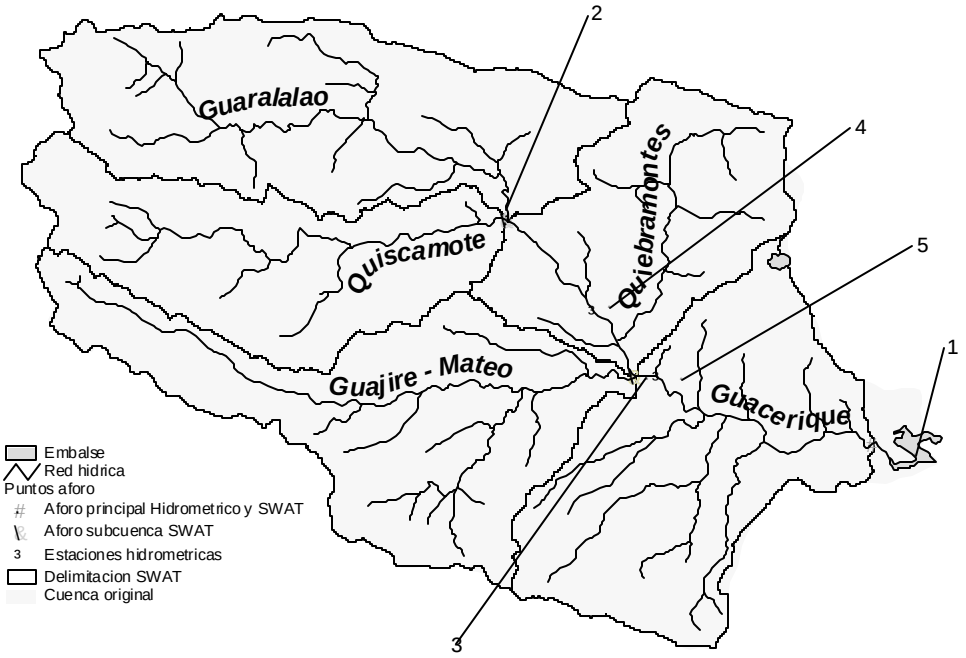


Figura. 9. Representación del alcance espacial de análisis por subcuenca en SWAT.

De esta forma, los caudales obtenidos con SWAT pudieron ser comparados con el registro de las estaciones Batallón, Quiebramontes y Guacerique II para verificar el grado de aproximación del modelo y su peso en la toma de decisiones. Una consideración importante acerca del punto de aforo total de la cuenca (Batallón) es que se ubica aguas arriba del embalse "Los Laureles", por lo que la masa espacial que se analizó con el SWAT es menor un 2,48% que el área original (figura 9).

Unidades de respuesta hidrológica URH: Son combinaciones únicas de tipos de uso de la tierra y clases de suelo, ya que el comportamiento hidrológico será muy diferente en cada combinación. En este punto se ofrecen dos opciones (a) usos y suelos dominantes y (b) múltiples URH. Se escogió la 2da ya que la primera opción generaliza demasiado al modelar la cuenca con un solo uso y suelo. El modelo proporciona la opción de redefinir que usos por su reducida área no serán tomados en cuenta (Ej. Usos con cobertura menor que 4%), así como para los suelos. Sin embargo, se decidió utilizar todos los usos y suelos independientemente de su cobertura, para mantener la mejor precisión posible. En este contexto y definidas las clases de uso *US*, y las series de suelo *SS*, la sobreposición espacial de ambas ($Us_i + SS_j$) generó una matriz con dimensiones $i = 1,2,3,\ldots,I$ filas y $j = 1,2,3,\ldots,J$ columnas, compuestas por $m = I \times J$ posibles combinaciones de URH. SWAT asocia los atributos de cada combinación con su correspondencia de subcuencas para todos los cálculos posteriores.

Generador climático: Con la serie de estadígrafos calculados para cada variable climática (Ej. Precipitación) se construye la base estadística del generador climático. Éste a su vez es cargado en el SWAT para simular el comportamiento climático en la cuenca, permitiendo al usuario cargar sus propios datos diarios de precipitación, temperatura, viento, etc. O dejar que el modelo los simule a partir de la base estadística integrada. En este estudio se utilizaron datos diarios de precipitación de las series de tiempo disponibles (cuadro 16) lo mismo que de temperatura. Dejándose al modelo la opción de simular las demás variables.

Procesamiento de la simulación: Una interfase permite al usuario la selección de los siguientes puntos: fecha de inicio y término de la simulación, método para la

evapotranspiración y para el cálculo de escorrentía y la frecuencia de datos de salida. Para este estudio, los primeros puntos se ajustaron a los escenarios de uso de la tierra que se generaron (1980, 1991 y 2003) y se seleccionaron los métodos de Hargreaves para evapotranspiración y Número de Curva para escorrentía (acápite 2.3.1). Las frecuencias de salida pueden ser diarias, mensuales o anuales, en este caso se prefirió el régimen mensual para tener más facilidad de análisis y representación gráfica.

Resultados en SWAT: El SWAT genera una gran cantidad de información, la calidad de la misma estará en función por supuesto de la calidad de los insumos de entrada. Una descripción sintética de los datos de salida que fueron utilizados en este estudio se presenta a continuación.

Cuadro 18. Tipo de resultados a considerar del SWAT.

Salida analizada	Referencia	Variables utilizada	Descripción / Observaciones
BSB	Balance hídrico por subcuenca	identificador de subcuenca	
		Lámina de precipitación para el período	mm
		Escorrentía producida por la subcuenca	mm
		Agua producida por subcuenca	Agua que se aporta al canal de drenaje por escorrentía y flujo de retorno mm
		Evapotranspiración	mm
		Producción de sedimentos por subcuenca	Ton ha^{-1}
		Agua que se percola pasando a la zona radical	mm
		Contribución de las aguas subterráneas al canal de drenaje	Agua del acuífero superficial que retorna al río en el tiempo evaluado mm
RCH	Comportamiento de los canales de drenaje o ríos de las subcuencas	Agua que sale de la sección del canal	$m^3 s^{-1}$
		Sedimentos que salen de la sección del canal	TM
		Concentración de sedimentos en la sección del canal	mg Kg

Los resultados de las simulaciones se compararon con los caudales medidos. En las primeras ocasiones se obtuvieron datos completamente inutilizables. Procediéndose a verificar la precisión de las coberturas temáticas, revisar los estadígrafos para las

variables climáticas y la elaboración de un mapa de suelos más detallado para su clasificación hidrológica. Obtenida una salida (2003) satisfactoria, se comenzó a generar los escenarios que simulan el comportamiento hídrico para los períodos de 1980 y 1991.

3.2.3.4 Evaluación del ajuste de datos de salidas del modelo

Diferentes enfoques han sido propuestos para evaluar la bondad de ajuste de mediciones directas u observadas en campo versus las simuladas por modelos (James y Burges, 1982). Sin embargo, el coeficiente modificado de eficiencia *E* (7) de Nash y Sutcliffe en 1970 y el índice modificado de concordancia *d* (8) propuesto por Willmott en 1985, son los que presentan condiciones de evaluación más objetivas (Legates y McCabe, 1999). Estos autores recomiendan usar medidas adimensionales como las dos anteriores y cuantificar el error en términos de las unidades de la variable siendo evaluada. En este contexto, recomiendan utilizar la raíz del error cuadrado medio *RMSE* (9) y el error medio absoluto *MAE* (10).

Se tiene que:

$$E = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^{N} \left|O_i - P_i\right|^j}{\sum_{i=1}^{N} \left|O_i - \bar{O}\right|^j} \tag{7}$$

$$d = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^{N} \left|O_i - P_i\right|^j}{\sum_{i=1}^{N} \left(\left|P_i - \bar{O}\right| + \left|O_i - \bar{O}\right|\right)^j} \tag{8}$$

$$RMSE = \sqrt{N^{-1} \sum_{i=1}^{N} (O_i - P_i)^2} \tag{9}$$

$$MAE = N^{-1} \sum_{i=1}^{N} \left|O_i - P_i\right| \tag{10}$$

Donde: O son los datos observados o medidos en campo, P se refiere a los datos simulados por el modelo, N es el período de tiempo en incrementos de duración arbitraria (años, meses, días), j es una potencia arbitraria, y $\hat{O}$ es la media aritmética de los datos medidos. Los estadísticos anteriores fueron utilizados en la evaluación en este estudio.

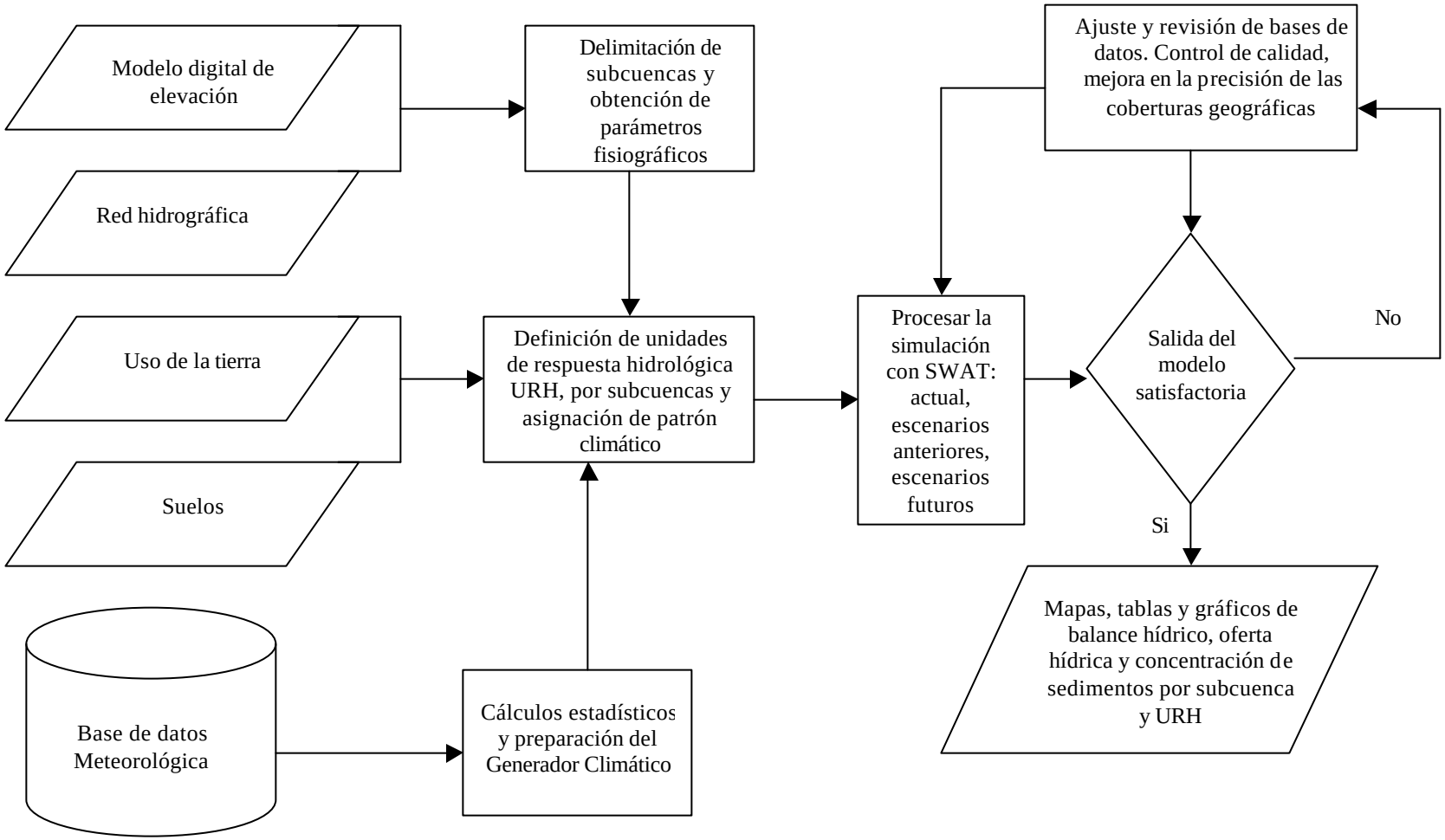


Figura. 10. Insumos requerido, procesos principales y salidas en la interfase de SWAT y Arcview, versión personal a partir de procesos realizados y revisión de Di Luzio *et al*., 2002.

3.3 Lineamientos para propuesta de acciones técnicas

3.3.1 Antecedentes

La problemática del uso de la tierra y del manejo del recurso hídrico en la cuenca del Río Guacerique ha sido motivo de atención durante las últimas dos décadas. Diferentes enfoques (SANAA, 2000; Komives *et al*., 1986) han señalado su carácter complejo, alternativas de mitigación, estrategias de cooperación interinstitucional, etc. Por mencionar algunos de los factores considerados esenciales en el manejo integrado de áreas de captación hídrica. Sin embargo, todos han concentrado sus esfuerzos de planificación hacia un manejo del sistema de cuenca completo, con lo que se complican los esquemas de implementación. Asimismo, han dado una relativa baja importancia al aspecto de los usos del agua principalmente en las zonas agrícolas y en la cuenca baja, que acarrean graves implicaciones en la oferta cuantitativamente deficiente que alcanza el embalse "Los Laureles" en las temporadas secas.

En este contexto, se pretende dar énfasis al ordenamiento hidrológico en subsistemas diferenciados, priorizarlos en base a los resultados de este estudio y enfoques anteriores; así como un esquema de administración acorde al marco legal del país. Se considera que la necesidad, magnitud y tipo de medidas agro-conservacionistas han sido identificadas (SANAA, 2000) y retomarlas en este documento causaría redundancia no positiva.

3.3.2 Consideraciones político-institucionales

Tal y como se menciona más adelante (acápite 4.3.2) la construcción de la urbanización "Ciudad Mateo" en 1992 y su posterior interrupción en 1994, ha sido un tema de carácter complejo; dada las implicaciones sociales, financieras y ambientales que traería cualquier tipo de decisión sobre su habilitación o no. A este respecto (CECRG, 2002) por decisión presidencial (Decreto Ejecutivo PCM 017-02) de Septiembre 2002, se nombró una comisión de alto nivel para que apoyándose en toda la documentación existente, en diferentes consultas a expertos y visitas de campo se tomara una resolución definitiva sobre el proyecto. Este aspecto se vio fortalecido con la realización de un foro de discusión pública titulado "Ciudad Mateo: Aporte ciudadano para una solución justa y correcta". Una vez finalizado el proceso anterior, la comisión emitió sus recomendaciones que no se limitaron al análisis puntual del proyecto urbanístico, sino que se dirigen hacia una visión integral del manejo de la cuenca.

Las recomendaciones ejecutivas incluyen los siguientes puntos:

?? Decretar la protección inmediata de la cuenca. Aunque ésta cuenta con el marco legal que prevé su protección (acápite 3.1.7), se reconoció que "a pesar de que existen varias instituciones a cargo de la conservación de dicha cuenca no han funcionado, no hay planes de reforestación ni de protección al recurso hídrico". Asimismo, denota la existencia de esfuerzos aislados, poco productivos.

?? Crear una autoridad de cuenca. Para evitar la dispersión de esfuerzos y atender en forma integral la conservación de la cuenca. Esta entidad integraría el manejo de los recursos naturales, sería la encargada de las futuras infraestructuras de suministro y administraría la venta del agua a otras instituciones.

?? Construir la represa Guacerique. Esta tendría una capacidad de 82,5 $x10^6$ m^3. Sin embargo la magnitud de sus costos ha atrasado los estudios conducentes a su implementación. No obstante, la comisión sugirió que cualquier costo será menor que dejar sin agua a la población capitalina y provocar un colapso social.

?? Conservar únicamente 690 viviendas del proyecto "Ciudad Mateo" y su respectiva infraestructura sanitaria. La decisión trae implicaciones financieras y legales enormes, pero persigue dejar una amplia zona de amortiguamiento para la nueva represa. Así, la comisión consideró que lo importante no era si se habilitaba o no el proyecto, sino "la necesidad superior de abastecer de agua potable a los habitantes de la capital".

?? Integrar una comisión de arbitraje. Para evaluar los litigios legales.

?? Nombrar un equipo ministerial para implementar las recomendaciones anteriores. Se reconoce que las medidas propuestas requieren de un largo proceso que no se puede postergar. Por lo que se propuso la constitución de un equipo técnico de alto nivel con miembros de ministerios relacionados, empresa privada y representantes civiles.

Esta comisión se constituyó (participantes en anexo 8) y ha estado reuniéndose periódicamente en este año 2003, teniéndose la oportunidad de participar en algunas reuniones para dar a conocer el tipo de resultados que se obtendrían de este estudio. Asimismo, de conocer los avances en la formulación de la estructura organizacional que se diseñaría para la autoridad de cuenca y en la redacción de un decreto legislativo que amparara dicha entidad.

A este respecto, existe una propuesta que busca focalizar la problemática a partir de la microcuenca. Prescribiéndose éstas como áreas menores que 20 km^2 y con una reducida cantidad de comunidades, pero que tienen un fuerte arraigo social y dependen de una misma autoridad municipal. Las mismas realizarían obras de tamaño y costos reducidos de fácil supervisión y evaluación. Considerándose que "un conjunto de microcuencas bien manejadas conduce a un manejo coherente de la unidad hidrográfica mayor" (Foletti, 2003).

La propuesta sugiere que "la Secretaría de Gobernación y Justicia SGJ convocará a las alcaldías y mancomunidades para que constituyan mediante convenio una autoridad encargada de participar en la elaboración de las tres propuestas pertinentes de manejo de las subcuencas, partiendo de cada microcuenca". Las tres propuestas se refieren a: (a) ordenamiento territorial, (b) continuidad del proyecto "Agua para todos" para asentamientos priorizados y (c) regularización de tierras en lo referente a catastro y registro de la propiedad. Esta autoridad de cuenca tendría un estatus permanente y especifica de las alcaldías. La misma planifica, coordina, asigna y verifica las actividades específicas en cada subcuenca.

Importante de mencionar es que la autoridad contará con dos órganos para el cumplimiento de sus objetivos:

1. Una secretaría técnica. Encargada de asesorar las municipalidades y mancomunidades así como de facilitar la coordinación entre las mismas. Está conformada por representantes de las instituciones participantes.
2. Una unidad ejecutora. La que aplica lo decidido por la autoridad de cuenca en lo referente a reducción de la vulnerabilidad y la supervisión de los planes de manejo.

Las reuniones y los procesos de discusión de la comisión interinstitucional han continuado, esperándose perfiles de propuesta finales en 2004. En base a lo anterior, puede verse que se está afinando una estrategia para el manejo integrado de los recursos en la cuenca a través de una sola autoridad y partiendo de la unidad hidrológica mínima. Más importante aún, existe la voluntad política para llevar a cabo las recomendaciones de la comisión ejecutiva en el mediano plazo.

3.3.3 Propuesta metodológica

Los lineamientos que se proponen buscan en la medida de lo posible acoplarse a las líneas estratégicas que están siendo sugeridas a lo interior de la comisión interinstitucional. De tal forma que puedan servir como herramientas de apoyo para la toma de decisiones y se adapten al manejo del recurso hídrico estipulado en la **Ley Marco del Sector Agua Potable y Saneamiento** recientemente aprobada en Honduras. En ésta, se dispone que corresponda a las municipalidades disponer las condiciones de prestación de servicios de agua en su respectiva jurisdicción. Asimismo, que las juntas de agua y organizaciones comunitarias tendrán preferencia en el otorgamiento de la autorización municipal para la operación de los servicios de agua potable y saneamiento en su respectiva comunidad, indicando lo anterior que también se puede concesionar el servicio a entes privados. Para el caso específico de Tegucigalpa, se continuará la prestación de los servicios bajo convenios entre la Municipalidad y el SANAA.

Dado lo anterior, se propone el siguiente marco de actividades:

Segmentación administrativo-biofísica de la cuenca:

Dado que la cuenca está enmarcada territorialmente en los municipios de Lepaterique y Tegucigalpa, se propone una delimitación de subcuencas que integre en la medida de lo posible; comunidades de cada municipio por separado. Aunque lo anterior signifique que cierta parte territorial de una subcuenca que pertenece a un municipio quede bajo la injerencia administrativa de otro. Esto no debería ser motivo de conflicto, ya que se persigue el manejo de la unidad hidrológica mínima a partir de las comunidades insertas en su contexto espacial. A este efecto se utilizaron las coberturas digitales de límites municipales, caseríos, modelo digital de elevación MDE y red hídrica para delimitar con el uso del modelo SWAT unidades hidrológicas diferenciadas por el número de comunidades, dinámica de uso de la tierra y concentración de áreas críticas identificadas.

Ordenamiento hidrológico por subcuenca:

Tomando como base las salidas del modelo (acápite 4.3.2) y dado que se considera que explican bien la dinámica hidrológica temporal y espacial en la cuenca; se propone

elaborar una línea de base por unidad hidrológica diferenciada. Esta línea base debe contar con al menos los siguientes ítems (cuadro 19):

Cuadro 19. Factores considerados para el ordenamiento hidrológico de la cuenca

Descriptor	Fuente	Observaciones
Balance hídrico	Salidas generadas con el modelo SWAT.	Se logra cuantificar potencial por subcuenca. Debe continuarse afinando las entradas al modelo y mejorar las condiciones de calibración
Inventario de usuarios y extracciones	Encuestas a nivel de subcuenca	Construcción de bases de datos sobre usuarios, georeferenciación, aforo, consignación de derechos, determinación de cánones.
Directriz de usos del agua	Insumos anteriores	Se logra la definición de derechos y regular los aprovechamientos.
Oferta hídrica disponible	Insumos anteriores	Se cuantifica de la oferta bruta calculada con modelo menos los derechos de usuarios locales.

Un producto importante de esta fase, sería la comprensión de la realidad socioeconómica que gobierna el comportamiento hidrológico en la subcuenca. Asimismo, puede servir para afinar o reconsiderar la segmentación propuesta. Ésta puede ser redefinida sin invertir muchos recursos en una nueva operación del modelo.

Priorización de áreas:

Una vez que se obtiene un marco explicativo del ordenamiento hidrológico por subcuenca, especialmente lo referente a la oferta hídrica disponible; conviene priorizar las mismas para optimizar la toma de decisiones. El criterio principal de calificación estuvo sesgado a la cobertura de áreas críticas por subcuenca identificada en este estudio. Como se explicó (acápite 3.2.2.1) estas áreas favorecen condiciones de inestabilidad del terreno y desordenes hidrológicos, ya que involucran una serie de factores biofísicos y socioeconómicos. Asimismo, se analizó la participación relativa de cada subcuenca en la producción total de agua de la cuenca, dando mayor peso a aquellas que tienen una gran concentración de áreas críticas y un peso relativo superior en el rendimiento hídrico.

Concesionamiento de la oferta hídrica por subcuenca:

Una vez que se conoce la oferta hídrica disponible por unidad diferenciada y por estación seca o lluviosa, así como el grado de prioridad de cada subcuenca, la autoridad de cuenca podrá evaluar el tipo de administración a aplicarles. La administración se refiere a lo

estipulado en la nueva ley de aguas sobre prestadores de servicio, sus deberes y derechos. Indicándose claramente las responsabilidades de éstos en la gestión integral de los recursos bajo su jurisdicción de manejo. En este contexto y de acuerdo a los lineamientos estipulados por la comisión interinstitucional y la nueva Ley de aguas, se pueden proponer tres escenarios:

1. Asumir el manejo de las subcuencas dentro de la estructura de convenios de la municipalidad y SANAA.
2. Asignar la subcuenca a las juntas de agua comunales u organizaciones de vecinos que conviven dentro de la misma. Estos tienen la prioridad según la ley.
3. Asignar la administración a organismos privados.

Las opciones dos y tres deben forzosamente incluir un proceso previo de traspaso por parte de SANAA y la correspondiente capacitación que será necesaria para llevar a cabo sus funciones. El sistema de cobros o cánones será prescrito y regulados por la figura legal de un **Ente Regulador** descrito en la ley. Este sistema puede incluir un canon base que puede ser calculado por la oferta hídrica mínima calculada por subcuenca, así como un referencial de premios o castigos que pueden asumirse por las condiciones de calidad del agua que sale de cada subcuenca. Un buen indicador lo pueden representar las condiciones de turbidez del agua que podría ser fácilmente monitoreada (León, 2001). Sin embargo, será necesario un análisis más profundo a este tópico, el cual está fuera de los alcances del presente estudio.

En lo referente a las acciones de restauración hidrológico-forestal que son necesarias de implementar en las áreas críticas, se propone revisar las medidas de restauración que han sido ejecutadas por el SANAA utilizando mano de obra local y materiales de muy bajo costo (anexo 6), estimándose la razón beneficio/costo de estas obras en 1,39 (Irías, 1995). Con lo anterior se pueden ejecutar obras cuya efectividad local ha sido evaluada y que además podría fortalecer las economías locales. En lo referente a las prácticas agro-conservacionistas a implementar, ya se mencionó anteriormente que estas han sido identificadas y recomendadas con precisión en estudios anteriores (SANAA, 2000).

Plan de monitoreo:

Un plan de seguimiento a la oferta hídrica cuantitativa y cualitativa por subcuenca será necesario para delimitar los derechos de propiedad (Piedra, 2002). En este aspecto, existe una red de puntos de muestreo con una base de datos temporal y espacial (anexo 7) sobre calidad de agua para diferentes puntos de muestreo en la cuenca realizado por SANAA, cuyo uso puede ser potenciado. Sin embargo, será necesaria su ampliación hacia la cobertura de todos los puntos de aforo por unidad diferenciada y su modernización hacia conceptos de recabado de datos automático (estaciones telemétricas) en línea. Rivera y León (2000) describen con buen detalle estudios y técnicas conducentes a la medición de caudales y erosión que se han realizado en Honduras, constituyéndolo en buen punto de referencia para iniciar este proceso.

Se considera que si la autoridad de cuenca decide implementar el sistema de premio-castigo enunciado anteriormente, deberá incluir la fase de monitoreo forzosamente.

En las figuras siguientes, se muestra la representación esquemática de la presente propuesta de ordenamiento hidrológico en la cuenca, así como de su respectiva inserción en los lineamientos de la comisión interinstitucional.

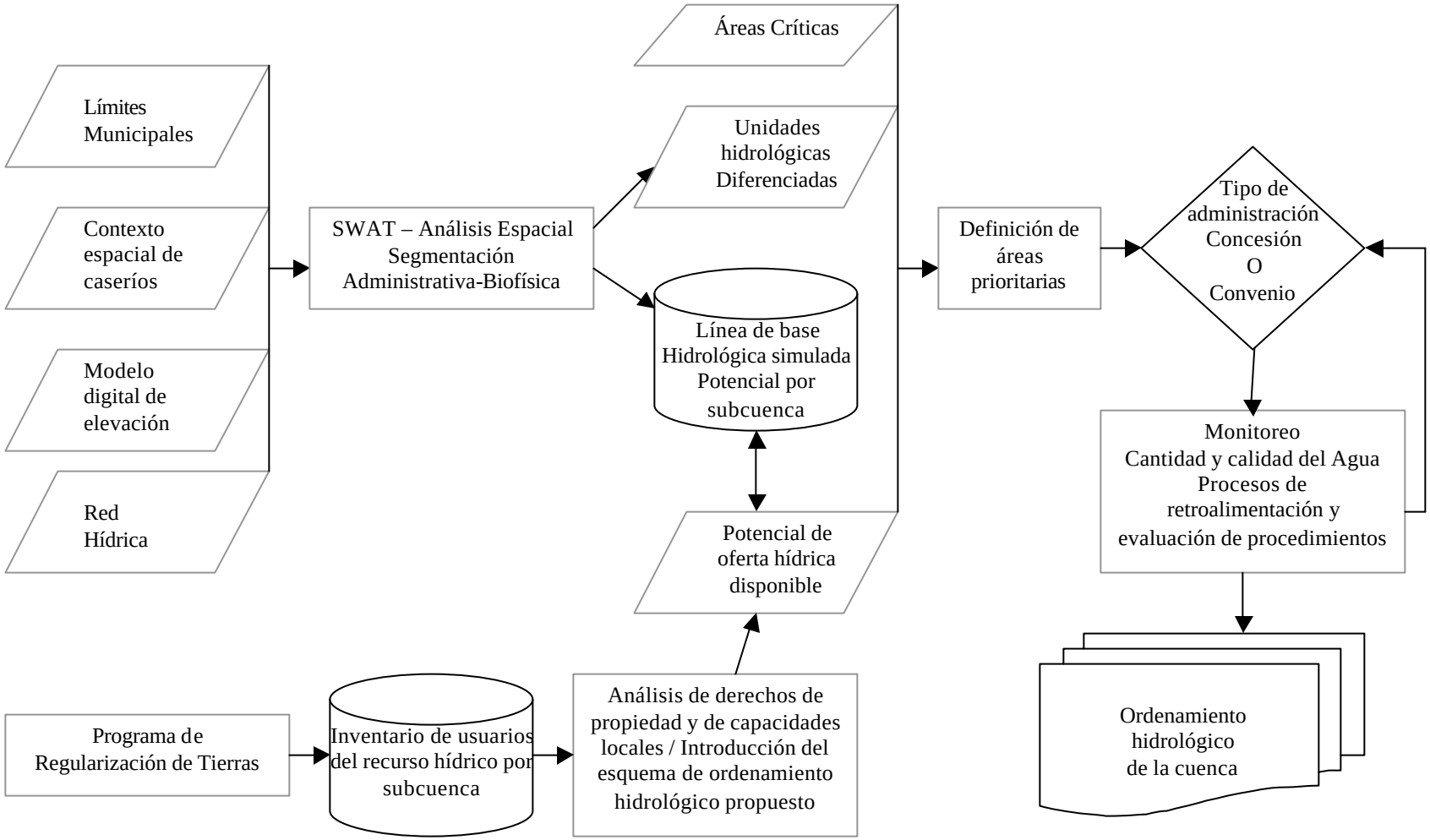


Figura. 11. Proceso metodológico propuesto para el ordenamiento hidrológico en la cuenca del Río Guacerique.

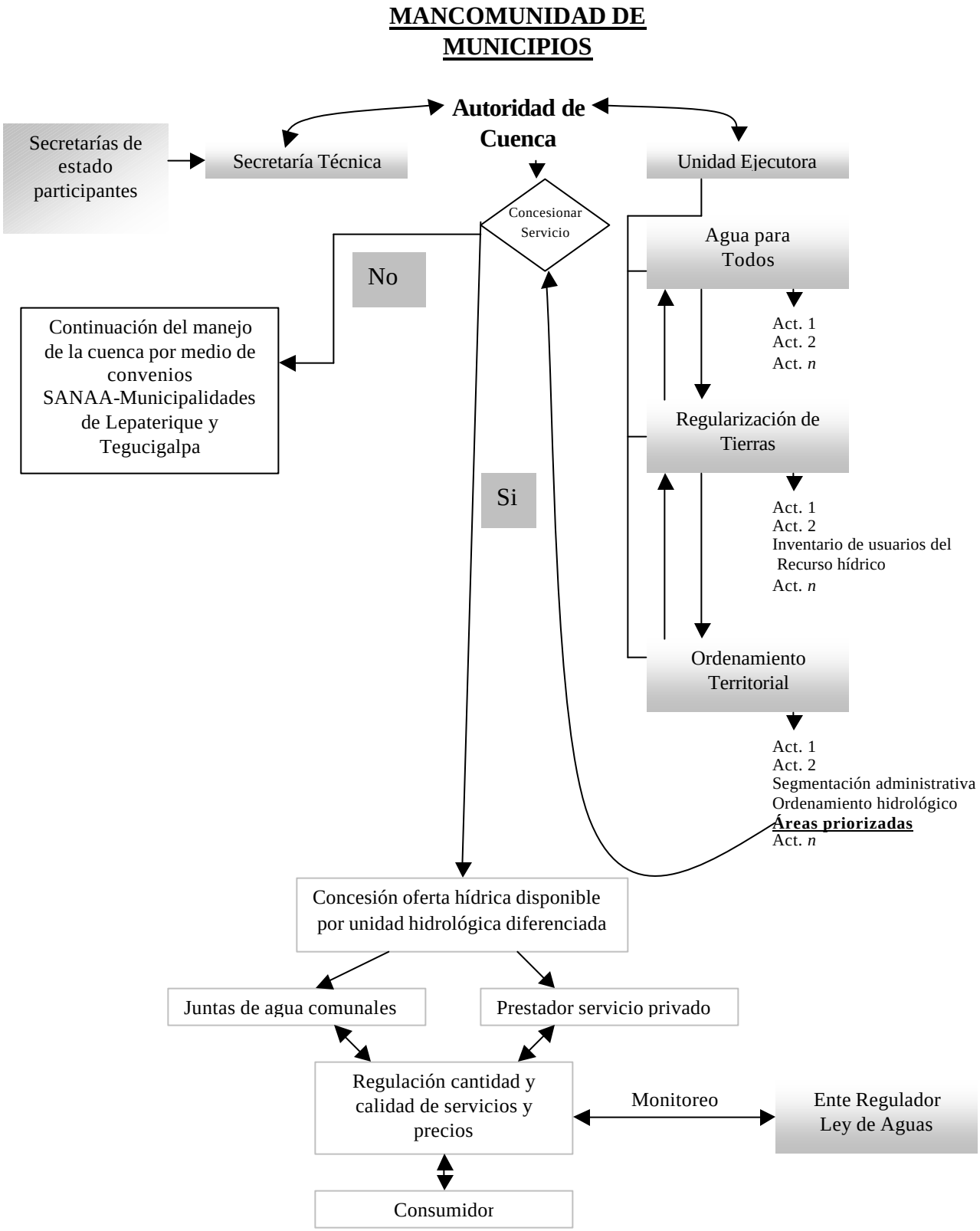


Figura. 12. Inserción del proceso de ordenamiento hidrológico propuesto en la estructura de autoridad de cuenca.

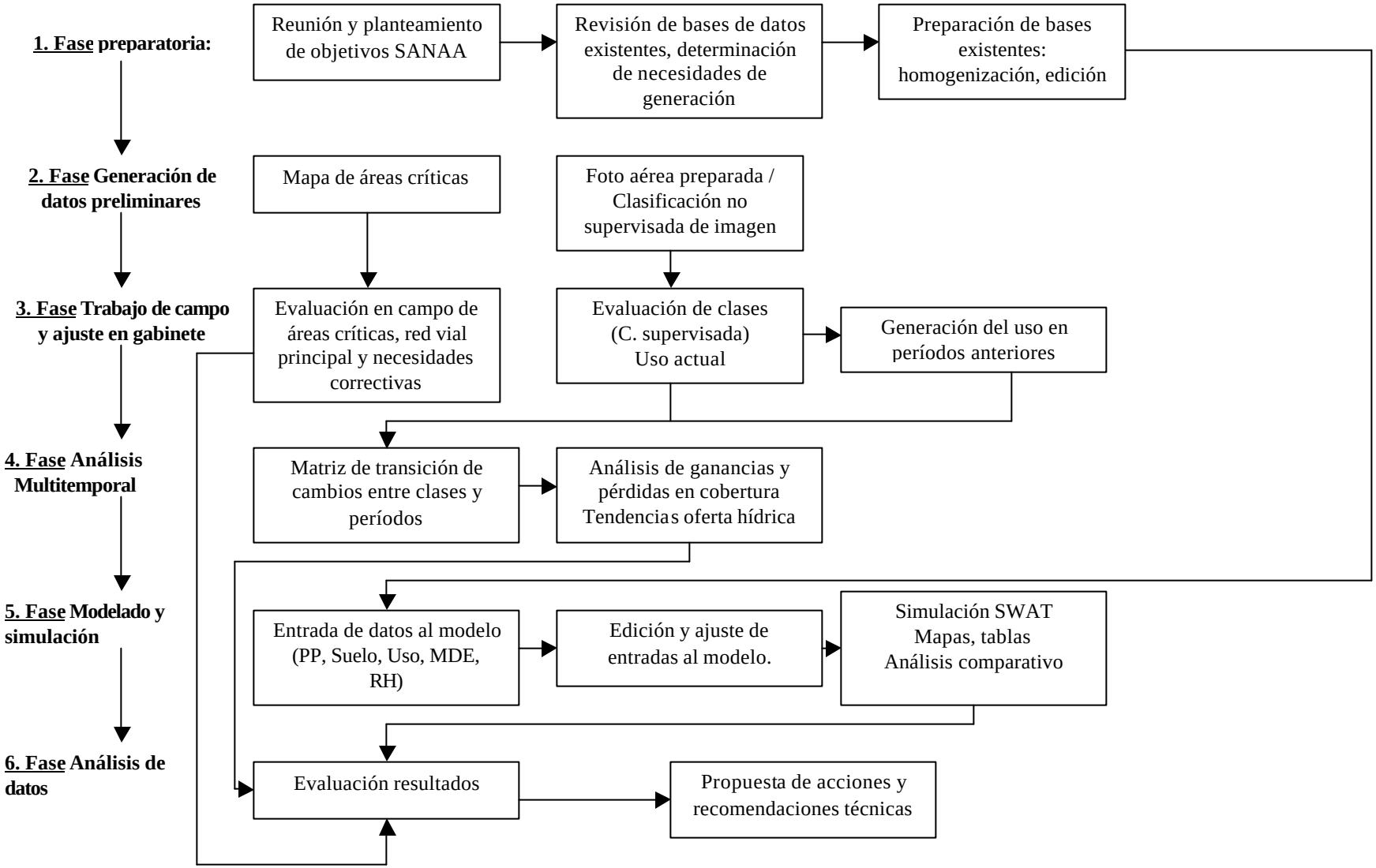


Figura.13. Diagrama consolidado de fases del estudio

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Usos de la tierra en la Cuenca del Río Guacerique

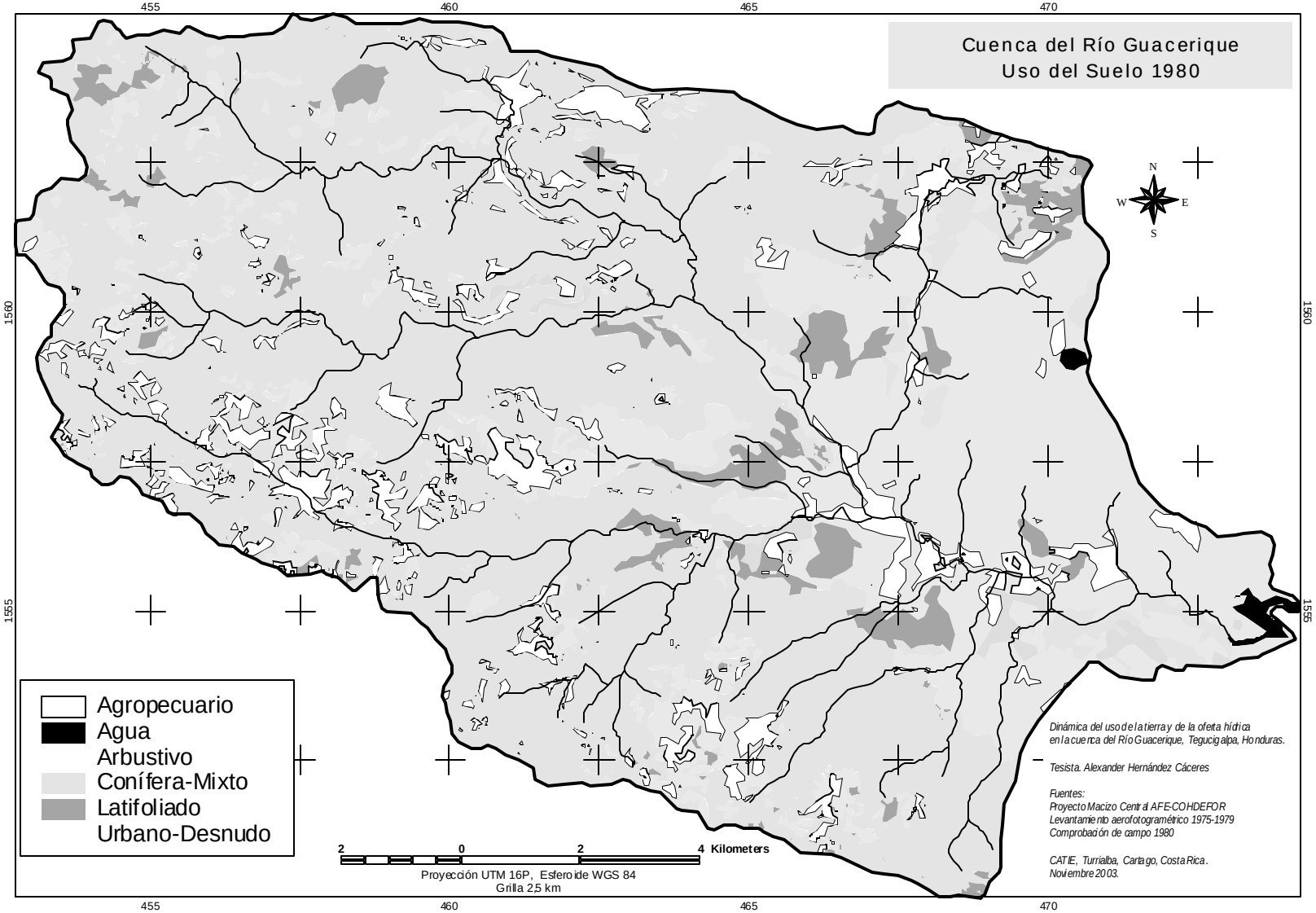
Las existencias por clases de uso muestran una variada dinámica en los escenarios analizados. El resultado de la población completa *N* = 215.644 está a continuación.

Cuadro 20. Existencias por tipo de uso en la Cuenca del Río Guacerique

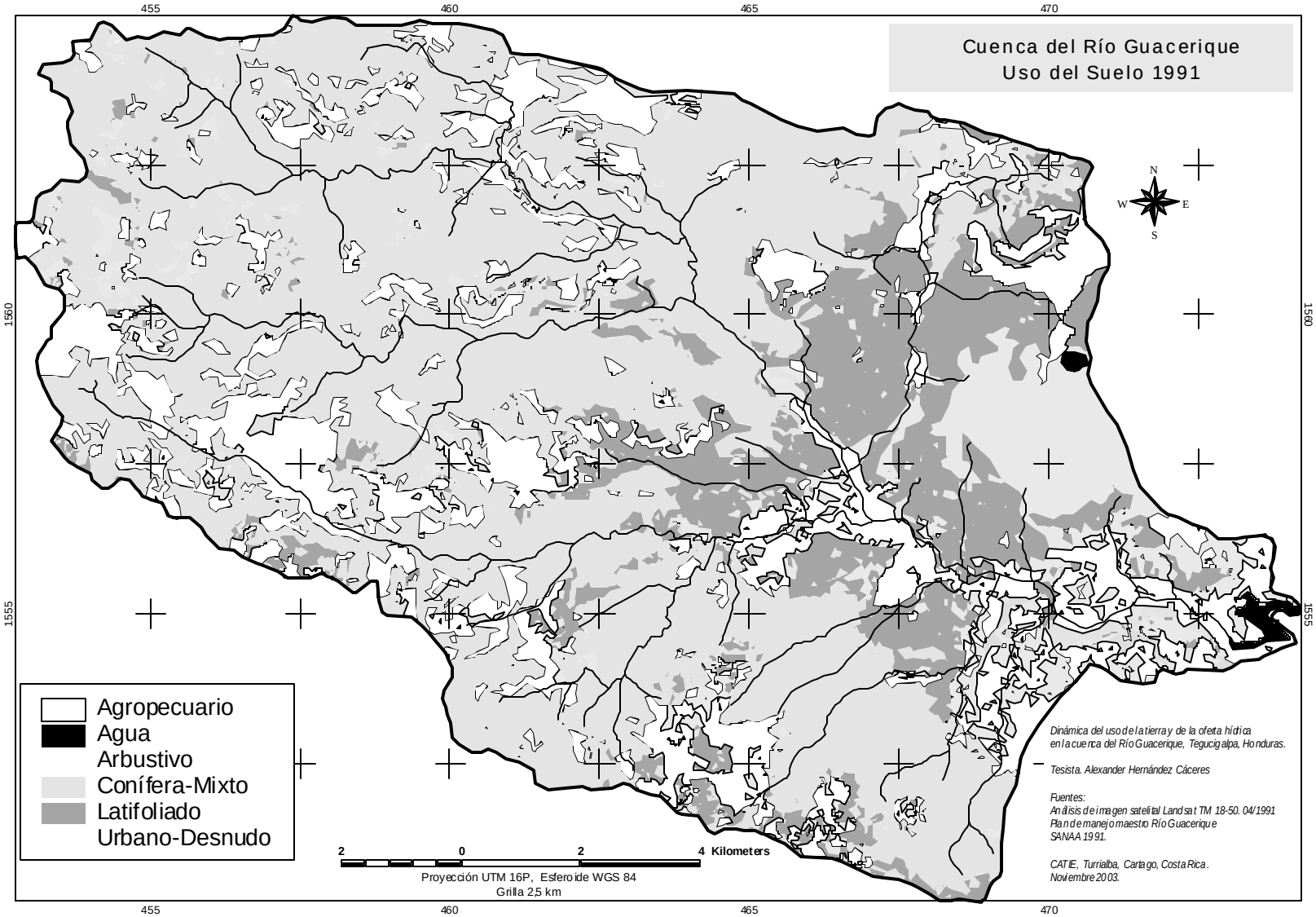
	Escenario 1980		Escenario 1991		Escenario 2003	
Clase de Uso	**Ha**	**%**	**Ha**	**%**	**Ha**	**%**
Agricultura	1848,6	9,53	1994,49	10,28	2263,95	11,67
Agua	56,16	0,29	56,16	0,29	59,58	0,31
Conífera	7670,97	39,53	6118,56	31,53	4988,97	25,71
Latifoliado	886,77	4,57	2800,44	14,43	3871,26	19,95
Arbustiva	4567,77	23,54	1795,59	9,25	1269,18	6,54
Mixto	4091,4	21,08	4261,32	21,96	3446,46	17,76
Pasto	123,66	0,64	2321,37	11,96	2475,72	12,76
Urbano-desnudo	162,54	0,84	59,94	0,31	1032,75	5,32

El estado actual de los recursos presenta una cobertura boscosa (Conífera, Latifoliado y Mixto) del 63,41% en comparación con un 65,18% y un 67,91% de 1980 y 1991 respectivamente. Por otra parte, los sistemas agropecuarios (Agricultura y Pastos) cubren en la actualidad el 24,42% en contraste con un 10,16% y un 22,24% para los períodos anteriores. Lo anterior presenta un panorama temporal de estabilidad en término de cobertura de los sistemas boscosos y una carrera ascendente de los agropecuarios.

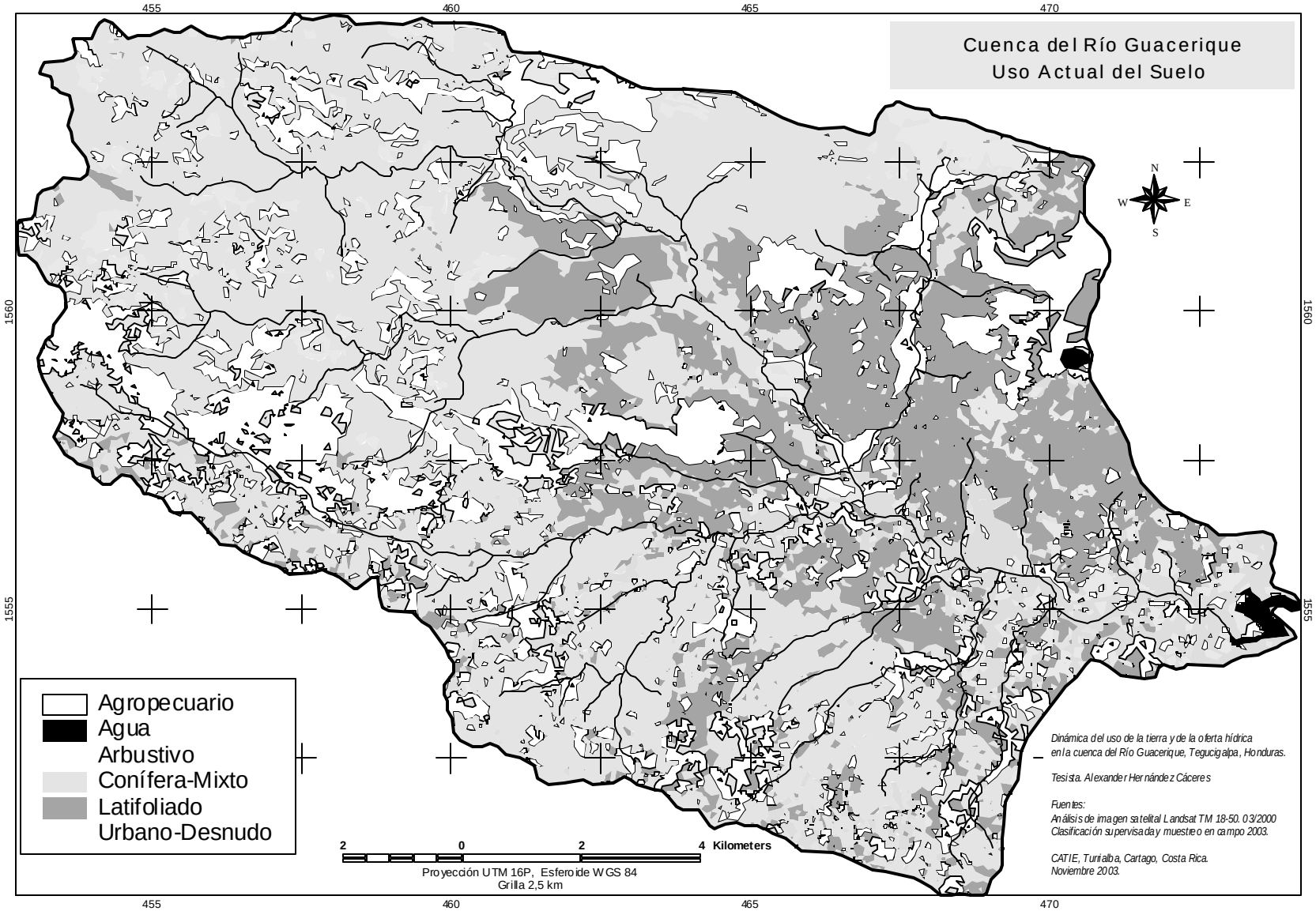
Sin embargo, al analizar la distribución espacial de los usos (Mapas 1, 2 y 3) se puede observar: una redistribución de los mismos en la cuenca, movimientos dentro de las categorías de bosque y agropecuario, una reducción considerable de la categoría arbustiva e incremento de las zonas urbano-desnudas. Lo anterior conduce a la pertinencia de analizar la cuenca en un contexto de dos modelos de transición: el de 1980-1991 y el de 1991-2003, encontrándose diferencias entre ambos. Debido a que ambos períodos han estado bajo la influencia de diferentes situaciones y reguladores ambientales, políticos, legales e institucionales; éstos tratarán de ser abordados en lo posible para cada modelo. La versión digital de los mapas incluye todas las clases de uso, los mapas siguientes están sintetizados en clases más homogéneas, sólo para efectos de representación cartográfica.



Mapa 1. Uso del suelo durante el escenario 1980.



Mapa 2. Uso del suelo durante el escenario 1991.



Mapa 3. Uso actual del suelo 2003.

4.1.1 Escenario 1980-1991

Durante este período, fue manifiesta la dinámica entre clases de uso. El cuadro 21 muestra este comportamiento, explicado por la totalidad de la población N = 215.644 celdas. No obstante, conviene revisar antes los resultados de una prueba de Chi-Cuadrado para verificar la significancia del cambio en este período con las frecuencias encontradas en la muestra n = 2.440. Esta prueba fue realizada con la opción tablas de contingencia de Infostat. El resultado o salida del programa estadístico fue:

Tablas de contingencia

Frecuencias absoluta.Total de puntos aleatorios por categoría por escenario

Uso	80	91	Total
Agricultura	245	251	496
Agua	9	9	18
Conífera	964	752	1716
Latifoliado	89	343	432
Arbustiva	584	229	813
Mixto	512	539	1051
Pasto	14	308	322
Urbano-desnudo	23	9	32
Total	2440	2440	4880

Estadístico	Valor	gl	p
Chi Cuadrado Pearson	605.87	7	<0.0001
Chi Cuadrado MV-G2	684.35	7	<0.0001
Coef.Conting.Cramer	0.25		
Coef.Conting.Pearson	0.33		

Existen diferencias estadísticas en las frecuencias absolutas por categoría de uso entre escenarios, por lo que se rechaza la hipótesis nula de no existencia de cambios en el período 1980 – 1991. Un punto considerable de atención a la matriz presentada es la diagonal de la misma, donde se expresa la estabilidad del ecosistema o la persistencia de áreas dentro de la misma clase (Baritto, 2000; Bell, 1998).

Cuadro 21. Dinámica de uso en el escenario 1980-1991

		Categorías de uso 1991								Area 1980	
		A	**Ag**	**C**	**L**	**Ar**	**M**	**P**	**U_D**	**Ha**	**%**
Categorías de uso 1980	**A**	**735,48**		48,06	63,9	331,92		669,24		1848,60	9,53
	Ag		**56,16**							56,16	0,29
	C	805,41		**5305,95**	43,29	28,98	1135,53	351,81		7670,97	39,53
	L	48,69		9,72	**588,78**		184,95	54,63		886,77	4,57
	Ar	296,37		190,8	1704,15	**1377,54**		998,91		4567,77	23,54
	M	93,15		531,36	378,54	14,76	**2939,67**	133,92		4091,40	21,08
	P	10,17		31,86	2,88			**78,75**		123,66	0,64
	U_D	5,22		0,81	18,9	42,39	1,17	34,11	**59,94**	162,54	0,84
Area 1991	**Ha**	1994,49	56,16	6118,56	2800,44	1795,59	4261,32	2321,37	59,94		
	%	10,28	0,29	31,53	14,43	9,25	21,96	11,96	0,31		

Llave: A: Agricultura; Ag: Agua; C: Conífera; L: Latifoliado; M: Mixto; P: Pasto; U_D: Urbano-desnudo; AR: Arbustivo

A partir del cuadro 21, cabe resaltar algunos puntos de interés. Por ejemplo, la recuperación de áreas con cobertura agropecuaria (agricultura y pastos) a bosque conífera, explicada probablemente por la ejecución de plantaciones por parte de SANAA en los años previos a 1991, especialmente a finales de los 80´s.

Los movimientos dentro de la cobertura boscosa de conífera y latifoliado a bosque mixto es explicada por la ecología de la vegetación que compone estas masas; especies de los géneros *Pinus sp*. y *Quercus sp*. de génesis colonizadora, especialmente los últimos (Fule *et al.*, 2000). Dado lo anterior, es muy común encontrar ecotonos o zonas de transición de estas 2 especies en la cuenca. La transición de bosques mixtos a rodales puros de una sola especie (*Pinus sp*. o *Quercus sp*.), se debe probablemente a las condiciones en las que se aprovecha de manera más enfática una sola especie por las comunidades (uso de *Quercus sp*. para leña) o el uso de *Pinus sp*. para madereo artesanal no comercial. Por otra parte, vale la pena observar el aumento considerable de la clase latifoliado de 4,57% a 14,43% de proporción de la cuenca; el cual se debió especialmente al movimiento positivo provisto por la vegetación secundaria que pasó en sucesión a un estado de bosque, especialmente en las zonas con baja intervención antropocéntrica.

El aumento considerable en la cobertura de pastos de 0,64% a 11,96%, principalmente a costa de la clase arbustiva y agricultura, podría considerarse un punto de partida lógico. Debido a que es mucho más fácil por ende racionalmente más económico para el campesino remover vegetación en estado secundario que hacerlo de bosques conformados. Por otra parte, existe la posibilidad que durante esta década la oferta de mercados favoreciera la cría de ganado o se dieran condiciones de cambios sucesionales entre agricultura a pastos y viceversa, dándose la condición que cuando se capturó la imagen satelital 1991 se estuviera favoreciendo el último. La reducción de la clase de uso Urbano-Desnudo no implica en ningún momento un fenómeno de abandono de construcciones. Dada la condición que por motivos logísticos en el procesamiento de las imágenes no pudieron separarse las dos clases independientemente, se sugiere que la dinámica favoreció la ocupación de tierras desnudas por vegetación arbustiva secundaria y pastos naturales. Asimismo, estas zonas después de sufrir incendios son comúnmente

colonizadas por *Pinus sp*. pero también por *Quercus sp* (Fule *et al.*, 2000; Alonso *et al.*, 1998).

En el mismo contexto y bajo un ambiente de análisis probabilístico, se presenta la matriz de transición Markoviana. Esta se deriva del análisis de frecuencias de la muestra *n* = 2.440 puntos aleatorios.

Cuadro 22. Matriz de transiciones markovianas para el período 1980-1991

Categorías de uso 1980	Categorías de uso 1991							
	A	**Ag**	**C**	**L**	**Ar**	**M**	**P**	**U_D**
A	**40,00**	0,00	3,27	3,67	16,33	0,00	36,73	0,00
Ag	0,00	**100,00**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C	10,48	0,00	**67,84**	0,83	0,41	15,04	5,39	0,00
L	1,12	0,00	0,00	**68,54**	0,00	23,60	6,74	0,00
Ar	6,85	0,00	4,62	37,33	**29,62**	0,00	21,58	0,00
M	2,15	0,00	11,33	9,18	0,39	**72,85**	4,10	0,00
P	0,00	0,00	35,71	0,00	0,00	0,00	**64,29**	0,00
U_D	0,00	0,00	0,00	0,00	43,48	0,00	17,39	**39,13**

Llave: A: Agricultura; Ag: Agua; C: Conífera; L: Latifoliado; M: Mixto; P: Pasto; U_D: Urbano-desnudo; AR: Arbustivo

Como se recordará, la diagonal de esta matriz representa la estabilidad del ecosistema. Puede observarse que después de la clase Agua con una probabilidad de estabilidad del 100%, la clase de bosque mixto (72,85%), latifoliado (68,54%) y conífera (67,84) son las más estables. Lo anterior es importante, pero aunque las clases de uso boscoso demuestren alta persistencia, más importante aún es caracterizar su estabilidad espacial que presenta un esquema para la conservación de biodiversidad. Una perspectiva diferente muestra la clase agricultura con una probabilidad de mantenerse de solamente 40%, dando una idea de baja rentabilidad económica, ya que en este período tuvo una probabilidad de ser sustituida por pastos (36,73%) o dejada en abandono hacia vegetación secundaria (16,33%). Finalmente, una mayor racionalidad ecológica se encuentra en la clase secundaria ya que presenta una baja estabilidad o persistencia (29,62%), la cual es explicada por su sucesión a vegetación mayor latifoliada (37,33%).

4.1.2 Escenario 1991-2003

En este período también se aplicó la prueba de Chi-Cuadrado para comprobar la significancia estadística de dinámica de usos. Los resultados muestran lo siguiente:

Tablas de contingencia

Frecuencias absoluta.Total de puntos aleatorios por categoría por escenario

Uso	91	2003	Total
Agricultura	251	283	534
Agua	9	10	19
Conífera	752	614	1366
Latifoliado	343	497	840
Arbustiva	229	160	389
Mixto	539	418	957
Pasto	308	319	627
Urb-desnu	9	139	148
Total	2440	2440	4880

Estadístico	Valor	gl	p
Chi Cuadrado Pearson1	86.07	7	<0.0001
Chi Cuadrado MV-G2	209.50	7	<0.0001
Coef.Conting.Cramer	0.14		
Coef.Conting.Pearson	0.19		

Existen diferencias estadísticas en las frecuencias absolutas por categoría de uso entre estos escenarios. Por lo que se rechaza la hipótesis nula de no existencia de cambios entre los períodos de 1991-2003. A continuación los resultados de toda la población *N*.

Cuadro 23. Dinámica de uso en el escenario 1991-2003

		Categorías de uso 2003								Area 1991	
		A	**Ag**	**C**	**L**	**Ar**	**M**	**P**	**U_D**	**Ha**	**%**
Categorías de uso 1991	**A**	**1362,33**		79,2	69,57	165,24		184,59	133,56	1994,49	10,28
	Ag		**56,16**							56,16	0,29
	C	314,46		**4208,85**		127,35	1167,84	257,85	42,21	6118,56	31,53
	L	126,72		0,18	**1670,04**	40,14	246,6	514,44	202,32	2800,44	14,43
	Ar	115,74		15,57	883,98	**608,04**		116,28	55,98	1795,59	9,25
	M	204,12		452,25	1022,58	183,33	**2032,02**	290,52	76,5	4261,32	21,96
	P	140,58	3,42	232,92	225,09	145,08		**1112,04**	462,24	2321,37	11,96
	U_D								**59,94**	59,94	0,31
Area	**Ha**	2263,95	59,58	4988,97	3871,26	1269,18	3446,46	2475,72	1032,75		
2003	**%**	11,67	0,31	25,71	19,95	6,54	17,76	12,76	5,32		

Llave: A: Agricultura; Ag: Agua; C: Conífera; L: Latifoliado; M: Mixto; P: Pasto; U_D: Urbano-desnudo; AR: Arbustivo

Es obvio que algunas de las condicionantes mencionadas en el acápite anterior prevalecen para explicar la dinámica de este período. Sin embargo, es de especial interés el aumento considerable de la clase urbano-desnudo de un 0,31% a 5,32%, explicada por la ejecución en el período 1991-1993 del megaproyecto urbanístico de interés social "Ciudad Mateo" en el sureste de la cuenca. Este proyecto se vio envuelto en una serie de incompatibilidades institucionales y políticas, dada el carácter polémico de su ubicación

cercana al embalse de "Los Laureles", que aprovisiona de agua a cerca de 250.000 personas (SANAA, 2000). Puede asumirse que este proyecto desencadenó un efecto expansivo de urbanización, accesos viales periféricos e infraestructura para la venta de servicios en los alrededores, dadas las posibilidades económicas que acarrearía su inicio de operaciones. No obstante, el proyecto fue detenido en su ejecución y hasta el año 2002 es que se toman acciones de alto nivel para decidir su futuro.

Es pertinente traer a colación que en el año 1992 se aprobó la "Ley de Modernización del Sector Agrícola"; instrumento legislativo que derogaba el derecho del estado al vuelo forestal independientemente de la tenencia del suelo. Con esta situación, se regresó a los propietarios de terrenos el derecho a explotar el recurso bosque, que el caso de la zona central de Honduras está sesgado a la explotación de coníferas. Es de suponer que esta nueva política nacional acarreó efectos negativos sobre las masas forestales consideradas comerciales, dada la racionalidad económica de explotar un recurso valioso como la madera, derecho que anteriormente era denegado. Aún así, el efecto de reducción no es tan drástico como los reportados por Hernández *et al*. (2000) para la cuenca hidrográfica del Río Humuya en Honduras; justificado posiblemente por el carácter legal de zona forestal protegida que acoge a la cuenca del Río Guacerique (Acápite 3.1.7).

Nuevas ópticas de atención pueden visualizarse al revisar la matriz Markoviana.

Cuadro 24. Matriz de transiciones markovianas para el período 1991-2003

Categorías de uso 1991	Categorías de uso 2003							
	A	**Ag**	**C**	**L**	**Ar**	**M**	**P**	**U_D**
A	**68,92**	0,00	3,98	2,79	7,97	0,00	9,56	6,77
Ag	0,00	**100,00**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C	5,45	0,00	**67,02**	0,00	2,13	19,81	4,52	1,06
L	4,66	0,00	0,00	**57,73**	0,58	9,04	19,53	8,45
Ar	5,68	0,00	0,00	49,78	**35,81**	0,00	6,11	2,62
M	4,64	0,00	12,24	28,20	3,90	**44,16**	5,57	1,30
P	4,87	0,32	11,04	8,44	6,17	0,00	**48,70**	20,45
U_D	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	**100,00**

Llave: A: Agricultura; Ag: Agua; C: Conífera; L: Latifoliado; M: Mixto; P: Pasto; U_D: Urbano-desnudo; AR: Arbustivo

De las masas boscosas, sólo la conífera presenta una continuidad en la probabilidad de persistencia (67,02% en relación a 67,84% del período anterior). Por otra parte, las clases latifoliado (57,73%) y mixto (44,16%) muestran descensos en este aspecto. Aunque la clase de latifoliado aumentó su superficie total, no es debida a un alto nivel de estabilidad y lo debe más al aporte recibido de la clase arbustiva en su movimiento sucesional y al de mixto; muy probablemente por la entresaca de conífera en las cercanías de las comunidades que buscan esencialmente preservar las fuentes de energía para leña, en este caso *Quercus sp*. Interesante también es el patrón inverso que muestran los sistemas agropecuarios. En este caso se elevan las probabilidades de mantener zonas agrícolas (68,92%) debidas posiblemente por el apogeo de cultivos intensivos de alta rentabilidad con períodos de retorno muy cortos (hortícola); situación que ha favorecido la expansión de frontera agrícola hacia coníferas (5,45%), mixto (4,64%) y latifoliado (4,66%). En el otro lado, los pastos reducen sus probabilidades de persistencia de 64,29% a 48,70%, explicado por su transición a la clase urbano-desnudo mayoritariamente.

Como ha sido explicado en estos últimos 2 acápites, la dinámica temporal de los usos en la Cuenca del Río Guacerique ha sido variada y puede ser interpretada por diversos tipos de situaciones. Pero en esencial, y dadas las condiciones cambiantes de los mercados; obedece a cierto grado de racionalidad económica de maximización de beneficios por parte del tomador de decisiones, representado por las diferentes comunidades al interior de la cuenca y las condicionantes externas que regulan su comportamiento.

4.1.3 Cambios en el patrón del paisaje

De acuerdo a Kammerbauer y Ardón (1999), un indicador útil de la fragmentación natural de los hábitat es el grado de parcheo del paisaje, especialmente en áreas boscosas. En este contexto, se presenta a continuación el análisis practicado a los diferentes escenarios de uso, con la diferencia que se analizaron las masas de bosque coníferas y mixtas como una sola y las de agricultura y pasto como otra. Lo anterior se justifica en que las primeras están muy vinculadas en su dinámica tendiente a la reducción y se persigue separar su comportamiento de las masas de latifoliado puro, entretanto las segundas se pueden comprender mejor como sistemas agropecuarios. Asimismo, se integraron las demás clases (arbustiva, agua y urbano-desnudo) en otra clase sintética.

Del cuadro 25 se visualiza que la tasa de deforestación para conífera y mixto observó un incremento en el último escenario 1991-2003 de 0,49% en relación al anterior. En este contexto las tasas encontradas no difieren mucho de las encontradas por Rivera (1998) para todo el territorio nacional que se calcularon en 0,9% para conífera y 1,2% para latifoliado.

En la cuenca se encontraron tasas de recuperación para la clase latifoliado, que como se explicó anteriormente obedecen a una racionalidad socio-económica ya que las comunidades la prefieren para mantener rodales para leña. No inclinándose por la conífera que es regulada por AFE-COHDEFOR como especie comercial y por lo tanto se dan esquemas restrictivos a su uso; convirtiéndola para las comunidades como un bien marginal al que no se tiene acceso y que por lo tanto interrumpe sus actividades. Asimismo, la recuperación de latifoliado obedece al patrón ecológico. En primera instancia por la tendencia observada de sucesión de la clase arbustiva y también porque la zona está sometida a incendios con una temporalidad anual. Este patrón de fuego aunque limita la supervivencia de árboles de *Quercus sp*. favorece el establecimiento y diseminación de sus rebrotes, mientras que por lo general extermina la regeneración pinar (Fule *et al*., 2000; Alonso *et al*., 1998; Buch, 1988).

Cuadro 25. Cambios en la cobertura entre los períodos 1980 y 2003 en la cuenca del Río Guacerique.

Escenario	**Uso**	**Area**		**Cambios**		**Ganancia o Pérdida**
		(ha)	**(%)**	**(ha)**	**(%)**	**(% por año)**
1980	Bosque Conífera y Mixto	11762,37	60,61			
	Bosque Latifoliado	886,77	4,57			
	Agropecuario	1640,34	8,45			
	Otros Usos	5118,39	26,37			
1991	Bosque Conífera y Mixto	10379,88	53,48	-1382,49	-11,75	-1,07
	Bosque Latifoliado	2800,44	14,43	1913,67	215,80	19,62
	Agropecuario	4315,86	22,24	2675,52	163,11	14,83
	Otros Usos	1911,69	9,85	-3206,70	-62,65	-5,70
2003	Bosque Conífera y Mixto	8435,43	43,46	-1944,45	-18,73	-1,56
	Bosque Latifoliado	3871,26	19,95	1070,82	38,24	3,19
	Agropecuario	4739,67	24,42	423,81	9,82	0,82
	Otros Usos	2361,51	12,17	449,82	23,53	1,96

Para evaluar el parcheo de las masas boscosas se utilizó el índice de complejidad de forma ICF (Kammerbauer y Ardón, 1999) que es la tasa de la división del perímetro promedio por el área promedio de los usos. ICF altos indican parches de forma más irregular que los de ICF bajos.

En referencia a la cuenca (cuadro 26), el número de poligonales por tipo de bosque aumentó considerablemente, dejando un paisaje altamente fragmentado de lo que anteriormente eran zonas contiguas. Asimismo, la dinámica de uso ocasionada por la presión agropecuaria ha reducido el tamaño promedio de los parches de Conífera y Mixto, dejando únicamente una masa contigua superior de 5715,37 ha de un original que era casi el doble. El bosque latifoliado había mostrado una tendencia hacia la consolidación de masas boscosas continuas para el año 1991, reduciendo su ICF. No obstante, siguió la tendencia de los conífera y mixto hacia el 2003, presentando un paisaje altamente fragmentado, con una variante de una zona continua superior de 1559,94 ha ubicado en la zona baja de la cuenca en su sector norte, propiciando una zona homogénea para la biodiversidad.

Cuadro 26. Cambios en la contigüidad espacial de las zonas boscosas como indicadores de fragmentación de hábitat e irregularidad hidrológica entre los períodos 1980 y 2003 en la cuenca del Río Guacerique.

Escenario	**Tipo de Uso**	**Número de Parches**	**Área (ha)**			**Perímetro Promedio (m)**	**Indice de Complejidad de Forma ICF (m/ha)**
			Promedio	Mínimo	Máximo		
1980	Conífera y Mixto	107	110,19	0,06	11304,34	5516,21	50
	Latifoliado	129	6,85	0,06	102,55	936,23	137
1991	Conífera y Mixto	268	38,82	0,06	9974,82	2238,63	58
	Latifoliado	401	6,98	0,06	1217,54	905,27	130
2003	Conífera y Mixto	478	17,72	0,06	5715,37	1734,31	98
	Latifoliado	683	5,67	0,06	1559,94	851,38	150

El mismo cálculo se aplicó a las otras clases, obteniendo ICF de 190, 279 y 232 para las clases agropecuario, arbustivo y urbano-desnudo respectivamente. De particular interés fue la de agropecuario que en 1991 mostraba un ICF de 198. Lo anterior significa que la intervención humana ha producido en el último período analizado una forma más simple de paisaje para esta clase o una aglomeración de parcelas.

La situación presentada muestra dos implicaciones de interés: (a) parches de bosque con tamaño promedio muy reducido que resulta en hábitat reducidos para la fauna de la región (Kammerbauer y Ardón, 1999) y (b) pérdida de la continuidad espacial en su función reguladora de los procesos hidrológicos en la cuenca (Sandströn, 1998; Bruijnzeel, 1989).

4.1.4 Análisis de factores directrices

Aunque no puede desvirtuarse el efecto regulador que condicionantes político-legales, económicos y socio-institucionales tienen sobre la dinámica de usos en la cuenca; la representación espacial de los mismos se vuelve compleja al no contar con datos actualizados y precisos. Por lo anterior, este ejercicio no contempla este tipo de variables. Limitándose al análisis estadístico de las variables descritas en el acápite 3.2.1.4. En primera instancia, se evaluó la correlación entre variables. Esta primera aproximación persigue evaluar lógica de correspondencia entre los datos. Encontrándose correlaciones que se explican bien en el medio. Ejemplo de estas es la precipitación con la altitud, observando un r = 0,67 con significancia $p<0.0001$, donde es generalizado aumentos en la cantidad de agua precipitada con aumentos en la altitud. Similares tendencias se observaron entre las demás variables. Asimismo, para analizar o visualizar patrones de asocio entre estas variables, se recurrió a la técnica del análisis de conglomerados, cuya representación básica está dada por el dendrograma.

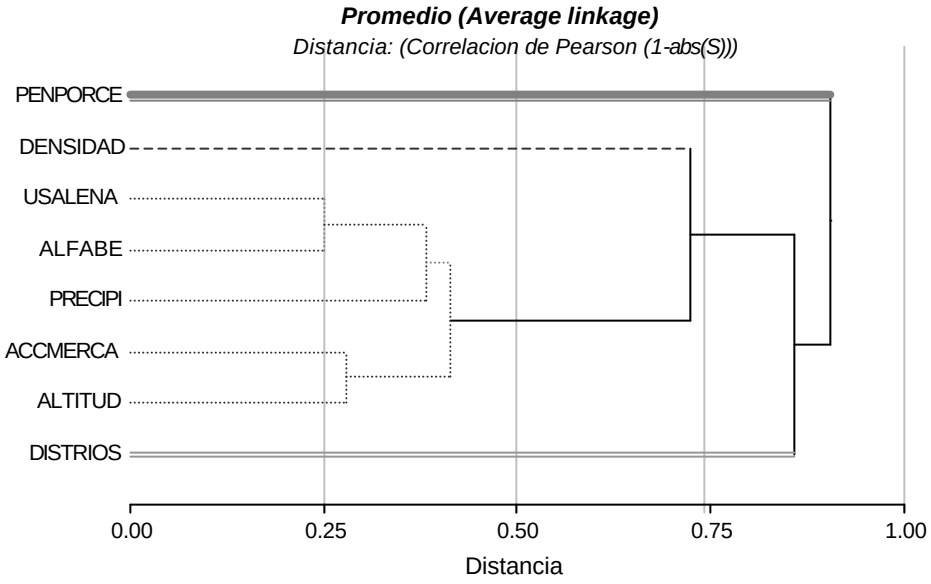


Figura 14. Dendrograma de tipos de conglomerados en las variables reguladoras de la dinámica de uso

Se observan distintas tendencias de aglomeración, denotando una baja integración de las variables pendiente y distancia a ríos con el resto; mismas que guardan una baja asociación y formaron conglomerados cada una. No es el caso de las demás cuya fuerza asociativa las agrupó en un solo conglomerado. Esperándose por lo tanto, que estas dos variables tengan muy poco peso o poder regulador sobre las existencias encontradas en el escenario actual y sobre la dinámica de cambios que se muestra a continuación.

Análisis de componentes principales

Datos estandarizados

Autovalores

Lambda	Valor	Proporción	Prop Acum
1	5.97	0.75	0.75
2	1.09	0.14	0.88
3	0.70	0.09	0.97
4	0.14	0.02	0.99
5	0.07	0.01	1.00
6	0.03	4.1E-03	1.00
7	4.3E-04	5.4E-05	1.00
8	0.00	0.00	1.00

Autovectores

Variables	e1	e2
DISTRIOS	0.24	0.73
PENPORCE	0.32	-0.44
ALTITUD	0.41	0.04
PRECIPI	0.36	-0.37
ALFABE	-0.40	0.02
ACCMERCA	0.40	-0.10
DENSIDAD	-0.27	-0.33
USALENA	0.38	0.10

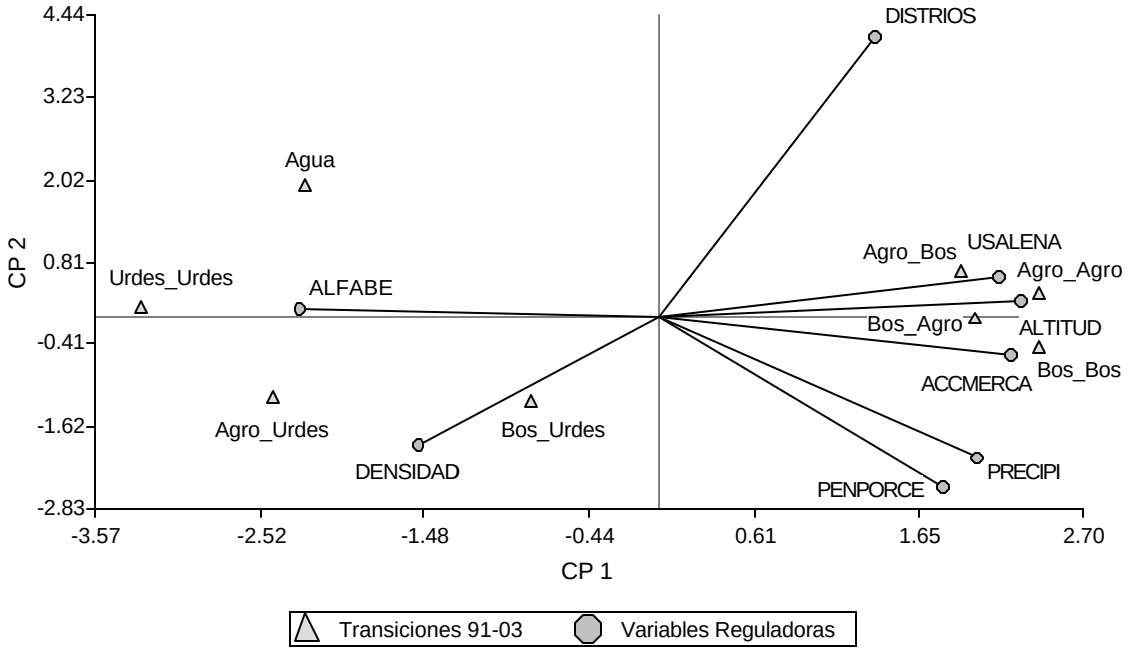


Figura 15. Biplot de componentes principales en el modelo de transición 91-03.

Los autovalores indican que con los dos primeros componentes se explicó el 88% de la variabilidad en las observaciones. Más específicamente, la primer componente (CP1, 75% variabilidad total) separa densidad y alfabetización del resto de fuerzas reguladoras, explicando la dinámica entre las categorías sintéticas. Este modelo postula que las

transiciones hacia la clase urbano-desnudo están muy bien explicadas por zonas densamente pobladas, y la persistencia de la misma clase a zonas con altos niveles de alfabetización.

Del lado opuesto en la CP1 y tal como se comentó anteriormente, las variables de pendiente y distancia a ríos aunados a la de precipitación; aparecen con vectores muy poco asociados a las transiciones entre bosque y elementos agropecuarios. Lo anterior explica la baja efectividad del aspecto normativo explicado en la Ley Forestal de preservar zonas adyacentes a los cursos de los ríos y limitar las actividades agropecuarias en ciertos rangos de pendientes, ya que la dinámica entre estas clases sintéticas se produce independientemente de la distancia a los cursos de agua y la inclinación del terreno.

Por otra parte, es interesante ver el grado de asociación de la persistencia de la clase bosque a una dificultosa accesibilidad a mercados, similar a la encontrada por Southworth y Tucker (2001) en la región occidental de Honduras. Asimismo, se percibe la transición de bosque a la clase agropecuaria en rangos altitudinales superiores, lo que es perceptible en el campo ya que es en las zonas altas donde ocurre mayormente esta dinámica persiguiendo la rentabilidad económica en la horticultura. La variable de población que hace uso de leña explica muy bien la persistencia en estados agropecuario y la transición de estos último hacia el bosque (principalmente latifoliado), lo que se hace en procura de mantener rodales de *Quercus sp*. que garantizan el abastecimiento de la fuente de energía para las comunidades circundantes.

4.2 Zonificación de áreas críticas en la Cuenca del Río Guacerique

Los mapas 4, 5 y 6 muestran los resultados pertinentes a las capas de estado erosivo, conflictos de uso y áreas críticas respectivamente. El comportamiento del potencial erosivo PE evaluado (figura 16) nos muestra que la gran mayoría de la superficie de la cuenca tiene un PE bajo, condicionado por la calidad de pendiente que en su mayoría es ondulada, limitándose las áreas escarpadas (>45%) al 8,13% de la superficie total.

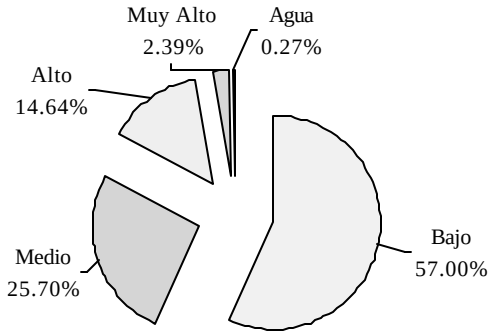


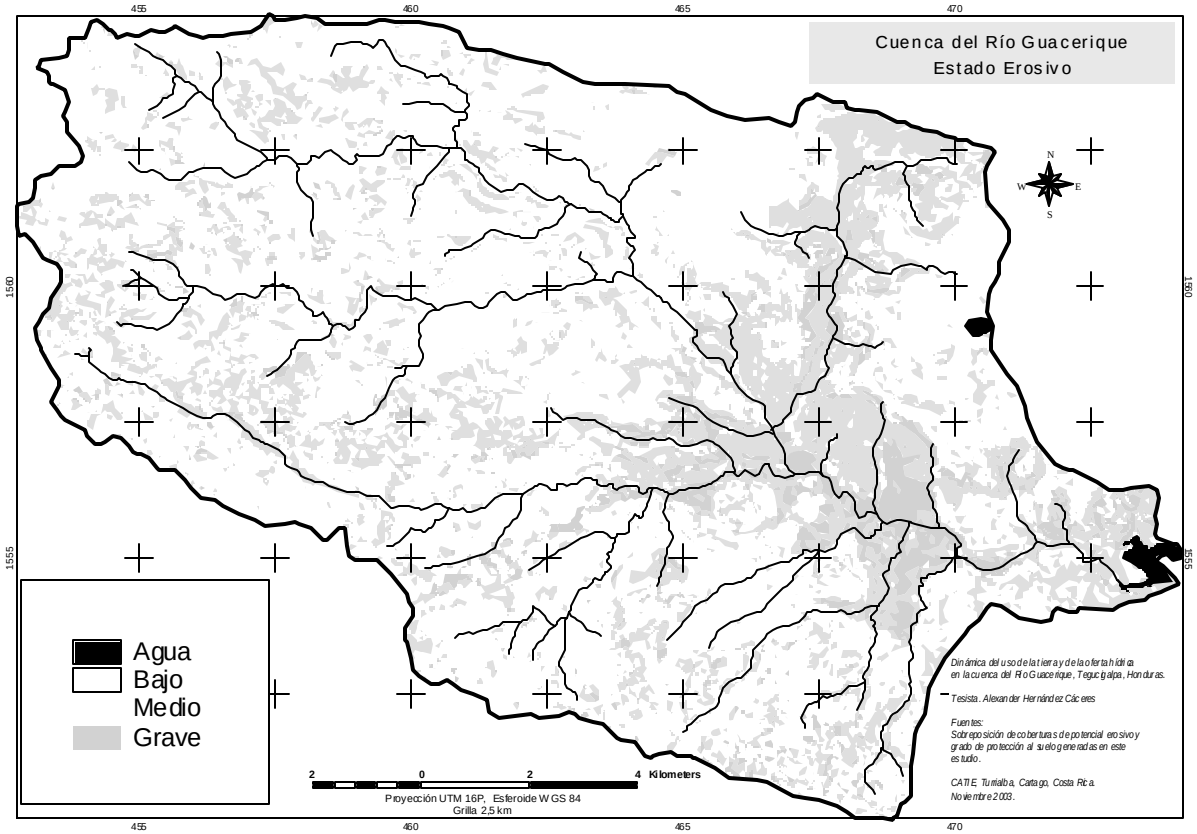
Figura 16. Categorías del potencial erosivo en la cuenca.

Por otra parte, el estado erosivo EE se indica en el cuadro siguiente:

Cuadro 27. Estados erosivos en la cuenca.

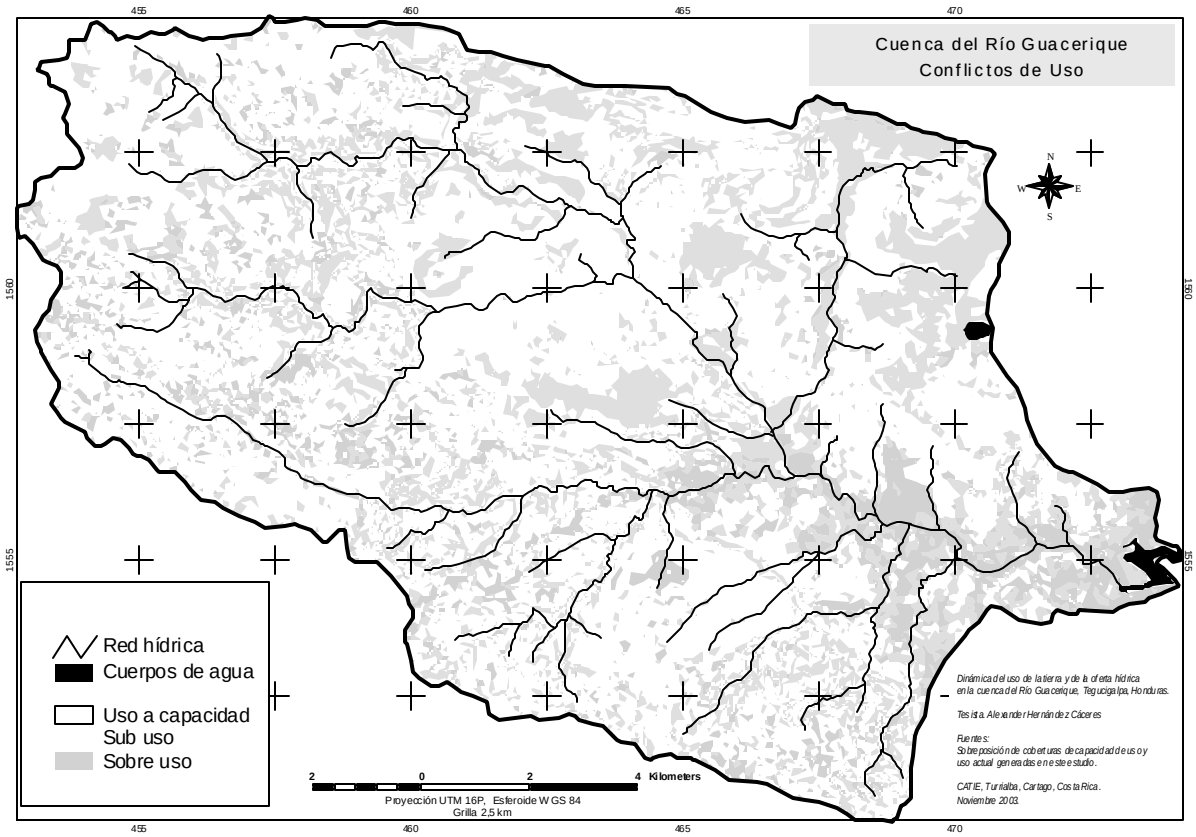
Estado Erosivo	% Cobertura
Agua	0,27
Muy Bajo	44,44
Bajo	27,78
Medio	22,41
Grave	5,03
Muy Grave	0,07

La variación en el comportamiento de categorías entre el potencial erosivo y el estado erosivo se ve influenciado por el uso de la tierra ya que en el escenario 2003 se cuenta con una porción de tierras con baja protección, especialmente uso urbano-desnudo y agricultura, así como de protección media en los pastos y vegetación arbustiva.



Mapa 4. Gradiente cualitativa de los estados erosivos en la cuenca.

En otro contexto, la capa de conflictos muestra que el 66,2% de los usos en la cuenca están acordes a la capacidad de usos definidas para su ubicación espacial. Explicado no por un buen manejo de los recursos, sino por la ausencia de economías locales prósperas que incidan significativamente una alta presión socioeconómica. Ubicándose las áreas conflictivas o sobre uso (9,62%) mayoritariamente en la parte baja de la cuenca, específicamente en las vecindades del proyecto habitacional "Ciudad Mateo" y donde la concentración de vías de comunicación es superior. En tanto que la sub utilización alcanza el 24,18%, explicado por las vastas zonas con usos no rentables (arbustivo, pastos naturales paupérrimos, etc) sobre áreas cuyas condiciones permitirían usos más intensivos y rentables (Agricultura).



Mapa 5. Conflictos del uso de la tierra en la cuenca.

Finalmente, el análisis de riesgo para la cuenca tiene el comportamiento presentado a continuación:

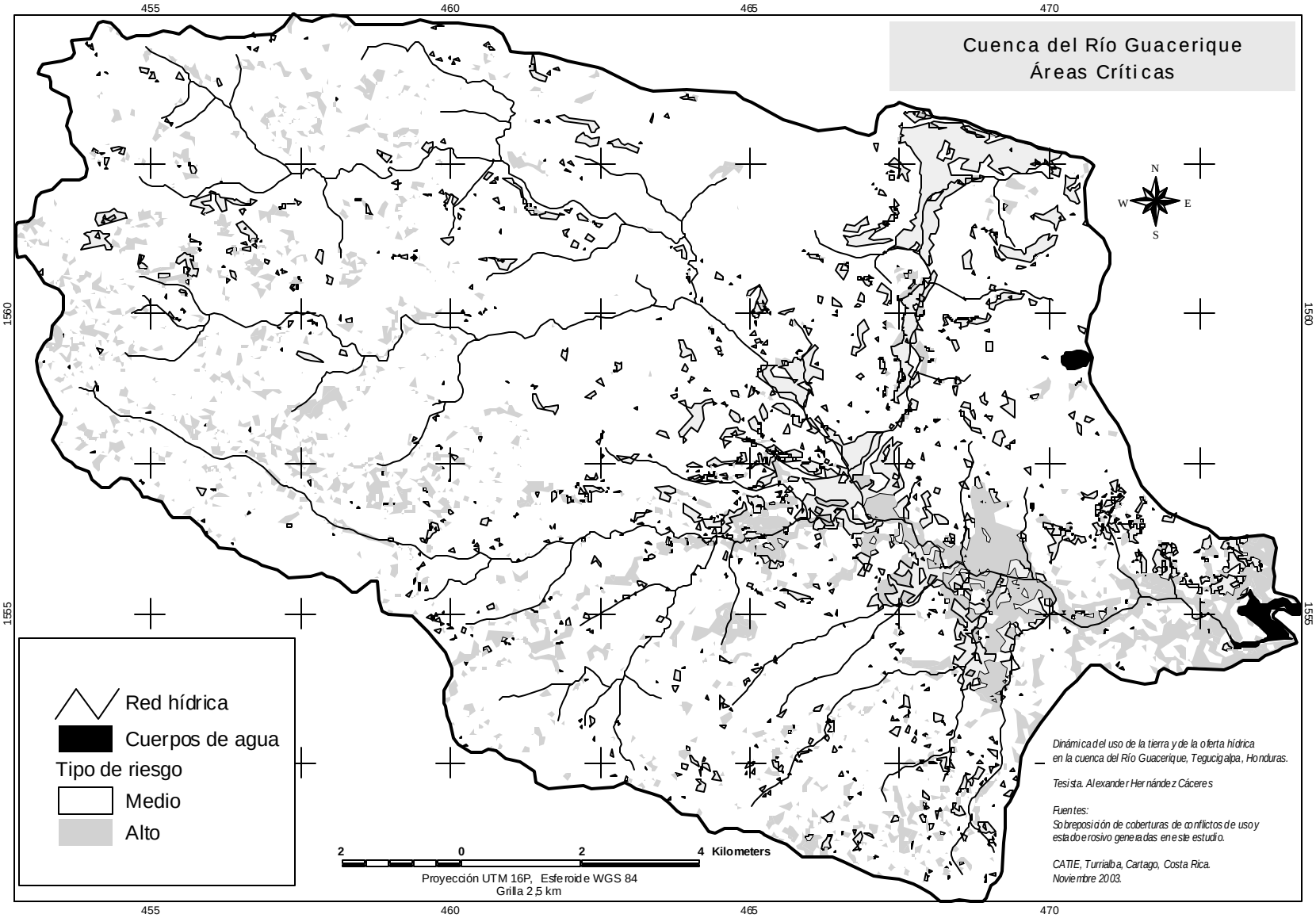
Cuadro 28. Distribución de los riesgos de degradación en la cuenca.

Clase de Riesgo	% Cobertura
Agua	0,27
Sin Riesgo	40,00
Muy Bajo	19,30
Bajo	23,96
Medio	6,85
Alto	9,62

Aunque las áreas definidas como críticas (riesgo medio y alto) sólo cubren el 16,47% de la cuenca, más importante aún es su ubicación espacial. Como se puede observar en el mapa 6, su concentración es en las vecindades del embalse “Los Laureles” incidiendo negativamente en la carga de sedimentos que aportan a dicho cuerpo de agua. Siendo por

lo tanto fundamental actividades de restauración hidrológico-forestal para éstas áreas. En el anexo 6 se pueden observar diferentes técnicas utilizadas con éxito por el departamento de Manejo de Cuencas de SANAA. Este tipo de actividades tienen ventajas comparativas en relación a las ejecutadas bajo condiciones de ingeniería civil especializada, en el sentido que su efectividad ha sido probada y su rentabilidad económica también. Asimismo, el factor social es significativo, ya que se realizan con la participación de las comunidades adyacentes; implicando una aceptabilidad de las mismas e ingresos para las economías locales.

El porcentaje de aciertos alcanzó un 87%, por lo que puede establecerse que la metodología se acondicionó muy bien al área. Obteniéndose una visión espacial donde se pueden priorizar esfuerzos en planes de restauración hidrológica que se deseen llevar a cabo en la cuenca, especialmente en zonas que aún no presentan un estado de degradación actual alto y que por ende pueden ser sujetas de acciones de prevención más que de corrección que son intrínsecamente más costosas. Los resultados de este acápite, fueron utilizados como insumos en la preparación de la propuesta técnica que se presenta en el acápite 4.4.



Mapa 6. Gradiente cualitativa de áreas críticas o zonas de riesgo a la erosión en la cuenca.

4.3 Oferta hídrica en la Cuenca del Río Guacerique

4.3.1 Análisis de registros hidro-climáticos

El análisis estadístico de los escenarios bajo estudio muestra que el régimen pluvial en la cuenca del Río Guacerique ha mantenido la tendencia de una estación seca (Dic –Enero) y la lluviosa (Mayo – Nov) con un descenso en los meses de julio y agosto conocido como canícula. Afirmándose este criterio al no encontrar diferencias estadísticas significativas entre épocas (Cuadro 29, figura 17).

Cuadro 29. Análisis de la Varianza (SC tipo III)

Variable	N	R^2	R^2 Aj	CV
Precipitación	36	0.97	0.95	20.72

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	232566.75	13	17889.75	53.84	<0.0001
Epoca	1386.60	2	693.30	2.09	0.1480
Mes	231180.15	11	21016.38	63.25	<0.0001
Error	7309.87	22	332.27		
Total	239876.63	35			

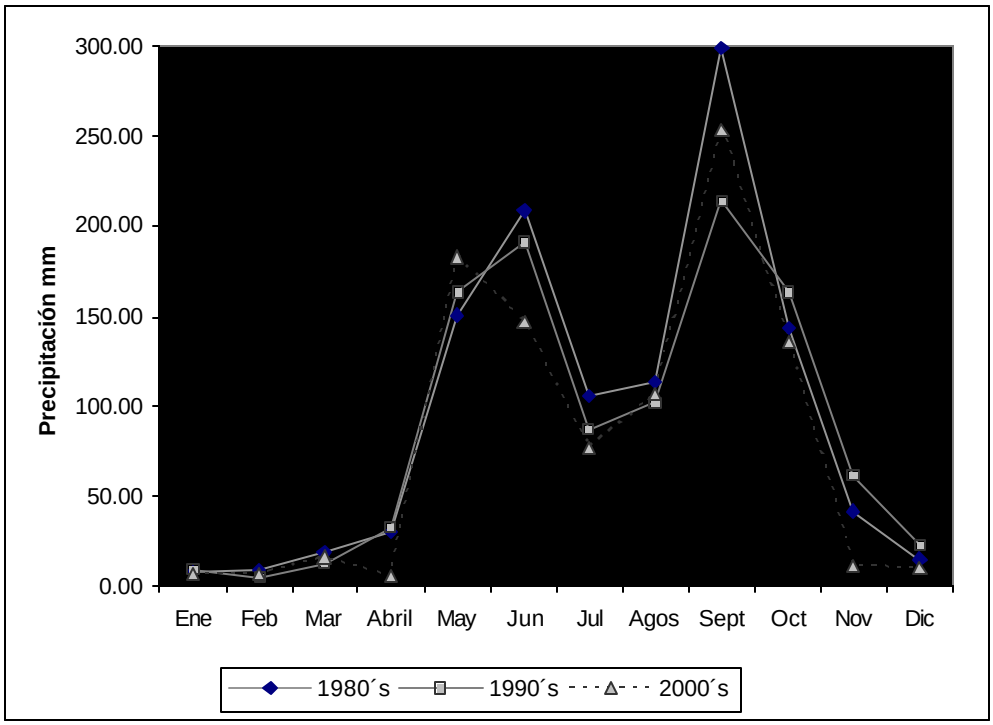
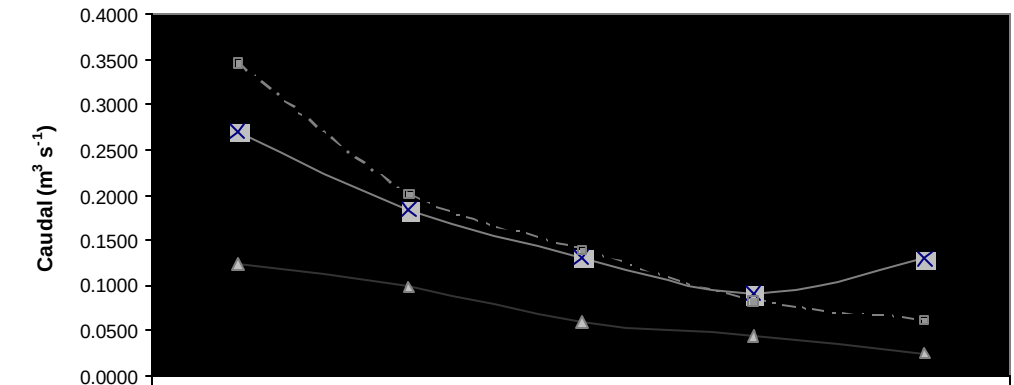


Figura 17. Comportamiento de la precipitación promedio mensual en la cuenca durante los escenarios analizados.

Más importante aún es el análisis de la oferta hídrica durante los períodos considerados. En este contexto, la única estación hidrométrica con datos consistentes y continuos desde

los 80´s es la estación Guacerique II (acápite 3.2.3.3, cuadro 17, figura 9). Aunque esa estación no es el punto de aforo total de la cuenca, registra los caudales del 78,78% del área total de captación, considerándose apropiada para esta primera aproximación de análisis. Las figuras 18 y 19 muestran los comportamientos de la oferta hídrica en esta estación durante las épocas seca y lluviosa.



	Dic	Ene	Feb	Mar	Abril
1980´s	0.2702	0.1836	0.1310	0.0903	0.1303
1990´s	0.3455	0.2014	0.1396	0.0830	0.0612
2000´s	0.1233	0.0994	0.0604	0.0448	0.0255

Figura 18. Caudales medios mensuales de Guacerique II en la estación seca.

La evidencia gráfica nos denota una reducción de los caudales promedios durante el último escenario (2000´s) en la época seca, aunque no se encontraron diferencias estadísticamente. Sin embargo, cuando se analiza el patrón de todo el año si se encuentran diferencias estadísticas significativas (a = 0,05) entre escenarios, concentrándose entonces las diferencias en la oferta hídrica durante el período lluvioso (Cuadro 30). Este tipo de comportamiento, muestra concordancia con estudios revisados (Galloso e Iroume, 1995; Nik, 1988; Swindel *et al*., 1983). En estos la dinámica de uso que incide en reducciones de la cobertura forestal implica desbalances en la oferta hídrica durante el año. A pesar que en el caso de la cuenca del Río Guacerique la cobertura boscosa muestra probabilidades de persistencia altos (acápites 4.1.1 y 4.1.2) durante los períodos analizados, el grado de fragmentación de la misma es severo (acápite 4.1.3). No obstante, debe recapitularse que esta tendencia obedece a la dinámica de uso del área de captación de la estación Guacerique II que no incluye la cuenca baja (Figura 9) donde se encontró el mayor patrón de cambios y la mayor concentración de áreas críticas (mapa 6).

Cuadro 30. Análisis de la Varianza (SC tipo III) de la variabilidad estacional de los caudales

Análisis de todo el año

Variable	N	R^2	R^2 Aj	CV
Caudal	36	0.90	0.84	48.06

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	57.28	13	4.41	14.95	<0.0001
Década	2.89	2	1.44	4.90	0.0174
Mes	54.40	11	4.95	16.78	<0.0001
Error	6.48	22	0.29		
Total	63.77	35			

Test:LSD Fisher Alfa:=0.05 DMS:=0.45961
Error: 0.2947 gl: 22

Década	Medias	n		
2000´s	0.88	12	A	
1990´s	0.98	12	A	
1980´s	1.53	12		B

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0.05)

Análisis de la estación seca

Variable	N	R^2	R^2 Aj	CV
Caudal	18	0.78	0.63	82.33

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1.47	7	0.21	5.06	0.0110
Década	0.22	2	0.11	2.59	0.1239
Mes	1.26	5	0.25	6.05	0.0079
Error	0.42	10	0.04		
Total	1.89	17			

Test:LSD Fisher Alfa:=0.05 DMS:=0.26248
Error: 0.0416 gl: 10

Década	Medias	n	
2000´s	0.10	6	A
1980´s	0.29	6	A
1990´s	0.35	6	A

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0.05)

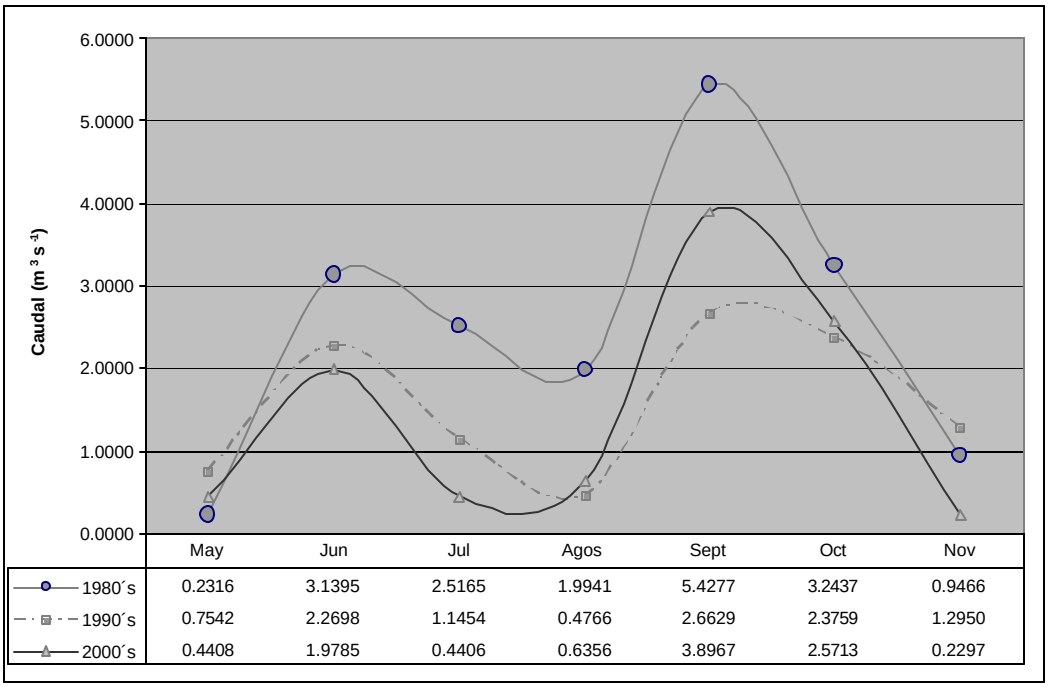


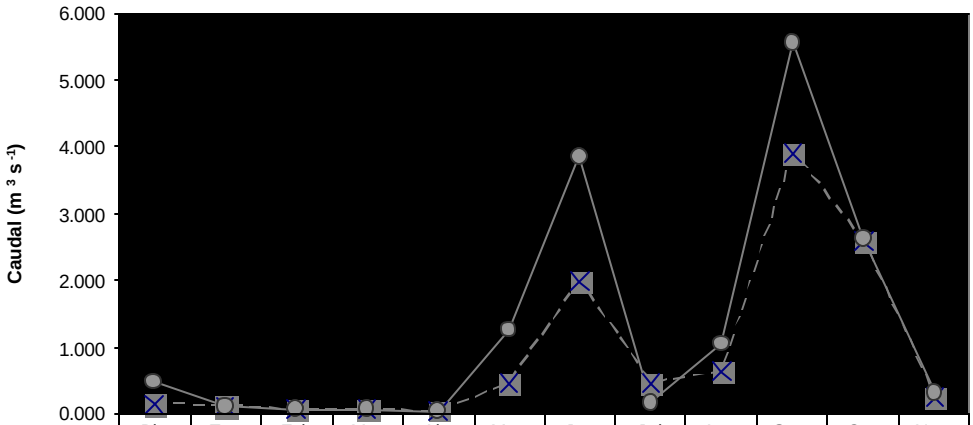
Figura 19. Caudales medios mensuales de Guacerique II en la estación lluviosa.

Al concentrarse las diferencias de la oferta hídrica promedio mensual en la estación lluviosa, existe concordancia con Sandströn, 1998 y Bruijnzeel, 1991, en que las

reducciones en cobertura boscosa conducen al aminoramiento de los caudales en época seca y grandes concentraciones en los períodos lluviosos.

Es importante mencionar que las series hidrométricas presentadas no incluyen las ocurridas durante el paso del huracán y tormenta tropical "Mitch" en Octubre de 1998. Dado que no se cuentan con registros de caudal para esas fechas y períodos siguientes por la destrucción total de las estaciones y sus limnímetros. Considerándose este fenómeno como extraordinario (Rivera, 1999) es hasta cierto punto aconsejable su no inclusión para evitar sesgos estadísticos.

Las implicaciones que en la cuenca baja se presente la mayor dinámica de cambios, concentración poblacional y áreas críticas se refleja en la siguiente figura donde se compara la oferta hídrica de las estaciones Guacerique II y El Batallón (aforo total de la cuenca) de los últimos tres años. Se debe aclarar que se comparó este período tan corto ya que para El Batallón solamente existen registros extemporáneos y de carácter continuo únicamente en el espacio temporal mencionado.



	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov
Guacerique	0.123	0.099	0.060	0.045	0.026	0.441	1.979	0.441	0.636	3.897	2.571	0.230
Batallon	0.458	0.108	0.055	0.050	0.016	1.243	3.852	0.15	1.03	5.5475	2.631	0.3135

Figura 20. Caudales medios mensuales en estaciones de aforo Batallón y Guacerique II.

La similitud gráfica de los caudales en la época seca y su diferencia en la lluviosa a pesar que El Batallón registra el 100% del área de captación y que la longitud de drenaje entre estaciones es de 6,631 Km (figura 22), trae a colación observaciones preocupantes. Dado

que se esperarían variaciones de caudal mayores en verano y no se observan, llegando al punto que algunos meses (Febrero y Abril) los registros para El Batallón son menores que para Guacerique II. En este contexto y después de una serie de observaciones de campo y consultas, se pudo constatar que entre los dos puntos de medición y otras zonas de la cuenca baja existen condicionantes que regulan esta oferta cuantitativamente deficiente. De estas se pueden mencionar:

1. Alta concentración poblacional y demanda por agua que se obtiene a través de pequeñas represas, pozos artesanales y extracciones directas del río por bombeo.
2. Industria (embotellamiento de agua, construcción, granjas avícolas, etc.).
3. Varios complejos militares.
4. Cultivos hortícolas con sistemas de irrigación de eficiencia baja (superficiales).
5. Extracciones de material del cauce (arena y piedra) que afectan su capacidad hidráulica, implicando la posibilidad de infiltraciones subterráneas.

Estos ítems explicarían las graves reducciones del caudal en la temporada seca. De acuerdo a SANAA (2000) existen al menos 31 instalaciones de las que el 60% disponen de una extensión mínima de 3,5 ha, concentrándose todas en la parte baja de la cuenca que es una zona fuertemente intervenida. Este estudio da una idea del tipo de extracciones, donde el 54% es de pozos y el 39% directamente del río. Este es un punto de sumo interés ya que se estimaron las extracciones directas del río entre 0,031 $m^3 s^{-1}$ a 0,125 $m^3 s^{-1}$ diarios durante la época seca. Estas cifras deben observarse con cautela ya que no fueron resultado de ningún tipo de aforo in situ, sino de consultas verbales; en las que seguramente se subestimaron los totales por los encargados de las instalaciones por razones obvias (Ej. Cálculo de cánones, deducción posterior de responsabilidades).

Para reforzar lo anterior, se presenta el patrón promedio de aforos automáticos realizados por SANAA a finales de los 90´s en 2 sitios: Aguas arriba y Aguas abajo de las bombas succionadoras propiedad de instalaciones militares.

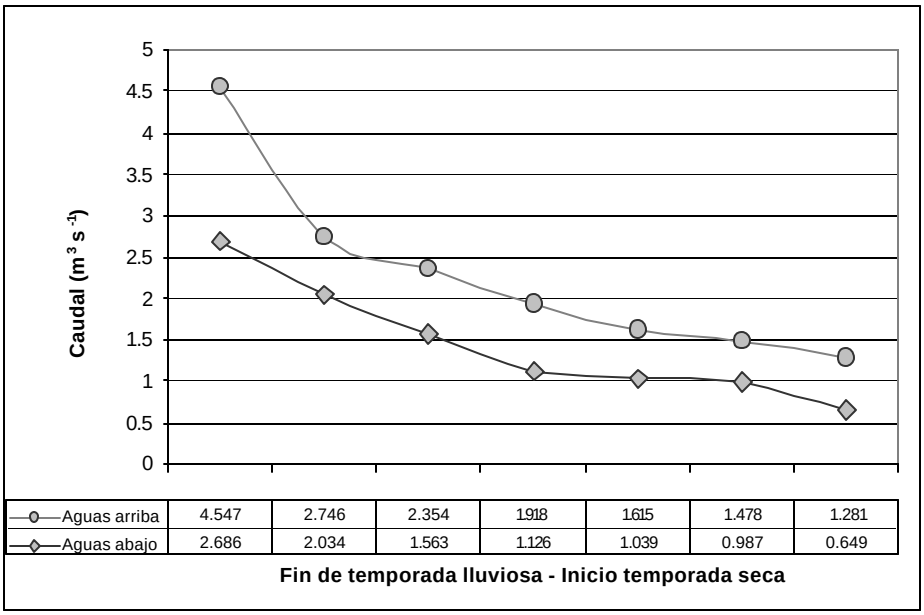


Figura 21. Caudales medios medidos en puntos antes y después de bombas succionadoras de instalaciones militares.

Es evidente el grado de perjuicio contra la oferta hídrica después que en las instalaciones militares se extrae el agua para surtir sus necesidades, estimándose en una extracción promedio de 0,836 m^3 s^{-1}, durante el período descrito. Sin embargo, datos para la temporada seca no pudieron obtenerse. Por otra parte, en esta misma zona se encuentran 26 pozos de los que ninguno se encuentra registrado (SANAA, 2000). Se estima asimismo, que ya que durante la época lluviosa la oferta hídrica es relativamente abundante; entonces las diferencias entre estaciones de medición se vuelven evidentes y por lógica la estación de El Batallón mantiene un caudal superior durante toda la época lluviosa. Sin embargo, este comportamiento temporal de la oferta incide en reducir las opciones de un buen abastecimiento a la represa "Los Laureles", dada su baja capacidad de almacenamiento ($12x_{10}^6$ m^3) por lo que se ha estimado que hasta el 80% de la escorrentía de invierno pasa sin ser aprovechada o almacenada (RDS, 2002; Strand, 1998; Lee, 1996). Por otra parte, la oferta cuantitativamente deficiente durante el verano aunado a una pérdida del volumen original de abastecimiento por la carga sedimentaria; implica descensos significativos en los niveles del embalse, mismos que hasta han obligado a su cierre temporal en varias ocasiones, afectando por ende a una magnitud considerable de la población de Tegucigalpa (RDS, 2002).

4.3.2 Modelación hidrológica

El análisis gráfico-estadístico de los datos hidrométricos existentes sirvió para caracterizar el comportamiento de la oferta hídrica en la cuenca y para explicar algunas condicionantes que gobiernan esta oferta espacial y temporalmente. Sin embargo, al no existir estas bases de datos o no contar con ellas en un nivel de precisión deseado, puede recurrirse al uso de modelos hidrológicos de base física (acápite 2.3). En este orden de ideas, con el modelo SWAT se pudo obtener para la cuenca total y para cada una de las subcuencas el comportamiento de la oferta hídrica en cada uno de los escenarios de uso de la tierra bajo consideración.

No obstante, se ha considerado pertinente dar mayor énfasis a las comparaciones entre caudales observados y caudales simulados; de tal forma que permita ver el grado de aproximación del modelo y definir su posible utilización en los procesos de planificación y toma de decisiones en la cuenca.

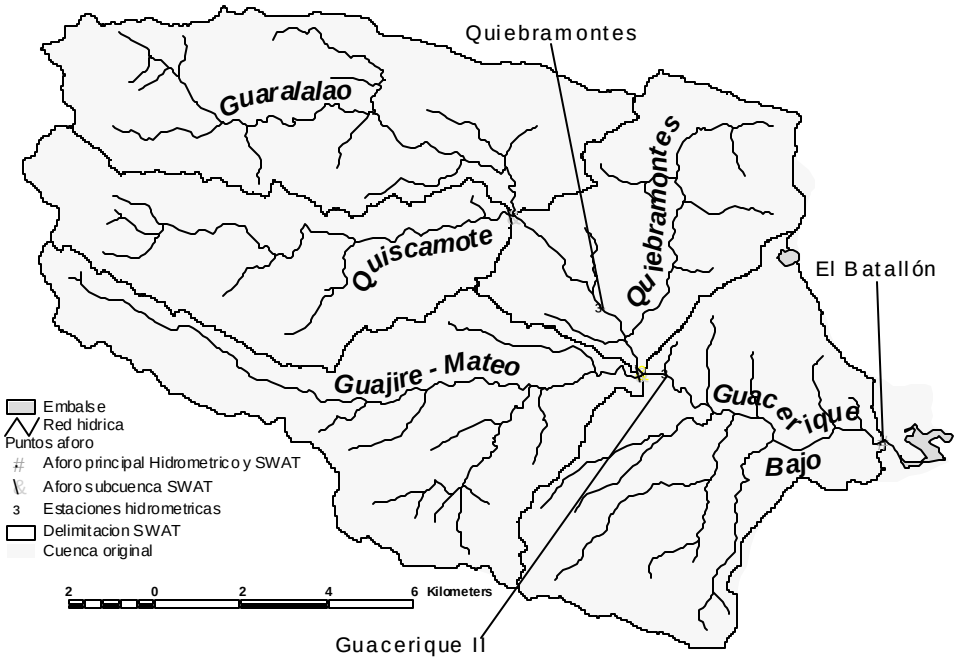


Figura 22. Delimitación de subcuencas por SWAT, ubicación de estaciones hidrométricas existentes y de aforo generada por el modelo.

La figura anterior nos ofrece la representación gráfica de las estaciones hidrométricas de las que se discutió el comportamiento de la oferta hídrica en el acápite anterior. Nótese las diferencias en el área de drenaje y distancias entre Guacerique II y El Batallón.

Las comparaciones entre resultados observados y simulados se presentan a continuación.

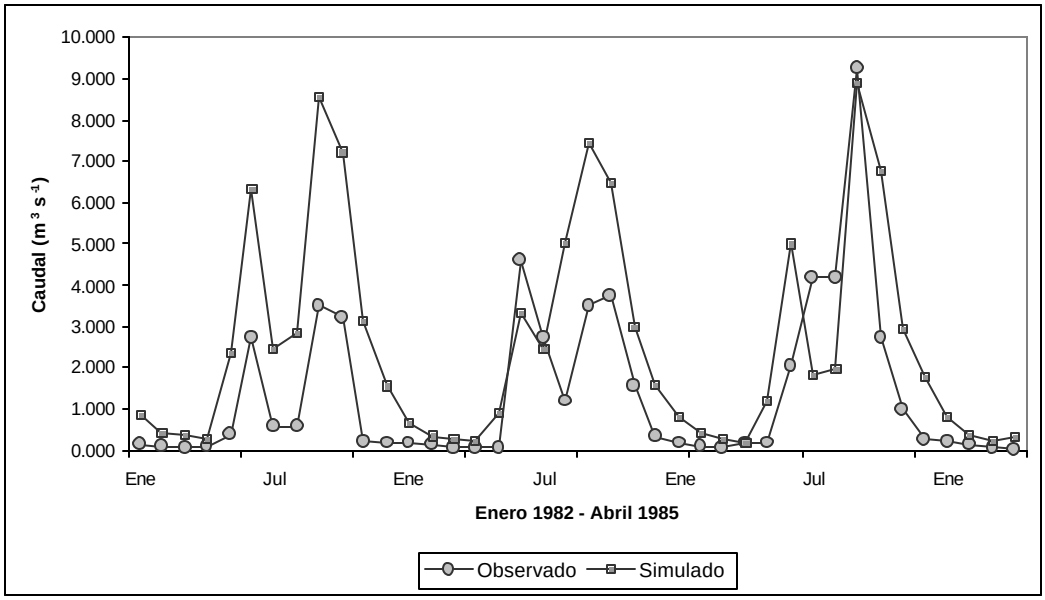


Figura 23. Comportamiento mensual de los caudales en la estación hidrométrica Guacerique II y los generados por SWAT contenido en el escenario de los años 80.

La correlación estadística encontrada fue de $r = 0{,}7621$, $p < 0{,}01$. Puede notarse que el comportamiento en las épocas secas es muy similar pero sin lugar a dudas el modelo sobreestima los caudales en la época lluviosa en los primeros dos años analizados. Sin embargo la modelación de la temporada de 1984 y seca de 1985 es sumamente similar. Es evidente que las mayores variaciones se dan en los meses de Septiembre y Octubre, cuyas medias históricas de precipitación y caudales observados, variaron del resto de los otros meses en los análisis de varianza de ambas variables. Cabe entonces poner en observación la calidad de los datos de precipitación que sirvieron de insumo al modelo o la precisión de los datos de caudal observados que correspondían a una medición diaria.

Una situación similar pero con una correlación $r = 0{,}852$, $p < 0{,}01$ es provista en la figura 24. Aunque los caudales para la época lluviosa sigan siendo superiores; la correlación aumentó, indicando una tendencia más estable en la sobreestimación que en el escenario anterior. Esto podría ser indicativo de una mejor concordancia en la toma de datos de precipitación o de caudales. Debe tenerse en cuenta que no se incluyeron elementos externos que afectan la oferta hídrica de la cuenca como las extracciones que se realizan y que por lo tanto no son contabilizadas durante la simulación. A manera de ejemplo,

durante la época de estiaje se han estimado las pérdidas por extracciones directas con bombas del río Guajire en 0,05 m^3 s^{-1}, al haberse medido el caudal antes y después de una zona con gran concentración de parcelas agrícolas SANAA (2000).

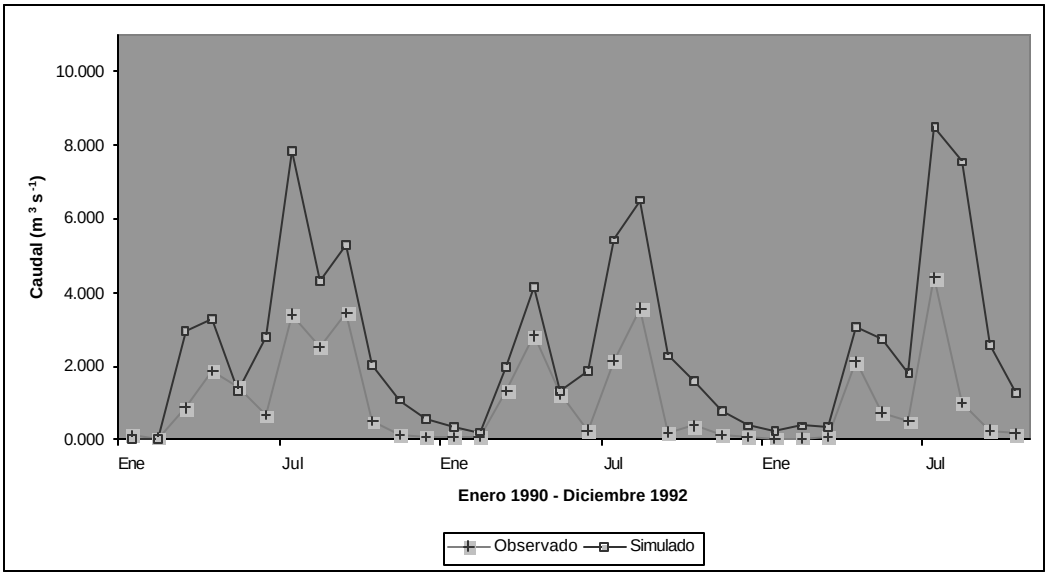


Figura 24. Comportamiento mensual de los caudales en la estación hidrométrica Guacerique II y los generados por SWAT contenidos en el escenario de los años 90.

En continuación a este orden de ideas y para ver el grado de aproximación del modelo en zonas donde las extracciones no se dan con la severidad encontrada hasta la estación Guacerique II, se exhibe la figura 25; la estación Quiebramontes para el último escenario de análisis 2000. La correlación r = 0,924, p < 0,01, fue superior a las anteriormente presentadas.

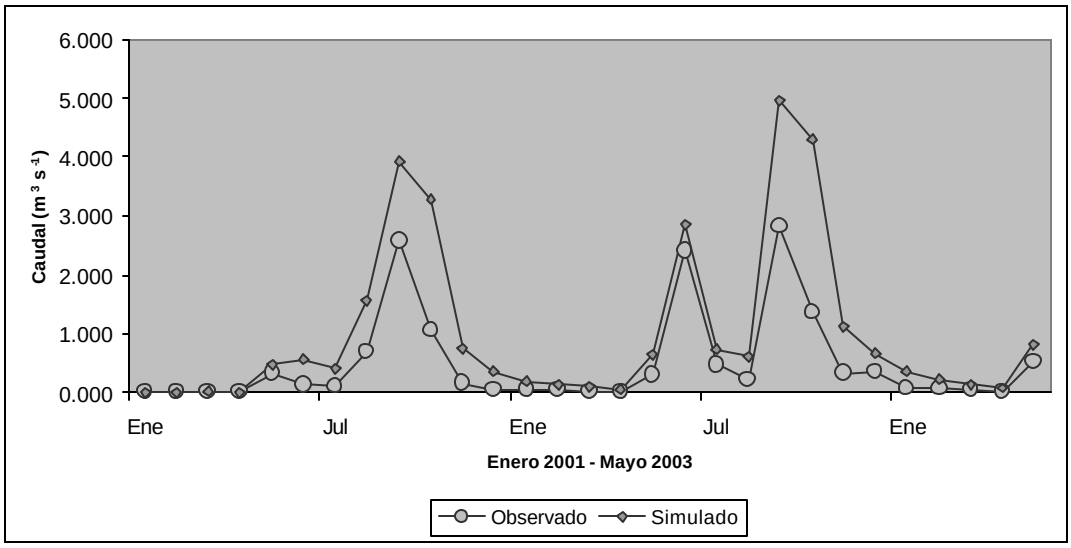


Figura 25. Comportamiento mensual de los caudales en la estación hidrométrica Quiebramontes y los generados por SWAT contenidos en el escenario de los años 2000.

En este punto de control se han contabilizado las aguas procedentes de las subcuencas Guaralalao, Quiscamote y parte de Quiebramontes (figura 22). Aunque como pudo observarse en los mapas de dinámica de uso (acápite 4.1) estas subcuencas están sometidas a presión agrícola, no se reportaron u observaron en campo extracciones masivas como las de la subcuenca Guajire (afluente a Guacerique II) especialmente por bombeo para irrigación agrícola.

A continuación se presenta la misma situación temporal pero para Guacerique II con r = 0,86, p < 0,01. Es evidente el mismo tipo de tendencia que los escenarios anteriores.

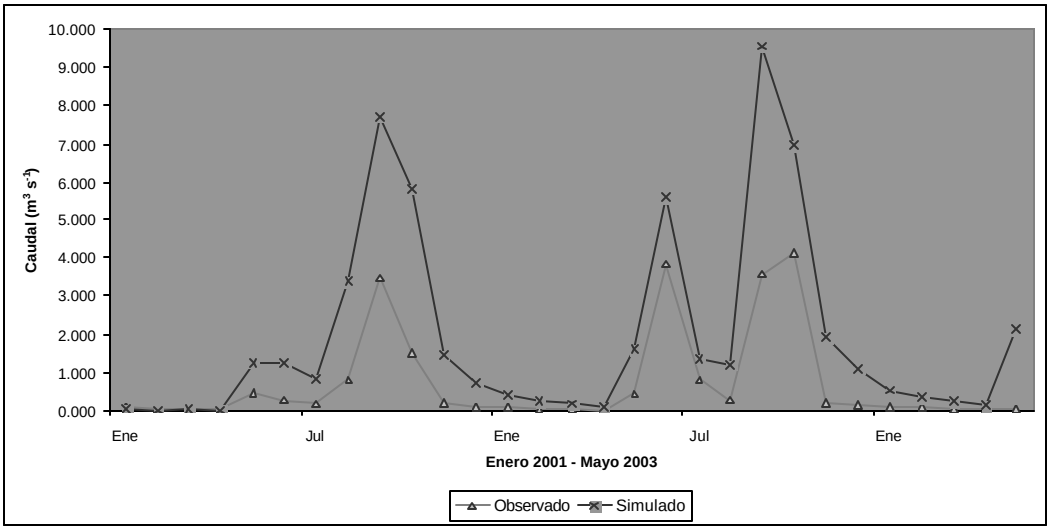
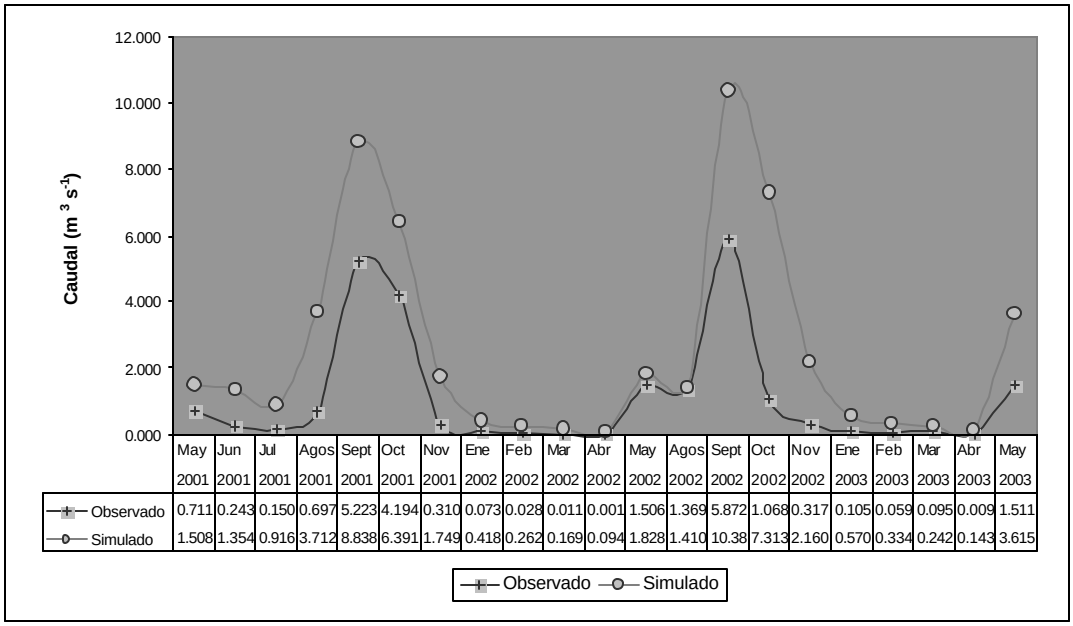


Figura 26. Comportamiento mensual de los caudales en la estación hidrométrica Guacerique II y los generados por SWAT contenidos en el escenario de los años 2000.

Sin embargo, es necesario exponer que entre la estación Quiebramontes y Guacerique II aguas abajo existen varias extracciones fuertes, pero la principal es una contentiva de la industria de fabricación de ladrillos para la construcción que requiere enormes cantidades de agua para sus operaciones diarias. Recurso hídrico sin oportunidad de volver al cauce por la naturaleza de la industria. Este tipo de pérdidas al sistema como se mencionó anteriormente, no fueron ingresadas durante la simulación. Descritas las salidas del modelo, puede estimarse como una buena representación de lo que ocurre con el patrón temporal y espacial de la oferta hídrica en la cuenca. Aunque siempre queda la incertidumbre por no considerar las pérdidas del sistema antes de cada punto de aforo.

A continuación se presenta la tendencia del aforo total de la cuenca hasta la estación de El Batallón.



	May 2001	Jun 2001	Jul 2001	Agos 2001	Sept 2001	Oct 2001	Nov 2001	Ene 2002	Feb 2002	Mar 2002	Abr 2002	May 2002	Agos 2002	Sept 2002	Oct 2002	Nov 2002	Ene 2003	Feb 2003	Mar 2003	Abr 2003	May 2003
Observado	0.711	0.243	0.150	0.697	5.223	4.194	0.310	0.073	0.028	0.011	0.001	1.506	1.369	5.872	1.068	0.317	0.105	0.059	0.095	0.009	1.511
Simulado	1.508	1.354	0.916	3.712	8.838	6.391	1.749	0.418	0.262	0.169	0.094	1.828	1.410	10.38	7.313	2.160	0.570	0.334	0.242	0.143	3.615

Figura 27. Comportamiento mensual de los caudales en la estación hidrométrica El Batallón y los generados por SWAT contenidos en el escenario de los años 2000.

Debe recordarse que en este punto la oferta del cauce durante el verano ha sido extremadamente agotada (acápite 4.3.1) por las condicionantes de extracción. Puede por lo tanto, hipotéticamente expresarse que en esa época el modelo hidrológico contabiliza la oferta que pasaría por esa sección de aforo si no se dieran las extracciones que son drásticas especialmente en la cuenca baja. Aunque, lo anteriormente expresado debe tomarse con la cautela estadística del caso.

4.3.2.1 Evaluación de la bondad de ajuste del modelo

Las pruebas estadísticas (acápite 3.2.3.4) confirmaron las tendencias observadas en los hidrogramas anteriormente discutidos. Es apreciable (cuadro 31) que la precisión o bondad de ajuste va disminuyendo a medida que se evalúa aguas abajo en las tres estaciones hidrométricas y se van incrementando las extracciones (acápite 4.3.1). En este contexto, aunado a la respuesta original del modelo, se presenta la respuesta cuantitativa cuando se hacen reducciones a la gradiente del número de curva CN (Neitsch *et al*., 1999) por tipo de uso de la tierra evaluado en SWAT. Esta evaluación se hizo para ver la sensibilidad del modelo en este aspecto ya que el CN sintetiza el volumen de escorrentía

según tipo de uso de la tierra y tipo de suelo. Observándose reducciones del caudal anual promedio de 2,06% cuando se realizan reducciones de hasta 10 unidades del CN.

Cuadro 31. Estadísticos anuales de bondad de ajuste entre series observadas y simuladas por SWAT para el período 1999-2003.

Estadístico	Estación hidrométrica								
	Quiebramontes			Guacerique II			El Batallón		
	Obs.	Simul. Normal	Simul. Modif. CN	Obs.	Simul. Normal	Simul. Modif. CN	Obs.	Simul. Normal	Simul. Modif. CN
$\hat{Y}$ ($m^3 s^{-1}$)	0,501	1,015	0,994	0,724	1,933	1,864	1,122	2,543	2,467
s ($m^3 s^{-1}$)	0,799	1,404	1,340	1,279	2,607	2,347	1,757	3,080	2,908
MAE ($m^3 s^{-1}$)		0,537	0,518		1,250	1,187		1,420	1,337
RMSE ($m^3 s^{-1}$)		0,900	0,871		1,930	1,750		1,880	1,692
r^2		0,854	0,809		0,860	0,813		0,809	0,789
d		0,620	0,630		0,520	0,530		0,58	0,59
E		0,050	0,090		-0,340	-0,270		-0,105	-0,095

Clave: $\hat{Y}$ *: media aritmética; s: desviación estándar;* r^2*: coeficiente de determinación; MAE: error medio absoluto; RMSE: raíz del error medio cuadrático; d: índice de concordancia modificado; E: coeficiente modificado de eficiencia; Obs. Series observada o medida en campo; Simul. Serie simulada por SWAT; Modif.: modificación al número de curva CN.*

Los rangos para evaluar r^2, *E y d* son: 0.00 a 1,00, -8 a 1,00 y 0,00 a 1,00 respectivamente. De acuerdo a Legates y McCabe (1999), calificar eficiencia de las salidas de un modelo sólo por un alto r^2 constituye una ligereza de apreciación comúnmente cometida. Debido a que este estadístico se ve influenciado gravemente por los valores extremos en la serie analizada, por lo que se recomienda enfáticamente el uso de *E y d*; ya que en estos los errores y sus diferencias muestran pesos apropiados no inflados por sus cuadrados. A este respecto, aunque en la estación Guacerique II y El Batallón se observaron r^2 más altos o iguales que en Quiebramontes, su eficiencia *E* es negativa; significando que es mejor utilizar la media de la serie observada en lugar del modelo para realizar predicciones. Esta apreciación se refuerza al presentar concordancias *d* menores que en Quiebramontes, al mismo tiempo que confirma el hecho que las predicciones del modelo son más precisas en las zonas donde las extracciones no agotan excesivamente el caudal.

Una mejoría cuantitativa en los estadísticos se observó cuando se disminuyó la gradiente del CN. Lo anterior anticipa que SWAT es sensible a cambios en sus coeficientes internos y puede manipularse para acercar más las series simuladas con las observadas en un proceso de calibración o ajuste. Sin embargo, esta implicación debe tomarse con cautela en el caso de la cuenca del Río Guacerique, ya que existe incertidumbre en cuanto a la cuantificación precisa de las extracciones y por lo tanto en que medida afectan la eficiencia de predicción de SWAT.

Similar comportamiento entre estaciones es observado al revisar los errores *MAE* y *RMSE*. Estos describen las diferencias entre la simulación y las series observadas en las unidades de la variable, $m^3\ s^{-1}$ para este caso particular. Dado que *RMSE* = *MAE*, está estipulado que este grado de excedencia es un excelente indicador de la magnitud de concentración de valores extremos en las series de datos (Chanasyk *et al*., 2003; Rosenthal y Hoffman, 1999; Legates y McCabe, 1999). En este contexto, la magnitud de estas diferencias se perciben en 0,363 $m^3\ s^{-1}$ en Quiebramontes, 0,680 $m^3\ s^{-1}$ en Guacerique II y de 0,460 $m^3\ s^{-1}$ en El Batallón, dando una idea clara de la diferencia de existencia de valores extremos en cada estación. Asimismo, fortalece la posición de Quiebramontes como la estación en la que SWAT predice mejor los resultados.

Con un enfoque estadístico distinto se comprobó las aseveraciones anteriores. Mediante la utilización de una prueba *T student* para medias de datos pareados se rechazó la hipótesis nula de que la diferencia entre medias (observado versus simulado) es cero para las tres estaciones hidrométricas:

$$H_0\ ?\ ?_1\ ?\ ?_2\ ?\ 0 \qquad (11)$$

Aunque la evidencia señala diferencias estadísticas significativas entre la simulación y lo observado, refrenda que el grado de precisión del modelo se ve afectado negativamente por las extracciones no contabilizadas, a medida que estas se van haciendo más fuertes. En este contexto, la figura 28 nos muestra el comportamiento de la probabilidad

calculada para cada estación, notándose que esta disminuye a medida se llega espacialmente a la cuenca baja y es notablemente inferior en la estación lluviosa.

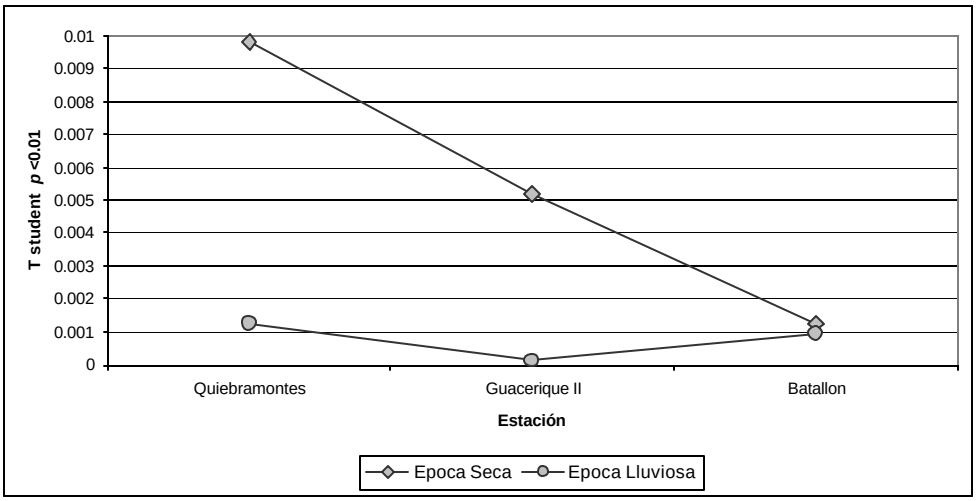


Figura 28. Comportamiento de la probabilidad por punto de aforo y por estación hidrológica del año.

Expuesta esta perspectiva de los resultados del modelo, puede establecerse que los mismos son más precisos en la instancia que el caudal no ha sido afectado como lo es en la cuenca baja. Debiéndose por lo tanto realizar un proceso de calibración del mismo a partir de la estación Quiebramontes que es donde se observó la mejor eficiencia y concordancia, proceso que deberá indisolublemente incluir la cuantificación de las extracciones no contabilizadas. Sin embargo, este proceso está fuera de los alcances propuestos en este estudio.

No obstante, puede estipularse que el uso de SWAT se constituye en una herramienta para apoyar el proceso de toma de decisiones. Especialmente para aquellas zonas en las que los datos hidrométricos han sido escasos o nulos y sólo se cuentan con una base meteorológica. Asimismo y dadas las condiciones de la cuenca del Río Guacerique en las que se da la mayor problemática durante la época seca, el modelo puede servir de punto de partida para establecer una línea base de datos con una precisión aceptable. En este orden de ideas, tampoco debe dejarse de considerar el potencial del modelo de simular las condiciones hidrológicas tanto para todo el sistema de cuenca, como a nivel de subcuenca que el planificador requiera delimitar y analizar según el grado de detalle necesario.

4.3.3 Implicaciones de la dinámica temporal de uso

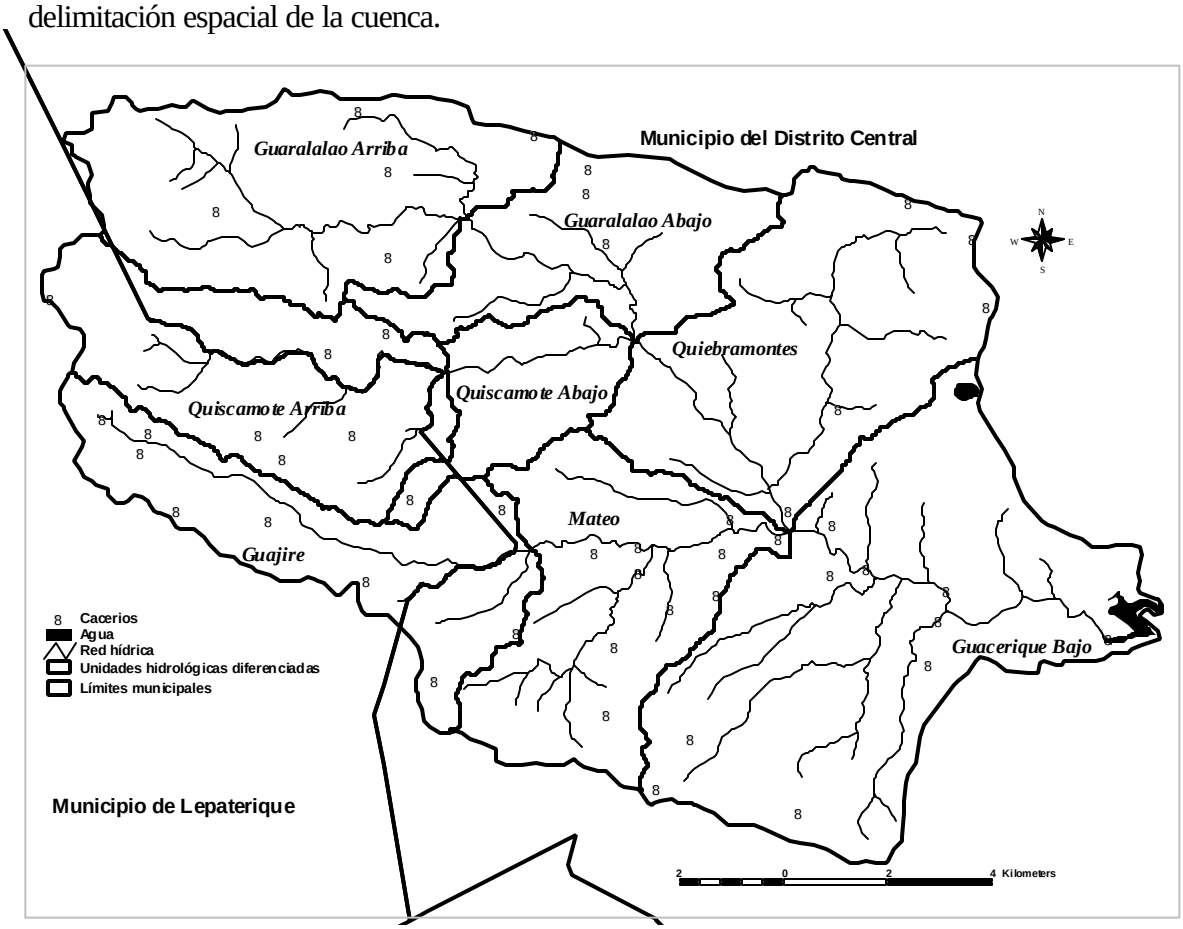
Como se ha discutido en los acápites anteriores, la situación temporal del uso de la tierra y oferta hídrica en la cuenca ha sido dinámica con una tendencia negativa. Se afirmó lo expuesto por Quesada (1986) de que las diferencias de caudal son muy marcadas entre estaciones y las aseveraciones planteadas (Sandströn, 1998; Brooks, 1991; Bruijnzeel, 1989) sobre la ruptura de balances hidrológicos cuando se reducen considerablemente masas boscosas, se expanden los procesos urbanísticos, se pierden las oportunidades de infiltración y las fuentes de caudales base son agotadas. Aunque no se encontraron diferencias estadísticas significativas en los caudales medios durante la época seca, fue notoria la tendencia hacia la reducción (figura 18) y consolidación de picos durante la lluviosa, tomando como base la estación Guacerique II.

Por otra parte, la pérdida de aproximadamente el 17% de la cobertura original de Conífera-Mixto en los últimos 23 años y su excesivo proceso de fragmentación seguramente han contribuido para que se observen los comportamientos de la oferta hídrica actual en la época seca. Reduciéndose de un promedio mensual de 0,16 m^3 s^{-1} en los años 80 a un exiguo 0,06 m^3 s^{-1} en la actualidad. No obstante el incremento en la cobertura original de latifoliado en casi un 15%, éste no debe considerarse con el patrón estereotipado de bosque húmedo tropical, sino con los de carácter xerofítico y muy propenso a los incendios. Dándose condiciones para encontrar ecosistemas degradados con baja cobertura y bajo poder de regulación hidrológica, al mismo tiempo que favorecen la persistencia de incendios forestales que dañan la estructura de los suelos y favorecen la escorrentía superficial, inciden en la existencia de sotobosques de especies que no proporcionan buena cobertura al suelo. Por otra parte, no debe despreciarse los efectos negativos que incrementos en las clases agropecuarias y urbanas han tenido en la cuenca, superficies con las más altas tasas de escorrentía superficial y poder erosivo (Di Luzio *et al*., 2002) y por ende menor aporte a los caudales base, incidiendo negativamente en las oportunidades de recuperación para mantener una oferta hídrica adecuada en las temporadas secas.

4.4 Manejo del recurso hídrico en la Cuenca del Río Guacerique. Propuesta

4.4.1 Segmentación administrativo-biofísica

A partir del criterio de unidades hidrológicas diferenciadas, se propone la siguiente delimitación espacial de la cuenca.



Mapa 7. Segmentación administrativa propuesta para el ordenamiento hidrológico.

Es evidente la similitud con la propuesta por SANAA (figura 22). Sin embargo, se tienen tres unidades adicionales. Como se ve a continuación (cuadro 31) las características de cada unidad difieren, ya que las condiciones socioeconómicas que gobiernan la realidad de cada subcuenca son diferentes. Básicamente se buscó delimitar áreas que encajaran con el contexto de pertenencia territorial por municipio, situación que no se pudo lograr al 100% con Guajire y Quiscamote Arriba. Se prevé que las interrelaciones que habrán de manejar las comunidades de ambos municipios serán diversas, lo cual podría no ser problema ya que las relaciones entre caseríos son menos complejas que las que se presentan a nivel municipal por la diversidad de intereses. En otro orden de ideas, las

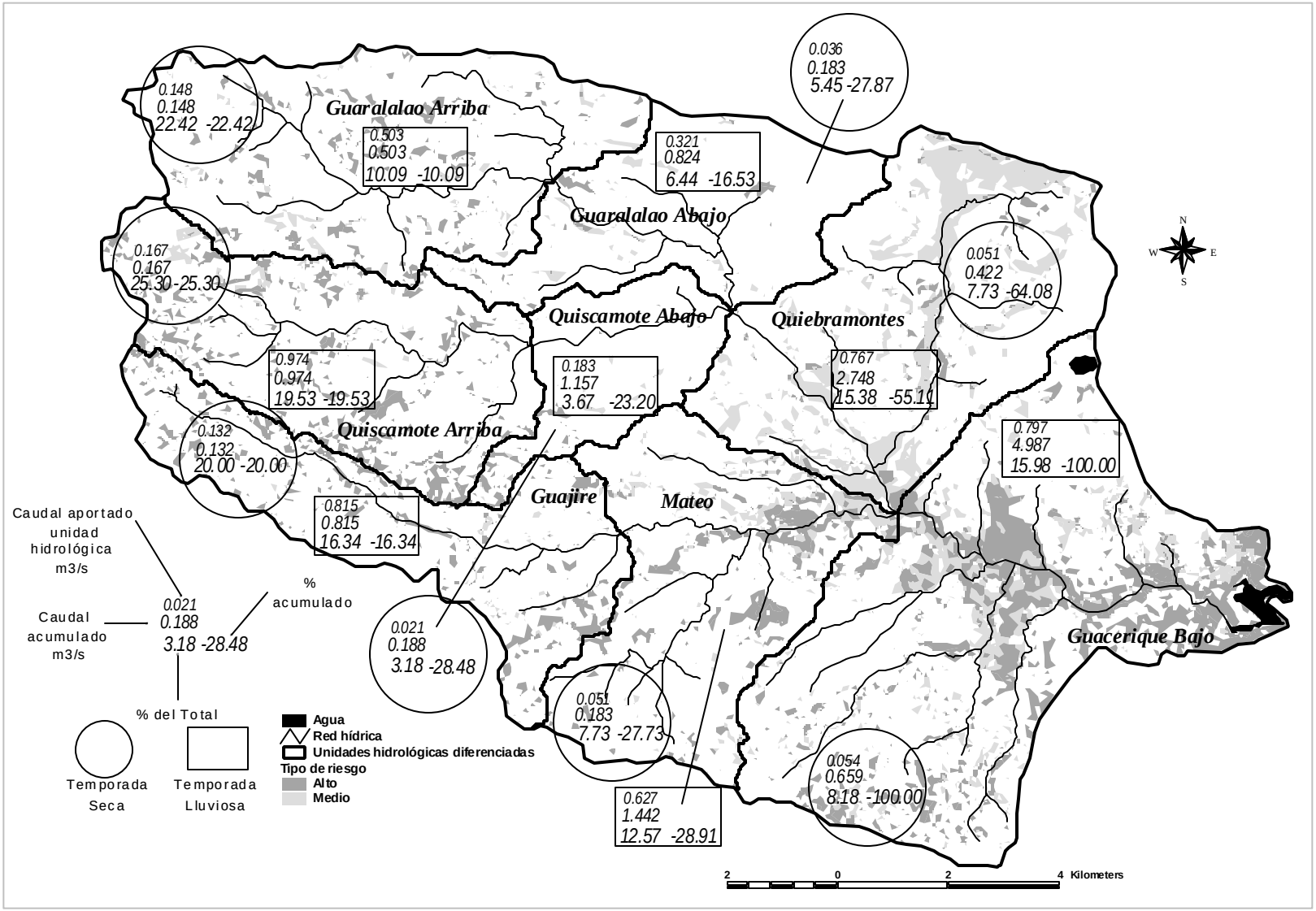
unidades de Quiscamote Abajo, Quiebramontes y Guaralalao Abajo por su baja carga poblacional podrían considerarse para concesión de un manejo privado. No obstante, esto está sujeto de posterior análisis y discusión exhaustiva al interior de la comisión interinstitucional. Presentándose a nivel de propuesta para exponer el potencial de las herramientas siendo utilizadas.

Cuadro 32. Segmentación territorial propuesta y características generales.

Unidad	Área		Contexto municipal %		Carga poblacional		Distribución % uso			
	(ha)	%	Distrito Central	Lepate-rique	# Caseríos	Hab.	Agro.	Latif.	Con-Mix.	Otros
Guaralalao Arriba	2773,08	14,29	99,89	0,11	5	391	21,19	0,96	70,16	7,69
Guaralalao Abajo	1663,56	8,57	100,00	0,00	3	891	18,47	15,37	62,92	3,24
Quiscamote Arriba	2290,77	11,80	28,81	71,19	6	1102	35,88	0,66	57,00	6,46
Quiscamote Abajo	933,57	4,81	90,30	9,70	1	132	18,90	35,79	42,53	2,78
Guajire	1970,82	10,15	28,37	71,63	9	1842	33,85	7,87	50,46	7,82
Mateo	2286,99	11,78	100,00	0,00	10	2523	22,90	21,93	46,21	8,96
Quiebramontes	2970,36	15,30	100,00	0,00	5	910	28,80	41,10	19,86	10,24
Guacerique Bajo	4519,80	23,29	100,00	0,00	10	2377	17,73	30,09	24,44	27,74

4.4.2 Ordenamiento hidrológico

El comportamiento hídrico promedio de los últimos cinco años (1999-2003) obtenido a partir del modelo se presenta en el mapa 8, mostrándose el peso relativo que tiene cada unidad diferenciada en su aporte a la oferta hídrica promedio por estación (seca o lluviosa). El mapa contiene la concentración de áreas críticas y presenta la evidencia que las zonas con alta densidad de las mismas (Ej. Mateo, Quiebramontes, Guacerique Bajo) aportan cantidades deficitarias durante el estiaje, dada la reducción de las oportunidades de infiltración y recarga de acuíferos. Sin embargo son los principales aportadores en la época lluviosa dada las altas tasas de escorrentía superficial que propician.



Mapa 8. Contribución a la oferta hídrica por estación climática para unidades hidrológicas diferenciadas y representación espacial de áreas críticas identificadas.

La estimación de caudales por unidad diferenciada para evaluar su potencial de aporte precede al inventario georeferenciado de extracciones. A este respecto, aunque Guacerique Bajo es un contribuyente bajo en el estiaje, es el mayor consumidor dada su carga poblacional, de industrias e infraestructura existente (acápites 4.3.1) y es por lo tanto donde deben destinarse más esfuerzos en este sentido. Se propone insertar esta actividad en el programa de Regularización de Tierras que llevará a cabo la Unidad Ejecutora, para optimizar el uso de recursos limitados. Los datos resultantes definirán los derechos de propiedad catastral, identificarán el patrón de usos de agua por unidad diferenciada y proporcionarán elementos de juicio para regular las extracciones que inciden en una oferta cuantitativamente deficiente para el embalse "Los Laureles" en tiempos de estiaje. Asimismo, definirá la oferta hídrica promedio que será objeto de concesión a las juntas de agua o servidores privados y que pueda ser negociada al consumidor final que es la municipalidad de Tegucigalpa.

4.4.3 Priorización de unidades diferenciadas

El mapa 8 y el cuadro 33 sirven para optimizar las decisiones a nivel de unidad diferenciada. Aunque un criterio de peso lo constituye el grado de deterioro presente o inclinación hacia estados críticos, es importante evaluar el potencial hídrico de cada unidad o su grado de aporte a la oferta estacional principalmente en la época seca.

Cuadro 33. Cobertura por tipo de riesgo identificado por subcuenca.

	Cobertura (ha)			Cobertura %		
Unidad	**Medio**	**Alto**	**Total**	**Medio**	**Alto**	**Total**
Guacerique Bajo	399,69	842,67	1242,36	2,06	4,34	6,40
Guajire	22,95	205,74	228,69	0,12	1,06	1,18
Guaralalao Abajo	37,98	26,19	64,17	0,20	0,13	0,33
Guaralalao Arriba	57,96	157,86	215,82	0,30	0,81	1,11
Mateo	142,02	232,38	374,40	0,73	1,20	1,93
Quiebramontes	602,19	80,19	682,38	3,10	0,41	3,52
Quiscamote Abajo	11,43	29,61	41,04	0,06	0,15	0,21
Quiscamote Arriba	45,90	287,82	333,72	0,24	1,48	1,72

En este contexto, se proponen 2 líneas a considerar para las áreas prioritarias:

1. Áreas con alto potencial hídrico y alta concentración de zonas de riesgo: se deben atender las unidades de Quiscamote Arriba y Quiebramontes. Debido que Quiscamote Arriba ofrece un potencial de cubrir el 25,30% de la oferta estacional de estiaje y el

subsistema hasta Quiebramontes concentra el 64,08% de la oferta total de la cuenca. Asimismo, en esta última unidad es donde está propuesta la construcción del embalse Guacerique que fue ratificada por la comisión de alto nivel (acápite 3.3.2). Por lo que la atención prioritaria de estas unidades garantizaría la regulación hidrológica de 3/5 partes de la oferta de estiaje total.

2. Áreas con alta concentración de zonas de riesgo y proximidad al embalse: Debe atenderse la unidad de Guacerique Bajo por su implicación directa en el embalse "Los Laureles". Dirigir esfuerzos de restauración a esta unidad compromete la cantidad de sedimentos que pueden llegar a reducir la capacidad hidráulica del embalse. A este respecto, SANAA mantiene un programa de control de torrentes y muros de retención de sedimentos, cuya relación beneficio/costo fue estimada en 1,39 en 1995. Sin embargo, la asignación presupuestaria a este rubro ha disminuido considerablemente en los últimos años y el mantenimiento de las obras es casi nulo (Irías, 2003).

Una tercera línea puede ser dirigida hacia las zonas con alta incidencia sobre la calidad del agua por sobre-uso de agroquímicos. Ejemplo de estos han sido reportados por Oyuela (1987) y SANAA (2000), quienes hacen referencia especial a la unidad de Guajire. Esta unidad con más del 35% del área cubierta por sistemas agropecuarios merecería atención de acuerdo a este criterio. Sin embargo, el aspecto de analizar parámetros de calidad del agua no estuvo incluido en el presente estudio.

4.4.4 Concesión de la oferta disponible por unidad

De acuerdo a lo estipulado (acápite 3.3.2), se persigue enfocar el problema a partir de la subcuenca. En este sentido, corresponderá a la autoridad de cuenca, decidir como realizar la gestión y administrar la oferta disponible por unidad, una vez que se hayan satisfecho las necesidades de las comunidades insertas en el ámbito territorial de cada subcuenca. Se considera proponer que esta administración le sea delegada a las juntas de agua conformadas en los caseríos, ya que existe una mayor conciencia de participación social (Foletti, 2003) y la nueva ley de aguas les concede la prioridad. Sin embargo, en los casos de renuencia de las comunidades a participar, podría considerarse el aspecto privado de la concesión. No obstante y dada la idiosincrasia local; debe ser un proceso concertado y la aceptabilidad local de esta variante del manejo debe ser muy alta. En este contexto, los

esquemas de Ordenamiento Territorial y la definición de los derechos de propiedad (Piedra, 2001) sobre el recurso hídrico deben estipularse y socializarse lo más objetivamente posible, antes de iniciar este proceso.

A nivel más específico, debe considerarse el caso de la unidad de Guacerique Bajo. Aunque es la unidad con la carga poblacional más alta, los conflictos por los usos y definición de derechos de propiedad del recurso hídrico pueden llegar a ser muy complejos. Lo anterior se justifica en que esta unidad es la que presenta casi el 100% de las instalaciones industriales o gubernamentales que aprovechan la oferta hídrica de toda la cuenca de manera excesiva, sin control técnico-administrativo y sin pagar el respectivo canon (SANAA, 2000). Por lo tanto, se propone que la administración de esta unidad se estipule directamente bajo una figura con más potestades legales e institucionales que las que podría eventualmente presentar la mancomunidad de caseríos o una entidad privada.

En otro orden de ideas, para garantizar una adecuada base de datos, es necesario implementar un sistema de monitoreo de la cantidad y calidad de la oferta por unidad diferenciada. Además de servir para corroborar y/o ajustar la primera aproximación obtenida con SWAT, generará elementos para la toma de decisiones que el Ente Regulador prescrito en la Ley de Aguas necesitará para regular los precios. Por lo que el encargado del sistema de monitoreo deberá trabajar conjuntamente con los prestadores o concesionarios de la oferta disponible. Una propuesta consistiría en un referencial de premios o castigos aplicables a la calidad del agua que sale de cada unidad. Lo anterior consistiría en establecer una línea de pago base calculada de acuerdo a la oferta hídrica que queda disponible en cada unidad. Asimismo establecer un reglamento de bonos o reducciones por una baja considerable en la cantidad (en caso que los usuarios se excedan del derecho establecido durante el ordenamiento hidrológico) y calidad (en caso que se realicen prácticas agronómicas que impliquen tendencias negativas en los parámetros de calidad del agua).

Sin embargo, lo expresado es a nivel de propuesta, misma que debe ser sometida a revisión, consideración y sobre todo a un proceso de profundización para definir reglas más específicas y aplicables a la situación local de la cuenca del Río Guacerique.

5. CONCLUSIONES

1. El análisis espacial-estadístico confirmó que la dinámica de usos en la cuenca ha sido significativa para los escenarios analizados. De las masas boscosas las probabilidades de persistencia favorecen únicamente a la clase conífera en un 67% en los dos modelos de transición. El cambio sucesional ha favorecido la expansión de latifoliado a costa de arbustiva en ambos escenarios. Esto no significa una mejora significativa en términos de protección y regulación hidrológica ya que la especie principal (*Quercus sp*) favorece paisajes xerofíticos y persistencia de incendios forestales.

2. El análisis de frontera agrícola demuestra que este ha afectado la cobertura de conífera en un 5,45%, la de mixto en un 4,64% y la de latifoliado en un 4,66% en el último escenario. En un sentido opuesto, la cobertura de pastos ha sido mermada debido principalmente al efecto urbanístico expansivo que desencadenó la construcción del complejo habitacional "Ciudad Mateo". La tasa de deforestación anual para el binomio conífera-mixto pasó de 1,07% a 1,56% en los dos modelos de transición. La clase latifoliado mostró una tasa de repoblación forestal inicial de 19,62% y luego de 3,19% anual. Este comportamiento de las masas boscosas puede ser explicado por fenómenos legales, ecológicos y socio-culturales.

3. La dinámica de usos ha producido un paisaje altamente fragmentado en las masas boscosas y favorecido condiciones para que los paisajes agropecuarios presenten formas más simples, significando que ha existido un proceso de aglomeración de estas clases de uso. La implicación de lo anterior radica en reducciones de hábitat para la biodiversidad y pérdida de la continuidad espacial de los bosques para la regulación hidrológica.

4. Las zonas con alta densidad y buen nivel de alfabetización propician más transiciones a clases urbano-desnudos. Por otra parte, la normativa de distanciamiento mínimo a ríos permanentes y condicionante biofísica de pendiente no regulan ningún tipo de transición entre clases sintéticas de uso, denotando una falta de aplicación de las leyes e indiferencia en las decisiones de las poblaciones locales que gobiernan la dinámica

de uso en la cuenca. La variable altitud favorece tendencias hacia cultivos de alta rentabilidad agropecuaria y el grado de uso de leña por la población ha favorecido la persistencia de rodales de latifoliado y su expansión para mantenerlos como fuentes de energía.

5. Aunque las áreas discriminadas como críticas sólo cubren el 16,47% de la cuenca, más importante es su ubicación espacial, ya que se ubican en las cercanías del embalse "Los Laureles". Esto denota un alto riesgo a la facilidad con que las zonas erosionadas pueden aportar sedimentos al embalse, reduciendo su capacidad de almacenamiento.

6. El patrón pluvial en la cuenca no ha cambiado de magnitud durante los escenarios analizados. Aunque no se registran diferencias estadísticas en los caudales promedios de estiaje observados en la estación Guacerique II, es notoria una tendencia hacia la reducción de los caudales medios de la temporada seca y un aumento en la concentración durante la fase lluviosa.

7. El patrón de caudales en el punto de aforo total se ve gravemente disminuido por las extracciones masivas que se hacen directamente del río por una serie de instalaciones e infraestructura radicada en la parte baja de la cuenca. Encontrándose que en ciertas épocas, los caudales en las estaciones aguas arriba son mayores. Todo esto repercute en una oferta hídrica cuantitativamente deficiente que alcanza el embalse "Los Laureles" y en las posibilidades de captación financiera, ya que no existe un sistema de regulación de las extracciones ni un mecanismo de pago por el agua utilizada.

8. Se encontraron diferencias altamente significativas entre caudales observados y simulados con SWAT y la evidencia demuestra que la precisión del modelo va disminuyendo en la medida que espacialmente las extracciones se van haciendo más fuertes en la cuenca baja. No obstante, la capacidad de predicción es mucho mejor en la época seca y las variables de entrada del modelo son sensibles a los cambios. Dado lo anterior y a que las aproximaciones son más necesarias en las temporadas de

estiaje, se puede establecer que el modelo puede ser sujeto de un proceso más adelantado de calibración y por ende ser utilizado en un proceso de toma de decisiones.

9. La dinámica de uso en relación con la oferta hídrica temporal muestran patrones negativos ya que se han producido reducciones en las masas forestales consideradas como mejores reguladores que las cubiertas agropecuarias. Sin embargo cabe responsabilizar la oferta cuantitativamente deficiente que se recibe en el embalse "Los Laureles" tanto a una degradación ambiental significativa como a una problemática en la definición de derechos de propiedad y regularización de explotaciones del recurso hídrico.

6. RECOMENDACIONES

1. Las estrategias para la obtención de una oferta hídrica acorde a la demanda del embalse "Los Laureles" deben ser orientadas en primera instancia a la regulación de las explotaciones del recurso agua que se dan en forma masiva especialmente en la cuenca baja. Lo anterior debe llevar implícito un plan de ordenamiento hidrológico en toda la cuenca; del que se ha presentado una propuesta preliminar en este estudio. Sin embargo debe ser sometido a un proceso de revisión y profundización temática para poder ser socializado con los diferentes actores.

2. La utilización del modelo para establecer una línea base inicial que coadyuve a definir la oferta hídrica disponible por unidad diferenciada puede ser probada, en el entendido que existe incertidumbre estadística. Se recomienda tomar la base de datos resultante de este estudio y continuar afinándola, requerimiento que se puede lograr con coberturas a mayor detalle o escala, revisión detallada del proceso de calibración y la integración de los puntos geográficos donde se realizan extracciones acompañados de la magnitud de las mismas.

3. Aunque se recomienda utilizar el modelo SWAT y su posterior proceso de calibración y ajuste, debe aclararse que se hace para el caso específico de la cuenca del Río Guacerique, donde una gran cantidad de datos con buena precisión pudieron ser obtenidos. Sin embargo, es necesario que en la medida de lo posible se puedan probar otros modelos con menos requerimientos de datos y menor grado de complejidad para su uso; de tal forma que este tipo de experiencias puedan satisfactoriamente ser replicados en otras zonas con un balance inferior de datos existentes y condiciones similares de problemas.

4. Las necesidades de restauración hidrológico-forestal que han sido identificadas con la ayuda del mapa de áreas críticas son diversas, complejas y por ende costosas. Se sugiere que éstas sean atendidas en el orden de prioridad asignado en la propuesta de ordenamiento y que se analice las fortalezas e historial existente en el Departamento de Manejo de Cuencas de SANAA al respecto. Se han hecho informes que validan el

atractivo financiero de las obras realizadas y al mismo tiempo se pueden implementar mecanismos para integrar las comunidades en la ejecución de las obras que redundaría en mayor participación-apropiación de los actores insertos y una reducción de costos en comparación a contrataciones de compañías de ingeniería civil.

5. Se recomienda realizar estudios conducentes a probar la eficiencia de otras especies forestales que cumplan con los propósitos de garantizar una fuente de energía (leña) para las comunidades adyacentes y provean las condiciones para una buena regulación hidrológica en la cuenca. Este patrón de experimentos debería realizarse en zonas con condiciones biofísicas similares a las de la cuenca para poder emular la respuesta hidrológica que se esperaría en caso de realizar propuestas de cambio de uso de la tierra con fines de regulación, dado que se ha identificado que las especies de latifoliado de las partes bajas propician condiciones que no son las óptimas para garantizar la oferta hídrica, especialmente en la temporada de estiaje.

6. El sistema de monitoreo de parámetros de calidad de agua para la cuenca debe ser consolidado y el uso de la base de datos existente puede ser potenciado. En caso de aprobar la revisión de la propuesta de ordenamiento hidrológico, la comisión debe dar énfasis a este tema, sin el cual no puede llevarse a cabo. Se recomienda la revisión de experiencias llevadas a cabo donde existe una participación de las comunidades en las mismas y que por lo tanto son de bajo costo.

7. La comisión interinstitucional puede considerar la realización de este tipo de estudios en las otras cuencas que forman parte del sistema suroeste de abastecimiento metropolitano (Concepción, Laguna del Pescado, Río Ojojona). Aunque las condiciones socioeconómicas que gobiernan la oferta hídrica de estas zonas sean diferentes, todas aportan hacia un fin común que es dotar de agua a Tegucigalpa. Pudiendo por lo tanto establecerse las líneas base de situación del uso de la tierra y de la oferta hídrica con suficiente antelación para evitar el tipo de problemática en las condiciones de degradación ambiental y usos del agua que se presentan en Guacerique.

7. LITERATURA CONSULTADA

Alonso, M; Rozados, M.J; Vega, J.A; Bara, S; Cuiñas, P. 1998. Parámetros químicos indicadores de daños producidos por fuego en *Pinus pinaster* Ait. Investigación Agraria-Sistemas y Recursos Forestales. 7(1-2):5-27.

Arguello, GE. 1992. Modelación hidrológica continua en tiempo real de la cuenca del río Virilla, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 128 p.

Arnold, J. 2001. Soil & water assessment tool. Consultado: 20/09/02. Disponible en línea: http://www.brc.tamus.edu/swat/swattheo.html

Ayala. J. 2001.Tesis. Simulación y modelamiento de los recursos hídricos de la cuenca del río Khenko. Consultado: 23/09/02. Disponible en línea: http://www.umss.edu.bo/epubs/earts/downloads/63.pdf

Baritto, FS. 2000. Dinámica del uso de la tierra y vulnerabilidad a desastres naturales en la costa norte de Venezuela. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 105 p.

Bell, EJ. 1998. Análisis Markov de cambio de uso de la tierra: Aplicación potencial en percepción remota y sistemas de información geográfica. Revista Cartográfica. 67. 65-77.

Bosch, JM; Smith, RE. 1989. The effect of afforestation of indigenous scrub forest with *Eucalyptus sp* on streamflow from a small catchment in the Transvaal, South Africa. Suid-Afrikaanse Bosboutydskrif 150: 7-17.

Briassoulis, H. 2001. Analysis of land use change: theoretical and modeling approaches. Lesvos, Greece, Department of Geography, University of the Aegean. 301 p.

Brooks, KN; Ffolliot, PF; Gregersen, HM; Thames, JL. 1991. Hydrology and the management of watersheds. Ames, Iowa, US, Iowa State University Press. 392 p.

Bruijnzeel, LA.1989. (De) forestation and dry season flow in the tropics: a closer look. Journal of Tropical Forest Science 1 (3): 229-243.

_____. 1991. Hydrological impacts of tropical forest conversion. Nature & Resources. 27 (2): 36-40.

Buch, MW. Von.1988. Degradation of ignimbrite soils and the destruction of pine forests in Honduras. Plant Research and Development. 28:32-46.

Carabalí, F; Estrada, RD. 1999. Estimación de caudales y sedimentos en la cuenca del río Guadalajara, mediante el modelo SWAT. CIAT / CONDESAN. Consultado: 11/09/02. Disponible en línea: www.kcl.ac.uk/kis/schools/hums/ geog/herb/guadalajara.pdf

Chanasyk, DS; Mapfumo, E; Willms, W. 2003. Quantification and simulation of surface runoff from fescue grassland watersheds. Agricultural Water Management. 59. 137-153.

Chávez, S; Cruz, G; Perez, JR. 1987. Estudio del caso de la cuenca del río Palaja hasta el embalse El Níspero. Tegucigalpa, HO, Empresa Nacional de Energía Eléctrica / CATIE. 85 p.

Chow, VT; Maidment, DR; Mays, LW. 1994. Hidrología aplicada. Santafé de Bogotá, O, McGraw-Hill Interamericana. 584 p.

CECRG Comisión ejecutiva de la cuenca del Río Guacerique. 2002. Informe a la presidencia de la república sobre Ciudad Mateo. Tegucigalpa, HO. 8 p.

Cooke, S; Ahmed, S; MacAlpine, N. 2002. Introductory guide to surface water quality monitoring in Agriculture. Alberta Agriculture, Food and Rural Development. Consultado: 21/09/02. Disponible en línea: http://www.agric.gov.ab.ca/sustain/water/final_wq_guide.html#table1

DeVries, JJ; Hromadka, TV. 1993. Computer models for surface water. *In* Maidment, DR. eds. Handbook of hydrology. New York, US, McGraw Hill, Inc. p 21.1 – 21.39.

Di Luzio, M; Srinivasan, R; Arnold, JG; Neitsch, SL. 2002. Arcview interface for SWAT2000: User´s guide. Consultado: 10/11/02. Disponible en línea: http://www.brc.tamus.edu/swat/swatapp.html

EPA Environmental Protection Agency.2000. BASINS. Consultado: 23/08/02. Disponible en línea: http://www.epa.gov/waterscience/basins/b3docs/sec1

Erdas Inc. 1999. Erdas field guide. 5ta. Edición. Atlanta, Georgia, US, Erdas inc. 698 p.

Fedra, K. 1993. GIS and environmental modeling. In Goodchild, MF; Parks, BO; Steyaert, LT. eds. Environmental modeling with GIS. New York, US, Oxford University Press. p 35 – 50.

Feller, MC. 1981. Water balances in *Eucalyptus regnans, E. obliqua* and *Pinus radiata* forests in Victoria. Australian Forestry 44 (3): 153-161.

Folleti, C. 2003. Propuesta de autoridad de subcuenca Guacerique: Documento de discusión No publicado. Tegucigalpa, HO. 7 p.

FHIS - Fondo Hondureño de Inversión Social. 2002. Manual de referencias hidrológicas. Tegucigalpa, HO. 136 p.

FAO Food and Agriculture Organization.1998. Contaminación provocada por los sedimentos. Consultado: 23/09/02. Disponible en línea: http://www.fao.org/docrep/W2598S/w2598s04.htm

Fule, P.Z; Arévalo, A.G; Covington, W.W. 2000. Effects of an intense wildfire in a Mexican oak-pine forest. *Forest Science*. 46(1):52-61.

Galloso, J; Iroume, A. 1995. Impacto del manejo de plantaciones sobre el ambiente físico. Bosque 16 (2): 3-12.

Hernández, A; Barbier, B; Hernández, J. 2000. Dinámica de uso de la tierra en la cuenca del río Humuya: Informe de consultoría CIAT-PROCUENCA. No publicado. Tegucigalpa, HO. 27 p.

Holdridge, LR. 2000. Ecología basada en zonas de vida. 5ta. Reimpresión. San José, CR, IICA. 216 p.

Hornbeck, JW; Corbett, ES; Duffy, PD; Lynch, JE. 1984. Forest hydrology and watershed management. *In* Wenger, KF. eds. Forestry handbook. 2 ed. New York, US, Willey. p 637 – 678.

Hudson, H; Kellman, M; Sanmugadas, K; Alvarado, C. 1983. Prescribed burning of *Pinus oocarpa* in Honduras: I effects on surface runoff and sediment loss. Forest Ecology and Management 5:269-281.

Infostat. 2003. InfoStat, versión 1.5. Manual del Usuario. Grupo InfoStat, Universidad Nacional de Córdoba, AR, Editorial Brujas. 272 p.

IGN Instituto Geográfico Nacional. 1990. Mapa hidrogeológico de la zona central de Honduras. Tegucigalpa, HO.

_____. 1991. Hojas cartográficas 2758 II y 2758 III. Tegucigalpa, HO.

_____. 1993. Hojas geológicas 2758 II G y 2758 III G. Tegucigalpa, HO.

Instituto Nacional de Ecología en México. 2001. Evaluación ambiental comparativa de dos sitios considerados para la ubicación del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM). Consultado: 12/09/02. Disponible en línea: http://www.ine.gob.mx/introaero.html

INE Instituto Nacional de Estadísticas. 2002. Datos del censo nacional de población y vivienda 2001. Consultado: 12/09/02. Disponible en línea: http://www.ine.online.hn

Irías, L. 1995. Análisis de rentabilidad de la construcción de muros de retención de sedimentos en las cuencas hidrográficas. Informe SANAA No publicado. Tegucigalpa, HO. 12 p.

James, LD; Burges, SJ. 1982. Selection, calibration and testing of hydrologic models. *In* Haan, CT; Johnson, HP; Brakensiek, DL. Eds. Hydrologic modeling of small watersheds. ASAE, MI, USA. pp. 437-472.

Kammerbauer, J; Ardón, C. 1999. Land use dynamics and landscape change pattern in a typical watershed in the hillside region of central Honduras. Agricultura, Ecosystems and Environment 75: 93-100.

Komives, R; Lücke, O; Pérez, R. 1986. Agua potable para Tegucigalpa: estudio de uso de la tierra. Tegucigalpa, HO, CATIE – AHE – UICN. 43 p.

Lee, M. 1996. Multiple resource needs and multiple conflicts in urban watersheds in developing countries: The case study of the Guacerique watershed, Tegucigalpa, Honduras. Integrated Management of Surface and Groundwater. UCOWR Annual Meeting, July 30-August 2, 1996. San Antonio, Texas. Consultado: 21/09/02. Disponible en línea: http://isis.csuhayward.edu/ALSS/Geography/mlee/guacerique.html

Legates, DR; McCabe, GJ. 1999. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water Resources Research. 35(1). 233-241.

León, M. 2001. Informe de comparación de parámetros de calidad de agua medidos con kit y laboratorio. No publicado. Siguatepeque, HO. 14 p.

Luitjen, JC; Jones, JW; Knapp, EB. 2000. Dynamic modeling of strategic water availability in the Cabuyal River, Colombia: the impact of land cover change on the hydrological balance. Advances in environmental monitoring and modeling, 1(1) 36-60.

Madrigal, LE. 1995. Análisis de las inundaciones en la cuenca del río Tuis mediante la modelación hidrológica e hidráulica de eventos máximos. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 371 p.

Maidment, DR. 1993. GIS and hydrological modeling. In Goodchild, MF; Parks, BO; Steyaert, LT. eds. Environmental modeling with GIS. New York, US, Oxford University Press. p 147 – 167.

Mosley, MP; McKerchar, AI. 1993. Streamflow. *In* Maidment, DR. eds. Handbook of hydrology.New York, US, McGraw Hill, Inc. p 8.1 – 8.37.

Neitsch, S.; Diluzio, M. 1999. User Guide, Arc View Interface for Swat Versión 99.2. 38 p.

_____; Arnold, JG; Kiniry, JR; Williams, JR; King, KW. 2002. Soil and water assessment tool theoretical documentation. Consultado: 12/11/02. Disponible en línea: http://www.brc.tamus.edu/swat/swatapp.html

Nik, AR. 1988. Water yield changes after forest conversion to agricultural landuse in peninsular Malaysia. Journal of Tropical Forest Science 1 (1): 67-84.

Oyuela, DO. 1987. Los sistemas de producción agrícola y la determinación de posibles fuentes de contaminación en la subcuenca del río Guajire, cuenca río Guacerique, Honduras. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 190 p.

Paul, S; Matlock, M; Haan, P; Mukhtar, S; Pillai, S. 2001. Uncertainty analysis as a first step of developing a risk-based approach to nonpoint source modeling of fecal coliform pollution for total maximum daily load estimates. Texas A&M University. Consultado: 01/09/02. Disponible en línea: http://twri.tamu.edu/reports/2002/2002-014/

Piedra, M. 2002. Apuntes de curso: Bases económicas para el manejo de los recursos naturales. Turrialba, CR, CATIE.

Quezada, CA. 1986. La problemática demográfica – ambiental de Tegucigalpa y su relación con el abastecimiento y costos de agua potable. *In* Maldonado, T; Pérez, JR. eds. Seminario sobre agua potable para Tegucigalpa. Tegucigalpa, HO, CATIE – Proyecto Regional Manejo de Cuencas. p 1 – 42.

RDS Red de Desarrollo Sostenible.2002. Noticias. Consultado: 14/11/02. Disponible en línea: http://rds.org.hn/docs/noticias/martes_20_marzo.html

Richters, E. 1995. Manejo del uso de la tierra en América Central: hacia el aprovechamiento sostenible del recurso tierra. Colección Investigación y Desarrollo (IICA). no. 28. IICA, San José, CR. 439 p.

Rivera, R. 1999. La Laguna del Pescado durante el paso del huracán Mitch. Revista Geográfica IGN, Tegucigalpa, HO.

Rivera, S. 1998. Análisis de la deforestación en Honduras (1965-1992) usando técnicas de sensores remotos y sistemas de información geográfica. Tatascán 10 (2): 65-79.

_____.; León, J. 2000. Avances en el estudio de la erosión en Honduras: Informe de consultoría CIAT-PROCUENCA. No publicado. 41 p.

Romero, R; Martínez, F. 1990. Agua para una ciudad sedienta. *In* Hinkelamment, F; Richard, P; Alvarez, C; Aruj, J. eds. Hacia una Centroamérica verde: seis casos de conservación integrada. San José, CR, DEI. p 53 – 72.

Rosenthal, WD; Hoffman, DW. 1999. Hydrologic modeling/GIS as an aid in locating monitoring sites. Transactions of the ASAE. 42(6). 1591-1598.

Sáenz, F; Shultz, S; Hyman, G. 1997. Uso de un sistema de información geográfica en la identificación de degradación de tierras y recursos hídricos. Revista Forestal Centroamericana 18 (6): 18-22.

Salas, G De Las. 1987. Suelos y ecosistemas forestales: con énfasis en América tropical. San José, CR, IICA.(Colección Libros y Materiales Educativos IICA No 80). 447 p.

Salgado, LJ. 1996. Valoración económica del agua para uso urbano, proveniente del parque nacional La Tigra, Tegucigalpa, Honduras. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 82 p.

SANAA. 2000. Segundo curso internacional de manejo integral de cuencas hidrográficas. Tegucigalpa, HO. 25 p.

_____. 2000. Resumen ejecutivo: Problemática cuenca del Río Guacerique. Tegucigalpa, HO. 225 p.

Sandströn, K. 1998. Can forest “provide” water: widespread myth or scientific reality? Ambio 27 (2): 132-138.

SAG Secretaría de Agricultura y Ganadería. 1989. Monografía de la cuenca del Río Choluteca: Tomo I. Tegucigalpa, HO. 356 p.

_____. 2001. Manual práctico forestal. Tegucigalpa, HO. 119 p.

Seminario, E; Cabrera, R; Mora, I; Oyuela, O. 1986. Transporte de sedimentos en el río Guacerique. *In* Maldonado, T; Pérez, JR. eds. Seminario sobre agua potable para Tegucigalpa. Tegucigalpa, HO, CATIE – Proyecto Regional Manejo de Cuencas. p 121 – 132.

Shaw. 2002. Consultado: 23/09/02. Disponible en línea: www.ce.utexas.edu/stu/shawks/ evaluating_water_quality_paramet.htm.

Sheaffer, R; Mendenhall, W. 1987. Elementos de muestreo. Trad. G Rendon, JR Gómez. México, DF, Grupo Editorial Iberoamerica. 321 p.

Simmons, CS. 1969. Los suelos de Honduras: Informe al gobierno de Honduras. Roma, IT, FAO. 88 p.

Southworth, J; Tucker, C. 2001. The influence of accesibility, local institutions, and socioeconomic factors on forest cover change in the mountains of western Honduras. Mountain Research and Development. 21(3). 276-283.

Srinivasan, R; Ramanarayanan, T; Wang, H; Jayakrishnan, R. 1997. Hydrologic modeling of the rio Grande / rio Bravo basin. Consultado: 01/09/02. Disponible en línea: http://www.brc.tamus.edu/swat/swatapp.html

Stadtmüller, T. 1994. Impacto hidrológico del manejo forestal de bosques naturales tropicales: medidas para mitigarlo. Turrialba, CR, CATIE. (Colección Silvicultura y Manejo de Bosques Naturales No 10). 62 p.

Strand, J.1998. Water pricing in Honduras.University of Oslo – World Bank. Oslo, Noruega. 36 p.

Swindel, BF; Lassiter, CJ; Riekerk, H. 1983. Effects of clearcutting and site preparation on stormflow volumes of streams in *Pinus elliottii* flatwood forests. Forest Ecology and Management 5: 245-253.

Tarbuck, EJ; Lutgens, FK. 2000. Ciencias de la tierra: Introducción a la geología física. Madrid, ES, Prentice Hall. 616 p.

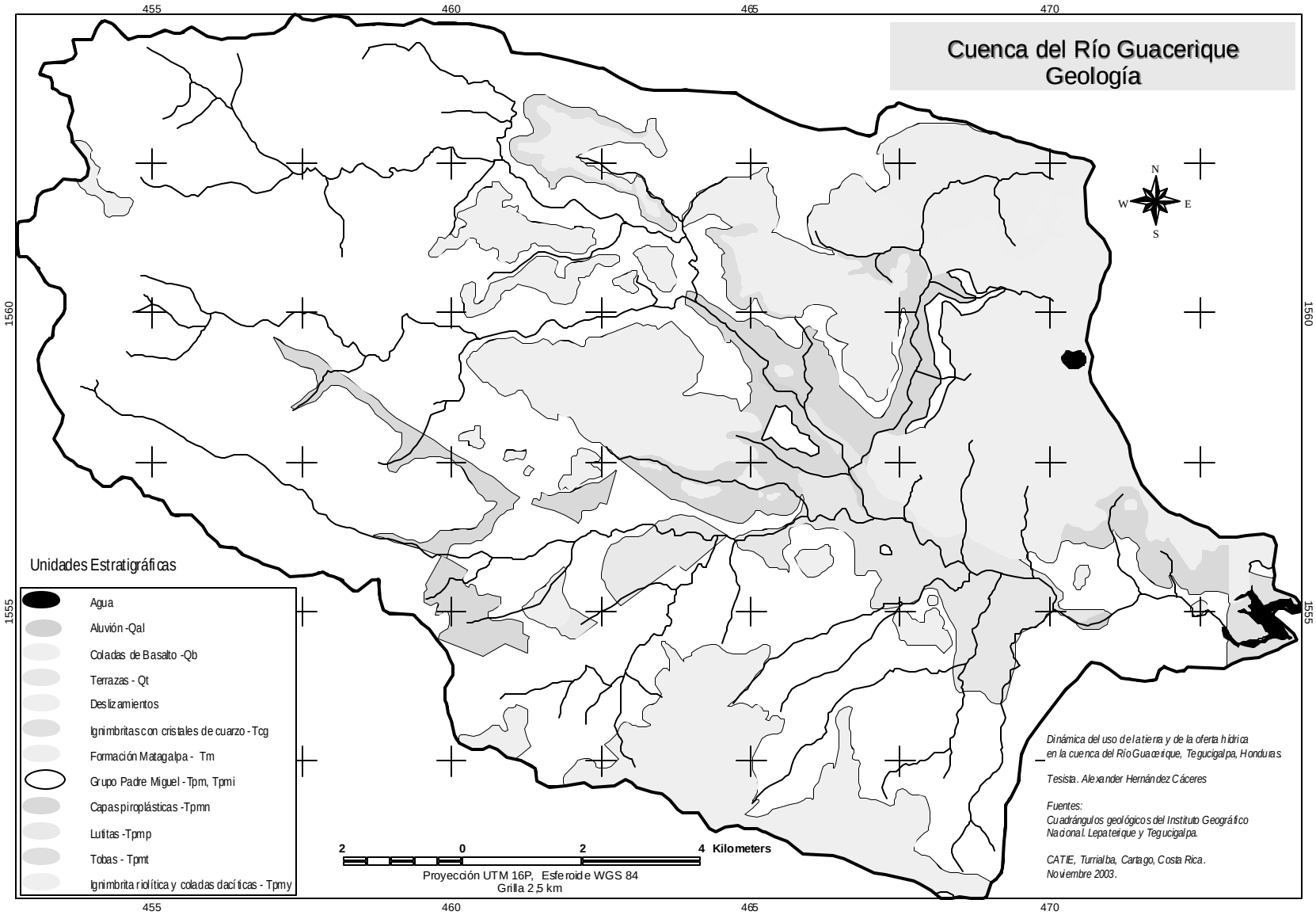
TRAGUA Tribunal Latinoamericano del Agua. 2002. Población y disponibilidad anual de agua potable en Centroamérica. Consultado: 11/11/02. Disponible en línea: http://tragua.com/aguarenovableca.htm

UNESCO. 2002. Una creciente escasez. Consultado: 23/09/02. Disponible en línea: http://www.unesco.org/courier/2001_10/sp/doss02.htm.

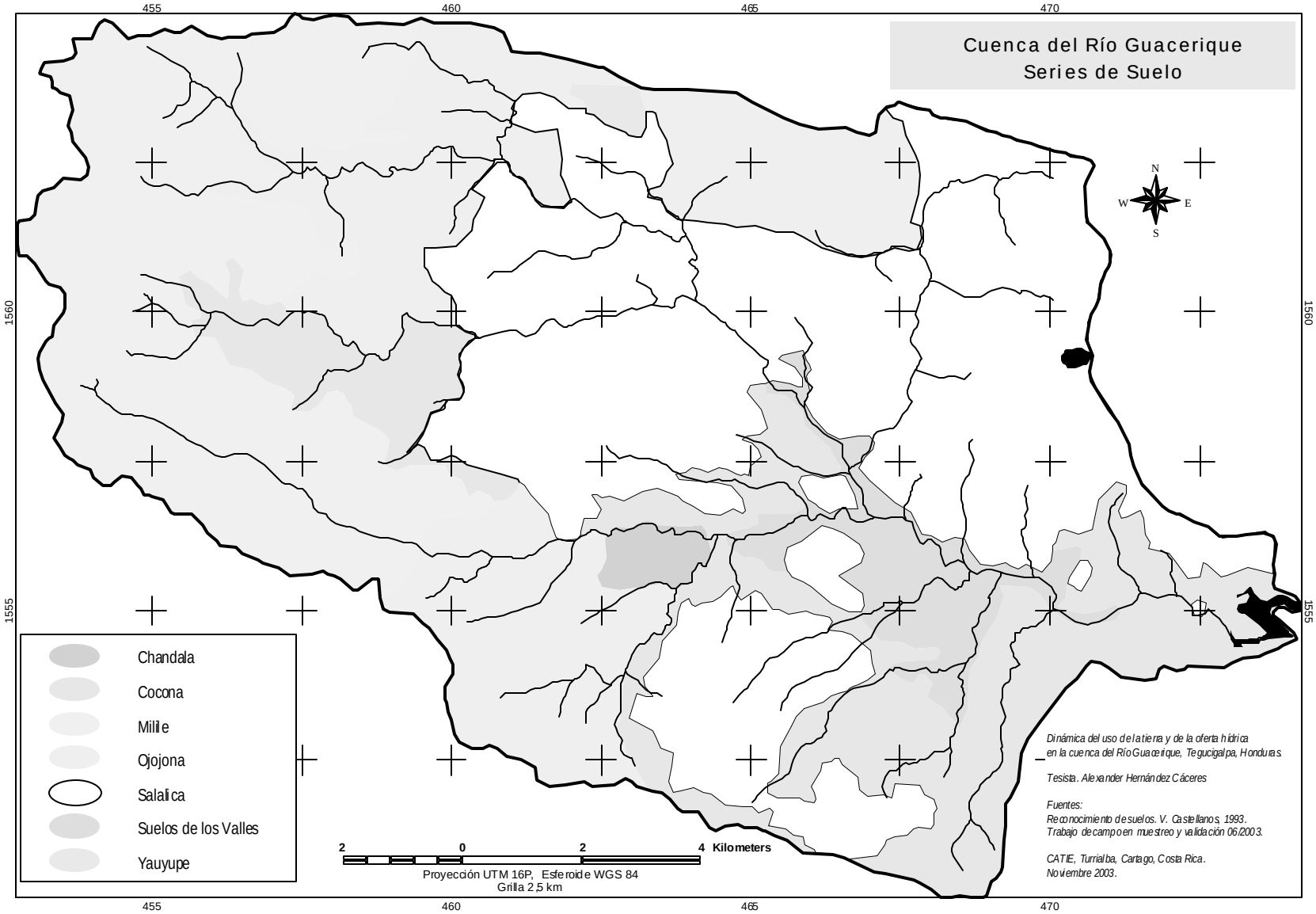
Villón, M. 2002. Hidrología. San José, CR, Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Zúniga Andrade, E. 1990. Las modalidades de la lluvia en Honduras. Tegucigalpa, HO, Editorial Guaymuras. 141 p.

ANEXOS



Anexo 1. Mapa geológico



Anexo 2. Mapa de series de suelo generado durante el trabajo de investigación

Anexo 3. Clasificación hidrológica de las series de suelo en la cuenca. Tomado de FHIS (2002).

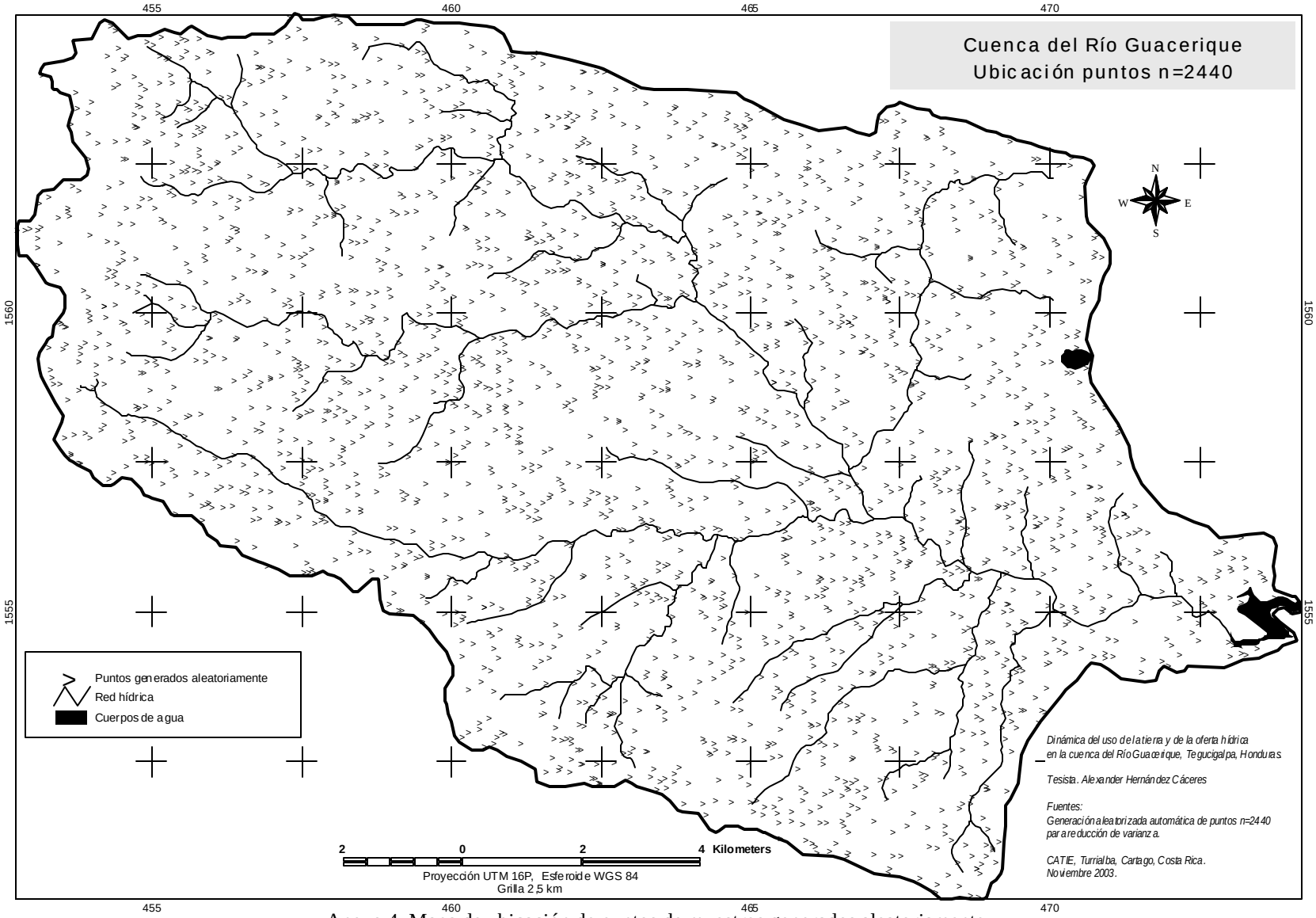
Serie de suelo	Clasificación hidrológica
Valles	D
Chandala	C
Ojojona1	D
Ojojona2	D
Salalica1	C
Salalica2	D
Milile	C
Cocona1	C
Cocona2	C
Yauyupe	D

Suelos C (Moderadamente alto potencial de escorrentía).

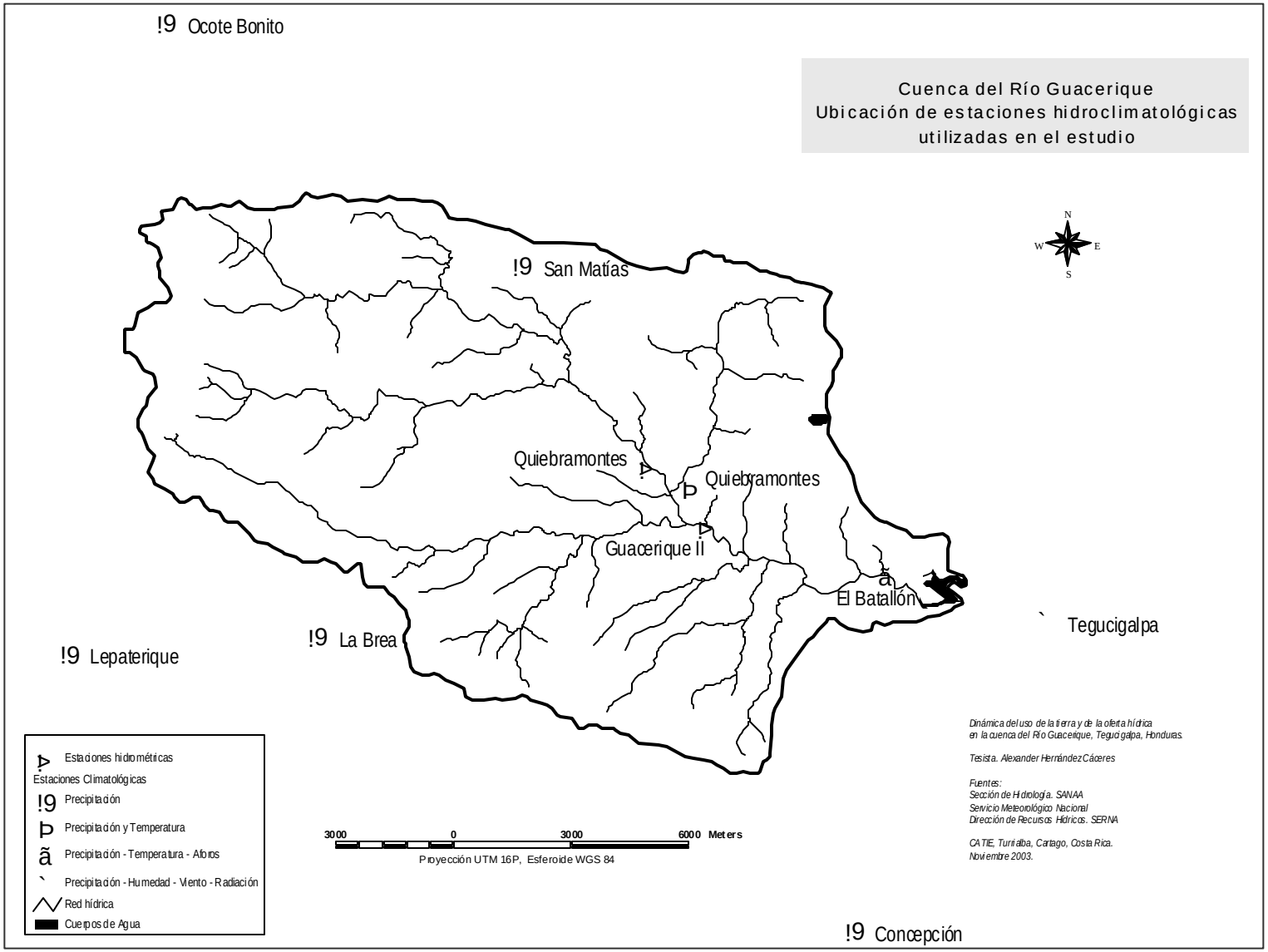
Suelos con infiltración lenta cuando muy húmedos. Suelos que poseen un estrato que impide el movimiento de agua hacia abajo, de texturas moderadamente fina; suelos con infiltración lenta debido a sales o álkali o suelos con mesas moderadas. Estos suelos pueden ser pobremente drenados o moderadamente bien drenados con estratos de permeabilidad lenta o muy lenta (fragipan, hardpan, sobre roca dura) a poca profundidad (50-100 cm) (comprende suelos en sub grupos albicos o aquicos; suelos en subgrupos arenicos de aquents, aquepts, aqualfs y aquults en familias francas; suelos que no estén en el grupo D y que pertenecen a las familias finas, muy finas o arcillosas excepto aquellas con mineralogía caolinitica, oxidica o haloisitica; humods y orthods; suelos con fragipanes de horizontes petrocalcicos; suelos de familias "poco profundas" que tienen subestratos permeables; suelos en subgrupo líticos con roca permeable o fracturada que permita la penetración del agua).

Suelos D (Alto potencial de escorrentía).

Suelos con infiltración muy lenta cuando muy húmedos. Consiste con suelos arcillosos con alto potencial de expansión; suelos con nivel freático alto; suelos con "claypan" o estrato arcilloso superficial; suelos con infiltración muy lenta debido a sales o álkali y suelos poco profundos sobre materia casi impermeable. Estos suelos tienen una rata de transmisión de agua muy lenta (incluye: todos los vertisoles y aquods; suelos en aquents, aquepts, aquolls, aqualfs y aquults, excepto los subgrupos arenicos en familias francas, suelos con horizontes nátricos, suelos en subgrupos líticos con subestratos impermeables; y suelos en familias poco profundas que tienen un subestrato impermeable).



Anexo 4. Mapa de ubicación de puntos de muestreo generados aleatoriamente

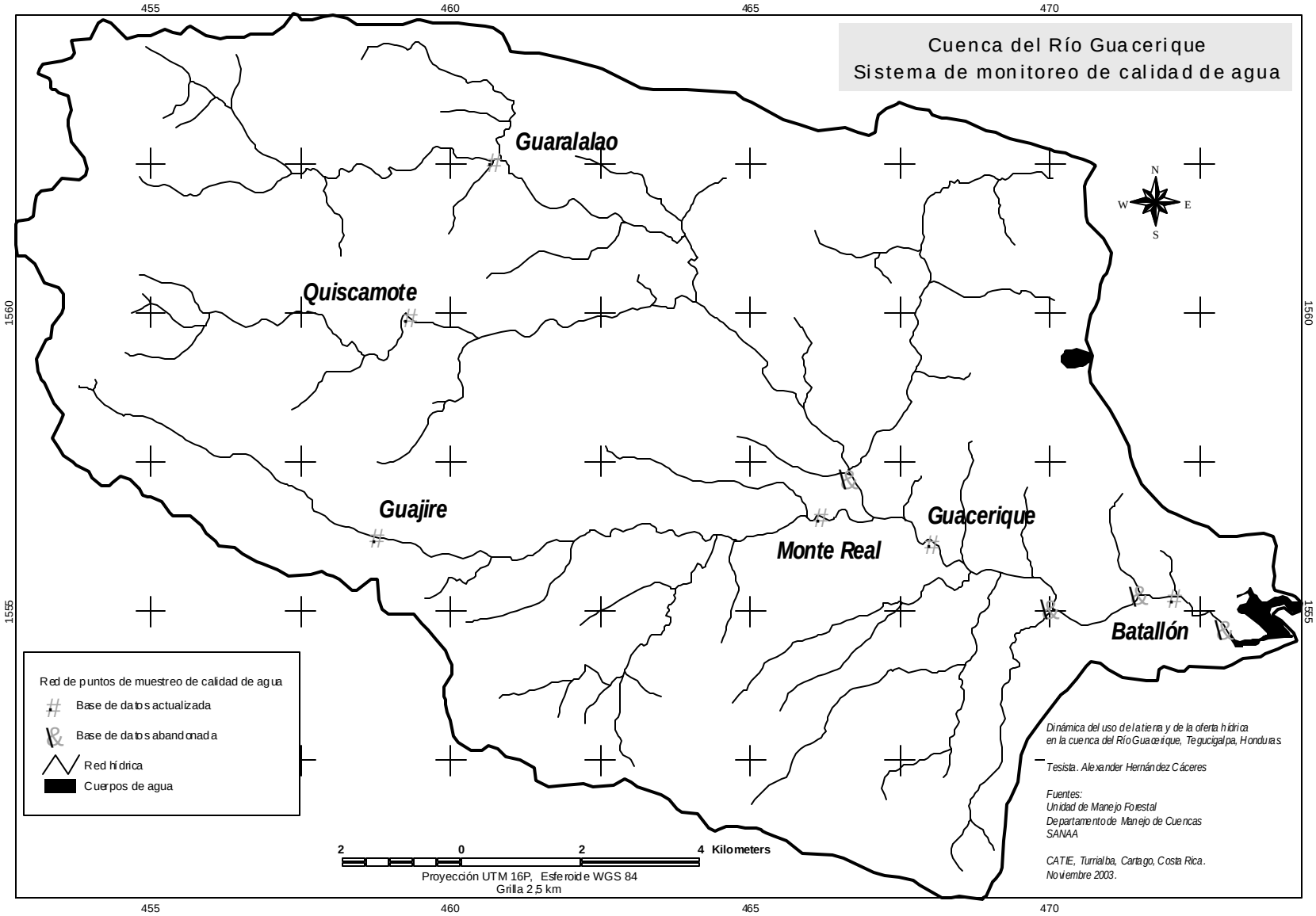


Anexo 5. Mapa de ubicación de estaciones hidro-climáticas utilizadas

Anexo 6. Ejemplos de técnicas de restauración hidrológica forestal. Cortesía de Departamento de Manejo de Cuencas SANAA.

Utilización de llantas usadas para retención de sedimentos. Al fondo el embalse Los Laureles

Utilización de mano de obra local en la construcción de muros de piedra suelta.



Anexo 7. Mapa de ubicación de red de estaciones de monitoreo de calidad de agua

Anexo 8. Listado de instituciones participantes en comisión interinstitucional

?? Municipalidad del Distrito Central
?? Municipalidad de Lepaterique
?? Dirección de Ordenamiento Territorial DGOT de la Secretaría de Gobernación y Justicia MGJ
?? Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente SERNA
?? Administración Forestal del Estado AFE-COHDEFOR
?? Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillados SANAA
?? Proyecto de Administración de Áreas Rurales PAAR
?? Instituto de Jubilaciones y Pensiones de Empleados Públicos INJUPEMP
?? Secretaría de Obras Públicas, Transportes y Vivienda SOPTRAVI
?? Secretaría de Agricultura y Ganadería SAG
?? Colegio de Ingenieros Civiles de Honduras CICH
?? Secretaría de Finanzas SEFIN

Anexo 1. Mapa geológico..... 105
Anexo 2. Mapa de series de suelo generado durante el trabajo de investigación 106
Anexo 3. Clasificación hidrológica de las series de suelo en la cuenca. 107
Anexo 4. Mapa de ubicación de puntos de muestreo generados aleatoriamente 108
Anexo 5. Mapa de ubicación de estaciones hidro-climáticas utilizadas 109
Anexo 6. Ejemplos de técnicas de restauración hidrológica forestal. 110
Anexo 7. Mapa de ubicación de red de estaciones de monitoreo de calidad de agua..... 111
Anexo 8. Listado de instituciones participantes en comisión interinstitucional..... 112