



MODELACION HIDROLOGICA EN LA SUBCUENCA LEMPA ALTO

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

HONORABLES AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

ING. Y MSC. RUFINO ANTONIO QUEZADA SÁNCHEZ

RECTOR

ARQ. Y MASTER MIGUEL ANGEL PÉREZ RAMOS

VICE-RECTOR ACADEMICO

LICDO. Y MASTER OSCAR NOÉ NAVARRETE

VICE-RECTOR ADMINISTRATIVO

LICDO. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ

SECRETARIO GENERAL

DR. RENÉ MADECADEL PERLA JIMENEZ

FISCAL GENERAL

Universidad de El Salvador

SAN SALVADOR * EL SALVADOR * CENTRO AMERICA

Hacia la libertad por la cultura

FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE

HONORABLES AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

LICDO. JORGE MAURICIO RIVERA

DECANO

LICDO. Y MASTER ELADIO EFRAIN ZACARÍAS ORTEZ

VICE-DECANO

LICDO. VICTOR HUGO MERINO QUEZADA

SECRETARIO DE FACULTAD

JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ING. RAÚL ERNESTO MARTINEZ BERMÚDEZ

ING. MAX ADALBERTO HERNANDEZ RIVERA

DOCENTE DIRECTOR

Universidad de El Salvador

SANTA ANA * EL SALVADOR * CENTRO AMERICA

Hacia la libertad por la cultura

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

**“MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA SUBCUENCA LEMPA ALTO,
EN COOPERACION CON LA COMISION TRINACIONAL DEL PLAN
TRIFINIO (EL SALVADOR, HONDURAS, GUATEMALA)”**

AUTORES:

ALVIN LISANDRO LOPEZ LOPEZ LLO4032

KAREN ARACELY DELGADO SORIANO DS04003

PARA OPTAR EL TITULO:

INGENIERO CIVIL

DOCENTE DIRECTOR:

ING. MAX ADALBERTO HERNANDEZ RIVERA

ASESOR EXTERNO:

ING. ABNER JOSUE JIMENEZ GALO

Universidad de El Salvador

SANTA ANA, AGOSTO DE 2009

Hacia la libertad por la cultura



TRABAJO DE GRADO APROBADO POR:

ING. MAX ADALBERTO HERNANDEZ RIVERA
DOCENTE DIRECTOR

ING. ABNER JOSUE JIMENEZ GALO
ASESOR EXTERNO

Universidad de El Salvador

Hacia la libertad por la cultura

*A nuestros Padres quienes con cariño y esfuerzo
Siempre nos brindaron su apoyo, a ellos dedicamos
Nuestro estudio de tesis, gracias.*

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios todo poderoso que me iluminó y me permitió estudiar y obtener este triunfo tan grande y a la virgen María Santísima por interceder y derramar bendiciones en mi persona y familiares.

A mis padres Ricardo Delgado y mi madre fallecida Ana del Carmen Soriano, que creyeron en mí siempre, me brindaron su confianza y siempre me han dado ánimos en las buenas y en las malas, por su esfuerzo y sacrificio, por todos sus consejos y apoyo brindado en el transcurso de mi vida, para poder formarme humana y profesionalmente. A ellos con todo amor.

A mis hermanos, Ricardo Alberto Delgado Soriano y Karla Joanna Delgado Soriano, por el apoyo incondicional que siempre me han brindado.

A mis Abuelas Lidia García y María Luisa Aguilar, quienes con sus consejos sabios hicieron que yo saliera adelante y no decayera en el transcurso de mi carrera.

A mi Compañero Alvin Lisandro López López, por permitirme compartir con él, una etapa más de mi vida y lograr nuestra meta.

A nuestro docente director, Ing Max Adalberto Hernández, por haber confiado en nosotros y por el apoyo brindado, el permanente interés en revisar los informes y la constante preocupación en los momentos en que se torno más difícil el desarrollo de la tesis.

Al Ingeniero Abner Jiménez, por su excelente disposición y continuo interés en el avance logrado en la tesis.

A la Comisión Trinacional del Plan Trifinio (El Salvador, Honduras, Guatemala) y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), por haber confiado en nosotros y darnos la oportunidad de compartir los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera.

A todos Uds. mi más sincero agradecimiento...

Karen Aracely Delgado Soriano

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dio todopoderoso que me dio el cuidado, la inteligencia necesaria para culminar mis estudios y a la virgen María Auxiliadora por interceder y derramar bendiciones en mi persona y familiares.

A mis padres Efraín Arturo López y mi madre Telma Lorena López, que siempre confiaron en mí, me brindaron su apoyo y de una forma perenne me han dado ánimos en las buenas y en las malas, por su gran esfuerzo y sacrificio, por todos sus consejos sabios que me brindaron a lo largo de toda mi vida, para poder formarme humana y profesionalmente. A ellos con todo amor.

A mi hermana, Thelma Geraldine López, por el apoyo incondicional que siempre me ha brindado.

A mi abuelo Benigno Emilio Mejía López el cual fue una fuente de inspiración para realizar mi estudio y a mi querida abuela María Olimpia López que me brindo su apoyo incondicional durante toda mi carrera.

A mi Compañera Karen Aracely Delgado Soriano, por ser una fuente de confianza y ayuda para el triunfo de mi carrera profesional.

A nuestro docente director, Ing Max Adalberto Hernández, por haber confiado en nosotros y por el apoyo brindado, el permanente interés en revisar los informes y la constante preocupación en los momentos en que se torno más difícil el desarrollo de la tesis.

Al Ingeniero Abner Jiménez, por ser un profesional muy amable y generoso en compartir los conocimientos que ha adquirido a lo largo de toda su carrera profesional, el cual siempre fue un asesor que nos ayudo de forma incondicional para el desarrollo de nuestro trabajo de tesis.

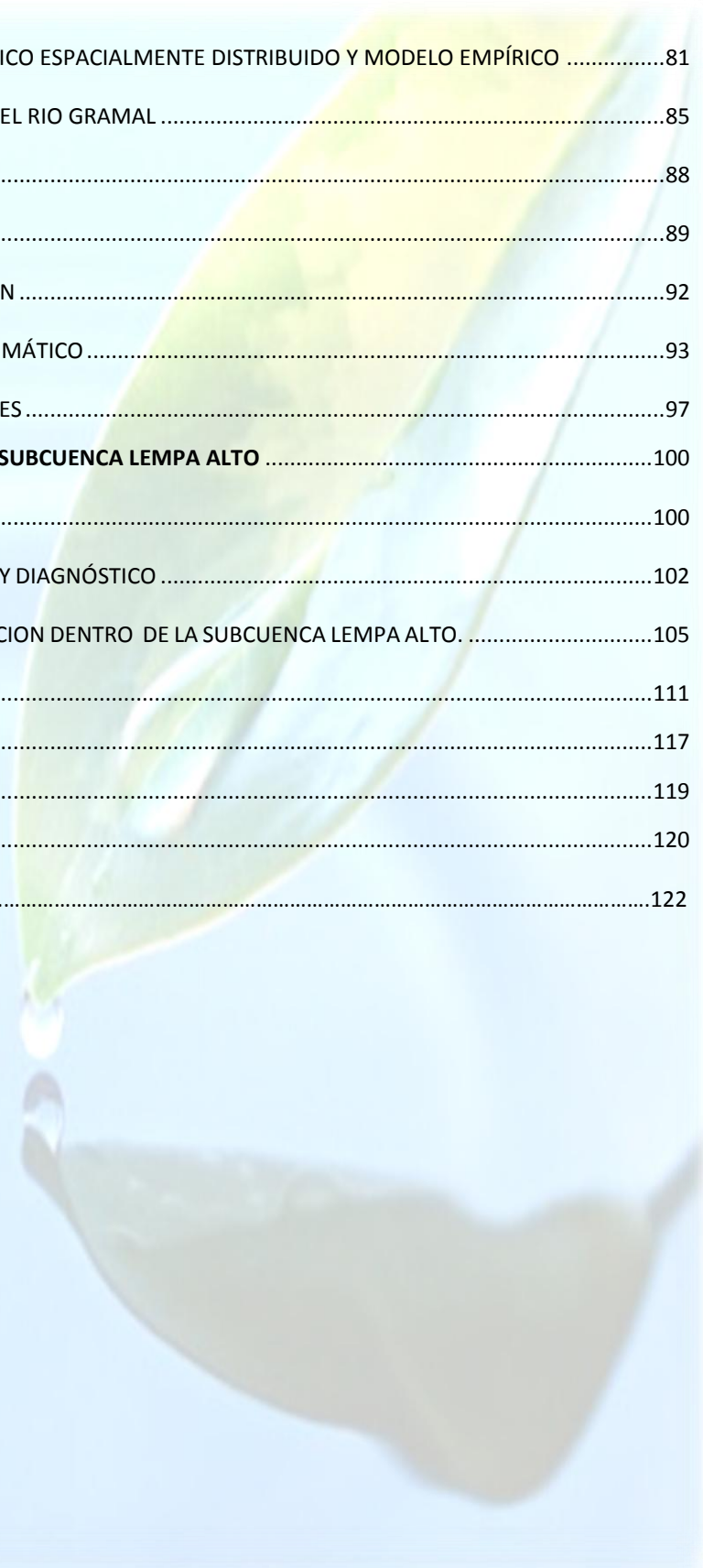
A la Comisión Trinacional del Plan Trifinio (El Salvador, Honduras, Guatemala) y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), por haber confiado en nosotros.

Alvin Lisandro López López

CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO	1
I. GENERALIDADES	1
1.1 INTRODUCCION	1
1.2 ANTECEDENTES	2
1.3 DESCRIPCION DE LA ZONA EN ESTUDIO	3
1.3.1REGIÓN TRIFINIO	3
1.3.2CUENCA DEL RIO LEMPA	6
1.3.3SUBCUENCA LEMPA ALTO	8
1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
1.5 OBJETIVOS	11
1.6 ALCANCES	11
1.7 LIMITACIONES.....	12
1.8 JUSTIFICACION	12
II. FUNDAMENTOS TEORICOS	13
2.1 CICLO HIDROLÓGICO	13
2.2 ¿QUÉ ES LA CUENCA HIDROGRÁFICA?	16
2.3 BALANCE HIDRICO	17
2.4 METODO RAS (RECARGA ACUÍFERA SUBTERRÁNEA)	19
2.5 MODELOS HIDROLOGICOS.....	21
2.5.1QUE ES MODELO HIDROLÓGICO?	21
2.5.2TIPOS DE MODELOS HIDROLÓGICOS	21
2.5.3ANALISIS DE VARIABLES PARA LA GENERACION DE MODELOS HIDROLOGICOS	23
2.6 GENERACION DE MODELO HIDROLOGICO UTILIZANDO ARCGIS	26
2.7 MÉTODOS DE AFORO	31
III. CARACTERIZACION	34

3.1	IMPORTANCIA DE LA CUENCA ALTA DEL RIO LEMPA.....	34
3.2	CONTEXTO GEOGRÁFICO DE LA SUBCUENCA LEMPA ALTO	35
3.3	UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	35
3.4	CONDICIONES CLIMÁTICAS.....	36
3.5	CANTIDAD DE AGUA	37
3.6	COBERTURA Y USO DE SUELO	38
3.7	MORFOLOGÍA DE LA CUENCA	41
3.7.1	PARÁMETROS DE FORMA	41
3.7.2	PARÁMETROS DE RELIEVE.....	42
3.7.3	PARÁMETROS RELATIVOS A LA RED HIDROGRÁFICA	44
IV.	GENERACIÓN DEL MODELO	45
4.1	GENERACIÓN DE MODELO DE ELEVACIÓN DE DIGITAL (DEM)	46
4.2	GENERACIÓN DE MAPA DE DIRECCIÓN DE FLUJO	48
4.3	GENERACIÓN DE MAPA DE FLUJO ACUMULADO	50
4.4	GENERACIÓN DE MAPA REDES HIDROGRÁFICAS	52
4.5	DETERMINACIÓN DE MICRO-CUENCAS	54
4.6	DETERMINACIÓN DEL ESCURRIMIENTO Y CAUDALES EN LA CUENCA LEMPA ALTO	56
4.6.1	GENERACIÓN DE MAPAS DE PRECIPITACIÓN.....	56
4.6.2	GENERACIÓN DE MAPAS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN	59
4.6.3	GENERACIÓN DE MAPAS DE BALANCE HÍDRICO CLIMÁTICO (BHC).....	63
4.6.4	GENERACIÓN RECARGA ACUÍFERA SUBTERRÁNEA (RAS)	64
4.6.5	GENERACIÓN DE MAPAS ESCORRENTÍA	68
4.6.6	GENERACIÓN DE MAPAS DE CAUDALES MENSUALES	69
4.7	GENERACIÓN DE ECUACIÓN QUE RIGE EL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO DE LA SUBCUENCA LEMPA ALTO.....	74
4.8	VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO EN LA SUB-CUENCA LEMPA ALTO	81



4.8.1 VALIDACIÓN DEL MODELO GENÉRICO ESPACIALMENTE DISTRIBUIDO Y MODELO EMPÍRICO	81
4.8.2 TOMA DE CAUDAL EN CAMPO EN EL RIO GRAMAL	85
4.9 ANÁLISIS DE RESULTADOS	88
4.9.1ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN	89
4.9.2ANÁLISIS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN	92
4.9.3ANÁLISIS DE BALANCE HÍDRICO CLIMÁTICO	93
4.9.4ANÁLISIS DE RÉGIMEN DE CAUDALES	97
V. PRIORIZACION DE MICROCUENCAS DE LA SUBCUENCA LEMPA ALTO	100
5.1 ORDENAMIENTO TERRITORIAL	100
5.2 ANÁLISIS TERRITORIAL: INFORMACIÓN Y DIAGNÓSTICO	102
5.3 PRIORIZACION DE AREAS DE INTERVENCION DENTRO DE LA SUBCUENCA LEMPA ALTO.	105
5.3.1 ANÁLISIS DE PRIORIZACIÓN	111
CONCLUSIONES	117
RECOMENDACIONES	119
BIBLIOGRAFIAS	120
ANEXOS.....	122

INDICE DE TABLAS

TABLA 3.1: MUNICIPIOS DE LA SUBCUENCA LEMPA ALTO.....	36
TABLA 3.2: COBERTURA Y USO DE SUELO.....	38
TABLA 4.1: TABLA DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS CON SU RESPECTIVA GEO-REFERENCIAS.....	57
TABLA 4.2: DATOS DE TEMPERATURAS EN ESTACIONES METEOROLOGICAS.....	60
TABLA 4.3: ECUACIONES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL MENSUAL.....	61
TABLA 4.4: COEFICIENTES DE CULTIVO DE LA SUBCUENCA LEMPA ALTO.....	63
TABLA 4.5: COEFICIENTE POR PENDIENTE KP.....	64
TABLA 4.6: COBERTURA VEGETAL.....	66
TABLA 4.7: TEXTURA DE SUELO KPt.....	68
TABLA 4.8: REGISTRO DE CAUDALES DE LA ESTACIÓN TELEMÉTRICA CÍTALA.....	73
TABLA 4.9: VALIDACION DE CAUDALES DE LA ESTACIÓN TELEMÉTRICA CÍTALA.....	83
TABLA 4.10: BALANCE HIDRICO CLIMATICO MAXIMO MENSUAL.....	94
TABLA 4.11: DEFICIT Y ESCESO DE DISPONIBILIDAD HIDRICA EN LA SUBCUENCA LEMPA ALTO.....	95
TABLA 5.1: PESO RELATIVO A CADA CRITERIO.....	108

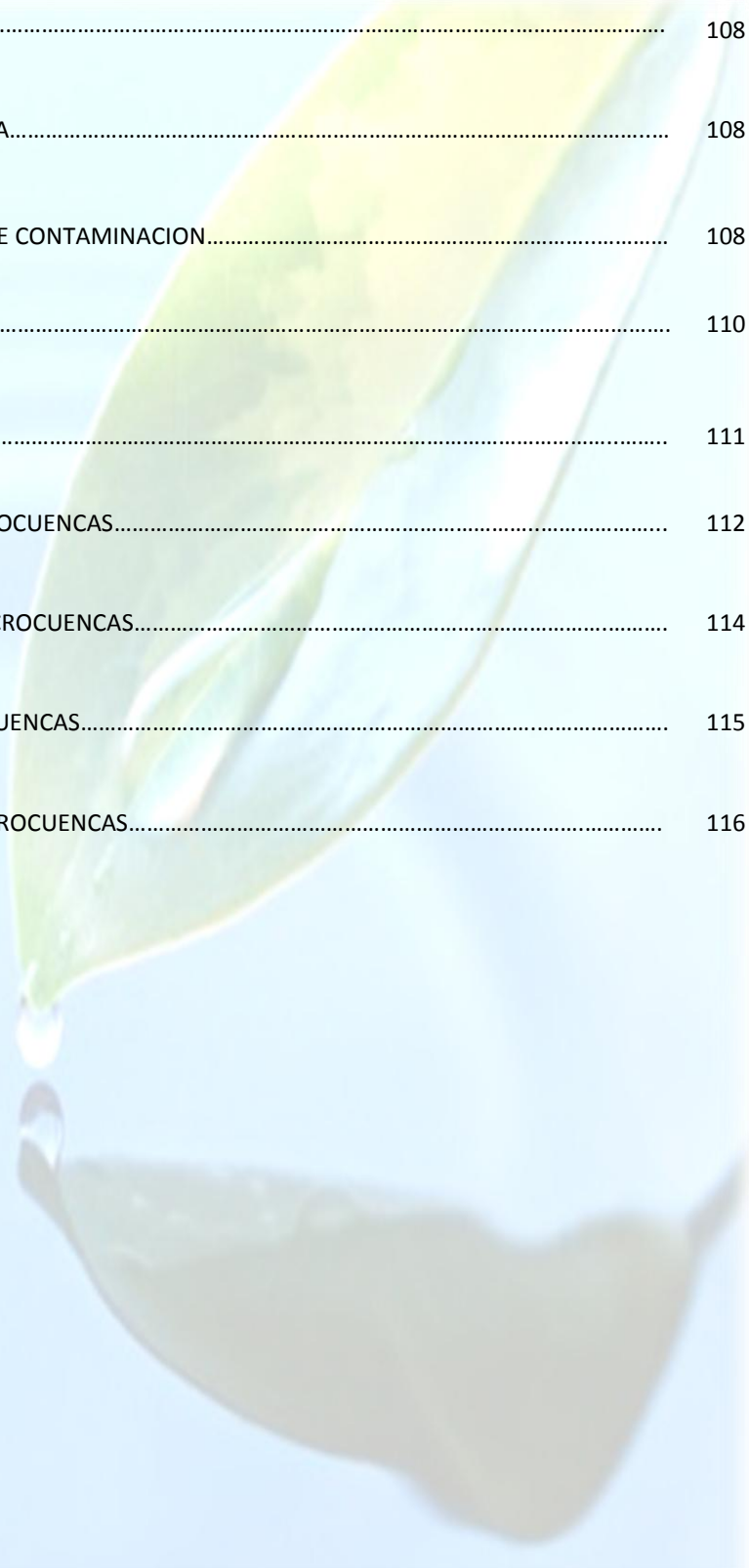



TABLA 5.2: PESO SEGÚN CAUDAL.....	108
TABLA 5.3: PESO SEGÚN AREA BOSOCOSA.....	108
TABLA 5.4: PESO DE ACUERDO A FOCO DE CONTAMINACION.....	108
TABLA 5.5: MATRIZ DE PRIORIZACION.....	110
TABLA 5.6: VALORES DE PRIORIZACION.....	111
TABLA 5.7: PRIORIZACION BAJA DE MICROCUENCAS.....	112
TABLA 5.8: PRIORIZACION MEDIA DE MICROCUENCAS.....	114
TABLA 5.9: PRIORIDAD ALTA DE MICROCUENCAS.....	115
TABLA 5.10: PRIORIZACION ALTA DE MICROCUENCAS.....	116

INDICE DE MAPAS

MAPA 1: REGION TRIFINIO.....	5
MAPA 2: CUENCA ALTA DEL RIO LEMPA.....	7
MAPA 3: SUBCUENCA LEMPA ALTO.....	9
MAPA 4: COBERTURA Y USO DE SUELO.....	40
MAPA 5: DEM (MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL DE LA SUB-CUENCA LEMPA ALTO).....	47
MAPA 6: MAPA DE DIRECCIÓN DE FLUJO DE LA SUB-CUENCA LEMPA ALTO.....	49
MAPA 7: MAPA DE ACUMULACION DE FLUJO.....	51
MAPA 8: MAPA RED DE DRENAJE FORMATO RASTER.....	53
MAPA 9: MICROCUENCAS.....	55
MAPA 10: ESTACIONES METEOROLOGICAS.....	58
MAPA 11: COEFICIENTE DE PENDIENTEMAPA.....	65
MAPA 12: COBERTURA VEGETAL.....	67
MAPA 13: ESCORRENTIA ANUAL ACUMULADA.....	71

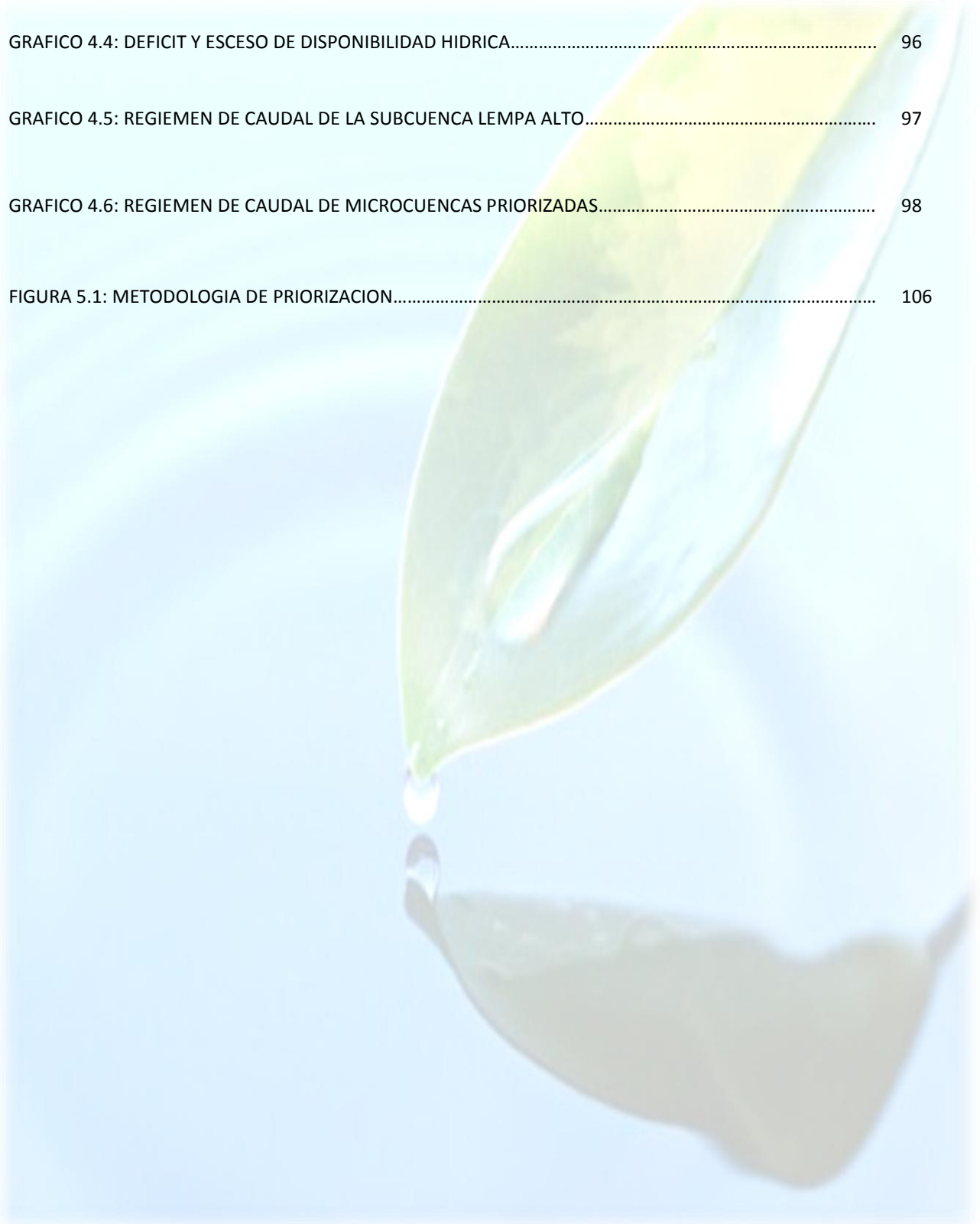


MAPA 14: MICROCUENCAS NIVEL 1.....	76
MAPA 15: SUBCUENCA CITALA.....	84
MAPA 16: PRECIPITACION ANUAL.....	91
MAPA 17: MICROCUENCAS PRIORIZADAS.....	99
MAPA 18: PRIORIDAD BAJA.....	115
MAPA 19: PRIORIDAD MEDIA.....	114
MAPA 20: PRIORIDAD ALTA.....	115
MAPA 21: PRIORIDAD MUY ALTA.....	116

INDICE DE GRAFICOS, FIGURAS E IMAGENES

FIGURA 2. 1. CICLO HIDROLOGICO DEL AGUA.....	14
FIGURA 2.2: ESQUEMA DE MODELO DE BALANCE HIDRICO REALIZADO POR EL SNET.....	19
GRAFICA 3.1: CURVA HIPSOMÉTRICA DE LA CUENCA ALTA DEL RIO LEMPA.....	43
FIGURA 4.1: METODOLOGIA PARA LA GENERACION DE MODELO GENERICO.....	45
FIGURA 4.2: CODIGO DE DIRECCION DE FLUJO.....	48
FIGURA 4.3: CODIGO DE ACUMULACION DE FLUJO.....	50
GRAFICO 4.1: VALIDACION DE CAUDALES DE LA ESTACIÓN TELEMÉTRICA CÍTALA.....	82
IMAGEN 4.1: SELECCIÓN DEL LUGAR Y CONFORMACIÓN DE CAUCE.....	85
IMAGEN 4.2: TOMA DE VELOCIDAD.....	86
IMAGEN 4.3: MEDICION DE ALTURAS DE LA SECCION TRANSVERSAL.....	87
GRAFICO 4.2: BALANCE HIDRICO CLIMATICO MAXIMO.....	94
GRAFICO 4.3: COMPORTAMIENTO DE ETO MEDIA, ETR MEDIA Y PRECIPITACION MEDIA.....	96

GRAFICO 4.4: DEFICIT Y ESCESO DE DISPONIBILIDAD HIDRICA.....	96
GRAFICO 4.5: REGIEMEN DE CAUDAL DE LA SUBCUENCA LEMPA ALTO.....	97
GRAFICO 4.6: REGIEMEN DE CAUDAL DE MICROCUENCAS PRIORIZADAS.....	98
FIGURA 5.1: METODOLOGIA DE PRIORIZACION.....	106



INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: MAPAS DE PRECIPITACION MENSUAL (mm).....	123
ANEXO 2: MAPAS DE EVAPOTRASPIRACION POTENCIAL MENSUAL (mm).....	130
ANEXO 3: MAPAS DE EVAPOTRASPIRACION REAL MENSUAL (mm).....	137
ANEXO 4: MAPAS DE BALANCE HIDRICO CLIMATICO MENSUAL (mm).....	144
ANEXO 5: MAPAS DE ESCORRENTIA MENSUAL (mm).....	151
ANEXO 6: MAPAS DE CAUDALES MENSUALES (m ³ /seg).....	158
ANEXO 7: BASE DE DATOS PARA CÁLCULO DE ECUACIONES DE CAUDAL MENSUAL Y ANUAL.....	165
ANEXO 8: CAUDAL MEDIO ANUAL.....	179
ANEXO 9: COBERTURA BOScosa.....	181
ANEXO 10: FOCOS CONTAMINANTES.....	183

RESUMEN EJECUTIVO

La Región del Trifinio es considerada estratégica por la riqueza de los recursos naturales que en ella existen y que son compartidos por los tres países. Esta riqueza está construida principalmente por la producción de agua y la diversidad biológica de los ecosistemas. Es decir que esta Región es muy rica en recursos hídricos. Se distingue por ser parte relevante de uno de los sistemas hídricos más importantes de América Central, ya que en el sistema destacan áreas de tres cuencas: La cuenca Trinacional del Río Lempa (45.6%), la cuenca binacional del río Motagua (38.9%) (entre Honduras y Guatemala) y la cuenca nacional del Río Ulúa en Honduras (15.5%) (SIT-CARL, 2008).

El área de la cuenca del Río Lempa dentro la región del Trifinio es la mayor entre las tres cuencas hidrográficas, por lo que el manejo coordinado de sus recursos naturales es prioritario para los tres países. Los tres gobiernos, a través de la Comisión Trinacional del Plan Trifinio, están invirtiendo en forma conjunta en el manejo sostenible de la cuenca alta del Río Lempa.

Es importante saber que las cuencas hidrográficas se dividen en tres áreas, la parte alta de la cuenca, la parte media y la parte baja.

En esta tesis se desarrolla un Modelo hidrológico, en la subcuenca Lempa Alto, el cual define una estimación de caudales, en los diferentes afluentes de la subcuenca. Este modelo es desarrollado siguiendo una metodología utilizando el software ArcGis. El objetivo es tener una herramienta que nos proporcione la disponibilidad de recurso agua, y con ello contribuir a la toma de decisiones de las diferentes entidades de los países asociados.

Inicialmente se realiza una revisión de antecedentes de la zona en estudio, tratando aspectos importantes relacionados. Se presentan los fundamentos teóricos, en los que se fundamenta y se apoya nuestra tesis, para lo cual se realizó un estudio de ellos antes de abordar lo que es la metodología del modelo hidrológico.

Luego se abordó de manera detallada la metodología de la generación del modelo hidrológico, en donde se trataron datos históricos de caudales de la sub-cuenca Lempa Alto, para el análisis. También se realizaron estudios de las precipitaciones y caudales registradas por la estación del Citalá, haciendo con estos datos una calibración del modelo, para obtener datos más reales, así mismo se estudió las evapotranspiraciones de la zona y se obtuvo la escurrentía de la zona. La obtención del modelo empírico, representado a través de fórmulas, con las cuales podemos obtener los caudales mensuales y anuales estimados, se obtuvo mediante un ajuste de datos de multiregresión lineal, los datos aquí analizados para la obtención de la fórmula, son los datos de caudales obtenidos en el modelo genérico. Cada mes posee características diferentes, por lo que se obtuvo una fórmula por mes de acuerdo al comportamiento de cada uno.

Se desarrolla un análisis de resultados, haciendo una comparación con los datos de caudales reales registrados por la estación del Citalá, los datos obtenidos con las fórmulas y los datos obtenidos por el modelo espacialmente distribuido, detallando sus diferencias mínimas, asegurando así la proximidad y el error típico del modelo empírico y espacialmente distribuido.

Con el modelo hidrológico espacialmente distribuido, tenemos una herramienta muy útil para ser utilizada, por si en un futuro se pretende realizar un Ordenamiento Hidrológico dentro de la zona en estudio. En nuestro último capítulo tratamos los aspectos generales de ordenamiento territorial, el cual lleva implícito una priorización de áreas dentro de una cuenca, entre otros estudios.

Se elaboró una priorización de microcuencas dentro de la subcuenca Lempa Alto, en función de su aporte de caudal principalmente, tomando otras variables importantes y conocidas en nuestro estudio como lo es el área boscosa y los focos contaminantes. La priorización de las microcuencas se define según rangos en; muy alta, alta, media, baja y muy baja, esto con el fin de mantener las de mayor prioridad.



MODELACION HIDROLOGICA LEMPA ALTO

CAPÍTULO I GENERALIDADES

I. Generalidades

1.1 Introducción

En consideración a los problemas actuales y a los desafíos socio-territoriales que ha de enfrentar EL TRIFINIO en los próximos años, a las oportunidades territoriales existentes y a las demandas de la población, se plantea como objetivo general lograr la plena incorporación del territorio y sus recursos naturales y humanos al proceso de modernización y desarrollo sostenible del La Zonda del Trifinio, según criterios de sostenibilidad, seguridad ambiental y competitividad, y en orden a alcanzar el bien común y a la mejora de la calidad de vida de la población.

El territorio se ha ido convirtiendo en un recurso crecientemente escaso, frágil y valioso, que presenta múltiples evidencias de progresiva degradación ambiental y funcional; la cual se manifiesta en una estructura socio-territorial desequilibrada, desarticulada en ámbitos importantes de la geografía nacional, sometida a fuertes tensiones de transformación por intensos procesos migratorios y por importantes cambios en los usos del suelo.

La modelación hidrológica desarrollada en el presente trabajo, arroja resultados de caudal en los diferentes puntos de los ríos tributarios de la subcuenca Lempa Alto. También se establecieron diferentes formulas para la obtención de caudales por mes analizando las variables que mas intervienen en cada uno de ellos, con los resultados obtenidos en el modelo empírico y espacialmente distribuido se hizo una priorización de microcuencas, herramienta útil para llevar a cabo un ordenamiento territorial dentro de la zona.

1.2 Antecedentes

Cantidad de agua en la Cuenca Alta del Río Lempa.

En el área de la CARL existe una importante producción de agua, de acuerdo a estimaciones parciales de la producción se estima que para el drenaje Olopa-Lempa se reciben $23.8 \text{ m}^3/\text{s}$ al nivel de la estación de Citalá (CATIE, 2001), lo que representa un volumen de 653 millones de $\text{m}^3/\text{año}$ al año. Adicionalmente se cuenta el aporte de las sub-cuencas que drenan al lago de Guija que alimentan a la represa Guajoyo y aportan al cauce del Lempa un volumen de 83 millones de $\text{m}^3/\text{año}$ (CATIE, 2001).

Un recurso muy importante en términos hídricos es el Área Natural Protegida Montecristo, estimaciones parciales para El Salvador, indican que de la precipitación anual (53.1 millones de $\text{m}^3/\text{año}$), cerca del 38% es devuelto a la atmósfera por la demanda biofísica de agua, otro 37.5% es escurrido superficial y sub-superficialmente (19.9 millones de $\text{m}^3/\text{año}$) y el restante 24.5% (12.9 millones de $\text{m}^3/\text{año}$), es el volumen de agua que se infiltra o recarga el acuífero (CATIE, 2001).

En el área complementaria del Macizo (Grupo de Montañas) de Montecristo, para El Salvador, se captan cerca de 953.7 millones de $\text{m}^3/\text{año}$, de lo cual el 44% es devuelto a la atmósfera por la demanda biofísica de agua, otro 44% es escurrido superficial y sub-superficialmente (420.6 millones de $\text{m}^3/\text{año}$) y el restante 12% (111.8 millones de $\text{m}^3/\text{año}$), es el volumen de agua que se infiltra o recarga al acuífero (MAG/PAES/CATIE, 2003). Entre los meses de mayo a octubre se genera un superávit de agua en la cuenca que se utiliza entre los meses de mayo y junio para recargar la humedad del suelo. Después de recargar el suelo, el superávit hídrico (la diferencia entre la precipitación y evapotranspiración), presente entre junio y octubre, se convierte en esorrentía superficial, presentando una distribución bi-modal, con máximos de precipitación y esorrentía en junio y septiembre. Durante la época seca, la humedad del suelo se aprovecha para evapotranspiración. Existe un déficit hídrico en la época seca, entre noviembre y mayo (CATIE, 2001).

1.3 Descripción De La Zona En Estudio

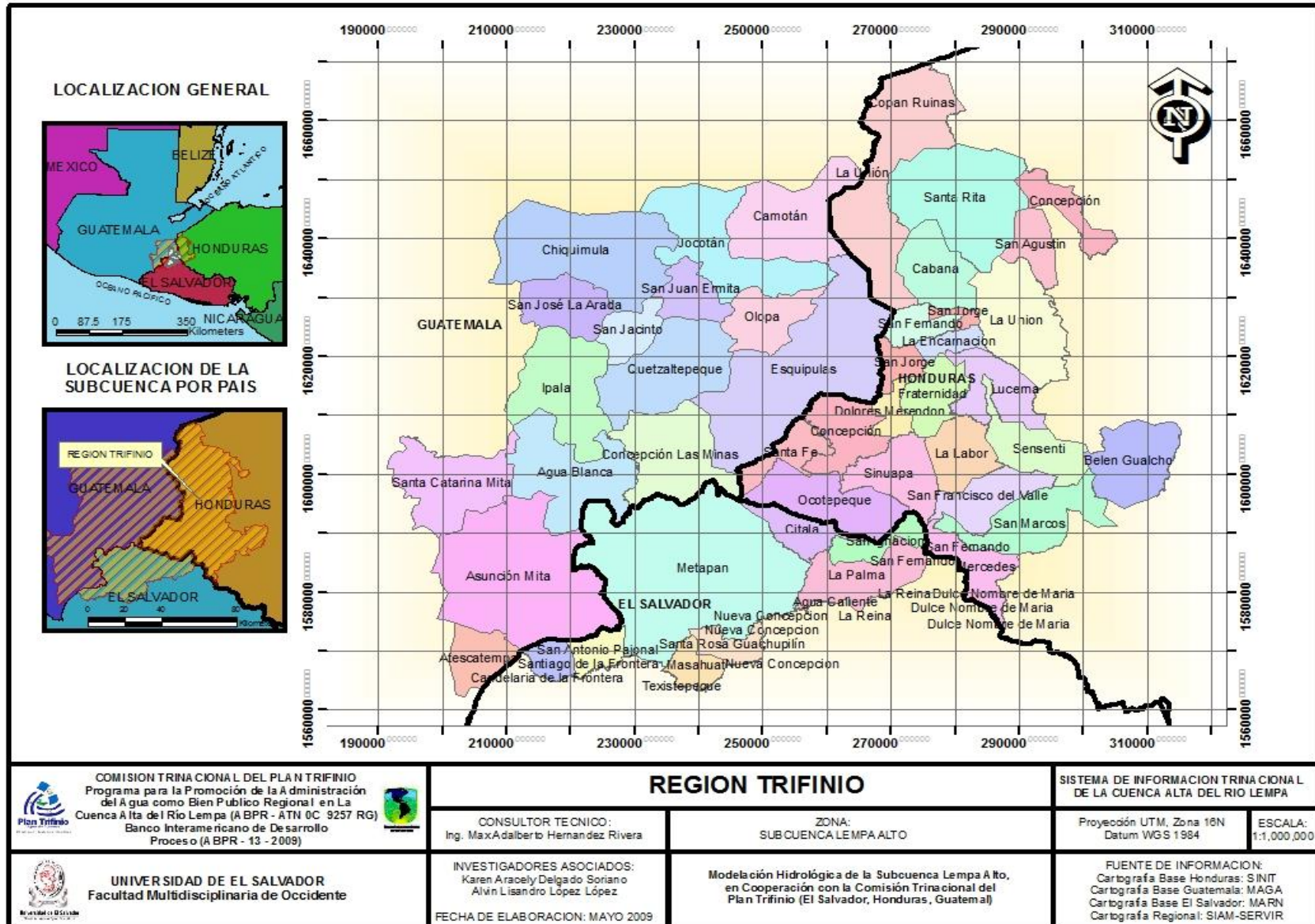
1.3.1 Región Trifinio

El **Plan Trifinio** nació como resultado de una preocupación de conservación forestal: la defensa del bosque nuboso que corona el Macizo de Montecristo. Sin embargo, el análisis de la región y las experiencias internacionales en materia ambiental condujeron a la convicción de que el bosque no podía ser protegido eficazmente si se le consideraba un hecho aislado.

El objetivo general de este Plan Trifinio fue “contribuir a la integración Centroamericana, mediante una acción conjunta de Guatemala, El Salvador y Honduras, que tienda al desarrollo integral, armónico y equilibrado de la región fronteriza de los tres países”. Para ellos se propuso mejorar el nivel de ingreso y de vida de las poblaciones de la zona; aumentar la complementariedad de las estructuras económicas de los tres espacios nacionales; mejorar la infraestructura física; y también los mecanismos de coordinación interinstitucional.

La **Región del Trifinio** (Ver mapa 1) es reconocida como área de especial interés que comparten tres países: Guatemala, El Salvador y Honduras. Esta Región del Trifinio tiene una extensión aproximada de 7,384 kilómetros cuadrados, de los cuales corresponden el 46.5% a Guatemala, el 15.6% a El Salvador y el 37.9% a Honduras (SIT-CARL, 2008). Esta Región del Trifinio es considerada estratégica por la riqueza de los recursos naturales que en ella existen y que son compartidos por los tres países. Esta riqueza está construida principalmente por la producción de agua y la diversidad biológica de los ecosistemas. Es decir que esta Región es muy rica en recursos hídricos. Se distingue por ser parte relevante de uno de los sistemas hídricos más importantes de América Central, ya que en el sistema destacan áreas de tres cuencas: La cuenca Trinacional del Río Lempa (45.6%), la cuenca binacional del río Motagua (38.9%) (entre Honduras y Guatemala) y la cuenca nacional del Río Ulúa en Honduras (15.5%) (SIT-CARL, 2008). Está ubicada entre los 88°45' y 89°50' de longitud oeste y entre los 14°05' y 15°12' de latitud norte. Se destacan tres formas principales de

relieve: montaña, pie de montaña y zonas planas. Las precipitaciones medias anuales van de 500 a 1800 mm, las temperaturas medias entre 15°C y 30°C y la humedad relativa media entre 70% y 88% (SIT-CARL, 2008). En la región del Trifinio se reconocen cinco zonas de vida que incluyen el bosque muy húmedo montano, los bosques subtropicales templados, seco tropical y sub-tropical.



MAPA 1: REGION TRIFINIO

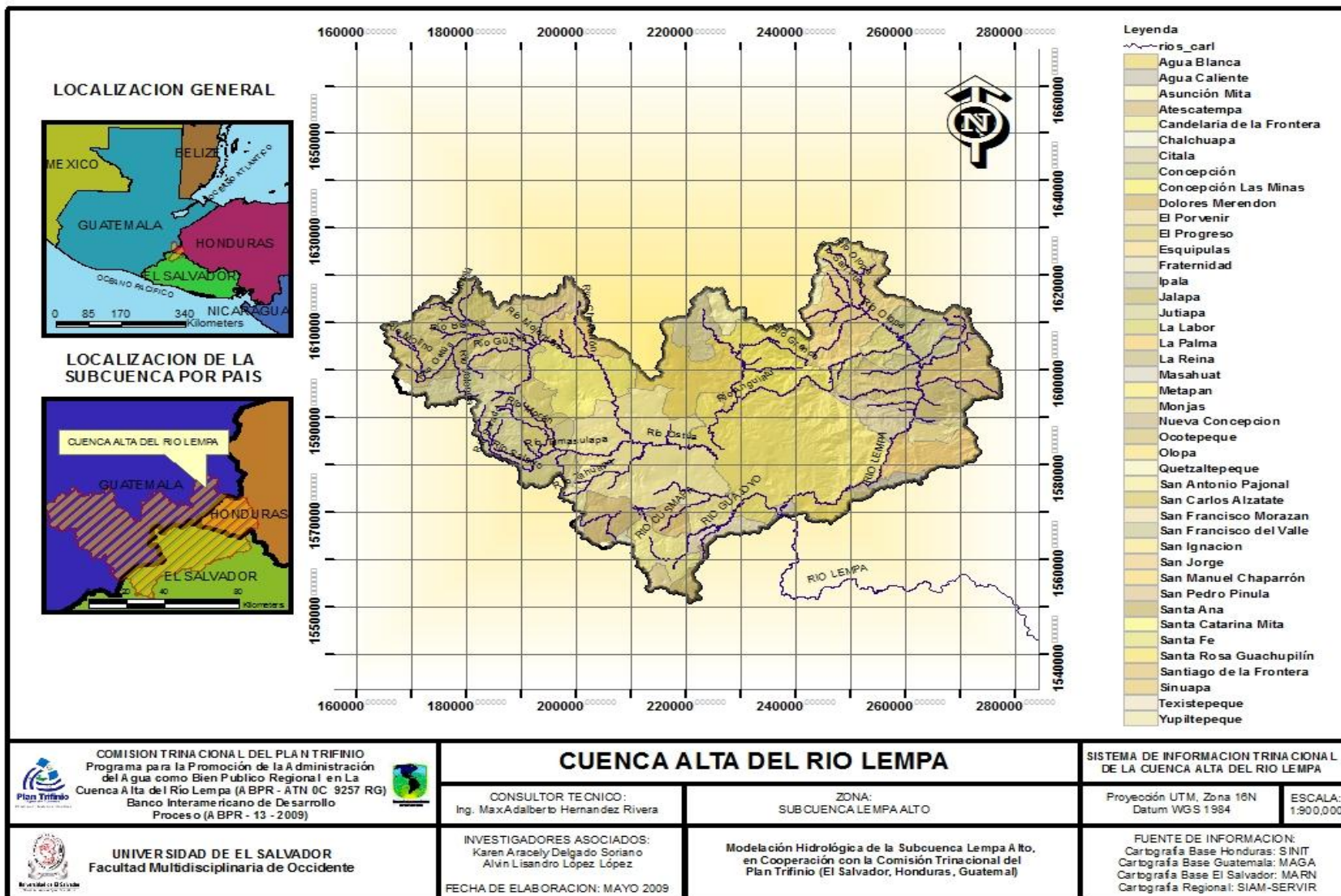
1.3.2 Cuenca Del Rio Lempa

La Cuenca del río Lempa (Ver mapa 2), tiene una extensión territorial de 17,919 kilómetros cuadrados de los cuales 55.1% corresponden a El Salvador, 30.6% a Honduras y 14.3% a Guatemala (SIT-CARL, 2008).

Los cauces principales de río Lempa tienen una longitud en el área conocida como “*Río Lempa Alto*” de 107.7 kilómetros, y en el área de “*Angue-Ostua-Guija*” de 211 kilómetros, ambos hasta el punto de confluencia con el río Desagüe. Y luego desde el río Desagüe hasta la desembocadura del océano pacifico de 275.3 km (SIT-CARL, 2008).

En la Cuenca se encuentran varios cuerpos de agua, entre los más importantes el Lago Guija, la Laguna de Metapán, tres embalses de represas hidroeléctricas. También se conocen tres grandes zonas de la cuenca, la cuenca alta, la cuenca media, y la cuenca baja o bajo Lempa.

El Río Lempa se origina entre las montañas volcánicas de las mesetas centrales en el municipio de Olopa del departamento de Chiquimula, en Guatemala, a una elevación aproximada de 1,500 msnm. Cruza por el departamento de Ocotepeque en Honduras y luego ingresa a El Salvador por el municipio de Citalá del departamento de Chalatenango, y desemboca en la planicie costera del océano Pacífico, entre los departamentos de San Vicente y Usulután, en El Salvador. La elevación máxima de la cuenca es 2,805 msnm que se alcanza en las montañas de Honduras.



MAPA 2: CUENCA ALTA DEL RIO LEMPA

1.3.3 Subcuenca Lempa Alto

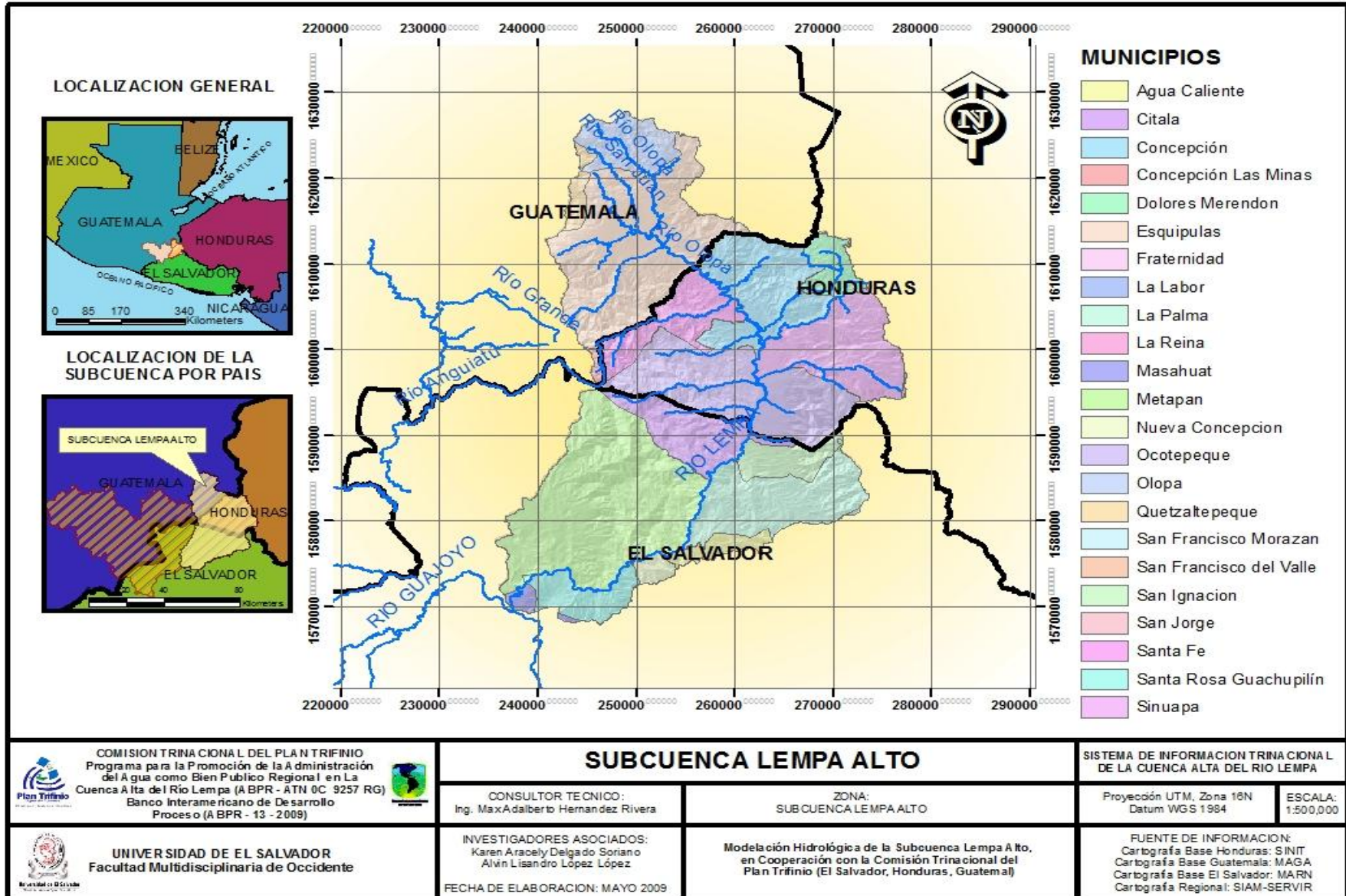
El área de la cuenca Alta del Río Lempa (CARL) tiene dos grandes áreas de drenaje:

- La primera que nace en regiones de Olopa-Esquipulas, en el territorio de Guatemala y en Santa Fe, Concepción, Sinuapa y Dolores Merendón y Ocotepeque en territorio de Honduras, y recorre entre los municipios de Citalá, San Ignacio, La Palma, Santa Rosa, Masahuat y Metapán conocida comúnmente como "**Río Lempa Alto**" o Subcuenca Lempa Alto (Ver mapa 3).
- La segunda nace en regiones del departamento de Jalapa, en los municipios de Ipala, Concepción Las Minas y cruza varios municipios de Jutiapa en territorio de Guatemala hasta desembocar en el Lago de Guija, y conocida comúnmente como "**Angue-Ostua-Guija**".

Ambas áreas de drenaje siguen su rumbo hasta su confluencia en río Desagüe en territorio de El Salvador, punto en el cual se divide la Cuenca Alta con la Cuenca Media del Río Lempa. El Territorio de la Cuenca Alta del Río Lempa tiene una extensión de 4,343 kilómetros cuadrados. De los cuales 29.5% corresponden a El Salvador, 11.6% a Honduras y 58.9% a Guatemala (SIT-CARL, 2008), esto hace ver la importancia que la región de Guatemala tiene en la cuenca alta del río Lempa.

En esta región se encuentran áreas de 23 municipios de los departamentos de Jalapa, Jutiapa y Chiquimula de la República de Guatemala; Ocotepeque de Honduras; Santa Ana y Chalatenango, de El Salvador.

Es importante indicar que entre los municipios de Guatemala ubicados en los departamentos de Jalapa y Jutiapa existen unos que no pertenecen a la región Trifinio pero si son parte de la Cuenca Alta.



MAPA 3: SUBCUENCA LEMPA ALTO

1.4 Planteamiento Del Problema

La región del trifinio cuenta con abundantes recursos hídricos. La conjunción de los recursos subterráneos y los recursos superficiales logra crear una distribución geográfica de recursos hídricos potenciales muy equilibrada. Donde faltan recursos superficiales hay subterráneos, y viceversa. Un recurso hídrico importante que abarca el Plan Trifinio es la Cuenca Alta del río Lempa (CARL) siendo además de gran importancia para el desarrollo económico y social de los pobladores de los países El Salvador, Guatemala y Honduras.

Actualmente, no se cumplen las pautas sostenibles para el desarrollo y uso del recurso agua. La creciente demanda del recurso, así como la reducción de los caudales en ríos con sus graves consecuencias para usuarios y ecosistemas, la sobre explotación de acuíferos a tasas superiores a la reposición natural, los problemas de contaminación y degradación de la calidad de las aguas, las dificultades de acceso al recurso para satisfacer necesidades básicas de un alto porcentaje de la población, son desafíos que demandan con urgencia estrategias que permitan resolver las numerosas tareas pendientes en cuanto a la utilización de los recursos hídricos.

La cuenca alta del Río Lempa contiene importantes territorios, recursos y ciudades, tales como la ciudad de Santa Ana y el área metropolitana de San Salvador, el valle de San Andrés, el valle del Alto Lempa, y los cerros El Pital y Mira mundo.

El problema surge de la necesidad de conocer cuáles son los aportes de los diferentes ríos que llegan al río principal de la Cuenca Alta de Río Lempa, así como también de la necesidad de determinar los usos de suelo y los tipos de coberturas existentes en la zona. Es por ello que con la modelación Hidrológica se estará generando los mapas de dirección de flujo pudiéndose obtener caudales estimados en el punto más bajo de la cuenca.

1.5 Objetivos

Objetivo General:

- Contribuir en la toma de decisiones de las mancomunidades, de los países asociados en el Plan Trifinio (El Salvador, Honduras, Guatemala), sobre el manejo del recurso hídrico agua, en la Sub-cuenca Lempa Alto.

Objetivos Específicos:

- Llevar a cabo la Modelación Hidrológica de la Subcuenca Lempa Alto apoyándonos en el software arcGIS 9.3.
- Analizar las variables que intervienen para la estimación de caudales utilizando el Sistema de Información Geográfica.
- Realizar mediciones de caudal en campo, por el método del flotador, en puntos estratégicos de los afluentes que conforman la Cuenca Lempa Alto.
- Validar los resultados del Modelo Hidrológico y del Modelo Empírico, comparándolos con los caudales tomados en campo, y datos registrados en la Estación El Citalá.
- Priorizar las microcuencas pertenecientes a la Subcuenca Lempa Alto, tomando como variables, el aporte de caudal, el área boscosa y los focos contaminantes.

1.6 Alcances

- Análisis de datos recopilados para determinar la fórmula que nos proporcionara el comportamiento hidrológico de la Cuenca Lempa Alto.

- Generación del Modelo Hidrológico utilizando la herramienta SIG.
- Tener con la priorización de microcuencas una herramienta clave para la realización de un Ordenamiento Territorial dentro de la Subcuenca Lempa Alto.

1.7 Limitaciones

- La investigación se limita a generar caudales estimados de la Subcuenca Lempa Alto.

1.8 Justificación

La Región del Trifinio en Territorio de El Salvador es una Región Estratégica para el país, ya que produce 550 millones de m³ de agua al año, agua que es de buena calidad y que se utiliza en la Cuenca Media del Lempa, para los diferentes usos, tales como abastecimiento de agua potable, riego e hidroelectricidad, contribuyendo a reducir la dependencia que para estos usos se tiene de Guatemala y Honduras, y además asegurando a largo plazo el abastecimiento de agua de buena calidad para el Área Metropolitana de San Salvador.

Con la formulación del modelo hidrológico se conocerán los aportes en cantidad de agua de los diferentes afluentes de La subcuenca Lempa Alto, y con esto poder hacer una priorización de microcuencas, para la toma decisiones en las diferentes instituciones y/o entidades de los países relacionados (El Salvador, Honduras y Guatemala).



Universidad de El Salvador
Hacia la libertad por la cultura



Plan Trifinio
"Agua sin Fronteras"
El Salvador - Guatemala - Honduras

MODELACION HIDROLOGICA LEMPA ALTO

CAPITULO II

FUNDAMENTOS TEORICOS

II. Fundamentos Teóricos

2.1 Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico comprende una serie de procesos continuos e interdependientes, de movimiento y transferencia de agua en la tierra, el océano, cuerpos de agua y en la atmósfera (Ver figura 2.1). Por ser un ciclo, no tiene punto de partida, sin embargo para explicarlo, se puede comenzar por la evaporación que se produce en el océano, en lagos, embalses, y todo tipo de cuerpos de agua, y la evapotranspiración de las plantas, la cual es la combinación del agua que se pierde por evaporación en el suelo y transpiración en el material vegetal. Esta evaporación y evapotranspiración, son producidas por la energía suministrada por el sol e influenciadas por las condiciones climáticas e hídricas de temperatura, radiación, viento y humedad. De esta forma, el agua cambia de un estado líquido a un estado gaseoso.

El agua en forma de vapor pasa a la atmósfera, y en este ascenso, pierde calor y se produce el proceso de condensación alrededor de núcleos de condensación (los cuales pueden ser partículas de polvo que flotan en el aire), creando pequeñas gotas de agua.

Estas pequeñas gotas de agua, crean nubes, y en su circulación se van uniando entre ellas, creando gotas más grandes, las cuales por su peso, se precipitan finalmente en forma de lluvia (nieve o granizo).

Parte de la precipitación es interceptada por la vegetación, otra parte cae al suelo y dependiendo de las condiciones de cobertura del suelo, del tipo de suelo y de la pendiente del terreno, esta agua puede quedar encharcada, escurrir superficialmente o infiltrarse.

El agua que escurre superficialmente corre hacia los cuerpos de agua y finalmente al mar. Una parte del agua que se infiltra es retenida por el suelo, cuya capacidad de retención depende de su textura y estructura (porosidad); otra parte del agua infiltrada se convierte también en escorrentía superficial al ser saturada la capacidad de almacenamiento suelo; otra parte se convierte en flujo subsuperficial, y por ultimo otra parte percola, hacia capas inferiores produciendo la recarga de aguas subterráneas. El agua que se infiltra, viaja lentamente y llega a alimentar a ríos y manantiales, y finalmente al mar (Fuente: Wikipedia).

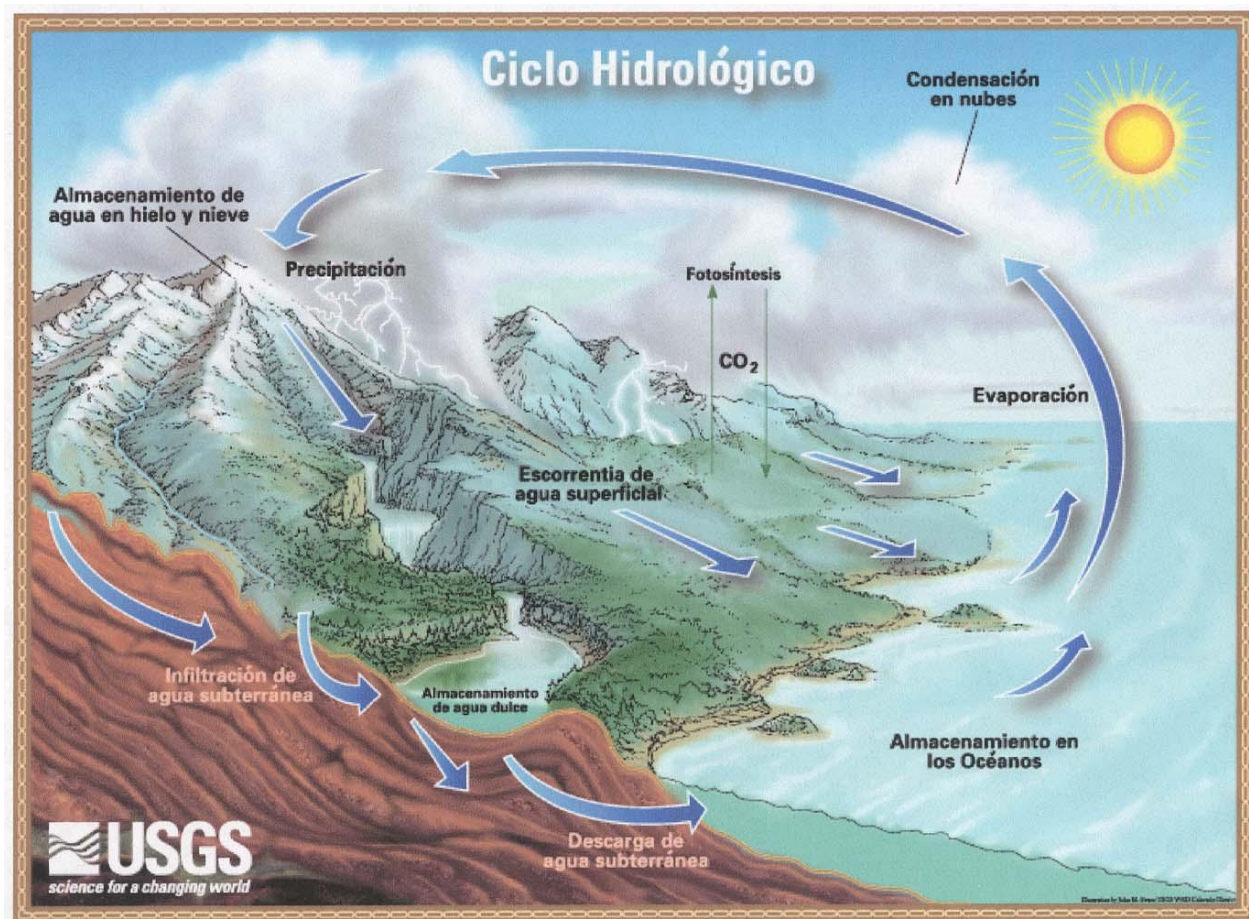


FIGURA 2.1: CICLO HIDROLOGICO DEL AGUA

Los principales procesos implicados en el ciclo del Agua son:

- **Evaporación.** El agua se evapora en la superficie oceánica, sobre el terreno y también por los organismos, en el fenómeno de la transpiración. Dado que no podemos distinguir claramente entre la cantidad de agua que se evapora y la cantidad que es transpirada por los organismos, se suele utilizar el término evapotranspiración. Los seres vivos, especialmente las plantas, contribuyen con un 10% al agua que se incorpora a la atmósfera. En el mismo capítulo podemos situar la sublimación, cuantitativamente muy poco importante, que ocurre en la superficie helada de los glaciares o la banquisa.
- **Precipitación.** La atmósfera pierde agua por condensación (lluvia y rocío) o sublimación inversa (nieve y escarcha) que pasan según el caso al terreno, a la superficie del mar o a la banquisa. En el caso de la lluvia, la nieve y el granizo (cuando las gotas de agua de la lluvia se congelan en el aire) la gravedad determina la caída; mientras que en el rocío y la escarcha el cambio de estado se produce directamente sobre las superficies que cubren.
- **Infiltración.** Ocurre cuando el agua que alcanza el suelo penetra a través de sus poros y pasa a ser subterránea. La proporción de agua que se infiltra y la que circula en superficie (escorrentía) depende de la permeabilidad del sustrato, de la pendiente (que la estorba) y de la cobertura vegetal. Parte del agua infiltrada vuelve a la atmósfera por evaporación o, más aún, por la transpiración de las plantas, que la extraen con raíces más o menos extensas y profundas. Otra parte se incorpora a los acuíferos, niveles que contienen agua estancada o circulante. Parte del agua subterránea alcanza la superficie allí donde los acuíferos, por las circunstancias topográficas, interceptan la superficie del terreno.
- **Escorrentía.** Este término se refiere a los diversos medios por los que el agua líquida se desliza cuesta abajo por la superficie del terreno. En los climas no excepcionalmente secos, incluidos la mayoría de los llamados desérticos, la escorrentía es el principal agente geológico de erosión y transporte.

- **Circulación subterránea.** Se produce a favor de la gravedad, como la escorrentía superficial, de la que se puede considerar una versión. (Fuente: Wikipedia).

2.2 ¿Qué Es La Cuenca Hidrográfica?

La Cuenca Hidrográfica es la unidad natural definida por la existencia de la divisoria de las aguas en un territorio dado. Las cuencas hidrográficas son unidades morfográficas superficiales. Sus límites quedan establecidos por la divisoria geográfica principal de las aguas de las precipitaciones; también conocida como “parteaguas”.

El parteaguas teóricamente es una línea imaginaria que une los puntos de máximo valor de altura relativa entre dos laderas adyacentes pero de exposición opuesta; desde la parte más alta de la cuenca hasta su punto de emisión, en la zona más baja.

Las cuencas hidrográficas son utilizadas como unidades para la planificación territorial y se subdividen en áreas menores llamadas subcuencas y microcuencas. La manera de hacer estas subdivisiones es por los distintos riachuelos que las conforman. Todas las cuencas hidrográficas tienen tres áreas o zonas donde el impacto del agua es distinto, aunque se mantiene una estrecha interacción e interconexión entre ellas:

- La primera, es la parte alta conocida como cabecera de la cuenca hidrográfica; en esta región se da la mayor captación del agua de lluvias y ayuda con la regulación y suministro de agua durante el resto del año a las otras partes de la cuenca. Todas las acciones que se hagan en esta parte de la cuenca, ya sean buenas o malas, tendrán sus repercusiones en el resto de la cuenca.
- La segunda, es la parte media de la cuenca hidrográfica, en esta zona se dan mayormente actividades productivas y es la región en donde se ejerce mayor presión hacia la parte alta de la cuenca. Esta región es como una zona de amortiguamiento entre las acciones de la parte alta de la cuenca y los efectos que se evidencian en la parte baja de la cuenca.

- Y la tercera, es la parte baja de la cuenca hidrográfica, que generalmente esta cercana a las costas, por ejemplo toda las áreas cercanas al Océano Pacifico son las partes bajas de muchas cuencas hidrográficas en Guatemala. En esta zona se evidencian los impactos positivos o negativos de las acciones que se hacen en la parte alta de la cuenca.

La cuenca hidrográfica funciona como un sistema indivisible e interdependiente, en donde hay una estrecha relación entre los habitantes y las actividades que se desarrollan en la parte alta con las partes media y baja de la cuenca. Por ejemplo: cuando se mantiene una cobertura forestal adecuada en la parte alta de la cuenca, ayuda a regular y controlar la cantidad y estacionalidad del agua que escurre por los ríos y manantiales, hacia las partes media y baja de la cuenca, con lo cual, las poblaciones de las partes bajas se ven beneficiados por la cantidad y calidad de agua para consumo, así como, por la protección que puede brindar la cobertura forestal hacia la ocurrencia de desastres principalmente inundaciones (Fuente: Informe el Trifinio y Su Ambiente).

2.3 Balance Hídrico

Un balance hídrico es la cuantificación tanto de los parámetros involucrados en el ciclo hidrológico, como de los consumos de agua de los diferentes sectores de usuarios, en un área determinada, cuenca, y la interrelación entre ellos, dando como resultado un Diagnóstico de las condiciones reales del recurso hídrico en cuanto a su oferta, disponibilidad y demanda en dicha área (Ver figura 2.2). Dado que el Balance Hídrico presenta un diagnóstico de las condiciones reales del recurso hídrico en un área en particular, permite tomar medidas y establecer lineamientos y estrategias para su protección y utilización de una manera integrada, de tal forma que se garantice su disponibilidad tanto en cantidad como en calidad.

El modelo de balance hídrico se basa en la ecuación de conservación de masa:

$$\mathbf{ENTRADAS - SALIDAS = CAMBIO DE ALMACENAMIENTO} \quad \mathbf{(Ec. 1)}$$

En el modelo del Balance Hídrico del SNET, considera las siguientes entradas:

- Precipitación,
- Importaciones superficiales de otra cuenca,
- Retornos de la demanda. (SNET-Servicio Hidrológico Nacional-2005).

Las salidas consideradas son las siguientes:

- Evapotranspiración real,
- Evaporación de cuerpos de agua,
- Evaporación en áreas urbanas
- Escurrimiento superficial,
- Demanda interna en la cuenca,
- Demanda externa de la cuenca

Como Cambio de almacenamiento:

- Recarga de acuíferos,
- Variación de nivel en cuerpos de agua (lagos, lagunas, embalses)

BALANCE HIDRICO

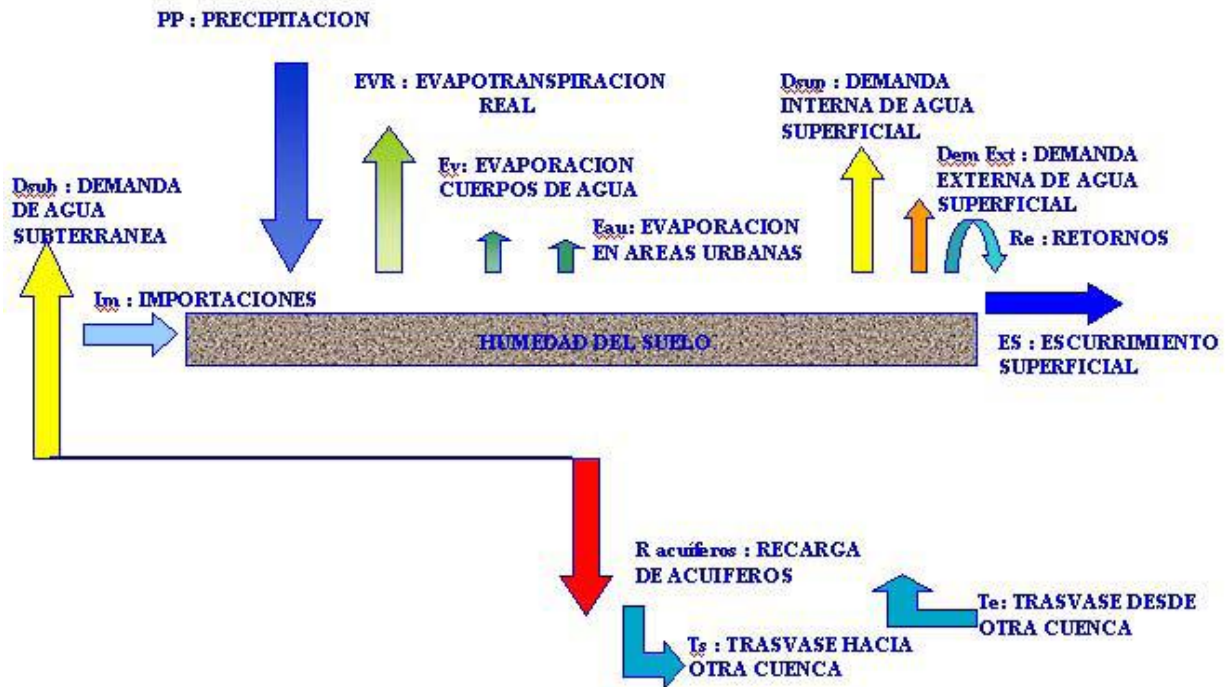


FIGURA 2.2: ESQUEMA DE MODELO DE BALANCE HIDRICO REALIZADO POR EL SNET. (Fuente: BALANCE HÍDRICO INTEGRADO Y DINAMICO EN EL SALVADOR – SNET – 2005)

2.4 Método RAS (Recarga Acuífera Subterránea)

El método RAS es un método científico, teórico para elaborar el mapa de la recarga de agua subterránea, que puede servir como una herramienta para apoyar la toma de decisiones en la protección y el manejo sostenible del recurso hídrico, como también en el ordenamiento territorial.

La recarga de agua subterránea, calculado con este método simplificado, da un valor teórico y aproximado, sin tomar en consideración procesos complejos como por ejemplo de flujo lateral y circulante en la zona no saturada.

Para el cálculo de la Recarga Acuífera Subterránea es necesario calcular el Balance Hídrico Climático y luego un coeficiente de infiltración, para ser utilizados en la siguiente fórmula:

$$R=C*BHC \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

R: Recarga acuífera

C: Coeficiente de Infiltración

BHC: Balance Hídrico Climático

El coeficiente de infiltración "C" es un valor relativo sin dimensión, dicho coeficiente se obtuvo de la modificación del modelo analítico propuesto por Schosinsky y Losilla (2000), según este método el coeficiente de infiltración se obtiene con la siguiente fórmula (Fuente: Método Ras – FORGAES):

:

$$C= (kp+kv+kfc) \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

C: coeficiente de infiltración

kp: fracción que infiltra por efecto de la pendiente

kv: fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal

kfc: fracción que infiltra por efecto de la textura del suelo

2.5 Modelos Hidrológicos

2.5.1 Que Es Modelo Hidrológico?

Es una representación simplificada de un sistema real complejo llamado prototipo, bajo forma física o matemática. De manera matemática, el sistema real está representado por una expresión analítica. En un modelo hidrológico, el sistema físico real que generalmente representamos es la 'cuenca hidrográfica' y cada uno de los componentes del ciclo hidrológico. De esta manera un modelo matemático nos ayudará a tomar decisiones en materia de hidrología, por lo que es necesario tener conocimiento de entradas (inputs) al sistema y salidas (outputs) a partir del sistema, para verificar si el modelo es representativo del prototipo.

Los modelos hidrológicos son entonces representaciones simplificadas de los sistemas hidrológicos reales, en otras palabras un modelo hidrológico es una simplificación de la realidad, a partir del cual podemos estudiar la relación causa-efecto de una cuenca a través de los datos de entrada y salida, con los cuales se logra un mejor entendimiento de los procesos físicos hidrológicos que tienen lugar dentro de la cuenca (Fuente: Hidrología Aplicada – Ven Te Chow).

2.5.2 Tipos De Modelos Hidrológicos

Los modelos en cualquier ámbito de la ciencia se clasifican en:

1. **Modelos físicos reducidos:** Se basan en la reducción a una determinada escala del prototipo (realidad). Su fundamento teórico lo constituye el análisis dimensional completado con la teoría de la semejanza.
2. **Modelos analógicos:** Analizan un sistema a partir de otro regido por teorías similares.
3. **Modelos matemáticos:** Representan el sistema por un conjunto de ecuaciones y sentencias lógicas que expresan las relaciones entre variables y parámetros.

Los modelos matemáticos son ampliamente los más utilizados en hidrología y suelen requerir el empleo de ordenadores.

Los modelos matemáticos se dividen en dos grandes grupos:

1. **Determinísticos:** las variables vienen determinadas por leyes físicas consideradas como exactas y que explican toda su variabilidad.
2. **Estocásticos:** las variables son regidas en todo o en parte por las leyes del azar, y por tanto caracterizadas en términos de probabilidad. Requieren la existencia de datos que permitan caracterizar dichas variables.

Los modelos Determinísticos utilizados en este trabajo se exponen a continuación:

1. **Modelos empíricos:** Las funciones que los definen se basan en una correspondencia entre las entradas y las salidas de datos registrados, definidas habitualmente mediante el ajuste de ecuaciones tras un análisis de regresión. A pesar de que pueden proporcionar resultados de gran exactitud en las cuencas donde han sido definidos, su aplicación en otras localizaciones es muy problemática.
2. **Modelos distribuidos:** Un modelo distribuido divide la cuenca en pequeñas unidades regulares (grid) asignando a cada una de ellas sus propias características, dentro de estas unidades se simulan los procesos, por lo que elimina los posibles errores derivados de la aplicación de un promedio. Huggins (1977) ya citan varias ventajas de los modelos hidrológicos distribuidos. La primera es su mayor precisión en la simulación de la esorrentía superficial como consecuencia de su mayor capacidad para la representación espacial del medio en que se produce. La segunda es su gran aptitud para la aplicación en cuencas no aforadas, sobre todo en la determinación de las posibles consecuencias derivadas de los cambios en los usos del suelo. (Fuente: Hidrología Aplicada – Ven Te Chow).

2.5.3 Análisis De Variables Para La Generación De Modelos Hidrológicos

▪ **PRECIPITACION**

La precipitación incluye la lluvia y otros procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre, tales como granizo. La formación de precipitación requiere la elevación de una masa de agua en la atmosfera de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense. Los tres mecanismos principales para la elevación de masas de aire son:

Precipitación ciclónica. Es la que está asociada al paso de una perturbación ciclónica. Se presentan dos casos: frontal y no frontal. La precipitación frontal puede ocurrir en cualquier depresión barométrica, resultando el ascenso debido a la convergencia de masas de aire que tienden a rellenar la zona de baja presión. La precipitación frontal se asocia a un frente frío o a un frente cálido.

En los frentes fríos el aire cálido es desplazado violentamente hacia arriba por el aire frío, dando lugar a nubosidad de gran desarrollo vertical acompañada de chubascos que a veces son muy intensos, así como de tormentas y granizo. La precipitación del frente frío es generalmente de tipo tormentoso, extendiéndose poco hacia delante del frente.

MEDICIÓN DE PRECIPITACION

La determinación de los valores precipitados para cada una de las modalidades mencionadas se efectúa con instrumentos especiales estandarizados y registrándose los valores en horarios preestablecidos, con la finalidad de que los valores indicados para localidades diferentes sean científicamente comparables.

La altura de precipitación se expresa generalmente en mm e indica la altura del agua de lluvia que cubriría la superficie del suelo, en el área de influencia de una estación pluviométrica, si pudiese mantenerse sobre la misma sin filtrarse ni evaporarse.

La medición de la precipitación se efectúa por medio de pluviómetros o pluviógrafos, los segundos son utilizados principalmente cuando se trata de determinar precipitaciones intensas de corto período y alta intensidad.

▪ **EVAPOTRANSPIRACION**

Se denomina evapotranspiración a la evaporación en superficies cubiertas de vegetales junto con la transpiración de estos vegetales. La evaporación del agua por las plantas se debe a la necesidad de agua que tienen las plantas para incorporarla a su estructura celular, además de utilizarla como elemento de transporte de alimentos y de eliminación de residuos. La circulación del agua en la planta no es un circuito cerrado, sino que por el contrario es una circulación abierta. El agua penetra por la raíz, circula por la planta y gran parte de ella se evapora por las hojas. Existen dos tipos de evapotranspiración a continuación se detallan.

• **EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL**

Con objeto de valorar la capacidad máxima de evaporación y transpiración de un suelo, con unas determinadas condiciones atmosféricas y de radiación, se define el concepto de evapotranspiración potencial como: la cantidad de agua transpirada por unidad de tiempo, teniendo el suelo un cultivo herbáceo uniforme de 30–50 cm. de altura (alfalfa) y siempre con suficiente agua. En esas condiciones se produce el máximo de transpiración y coincide con las óptimas condiciones de crecimiento de las plantas.

▪ **CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL**

a) **Método de Blaney–Criddle**

Es una fórmula utilizable para zonas áridas:

$$E_{tp} = p \cdot (0,46 \cdot T + 8,13) \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

p : $100 \cdot (n^{\circ} \text{ horas luz al día} / n^{\circ} \text{ horas luz al año})$; T es la temperatura en $^{\circ}\text{C}$

Etp: es la evapotranspiración potencial diaria en mm.

b) Método de Contagne

$$Etp \text{ (mm/día)} = p - \cdot p2 = p - [p2 / (0,8 + 0,14 \cdot T)] \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

P : es la precipitación anual en mm.

T : es la temperatura media anual.

- c) **Fórmula de Hargreaves Simplificada:** La fórmula de Hargreaves Simplificada (Hargreaves y Samani, 1985) para evaluar la Evapotranspiración Potencial, necesita solamente datos de temperaturas y de Radiación Solar Extraterrestre.

La expresión general es la siguiente:

$$ETo = 0,0023 (tmed + 17,78) R0 * (tmax - tmin)^{0,5} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

ETo = evapotranspiración potencial diaria, mm/día

$tmed$ = temperatura media diaria, $^{\circ}\text{C}$

$R0$ = Radiación solar extraterrestre , en mm/día (tabulada)

$tmax$ = temperatura diaria máxima

$tmin$ = temperatura diaria mínima

- **EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL**

La evapotranspiración real es inferior a la evapotranspiración potencial para los siguientes factores:

- Falta de agua en algunos períodos;
- Variación de la evapotranspiración según el desarrollo de la planta;
- Variaciones de las condiciones atmosféricas como la humedad, la temperatura, etc.

Por todo ello:

$$Etr(\text{Evapotranspiración real}) = K \cdot Etp \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

K: es un coeficiente variable, que oscila entre 0.10 y 0.90, aproximándose a 1 cuando la planta está en su máximo desarrollo de foliación y fruto.

Etp: es la evapotranspiración potencial diaria en mm.

Fuente: Hidrología Aplicada – Ven Te Chow

2.6 Generación De Modelo Hidrológico Utilizando Arcgis

La forma de una superficie determina el modo en que el agua pueda fluir a través de la misma. Las herramientas de análisis hidrológico de ArcGIS proveen un método que permite describir las características físicas de una superficie. Utilizando un modelo de elevación digital, es posible delinear un sistema de drenaje y cuantificar las características del sistema. Estas herramientas permiten determinar para cualquier ubicación de la cuenca el área de contribución para cualquier punto de interés y la cantidad de agua que puede recibir dicho punto. Las cuencas y las redes de drenaje creadas a partir de un modelo de elevación digital utilizando ArcGIS son las fuentes

primarias para la mayoría de los modelados hidrológicos de superficie. Dichos modelos pueden ser utilizados, entre otros, para determinar la altura, tiempo y magnitud de inundación de un área, localización de área que contribuye a la contaminación de los cursos fluviales o predecir los efectos de alteración del paisaje.

Muchas aplicaciones requieren de un conocimiento de cómo el agua fluye a través de un área y qué cambios del área pueden afectar dicho flujo.

Principales Funcionalidades De Un Modelado Hidrológico:

A. Sistema de Drenaje:

El área en la cual cae el agua y la red a través de la cual fluye hacia un punto más bajo es referido normalmente como sistema de drenaje. El flujo del agua a través del sistema de drenaje es sólo una parte del ciclo hidrológico, el cual incluye precipitación, evapotranspiración y agua subterránea.

B. Procesos de Modelado del Terreno:

Las características físicas de la superficie determinan las características del flujo del agua a través de la misma; paralelamente, el flujo del agua tiende a cambiar las características del terreno.

La dirección del flujo es determinada por el "aspecto" o dirección de la pendiente, esto es la dirección donde se produce la mayor velocidad de cambio de elevación en un modelo digital.

C. Modelo de Elevación Digital:

La forma más común de representar digitalmente la forma de la tierra es a través de un modelo basado en celdas, conocido como modelo de elevación digital (DEM). Estos datos son utilizados en ArcGIS para cuantificar las características de la superficie de la tierra. (Fuente: Aplicación de SIG a Recursos Hídricos)

Un DEM es una representación gráfica de una superficie continua, usualmente referida como una superficie de la tierra. La precisión de estos datos es determinada primariamente por resolución del modelo y resulta de vital importancia para la determinación de la dirección de flujo del agua.

Los mapas de pendiente (grado o porcentaje), aspecto de la pendiente, relieve de sombras, vistas en perspectiva 3D, son algunos los productos derivados del análisis topográfico a partir de un DEM.

D. Usos de los DEM en la modelación hidrológica:

Dado que el flujo de las aguas a través de la superficie es siempre en la dirección de máxima pendiente, una vez que la dirección de flujo es conocida es posible determinar cuales y cuántas celdas fluyen hacia una celda particular. Esta información puede ser utilizada para definir los límites de las cuencas y la red de drenaje.

Dirección de Flujo:

Una de las claves del modelado hidrológico lo constituye la determinación de la dirección de flujo de cualquier punto de una cuenca (cualquier celda). El proceso de cálculo de la dirección de flujo consiste en determinar la dirección de máxima pendiente hacia abajo de cada celda. Existen ocho direcciones posibles de flujo de una celda considerando las ocho celdas adyacentes (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW).

F. Flujos Acumulados:

Constituye el peso acumulado en una celda determinada de todas celdas que fluyen pendiente abajo hacia la misma. De este modo es posible conocer rápidamente la cantidad de agua que puede recibir una celda determinada. Asimismo, el cálculo de flujos acumulados posibilita también determinar la cantidad de agua de lluvia que puede fluir por una celda dada, asumiendo que toda la lluvia se convierte en

escurrimiento superficial y que no existe infiltración, evapotranspiración u otras pérdidas de agua.

G. Determinación de Cuencas Hidrográficas:

Las cuencas pueden ser delineadas automáticamente a partir del modelo de elevación digital, utilizando como entrada la información de dirección de flujos, lo cual posibilita conocer el área de contribución de agua. Asimismo, a partir de una cuenca dada es factible delinear nuevas subcuencas. Debido que muchas subcuencas pueden resultar de dimensiones muy pequeñas y sin interés para la aplicación, el usuario tiene la posibilidad de especificar el tamaño mínimo deseado para las sub-cuencas. Los límites de distintas cuencas son comúnmente requeridos para todo tipo de modelado hidrológico. Utilizando herramientas de ArcGIS es posible combinar dichos límites con información de suelos y uso de la tierra para obtener información estadística para cada cuenca para, por ejemplo, predecir la pérdida de sedimentos o importantes inundaciones.

H. Determinación de Pendientes Medias:

ArcGIS provee las herramientas necesarias para el cálculo de la pendiente media de una cuenca o sub-cuenca, para lo cual utiliza la fórmula empírica de Van Haveren (1986).

I. Redes Hidrográficas:

Las redes hidrográficas pueden ser delineadas a partir de DEM utilizando información sobre los flujos acumulados. Con esta herramienta es posible asignar un orden jerárquico a los distintos cursos que conforman la red de una cuenca dada; para ello, ArcGIS utiliza el método de Shreve o el de Strahler. (Fuente: Aplicación de SIG a Recursos Hídricos)

J. Determinación de los cursos más importantes dentro de una cuenca Los cursos más largos (más importantes):

Dentro de una cuenca dada pueden ser obtenidos automáticamente con ArcGIS, pudiéndose determinar asimismo la pendiente promedio del mismo y la su representación gráfica de un perfil longitudinal.

K. Determinación del Escurrimiento en una Cuenca Hidrológica:

Otra característica muy significativa del modelado hidrológico lo constituye el RCN (Runnoff Curve Number) el cual está basado en el Uso del Suelo, Tipo de Suelos y la Pendiente, y que puede ser utilizado luego para estimar el escurrimiento de una cuenca. A tal efecto ArcGIS dispone de poderosas herramientas para la obtención del RNC representativo de la cuenca de interés, el cual toma en consideración los parámetros fisicoquímicos de los suelos, la pendiente y el uso actual del suelo, posibilitando determinar la cantidad de agua que sólo escurre por el terreno.

L. Determinación del Escurrimiento Anual de una Cuenca Hidrológica:

El escurrimiento anual promedio puede ser determinado en este modelo para una cuenca dada. Los cálculos están basados en la información del RCN y en los datos de precipitación, pudiéndose determinar la cantidad de agua que se infiltra, el porcentaje del escurrimiento versus precipitación, el promedio diario de escurrimiento para cada subcuenca, y la descarga (Q en metros cúbicos por hora).

M. Simulación de Tormentas y análisis de las consecuencias resultantes:

Dentro de las herramientas de modelado hidrológico de ArcGIS resulta fascinante que el usuario puede simular una tormenta con tales o cuales características y luego poder analizar los resultados de la misma. A tal efecto el usuario, puede designar una tormenta para un área determinada. Existen opciones para seleccionar tormentas que pueden presentarse ya sea una vez al año, una vez en dos años, una vez en cinco

años, una vez en 10, 25, 50 o 100 años. Asimismo, el usuario pueden ingresar al modelo la duración e intensidad de la lluvia. Como resultado de los cálculos, se obtiene información gráfica y tabular mostrando consecutivamente las descargas en metros cúbicos por segundo para cada hora desde el comienzo de la tormenta.

N. Otras Funcionalidades De Un Modelado Hidrológico:

Además de lo expuesto, existen otras herramientas en ArcGIS orientadas al modelado hidrológico de acuíferos subterráneos, incluyendo:

- Determinación de niveles piezométricos de un acuífero.
- Perfiles del acuífero.
- Localización áreas alto riesgo de contaminación.
- Cálculo de volumen de un acuífero.
- Determinación de Plumas de contaminantes.

Fuente: Aplicación de SIG a Recursos Hídricos

2.7 Métodos De Aforo

El aforo es el procedimiento de medir un caudal, mediante el cual podemos determinar la cantidad de agua que está circulando en un punto determinado de nuestros canales, riachuelos, quebradas, etc.

Para poder realizar un aforo es necesario conocer el área de la sección transversal del cauce de la corriente de agua y la velocidad con la que esta avanza.

Son varios los métodos que se pueden emplear para aforar el agua, vamos a citar sólo los más usados en nuestro medio, que son los siguientes:

a) Método usando dispositivos especiales tales como:

a.1. VERTEDEROS.- estos pueden ser triangulares, rectangulares y trapeciales sobre estos últimos los más conocidos son los llamados "Cipolletti".

a.2. CANALETAS.- estos tienen formas alargadas; en este grupo se encuentran los medidores tipo "Parshall", "RBC" y los "Sin cuello".

Para aforar, basta con conocer la altura que tiene el agua que discurre por estos dispositivos, con esta altura se recurre a unas tablas elaboradas para cada uno de ellos donde se determina la cantidad de agua circulante. Estos dispositivos son los más recomendables por su precisión y facilidad en la lectura. Estos dispositivos son fáciles de construir y pueden ser de fierro, ladrillo o concreto; cuando son de fierro estos pueden ser incluso portátiles, en cambio cuando se construyen de ladrillo o concreto estos son fijos.

b) Método usando Orificios:

Un orificio no es más que la abertura de una compuerta cuando esta se levanta mediante el timón de maniobras. Por la acción de la altura del agua, por este orificio o abertura empieza a circular el agua de un lado a otro de la compuerta.

c) Método usando el Correntómetro:

El correntómetro es un instrumento que se usa para medir la velocidad del agua que circula en los canales, cauces de los ríos, quebradas, etc. Tiene la ventaja de ser transportable, sin embargo su operación tiene que estar en manos de personal debidamente entrenado.

d) Método usando Limnigrafo o Limnómetro:

El aforo con estos instrumentos se realiza cuando se necesita realizar un registro constante de la cantidad de agua que circula por grandes canales o ríos.

El Limnógrafo cuenta además con un dispositivo reloj que grafica la cantidad de agua durante las 24 horas.

e) Método del flotador:

Cuando no se dispone de ninguno de los dispositivos de medición antes señalados, se puede recurrir a este método, por ser práctico y fácil de realizar. Para este método se necesita de un flotador (que puede ser una pelotita de plástico, una pequeña madera, o una hoja de algún arbusto; también se necesita de un reloj (para medir el tiempo de recorrido del flotador). Sin embargo el grado de precisión no es tanto como el de los métodos anteriores. La ecuación empleada para el cálculo del caudal que circula a través del río aforado es la siguiente:

$$QR = V \cdot A \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

Qr: Caudal calculado para la sección de río en m³/s

V: velocidad promedio del río en m/s.

A: área de la sección transversal del río en m².

(Fuente: Métodos de Aforo - Julio Cesar de los Ríos Zorrilla)



MODELACION HIDROLOGICA LEMPA ALTO

CAPITULO III

CARACTERIZACION DE LA SUBCUENCA LEMPA ALTO

III. Caracterización

3.1 Importancia De La Cuenca Alta Del Río Lempa

El Balance Hídrico ha demostrado que la cuenca alta del Río Lempa dispone anualmente de 2,273.50 millones de m³ de esorrentía en el Río Lempa. De este volumen el 24% un estimado de 550 millones de m³, proviene de las cuencas en territorio de El Salvador conocido como Trifinio. La diferencia proviene de Honduras 720 millones de m³ anuales y de Guatemala 1,003.50 millones de m³ al año.

Los estudios realizados en la Cuenca Alta del Río Lempa por el Plan Trifinio, indican que las aguas provenientes de Honduras en el ramal Ocatepeque – Citala – Masahuat son de mala calidad, ya que están contaminadas por diferentes usos en Territorio de Honduras y Guatemala. También las aguas provenientes de Guatemala en el Ramal Asunción Mita – Guija, son de mala calidad por estar contaminados por los usos en Territorio de Guatemala. Las aguas de la Cuenca Alta del Río Lempa en Territorio de El Salvador, se considera que son aguas de Buena Calidad.

Dadas las condiciones anteriores, se puede concluir que la Región del Trifinio en Territorio de El Salvador es una Región Estratégica para el país, ya que produce 550 millones de m³ de agua al año, agua que es de buena calidad y que se utiliza en la Cuenca Media del Lempa, para los diferentes usos, tales como abastecimiento de agua potable, riego e hidroelectricidad, contribuyendo a reducir la dependencia que para estos usos se tiene de Guatemala y Honduras, y además asegurando a largo plazo el abastecimiento de agua de buena calidad para el Área Metropolitana de San Salvador.

Por lo tanto la importancia del La Sub-Cuenca Lempa Alto, es que está definida como el área de influencia de la Cuenca Alta Del Río Lempa. (Fuente: El Trifinio y Su Ambiente).

3.2 Contexto Geográfico De La Subcuenca Lempa Alto

La Cuenca del río Lempa tiene una extensión territorial de 17,919 kilómetros cuadrados de los cuales 55.1% corresponden a El Salvador, 30.6% a Honduras y 14.3% a Guatemala (SIT-CARL, 2008).

La sub-cuenca Lempa Alto tiene una extensión territorial de 1411.1 kilómetros cuadrados de los cuales el 41.88% corresponden a El Salvador, 22.32% pertenece a Guatemala y el 35.80% le pertenecen al territorio de Honduras.

El Río Lempa se origina entre las montañas volcánicas de las mesetas centrales en el municipio de Olopa del departamento de Chiquimula, en Guatemala, a una elevación aproximada de 1,500 msnm. Cruza por el departamento de Ocotepque en Honduras y luego ingresa a El Salvador por el municipio de Citala del departamento de Chalatenango, y desemboca en la planicie costera del océano Pacífico, entre los departamentos de San Vicente y Usulután, en El Salvador. La elevación máxima de la cuenca es 2,805 msnm que se alcanza en las montañas de Honduras.

Los cauces principales de río Lempa tienen una longitud en el área conocida como **“Río Lempa Alto” de 107.7 kilómetros, y en el área de “Angue-Ostua-Guija”** de 211 kilómetros, ambos hasta el punto de confluencia con el río Desagüe. Y luego desde el río Desagüe hasta la desembocadura del océano pacífico de 275.3 km (SIT-CARL, 2008). En la Cuenca se encuentran varios cuerpos de agua, entre los más importantes el Lago Guija, la Laguna de Metapán, y tres embalses de represas hidroeléctricas.

3.3 Ubicación Geográfica

La Cuenca Alta del Río Lempa, define su área de influencia como la parte de la cuenca alta del río Lempa hasta su confluencia con el río Desagüe. El río Lempa tiene una longitud de 422 km siendo el más largo de Centroamérica con vertiente al Océano Pacífico (SNET, 2004). La cuenca alta del río Lempa (CARL) es trinacional, incluye territorios de Guatemala, Honduras y El Salvador (Ver tabla 3.1).

La Sub-Cuenca Lempa Alto se origina entre las montañas volcánicas de las mesetas centrales en el municipio de Olopa del departamento de Chiquimula, en Guatemala, a una elevación aproximada de 1,500 msnm. Ingresa a Honduras por el departamento de Ocotepeque entrando a El Salvador por el noreste del departamento de Chalatenango, en el municipio de Citalá y en el departamento de Santa Ana teniendo el punto más bajo en el municipio de Masahuat. La elevación máxima de la sub-cuenca Lempa Alto es 2,717 msnm y la elevación mínima en el punto de Masahuat es de 338 msnm. (Fuente: El Trifinio y Su Ambiente).

La Sub-cuenca Lempa Alto incluye las siguientes cabeceras (Ver Mapa 3):

PAIS	DEPTO	CABECERA
EL SALVADOR	SANTA ANA	MASAHUAT
EL SALVADOR	SANTA ANA	SANTA ROSA GUACHIPILÍN
EL SALVADOR	CHALATENANGO	LA PALMA
EL SALVADOR	CHALATENANGO	SAN IGNACIO
EL SALVADOR	CHALATENANGO	CITALA
HONDURAS	OCOTEPEQUE	NUEVA OCOTEQUE
HONDURAS	OCOTEPEQUE	SINUAPA
HONDURAS	OCOTEPEQUE	CONCEPCIÓN
HONDURAS	OCOTEPEQUE	SANTA FE
HONDURAS	OCOTEPEQUE	DOLORES MERENDON
GUATEMALA	CHIQUIMULA	ESQUIPULAS
GUATEMALA	CHIQUIMULA	OLOPA

TABLA 3.1: MUNICIPIOS DE LA SUBCUENCA LEMPA ALTO

3.4 Condiciones Climáticas

La cuenca alta del río Lempa por su ubicación en la vertiente del océano Pacífico, presenta variaciones estacionales en el clima, asociadas al movimiento de masas de aire que transportan humedad y calor como parte de la circulación de sistemas de gran escala que emigran y se estacionan cerca del área, como la Zona de Convergencia Intertropical, combinado con a la interacción con los flujos de escala local como las brisas mar-tierra (SNET, 2004).

El clima de la cuenca alta está condicionado también por la orografía, pues con la presencia de cadenas montañosas, una parte de la cuenca alta se localiza a sotavento (atrás), del viento del noreste proveniente del Caribe (Alisios), disminuyendo la inyección de humedad desde el Caribe a las otras zonas en la estación seca. Por lo tanto las lluvias disminuyen mucho más comparadas con cuencas de ríos que desembocan en la vertiente del mar Caribe (SNET, 2004).

El régimen de lluvia presenta una estación seca (de noviembre a abril) y otra lluviosa (de mayo a octubre) bien definidas, ocurriendo durante julio y/o agosto una "canícula" en la cual la lluvia disminuye significativamente en la parte media de la cuenca. En abril se presenta la transición de la época seca a la lluviosa y en noviembre la transición inversa, las lluvias inician en las zonas montañosas, luego en las planicies intermedias y finalmente en la parte baja (SNET, 2004).

3.5 Cantidad De Agua

En el área de la CARL existe una importante producción de agua, de acuerdo a estimaciones parciales de la producción se estima que para el drenaje Olopa-Lempa se reciben 23.8 m³/s al nivel de la estación de Citalá (CATIE, 2001), lo que representa un volumen de 653 millones de m³/año al año. Adicionalmente se cuenta el aporte de las subcuencas que drenan al lago de Guija que alimentan a la represa Guajoyo y aportan al cauce del Lempa un volumen de 83 millones de m³ /año (CATIE, 2001). El 80 a 90% de la precipitación promedio anual en la cuenca es recibida durante la estación lluviosa, reportándose 1,850 mm, con un rango promedio histórico para la cuenca alta de 1,220 mm y 2,020 mm (CATIE, 2001). Los puntos de lluvias máximas se encuentran localizados especialmente en los puntos elevados, como el cerro de Montecristo, con precipitaciones anuales que varían desde 1,700 a 2,300 mm.

Los puntos de lluvias mínimas se encuentran en los alrededores del lago de Güija, Atescatempa-Asunción Mita, con láminas que alcanzan los 1,000 a 1,100 mm en los puntos más críticos (ICI-APESA-NORAGRIC, 2000). La evapotranspiración potencial de la cuenca disminuye a medida que aumenta la altitud sobre el nivel del mar. Tiene

un rango de un mínimo de 80 mm por mes en zonas elevadas durante la época lluviosa a un promedio mensual máximo de 190 mm en las zonas bajas. Entre los meses de mayo a octubre se genera un superávit de agua en la cuenca que se utiliza entre los meses de mayo y junio para recargar la humedad de suelo. Después de recargar el suelo, el superávit hídrico (la diferencia entre la precipitación y 9 evapotranspiración), presente entre junio y octubre, se convierte en escorrentía superficial, presentando una distribución bimodal, con máximos de precipitación y escorrentía en junio y septiembre. Durante la época seca, la humedad del suelo se aprovecha para evapotranspiración. Existe un déficit hídrico en la época seca, entre noviembre y mayo (CATIE, 2001).

3.6 Cobertura Y Uso De Suelo

Los principales usos de la tierra identificados en el área de la Sub-Cuenca Lempa Alto se agrupan en las siguientes categorías (Ver tabla 3.2 y mapa 4):

USO	PORCENTAJE %	USO	PORCENTAJE %
BOSQUE CADUCIFOLIOS	8	LAGOS, LAGUNAS Y LAGUNETAS	2
BOSQUE DE CONÍFERAS	10	MOSAICO DE CULTIVO Y PASTOS	6
BOSQUE MIXTO	9	PASTOS CULTIVADOS	2
BOSQUE SEMI CADUCIFOLIOS	2	PASTOS NATURALES	30
CAFÉ	2	TEJIDO URBANO DISCONTINUO	1
ESPACIOS CON VEGETACIÓN ESCASA	1	TERRENOS PRINCIPALMENTE AGRÍCOLAS	8
GRANOS BÁSICOS	7	VEGETACIÓN ARBUSTIVA BAJAS	10
VEGETACIÓN DE TRANSICIÓN	1		

TABLA 3.2: COBERTURA Y USO DE SUELO

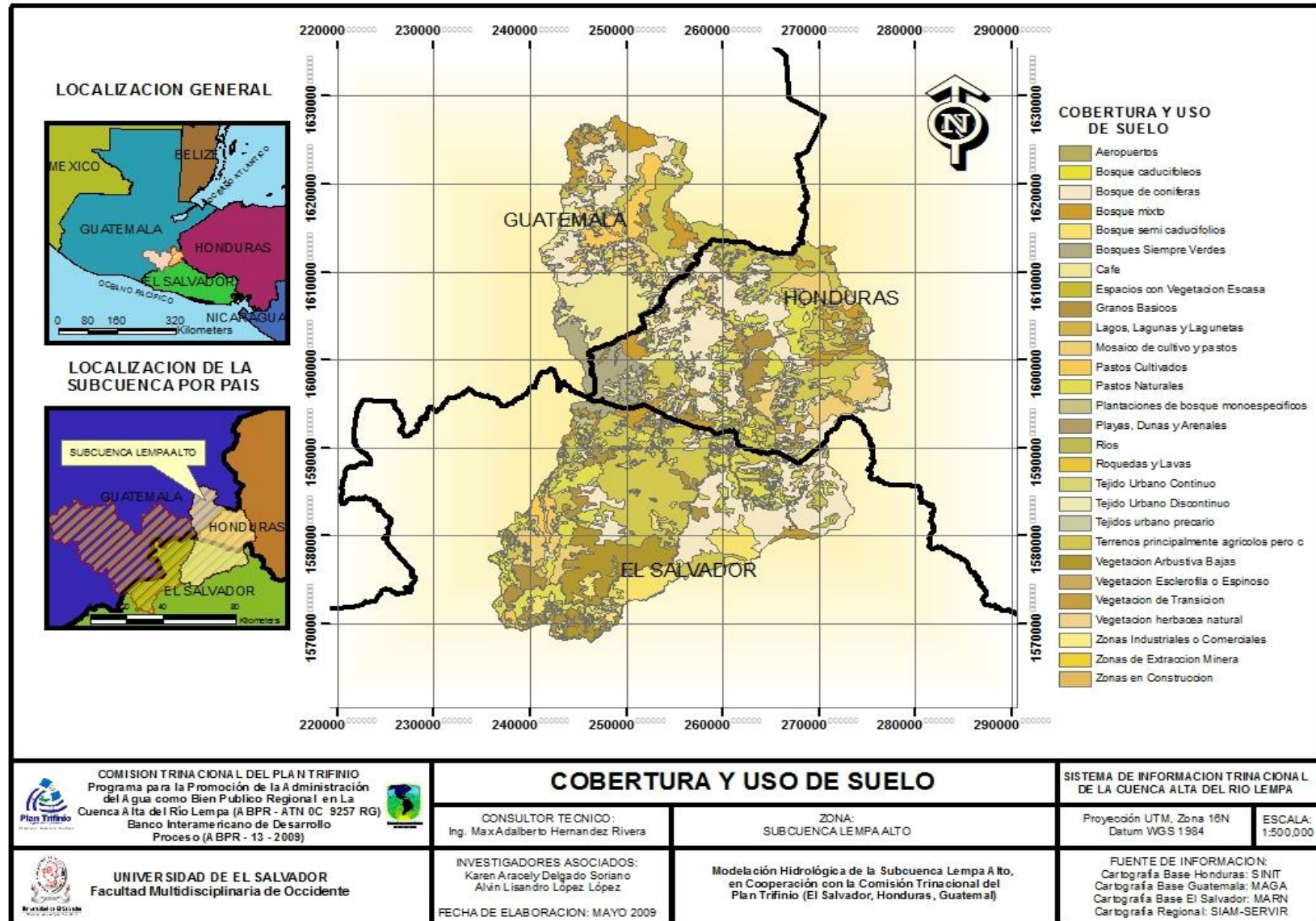
- A. Áreas de uso agrícola (24%):** presencia predominante de cultivos anuales como maíz y frijol, hortalizas en pequeña y micro-escala y cultivos permanentes como café, pastos bajo riego.
- B. Áreas sin manejo temporal (42%):** estas áreas son un conjunto de pastos, arbustos, matorrales y bosques caducifolios y coníferas abiertos. Se utilizan para

pastos en época lluviosa y en algunas áreas para cultivos anuales, aunque con rendimientos bajos. Hay extracción de leña y madera. Ocurren incendios forestales provocados para el renuevo del pasto.

- C. Bosques: coníferas, latifoliados, mixtos, nuboso (29%):** Una parte de estos bosques está bajo protección, la otra parte son áreas de propiedad privada. El avance de la frontera agrícola se origina por el cultivo del café, actividades agrícolas anuales y ganaderas; hay ocurrencia de incendios forestales y extracción de leña y madera.

- D. Cuerpos de agua y humedales (3%):** lagos y lagunas como Guija, Metapán, Ipala, pequeñas lagunetas de invierno y tierras inundables.

- E. Áreas construidas (2%):** corresponde a los centros poblacionales del área que incluyen las ciudades principales de Esquipulas, Nueva Ocotepeque, Metapán y La Palma, y centros más pequeños como las cabeceras municipales.



MAPA 4: COBERTURA Y USO DE SUELO

3.7 Morfología De La Cuenca

La morfología de la cuenca queda definida por tres tipos de parámetros

- Parámetros de forma
- Parámetros de relieve
- Parámetros relativos a la red hidrológica.

3.7.1 Parámetros de Forma

La forma de una cuenca influye sobre los escurrimientos y sobre la marcha del Hidrograma resultante de una precipitación dada. Dentro de los parámetros de forma tenemos:

- **Perímetro de la Cuenca (P):**

El perímetro (P) es la longitud del límite exterior de la cuenca y depende de la superficie y la forma de la cuenca

$$P = 223 \text{ km}$$

- **Área de Drenaje (A):**

El área de la cuenca es quizá el parámetro más importante, siendo determinante de la escala de varios fenómenos hidrológicos tales como, el volumen de agua que ingresa por precipitación, la magnitud de los caudales, etc.

$$A = 1411.1 \text{ km}^2$$

- **Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad**

El índice o coeficiente de compacidad K_c se debe a Gravelius, y es la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área que la cuenca. LLamas (1993) da la siguiente expresión:

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Siendo P y A los parámetros definidos más arriba (en Km y Km² respectivamente). Cuanto más irregular sea la cuenca, mayor será su coeficiente de compacidad. Para una cuenca perfectamente circular KC = 1, y cuanto más se aleje KC de 1 más alargada será la cuenca.

Este coeficiente define la forma de la cuenca, respecto a la similaridad con formas redondas, dentro de rangos que se muestran a continuación (FAO, 1985):

- ✓ Clase Kc1: Rango entre 1 y 1.25. Corresponde a forma redonda a oval redonda
- ✓ Clase Kc2: Rango entre 1.25 y 1.5 Corresponde a forma oval redonda a oval oblonga
- ✓ Clase Kc3: Rango entre 1.5 y 1.75 Corresponde a forma oval oblonga a rectangular oblonga.

$$K_c = 0.28 * 223/(1411.1)^{1/2}$$

$$K_c = 1.66$$

Por lo tanto la cuenca en estudio corresponde a una forma oblonga a rectangular oblonga, es decir tiene una forma más alargada en relación a su ancho, por lo que la mayor parte del agua escurre a un solo cauce.

3.7.2 Parámetros de relieve

La influencia del relieve sobre el hidrograma es aún más evidente. A una mayor pendiente corresponderá una menor duración de concentración de las aguas de escorrentía en la red de drenaje y afluentes al curso principal.

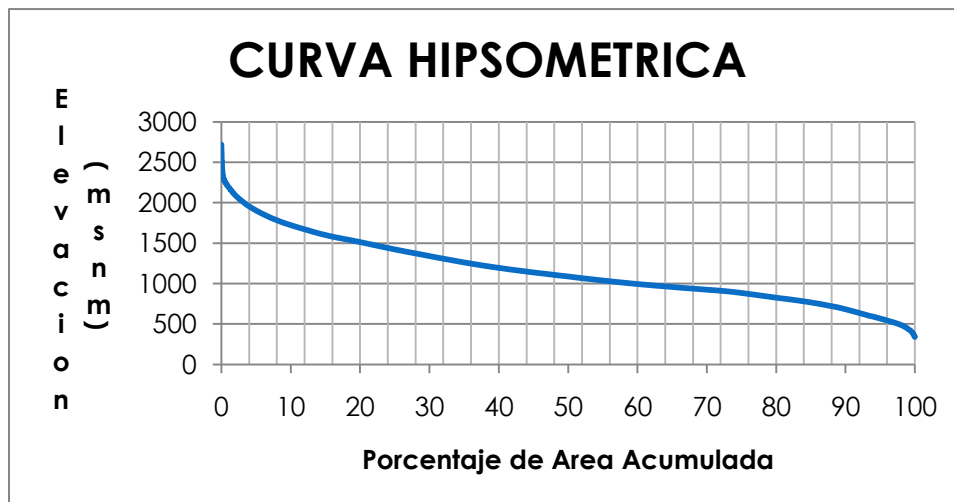
- **Amplitud del relieve:** Se define como la diferencia entre la altura máxima menos la altura mínima de la cuenca, que toma el valor de $Amp = h_{max} - h_{min}$

$$Amp = (2217 - 338)m$$

$$Amp = 1879 m$$

- **La curva hipsométrica**

Mediante la curva hipsométrica definimos el relieve mediante una gráfica de doble entrada cota-superficie acumulada, el área hay que acumularla de las cotas máximas a las cotas más bajas (Ver grafica 3.1).



GRAFICA 3.1: CURVA HIPSONOMÉTRICA DE LA CUENCA ALTA DEL RIO LEMPA

- **Altura mediana (hmed)**

Es aquella que obtenemos de la curva hipsométrica entrando con la mitad de la superficie, por tanto es la altura para la cual las áreas quedan igual repartidas.

$$H(\text{med}) = 1100 \text{ msnm}$$

3.7.3 Parámetros relativos a la red hidrográfica

La importancia de poder determinar las características de los drenajes superficiales de una cuenca hidrográfica, radica en la posibilidad que brindan estas de comprender mejor la dinámica de la regulación hídrica en una unidad hidrográfica particular y establecer la oferta natural del recurso en un área determinada, que para este caso, es el parque y las áreas urbanizadas aguas abajo. Las características analizadas en los drenajes están sujetas a la disponibilidad de información sobre cada uno de ellos, obtenida básicamente de observaciones en campo, y con limitantes técnicas, como la ausencia de información sobre caudales, niveles de sedimentación, profundidades, etc que podrían enriquecer el conocimiento sobre los drenajes más importantes de la Sub Cuenca Lempa Alto. Los índices de morfometría de drenajes en este estudio son:

- **Modelo de ordenación de Horton – Strahler**

Según Strahler una corriente puede tener uno o más segmentos. Un canal es una unión arbitraria de segmentos (e.j. canal principal). Strahler ordena las corrientes de acuerdo los siguientes criterios:

1. Los segmentos que se originan en un nudo externo son definidos como tramos de primer orden. Los segmentos que están unidos a una fuente (los que no tienen tributarios), son definidos como de *primer orden*.
2. Cuando dos segmentos del mismo orden, i , se unen en un nudo interior dan lugar a un segmento de orden superior, $i+1$, aguas abajo.
3. Cuando se unen dos tramos de distinto orden en un nudo interior dan lugar a un tramo que conserva el mayor de los órdenes. Cuando se unen dos tramos de distinto orden el orden del segmento resultante es el máximo orden de los segmentos que la preceden. Cuando a una corriente se le une otra de menor orden, la primera continúa y conserva su número de orden. (Fuente: Caracterización Geomorfológica de Cuencas – Jose Guadalupe Valtierra).



Universidad de El Salvador



Plan Trifinio
"Agua sin Fronteras"

MODELACION HIDROLOGICA LEMPA ALTO

CAPITULO IV

METODOLOGIA PARA LA GENERACION DEL MODELO HIDROLOGICO

IV. Generación Del Modelo

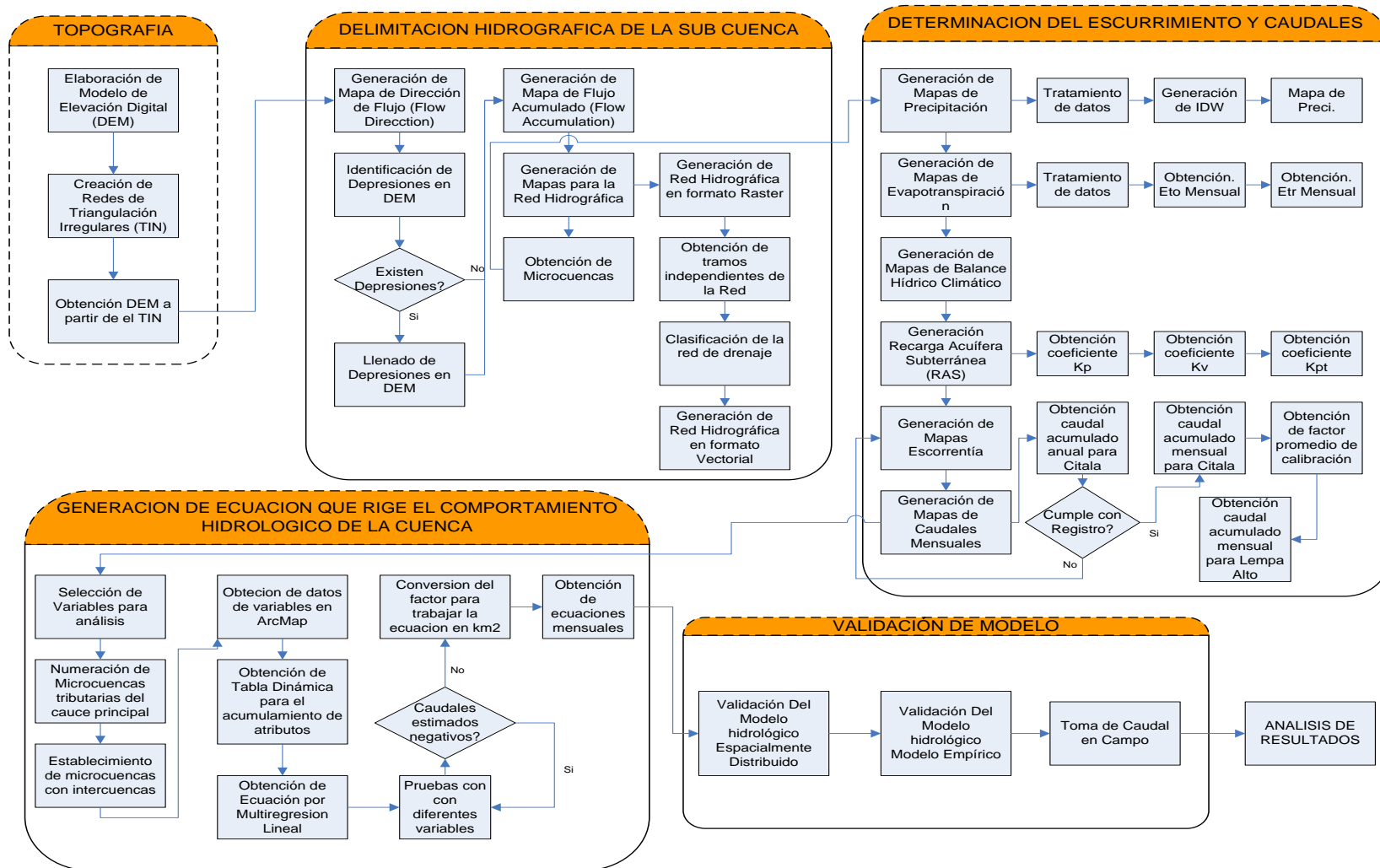


FIGURA 4.1: METODOLOGIA PARA LA GENERACION DE MODELO GENERICO

Para la realización del modelo hidrológico se utilizó el software Arcgis, tomando en cuenta las variables de precipitación, temperatura, pendiente, cobertura boscosa, tipo de suelo, evapotranspiración, balance hídrico climático y el escurrimiento. Con el análisis de estas variables se obtuvieron los resultados de caudales en los diferentes puntos que constituyen la sub-cuenca Lempa Alto.

La metodología que se desarrolló para la elaboración del modelo hidrológico es la siguiente (Figura 4.1):

4.1 Generación de Modelo de Elevación de Digital (DEM)

A. Creación de superficie TIN (Redes de Triangulaciones Irregulares).

Para la creación de la superficie es necesario contar con los archivos:

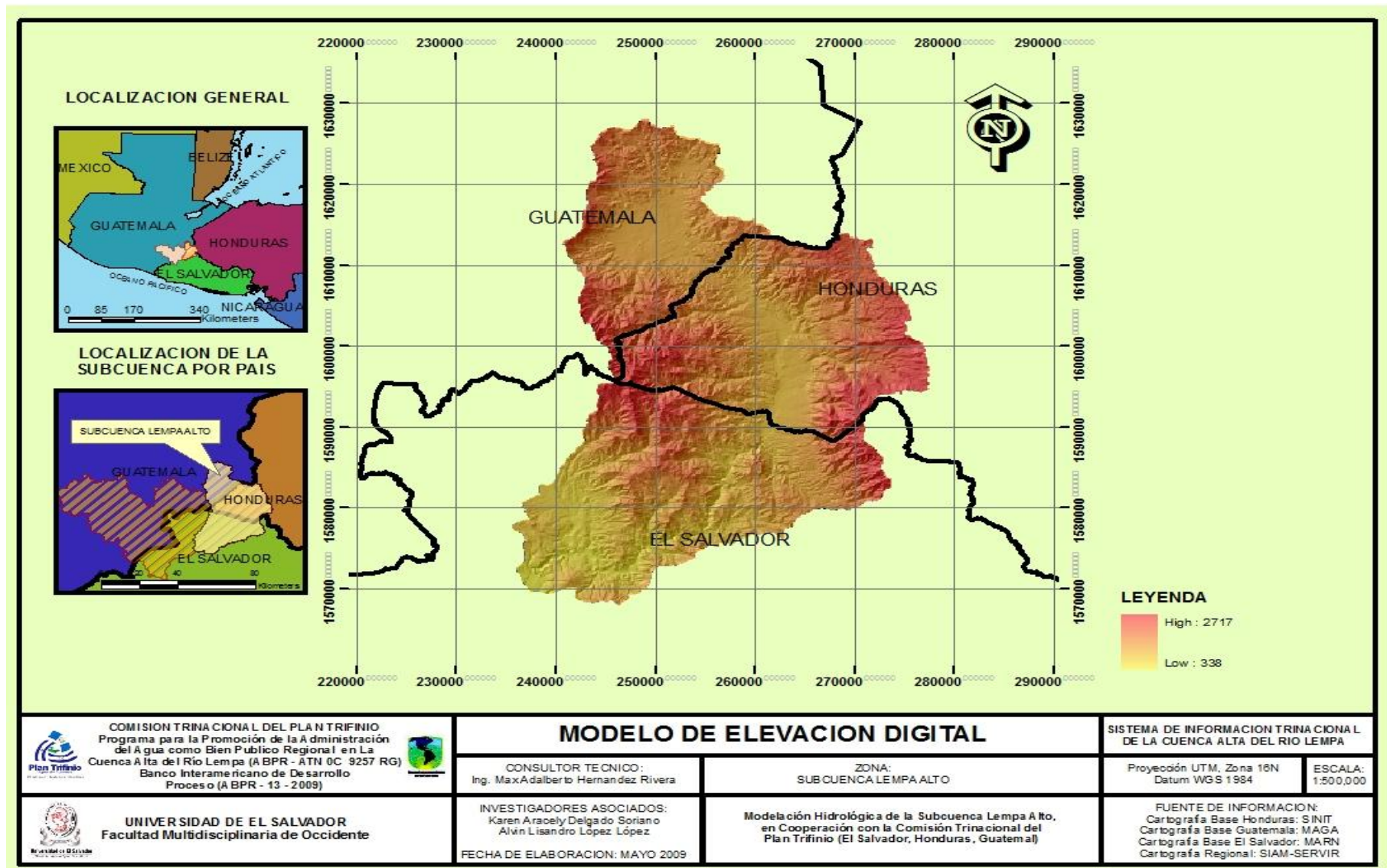
-Elementos poligonales en 2D.

-Líneas de curvas de nivel.

- ✓ Elementos poligonales en 2D: para el empleo de estos datos se utilizará la divisoria de aguas de la Sub-Cuenca Lempa Alto, la cual fue proporcionada por el Plan Trifinio.
- ✓ Líneas o curvas de nivel: para el empleo de las curvas de nivel será necesario utilizar las curvas que se encuentran en la Sub-Cuenca Lempa Alto, para la utilización del archivo .shp se llevó a cabo un geoprocesamiento de los datos.

B. Convertir a una capa Raster el TIN Generado: Al convertir el TIN a una capa Raster el producto final es el DEM para la Sub-Cuenca Lempa Alto.

Es necesario que el DEM de la Sub-Cuenca Lempa Alto, contenga información solo dentro de la divisoria de agua de la Sub-Cuenca. *En el mapa siguiente se puede apreciar el DEM generado para la Sub-Cuenca Lempa Alto.* En el mapa se puede apreciar que los puntos más altos y los mínimos (Ver mapa 5).



MAPA 5: DEM (MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL DE LA SUB-CUENCA LEMPA ALTO)

4.2 Generación de mapa de dirección de flujo

Antes de la generación del mapa de dirección de flujo se ubican las depresiones¹, en el mapa de modelo de elevación digital, para luego rellenarlas.

Para la creación del mapa Flow direction se realizaron los siguientes pasos:

1. Identificación de las depresiones en el mapa DEM.
2. Llenado (Fill) de depresiones en el mapa DEM.
3. Creación del mapa de Dirección de Flujo (Ver Mapa 6).
4. Para calcular las direcciones de flujo de cada una de las celdas del modelo de elevación. La capa resultante indica en forma numérica la dirección hacia donde fluiría el agua (Ver figura 4.2).

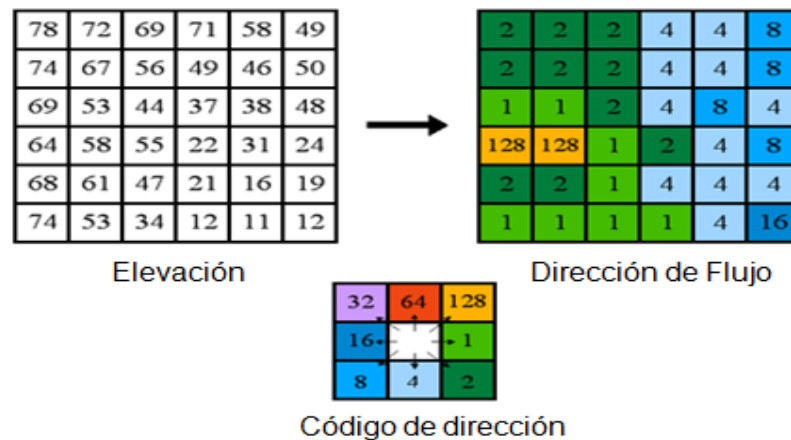
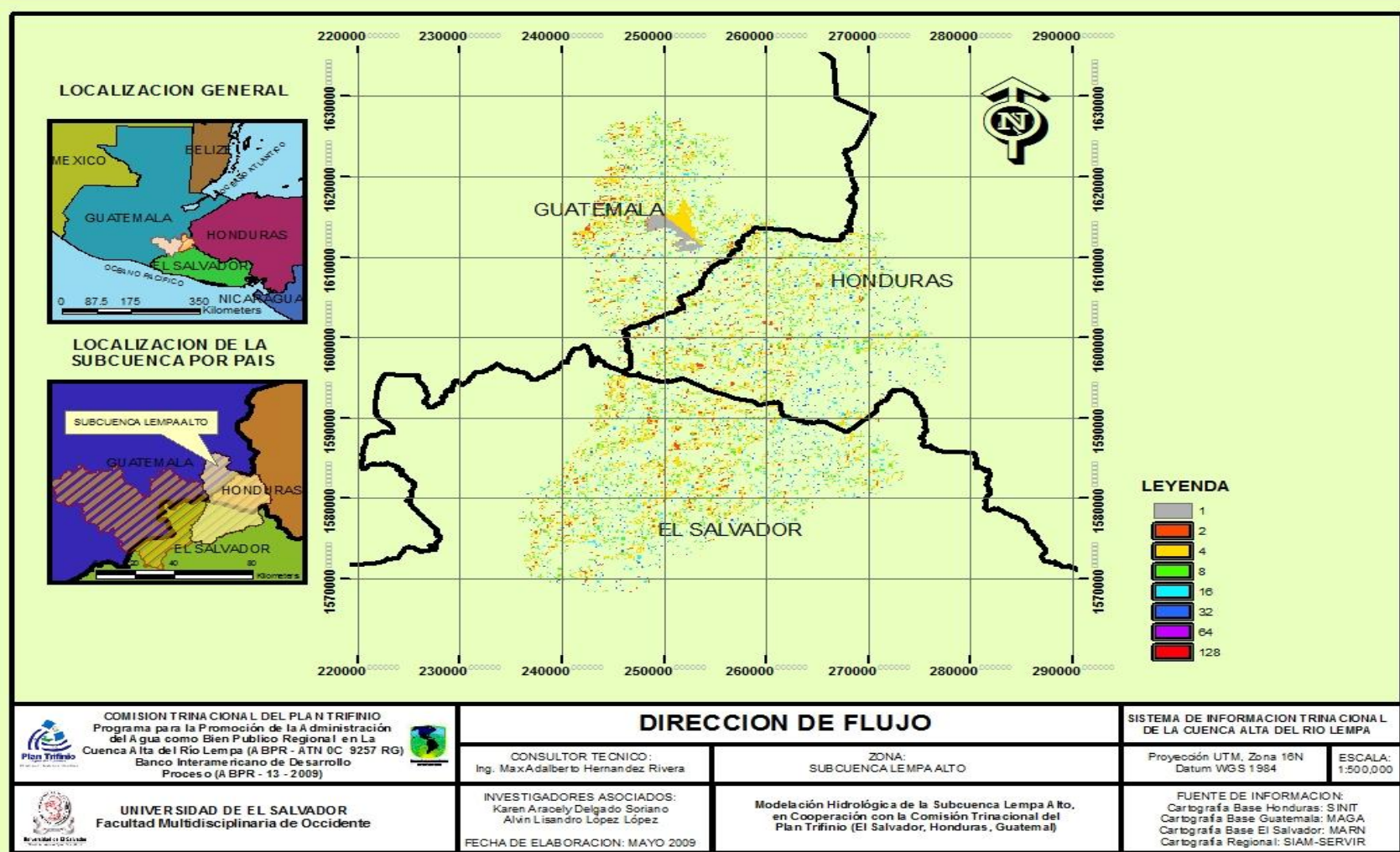


FIGURA 4.2: CODIGO DE DIRECCION DE FLUJO

¹ Las depresiones son puntos que no contienen información, y en las cuales se detendría la simulación del flujo del agua sobre la superficie.



MAPA 6: MAPA DE DIRECCIÓN DE FLUJO DE LA SUB-CUENCA LEMPA ALTO

4.3 Generación de mapa de flujo acumulado

La capa de “Acumulación de flujo” es la que permite visualizar la distribución de la red de drenaje. Las celdas que tienen los mayores valores de acumulación definen dicha red (Ver mapa 7). Para la obtención del mapa de flujo acumulado se genero el mapa con la herramienta de hidrología y luego se realizo una reclasificación de este para visualizar la red de drenaje.

Con la generación del mapa de flujo acumulado no solo pueden generarse para la delimitación de la red de drenaje, sino que también para generar un mapa de flujo acumulado de caudales a lo largo de toda la red de drenaje, el cual se encuentra posteriormente.

Utilice la Herramienta “Flow Accumulation” del ArcToolbox, para calcular en cada una de las celdas del grid, el flujo acumulado sobre la misma, es decir, el número de celdas que vierten a ella. La capa de “Flow Accumulation” es la que permite visualizar la distribución de la red de drenaje. La celdas que tienen los mayores valores de de acumulación definen dicha red (Ver figura 4.3).

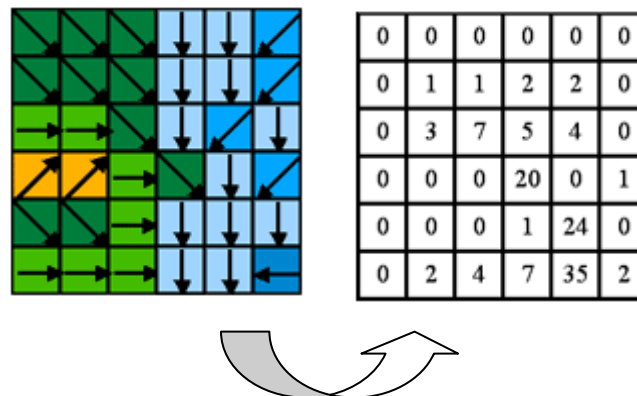
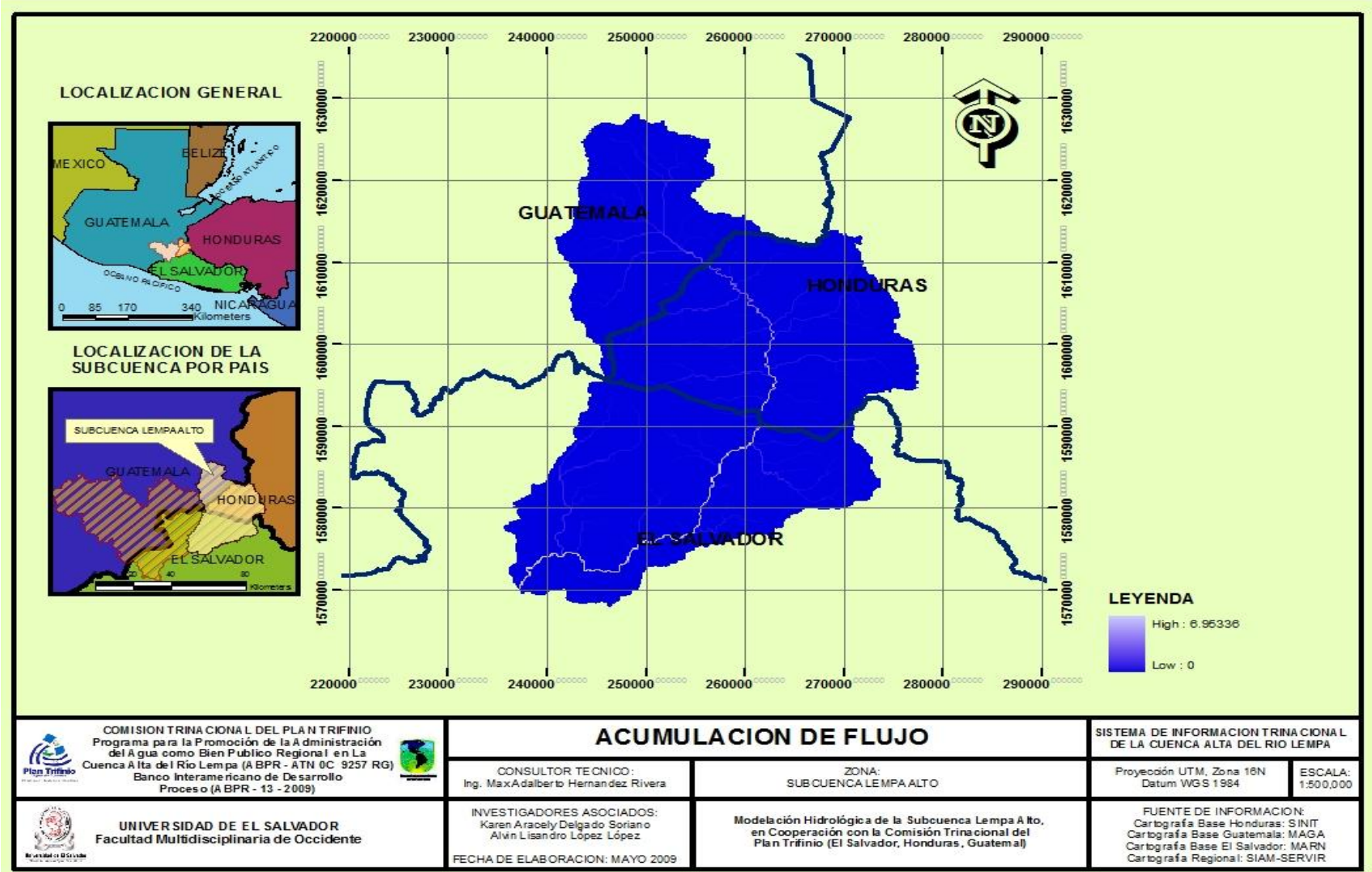


FIGURA 4.3: CODIGO DE ACUMULACION DE FLUJO



MAPA 7: MAPA DE ACUMULACION DE FLUJO

4.4 Generación de mapa Redes Hidrográficas

Para la generación de la red hidrográfica es necesario ejecutar la siguiente metodología:

A. Generación de Red Hidrográfica en formato Raster

Para la generación del mapa de la red hidrográfica de la Sub-Cuenca Lempa Alto se utilizó el mapa de Acumulación de flujo, porque este es el que permite visualizar la red de drenaje, pero para ello fue necesario que todos los valores menores a las 5,000 celdas acumuladas, no fueran consideradas (No Data). *En el mapa 8, se puede apreciar el mapa de de la red de drenaje en formato Raster, generado para la Sub-Cuenca Lempa Alto.*

B. Obtención de tramos independientes de la Sub-Cuenca Lempa Alto

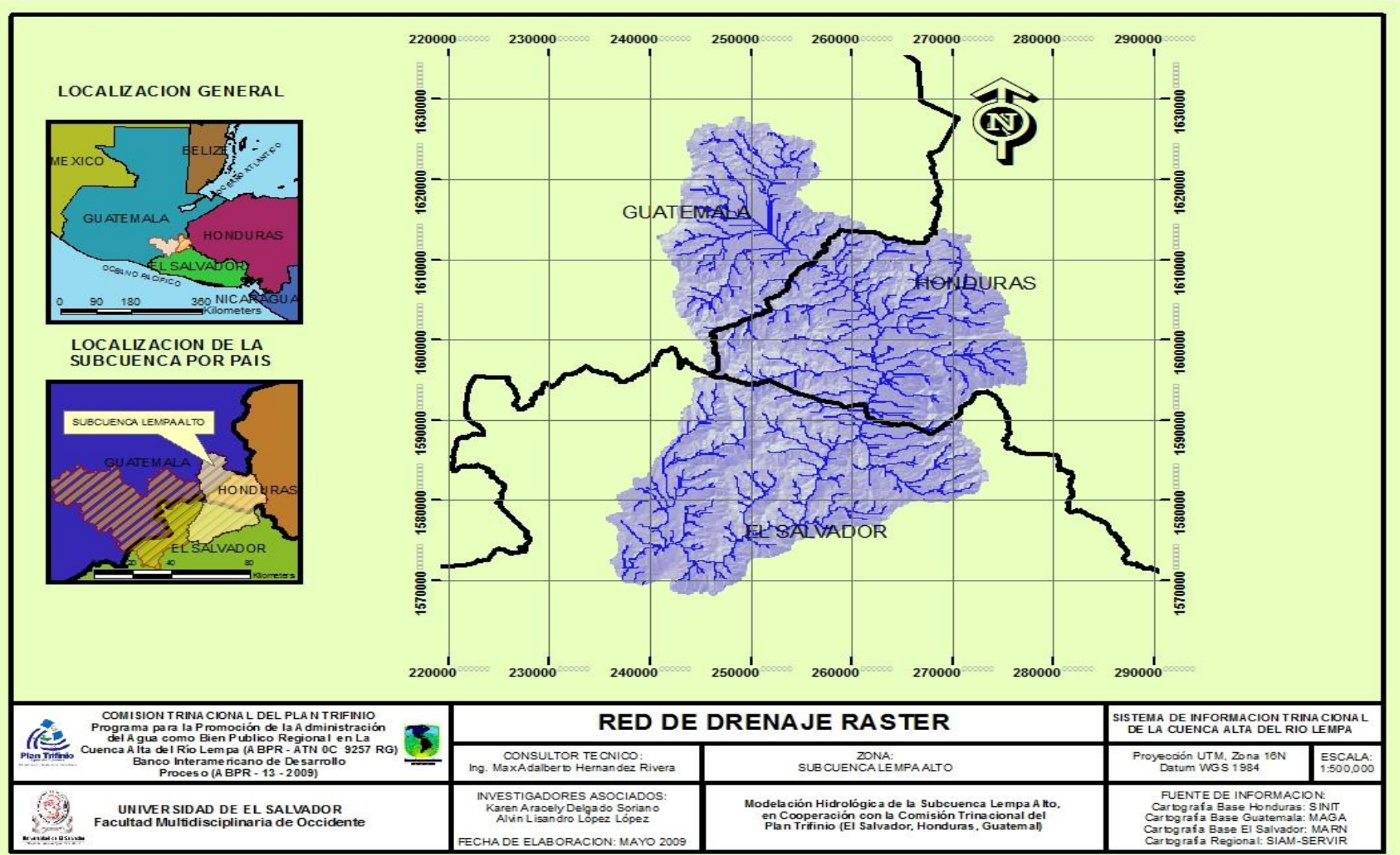
Para la obtención de los tramos independientes de los ríos tributarios de la Sub-Cuenca Lempa Alto se utilizó la red hidrográfica en formato raster, este mapa es necesario para la generación de todas las microcuencas que serán necesarias para la formulación del modelo hidrológico empírico, expresado en una ecuación matemática.

C. Clasificación de la red de drenaje

Para obtener el orden de la red de drenaje se utilizó el método de Strahler para generar el orden de la cuenca. Por lo que el orden de la Sub-cuenca Lempa Alto es de orden 5 según el método este método, llevado a cabo con la herramienta de hidrología de ArcGis 9.3.

D. Conversión de Red de Drenaje en formato Raster a formato vectorial

Se convierte la imagen raster a un formato vectorial con extensión .shp



MAPA 8: MAPA RED DE DRENAJE FORMATO RASTER

4.5 Determinación de Micro-cuencas

Para la generación de micro-cuencas con las áreas de drenaje de mayor importancia se siguió la siguiente metodología:

A. Generación de puntos para definir las microcuencas

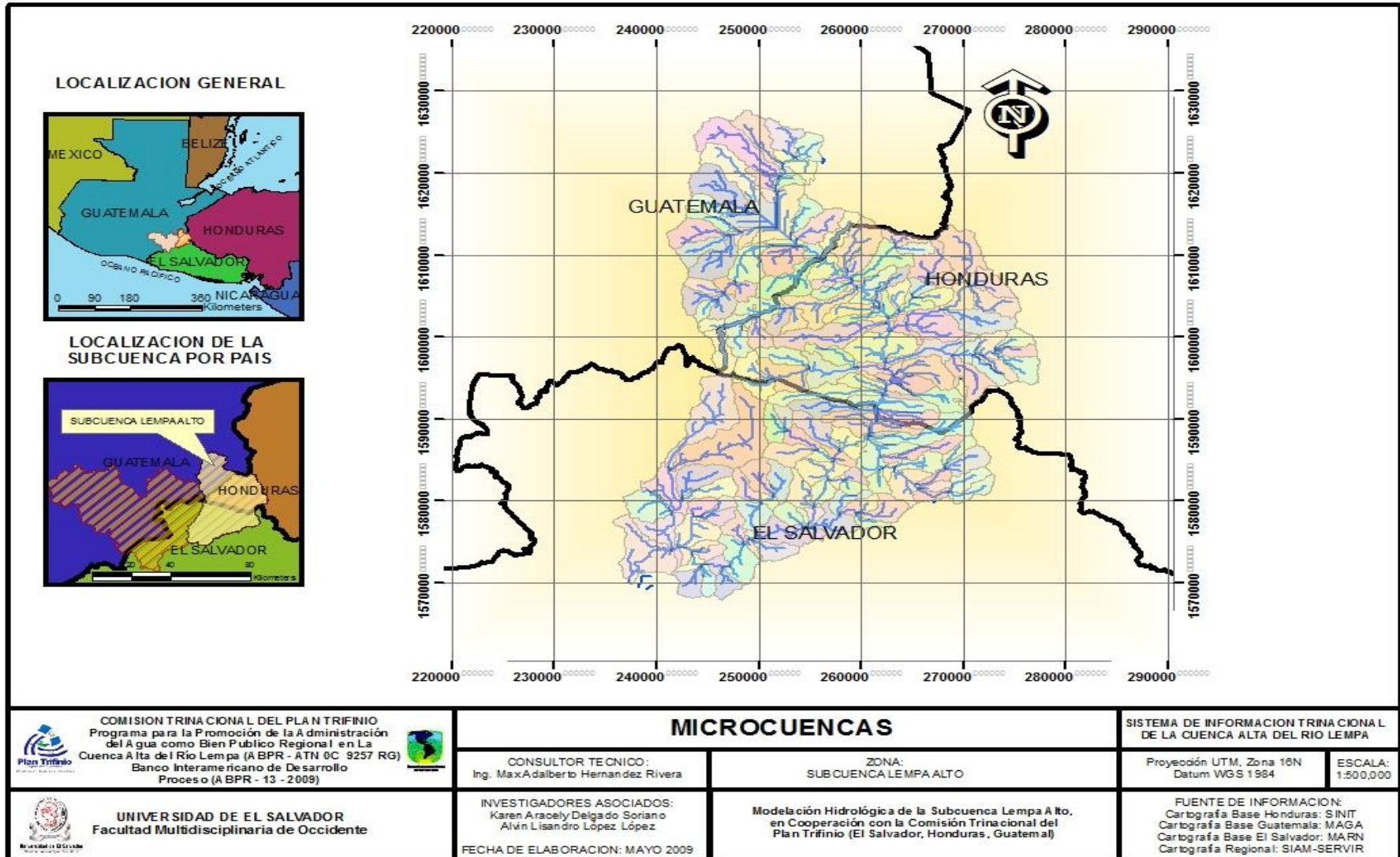
La generación de estos puntos consiste en la Digitalización de ellos a partir del cual se delimitaran las micro-cuencas.

B. Ajuste de Puntos

Ajustar los puntos digitalizados a las celdas cercanas que tienen el mayor valor de acumulación de flujo.

C. Generar las micro-cuencas utilizando la herramienta "Watershed"

Con esta se generan las micro-cuencas de toda La Sub-cuenca Lempa Alto (Ver mapa 9).



MAPA 9: MICROCUENCAS

4.6 Determinación del Escurrimiento y Caudales en La cuenca Lempa Alto

4.6.1 Generación de Mapas de Precipitación

Para la generación de los Mapas de Precipitación, El Plan Trifinio proporciono todos los datos de precipitación, los cuales son datos acumulados mensuales, para la generación de los mapas se siguió la siguiente metodología:

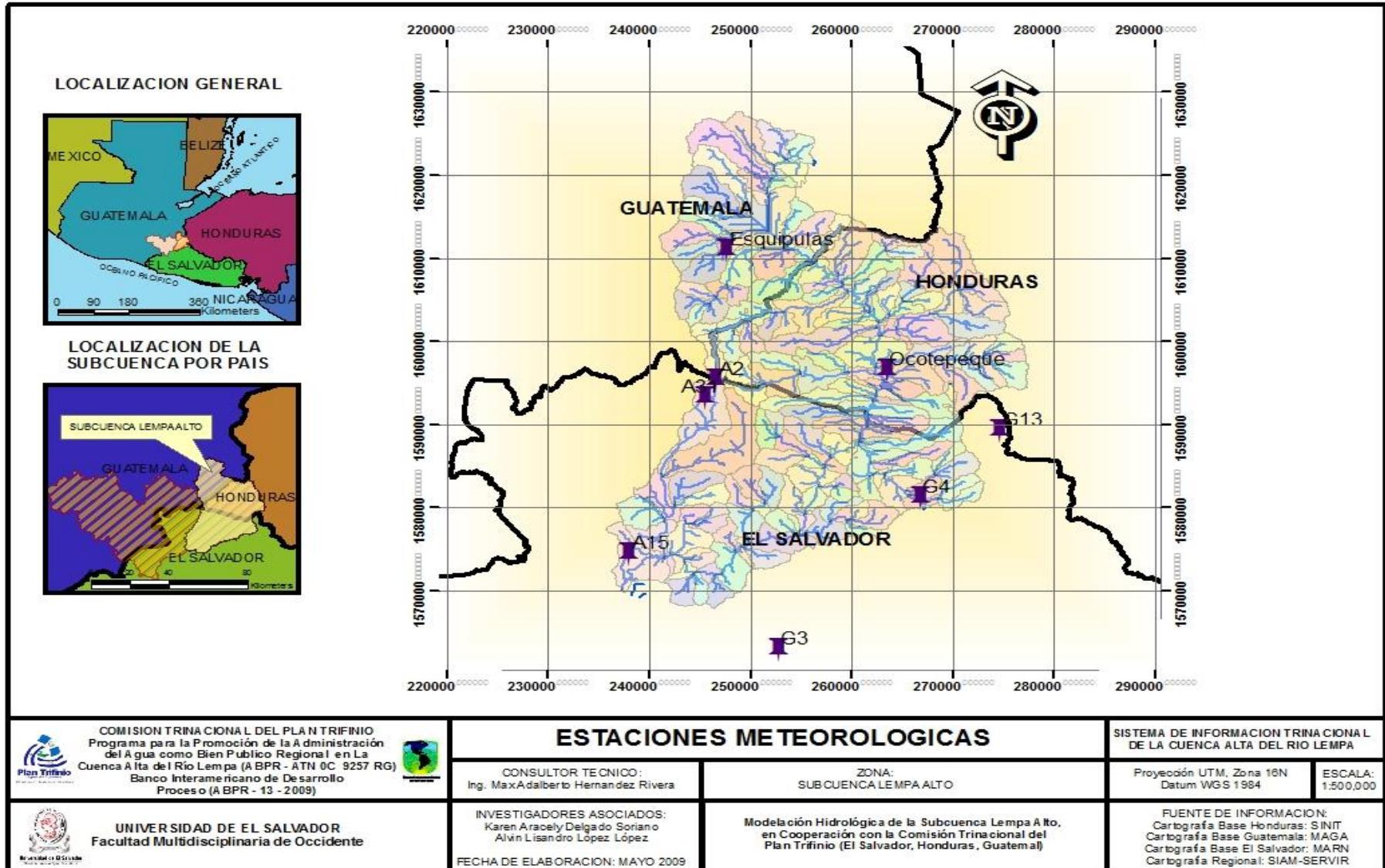
A. Introducción de Estaciones Meteorológicas en ArcMap

Para el empleo de los datos de precipitación es necesario darles un tratamiento previo, para poder ser agregados en ArcMap, por lo que es necesario primeramente identificar las estaciones meteorológicas (Ver mapa 10) que intervienen en el análisis de la Sub-cuenca en estudio, las estaciones que intervienen en el análisis de la cuenca se encuentra en la Tabla 4.1.

N°	ESTACIÓN	PAÍS	COORDENADAS		ELEVACIÓN
			X	Y	
1	QUEZADA	GUATEMALA	172,238.67	1,579,261.92	980
2	ASUNCIÓN MITA	GUATEMALA	207,803.19	1,586,737.95	478
3	ESQUIPULAS	GUATEMALA	247,675.32	1,610,946.03	982
4	POTRERO CARRILLO	GUATEMALA	184,299.20	1,633,931.84	1770
5	CEIBITA	GUATEMALA	189,967.53	1,604,253.21	960
6	OCOTEPEQUE	HONDURAS	263,446.17	1,596,456.78	786
7	A2	EL SALVADOR	246,828.83	1,595,958.38	2244
8	A12	EL SALVADOR	222,525.82	1,546,592.88	718
9	A15	EL SALVADOR	237,715.20	1,573,933.77	511
10	A27	EL SALVADOR	213,159.03	1,562,794.89	728

11	A31	EL SALVADOR	245,563.05	1,593,679.97	1855
12	G3	EL SALVADOR	252,398.27	1,563,301.20	321
13	G4	EL SALVADOR	266,828.18	1,581,781.62	996
14	G13	EL SALVADOR	274,929.19	1,589,123.16	1960

TABLA 4.1: TABLA DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS CON SU RESPECTIVA GEO-REFERENCIAS.



MAPA 10: ESTACIONES METEOROLOGICAS

B. Generación de Mapas de Precipitación

Para la generación de los mapas de precipitación fue necesario seguir la siguiente metodología:

- ✓ Unión de los datos de precipitación con la tabla de las estaciones meteorológicas.
- ✓ Generación de Superficie de precipitación: para la generación de la superficie de precipitación se utilizó como método de interpolación la media ponderada por el inverso de la distancia (IDW).
- ✓ Extracción de los mapas de precipitación (Ver anexo 1).

4.6.2 Generación de Mapas de Evapotranspiración

Para la obtención de los mapas de de evapotranspiración se realizó la siguiente metodología, la cual incluye la generación de los mapas de evapotranspiración potencial y evapotranspiración real:

1. Tratamiento de los datos de temperaturas

Los datos proporcionados por el plan trifinio, los cuales son necesarios para la obtención de la evapotranspiración potencial, dicho tratamiento consistió en obtener el promedio de las temperaturas diaria media, temperatura diaria máxima y la temperatura diaria mínima, para las diferentes estaciones la cuales se encuentran especificadas en la tabla 4.2.

TEMPARATURAS MINIMAS PROMEDIO														
PAIS	ESTACION	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ANUAL
EL SALVADOR														
	A2	8.1	7.7	9.3	10.1	11.2	11.4	10.8	11.0	11.1	10.5	9.4	8.6	9.9
	A12	15.8	16.2	17.1	18.3	18.9	18.9	18.6	18.7	18.7	18.5	17.5	16.3	17.8
	A15	18.1	18.9	20.5	21.4	21.3	20.6	19.9	19.9	20.2	19.8	18.8	18.3	19.8
	A27	18.1	18.0	18.8	20.2	20.4	20.1	20.0	19.8	19.7	19.8	19.2	18.4	19.4
	A31	10.7	10.5	11.7	12.9	13.6	13.7	13.7	13.5	13.3	12.9	12.2	10.9	12.5
	G3	17.3	18.8	20.3	21.6	22.2	21.7	20.8	20.8	21.1	20.4	18.7	17.6	20.1
	G4	14.4	14.8	16.0	16.9	17.7	17.6	17.1	17.2	17.4	16.9	16.0	15.2	16.4
	G13	10.3	11.0	11.9	12.6	13.8	13.8	13.4	13.4	13.5	13.0	12.0	11.1	12.5
HONDURAS														
	Ocoatepeque	14.99	15.83	16.94	18.37	18.90	18.99	17.83	18.18	17.78	17.74	16.35	15.29	17.27
GUATEMALA														
	QUESADA	11	15.6	16.5	16.7	17.2	17.1	16.9	16.9	16.6	15.8	14.6	13.9	17.6
	ASUNCIONMITA	19	20.1	21.2	22.6	22.8	22.4	22.2	22.3	22.0	21.6	20.4	18.6	21.7
	CEIBITA	4	12.6	14.2	4.9	17.9	18.1	17.7	17.2	6.3	6.4	5.5	4.6	14.2
	Potre-Carrillo	7.38	6.81	7.34	8.83	4.28	13.25	5.33	13.19	5.29	5.06	3.52	3.31	8.20
	Esquipulas	15.64	15.83	16.54	17.79	18.72	18.77	18.77	18.77	18.44	18.28	17.08	15.92	17.55
TEMPARATURAS MAXIMAS PROMEDIO														
PAIS	ESTACION	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ANUAL
EL SALVADOR														
	A2	15.6	16.3	18.9	18.9	19.4	18.3	18.4	18.5	18.0	16.7	15.7	15.4	17.5
	A12	30.3	31.4	33.2	33.2	31.8	30.1	30.5	30.5	29.6	30.0	29.6	29.7	30.8
	A15	32.6	33.7	35.3	35.5	34.2	32.2	32.4	32.5	31.8	31.7	32.2	32.4	33.0
	A27	30.9	31.8	34.2	34.6	33.2	31.4	31.4	31.6	30.6	30.8	30.6	30.1	31.8
	A31	19.6	20.4	22.4	22.7	22.0	21.3	21.6	21.7	20.9	20.3	19.7	19.3	21.0
	G3	33.6	34.7	36.3	36.4	34.6	32.5	32.8	32.7	32.0	32.5	32.9	33.2	33.7
	G4	26.6	27.9	29.6	29.6	28.2	26.7	27.6	27.4	26.5	26.3	26.2	26.0	27.4
	G13	19.8	21.1	23.1	23.2	23.0	21.9	22.3	22.3	21.5	20.8	20.1	20.0	21.6
HONDURAS														
	Ocoatepeque	27.72	29.37	31.10	31.77	30.58	29.43	28.71	29.28	27.71	28.16	27.41	27.09	29.03
GUATEMALA														
	QUESADA	30.0	30.9	33.3	34.3	32.7	31.8	31.9	31.9	31.3	31.0	27.0	27.2	32.4
	ASUNCIONMITA	35.6	37.6	38.9	39.8	37.9	35.2	36.3	36.2	35.7	35.1	34.9	34.7	36.7
	CEIBITA	30.2	31.1	31.0	34.2	31.0	29.0	29.0	29.0	30.3	29.7	11.1	10.2	29.7
	Potre-Carrillo	19.92	21.39	23.10	24.34	25.29	22.39	23.17	21.82	23.35	23.20	7.17	8.04	23.56
	Esquipulas	25.39	27.59	29.57	30.81	30.25	28.98	28.26	28.63	28.36	26.91	24.80	24.26	27.82
TEMPARATURAS MEDIAS PROMEDIO														
PAIS	ESTACION	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ANUAL
EL SALVADOR														
	A2	11.0	11.1	13.1	13.4	14.2	13.8	13.5	13.6	13.5	12.8	11.9	11.3	12.8
	A12	22.3	23.2	24.4	25.2	24.9	23.8	23.9	23.8	23.2	23.3	22.6	22.2	23.6
	A15	24.7	25.7	27.1	27.7	27.0	25.3	25.1	25.1	24.8	24.9	25.0	24.8	25.6
	A27	22.7	23.2	24.7	25.5	25.1	24.0	24.0	24.0	23.4	23.5	23.3	22.6	23.8
	A31	14.5	14.9	16.6	17.3	17.3	16.8	16.9	16.8	16.3	16.0	15.3	14.5	16.1
	G3	25.5	26.5	27.9	28.6	27.8	26.1	25.8	25.7	25.4	25.5	25.4	25.2	26.3
	G4	19.4	20.2	21.6	22.5	22.3	21.3	21.5	21.3	20.9	20.7	20.2	19.6	21.0
	G13	13.5	14.2	15.6	16.4	16.9	16.4	16.1	16.0	15.6	15.1	14.5	13.9	15.4
HONDURAS														
	Ocoatepeque	22.49	24.02	25.33	26.48	25.70	24.84	24.67	24.81	24.25	23.83	23.19	23.02	24.39
GUATEMALA														
	QUESADA	23.9	19.8	20.5	23.0	22.8	22.4	22.7	22.3	21.9	21.3	20.9	21.0	18.6
	ASUNCIONMITA	27.5	28.7	30.1	31.0	30.1	28.9	29.1	29.1	28.2	27.8	27.7	27.5	28.9
	CEIBITA	22.6	22.2	23.7	25.1	24.8	23.9	23.6	24.1	23.2	22.8	23.4	22.9	23.2
	Potre-Carrillo	14.34	15.51	16.43	18.21	19.71	18.42	18.99	17.89	19.04	17.99	15.93	15.83	18.04
	Esquipulas	20.17	21.49	22.59	23.94	23.84	23.06	22.86	22.90	22.66	22.14	20.47	19.78	22.16

TABLA 4.2: DATOS DE TEMPERATURAS EN ESTACIONES METEOROLOGICAS

2. Obtención de la evapotranspiración potencial

Para cada estación en análisis el cálculo de la evapotranspiración potencial se efectuó utilizando la Fórmula de Hargreaves Simplificada, al obtener los valores de evapotranspiración se compararon con los datos de evapotranspiración calculados en un estudio proporcionado por el Plan Trifinio y se optó por utilizar estos ya que los datos de evapotranspiración para las estaciones meteorológicas de El Salvador poseían una diferencia considerable, luego de este análisis se procedió a generar regresiones lineales en Excel, para obtener ecuaciones con curvas de tendencia que más se ajustaran a los datos (Ver tabla 4.3).

ECUACIONES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL MENSUAL ETO-ELEV		
MES	ECUACIÓN	R ²
ENERO	$Y = 3E-08X^3 - 7E-05X^2 - 0.0089X + 166.77$	0.913
FEBRERO	$Y = 2E-08X^3 - 4E-05X^2 - 0.0398X + 179.81$	0.9464
MARZO	$Y = 2E-05X^2 - 0.1099X + 242.12$	0.9621
ABRIL	$Y = 2E-05X^2 - 0.0933X + 241.29$	0.949
MAYO	$Y = 225.18E^{-3E-04X}$	0.9224
JUNIO	$Y = 193.12E^{-3E-04X}$	0.8953
JULIO	$Y = 199.94E^{-3E-04X}$	0.8841
AGOSTO	$Y = 200.17E^{-3E-04X}$	0.8988
SEPTIEMBRE	$Y = 176.66E^{-3E-04X}$	0.9026
OCTUBRE	$Y = 173.18E^{-3E-04X}$	0.9503
NOVIEMBRE	$Y = 1534.7X^{-0.382}$	0.9211
DICIEMBRE	$Y = 3E-05X^2 - 0.1119X + 189.32$	0.9212

TABLA 4.3: ECUACIONES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL MENSUAL.

3. Generación de los mapas de Evapotranspiración Potencial Mensual

Al efectuar la generación de los mapas se utilizaron las ecuaciones mostradas en la tabla #5, las cuales están en función de la elevación, estas fórmulas fueron operadas con el Modelo de Elevación Digital (DEM), dando lugar a un mapa de evapotranspiración potencial distribuido en toda la cuenca (Ver anexo 2).

4. Generación de los mapas de Evapotranspiración Real Mensual

Para la generación de los mapas de evapotranspiración real mensual (Ver anexo 3), se utilizó la ecuación $E_{tr}(\text{Evapotranspiración real}) = K \cdot E_{tp}$ donde la variable a utilizar son los mapas de evapotranspiración potencial mensual, y la constante "K" es el mapa de coeficientes de cultivo el cual está en formato grid, los diferentes coeficientes de cultivo de la Sub-cuenca Lempa Alto se muestran en la tabla 4.4.

COEFICIENTES DE CULTIVO PARA SUBCUENCA LEMPA ALTO			
USO	CC	USO	CC
AEROPUERTOS	0.20	PLANTACIONES DE BOSQUE MONOESPECÍFICOS	0.95
ÁRBOLES FRUTALES	0.80	PLAYAS, DUNAS Y ARENALES	0.20
BOSQUE CADUCIFOLEOS	0.95	PRADERAS PANTANOSAS	0.50
BOSQUE DE CONÍFERAS	0.95	RÍOS	0.50
BOSQUE MIXTO	0.95	ROQUEDAS Y LAVAS	0.20
BOSQUE SEMI CADUCIFOLIOS	0.95	TEJIDO URBANO CONTINUO	0.20
BOSQUES SIEMPRE VERDES	0.95	TEJIDO URBANO DISCONTINUO	0.30
CAFÉ	0.95	TEJIDOS URBANO PRECARIO	0.30
CANA DE AZÚCAR	1.25	TERRENOS PRINCIPALMENTE AGRÍCOLAS PERO C	1.15
ESPACIOS CON VEGETACIÓN ESCASA	0.50	VEGETACIÓN ARBUSTIVA BAJAS	0.30

GRANOS BÁSICOS	1.15	VEGETACIÓN DE TRANSICIÓN	0.30
LAGOS, LAGUNAS Y LAGUNETAS	0.50	VEGETACIÓN ESCLERÓFILA O ESPINOSO	0.30
MOSAICO DE CULTIVO Y PASTOS	1.10	VEGETACIÓN HERBÁCEA NATURAL	0.30
PASTOS CULTIVADOS	1.00	ZONAS DE EXTRACCIÓN MINERA	0.20
PASTOS NATURALES	0.75	ZONAS EN CONSTRUCCIÓN	0.20
PERÍMETRO AGRÍCOLA	0.50	ZONAS INDUSTRIALES O COMERCIALES	0.20

TABLA 4.4: COEFICIENTES DE CULTIVO DE LA SUBCUENCA LEMPA ALTO.

4.6.3 Generación de Mapas de Balance Hídrico Climático (BHC)

Al utilizar un SIG, el balance del agua se modela tomando en cuenta la distribución espacial de la precipitación, evapotranspiración y las características del suelo; en donde cada píxel puede ser tratado como balance hídrico individual. Los balances hídricos calculados para la Sub-cuenca Lempa Alto fueron mensuales (ver anexo 4), todos los mapas del balance hídrico climático que poseían déficit (valores negativos) fueron reclasificados de tal manera que todos estos mapas solo mostrarán los valores de balance hídrico climático mayores a cero.

La expresión matemática del balance hídrico es $BHC = Entradas - Salidas$ donde la variable entrada consiste en la distribución espacial de la precipitación mensual y la variable de salida es ocupada por la distribución espacial de la evapotranspiración real, obteniendo como resultado mapas de distribuciones espaciales del balance hídrico climático.

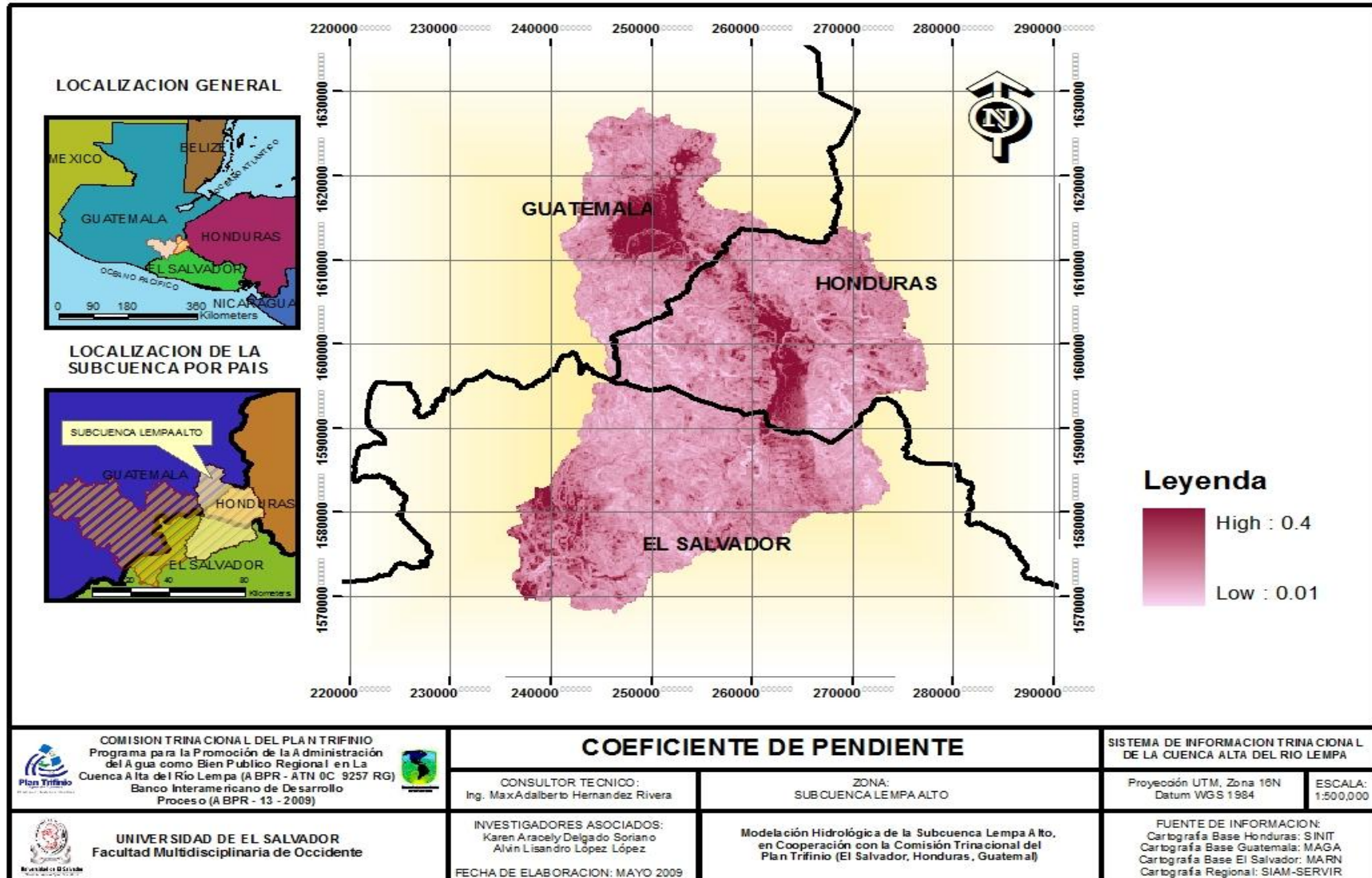
4.6.4 Generación Recarga Acuífera Subterránea (RAS)

Para el cálculo de la Recarga Acuífera Subterránea es necesario utilizar el Balance Hídrico Climático el cual ya fue calculado anteriormente y luego un coeficiente de infiltración "C", para el cálculo del coeficiente el cual es un valor relativo sin dimensión, se utilizo la ecuación $C = (k_p + k_v + k_{fc})$, por lo que se realizo la siguiente metodología:

- a) Obtención del coeficiente K_p (fracción que infiltra por efecto de la pendiente). Para la obtención de este coeficiente se utilizo un mapa de pendiente de la zona este mapa se clasifico en 7 rangos de pendientes de acuerdo a la tabla 4.5, luego de obtener esta clasificación del mapa de pendientes se procedió a la elaboración del mapa del coeficiente k_p distribuido (Ver mapa 11).

TABLA DE COEFICIENTE K_p	
RANGO DE PENDIENTE	COEFICIENTE
0-5%	0.4
5-10%	0.2
10-15%	0.15
15-30%	0.1
30-50%	0.07
50-70%	0.05
>70%	0.01

TABLA 4.5: COEFICIENTE POR PENDIENTE K_p .

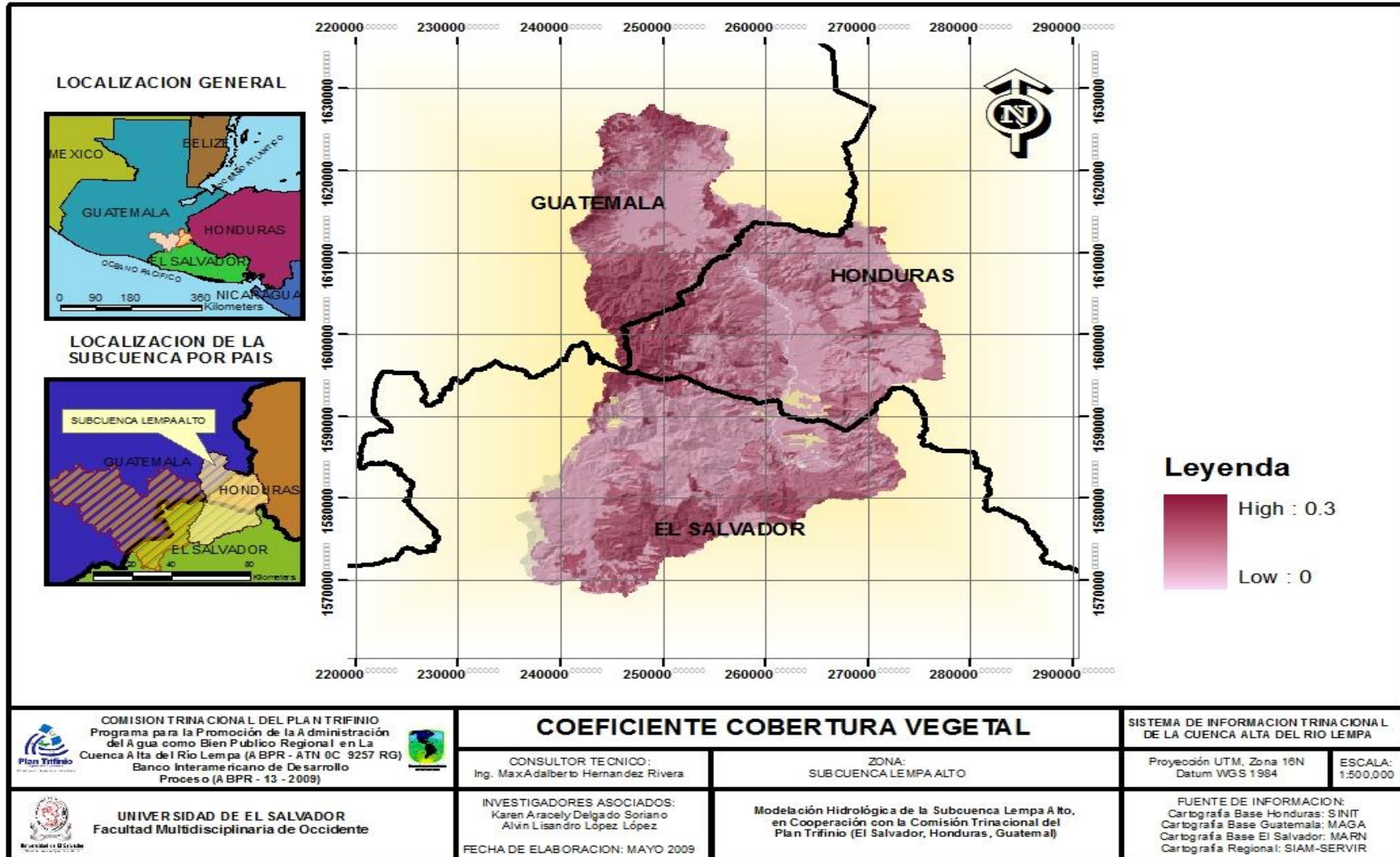


MAPA 11: COEFICIENTE DE PENDIENTE

b) Obtención del coeficiente kv (fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal): Para la obtención del este coeficiente se utilizo un mapa de cobertura vegetal (Ver mapa 12) proporcionado por “El Trifinio” el cual tiene 33 tipos de cobertura de suelo, se muestran en la tabla 4.6.

USO	KV	USO	KV
AEROPUERTOS	0.18	PERÍMETRO ACUÍCOLA	0
ÁRBOLES FRUTALES	0.1	PLANTACIONES DE BOSQUE MONOESPECIFICOS	0.18
BOSQUE CADUCIFOLIOS	0.2	PLAYAS, DUNAS Y ARENALES	0.07
BOSQUE DE CONÍFERAS	0.15	PRADERAS PANTANOSAS	0.1
BOSQUE MIXTO	0.2	RÍOS	0
BOSQUE SEMI CADUCIFOLIOS	0.2	ROQUEDAS Y LAVAS	0.2
BOSQUES SIEMPRE VERDES	0.2	TEJIDO URBANO CONTINUO	0.18
CAFÉ	0.19	TEJIDO URBANO DISCONTINUO	0.1
CANA DE AZÚCAR	0.1	TEJIDOS URBANO PRECARIO	0.1
ESPACIOS CON VEGETACIÓN ESCASA	0.18	TERRENOS PRINCIPALMENTE AGRÍCOLAS PERO C	0.1
GRANOS BÁSICOS	0.1	VEGETACIÓN ARBUSTIVA BAJAS	0.18
LAGOS, LAGUNAS Y LAGUNETAS	0	VEGETACIÓN DE TRANSICIÓN	0.18
MOSAICO DE CULTIVO Y PASTOS	0.1	VEGETACIÓN ESCLERÓFILA O ESPINOSO	0.3
PASTOS CULTIVADOS	0.1	VEGETACIÓN HERBÁCEA NATURAL	0.18
PASTOS NATURALES	0.1	ZONAS DE EXTRACCIÓN MINERA	0.18
ZONAS INDUSTRIALES O COMERCIALES	0.18	ZONAS EN CONSTRUCCIÓN	0.18

TABLA 4.6: COBERTURA VEGETAL



MAPA 12: COBERTURA VEGETAL

- c) Obtención del coeficiente de kfc (fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal): se generó este coeficiente a partir de la combinación de diversos factores, para obtener al final lo que es el coeficiente de textura de suelo KPt, simbolizado de esta manera por su relación con la pendiente (Ver tabla 4.7).

PENDIENTE	KP	KFC	KP2	KFC2	KPT
0-5%	0.4	0.15	0.4	0.15	0.55
5-10%	0.2	0.15	0.2	0.15	0.35
10%-15	0.15	0.12	0.15	0.12	0.27
15-30%	0.1	0.1	0.075	0.075	0.15
30-50%	0.07	0.1	0.0525	0.075	0.1275
50-70	0.05	0.1	0.0375	0.075	0.1125
>70%	0.01	0.1	0.0075	0.075	0.0825

TABLA 4.7: TEXTURA DE SUELO KPt

- d) Luego se obtiene el coeficiente de infiltración mediante la ecuación 3, y por último a este coeficiente se le resta el valor de 1, obteniendo así el valor de coeficiente de escorrentía.

4.6.5 Generación de Mapas Escorrentía

Los mapas de escorrentía espacialmente distribuidos, se obtuvieron utilizando un coeficiente de escorrentía multiplicado por el mapa del Balance Hídrico Climático, los mapas de escorrentía se generaron para cada mes del año. Para la obtención del

coeficiente de escorrentía se obtuvo un mapa de coeficiente de escorrentía de la Sub-cuenca Lempa Alto, por lo que se uso la siguiente ecuación, despejando de esta la variable “ C_{esco} ”:

$$C_{ras} + C_{esco} = 1$$

Donde:

C_{ras} : Coeficiente de infiltración

C_{esco} : Coeficiente de escorrentía

Luego de obtener los mapas de escorrentía fue necesario pasar la altura de agua de mm a m^3 , esto con el objetivo de obtener posteriormente los mapas de caudales acumulados. Para realizar la conversión se tomo en cuenta que el tamaño de cada celda es de 10x10 mts y que un metro tiene 1000 mm (ver anexo 5).

4.6.6 Generación de Mapas de Caudales Mensuales

Para llevar a cabo la generación de los mapas de caudales mensuales para la Sub-cuenca Lempa Alto, es necesario obtener un factor de calibración el cual es un numero adimensional, esto con el objetivo de obtener caudales estimados los más cercanos posibles a la realidad.

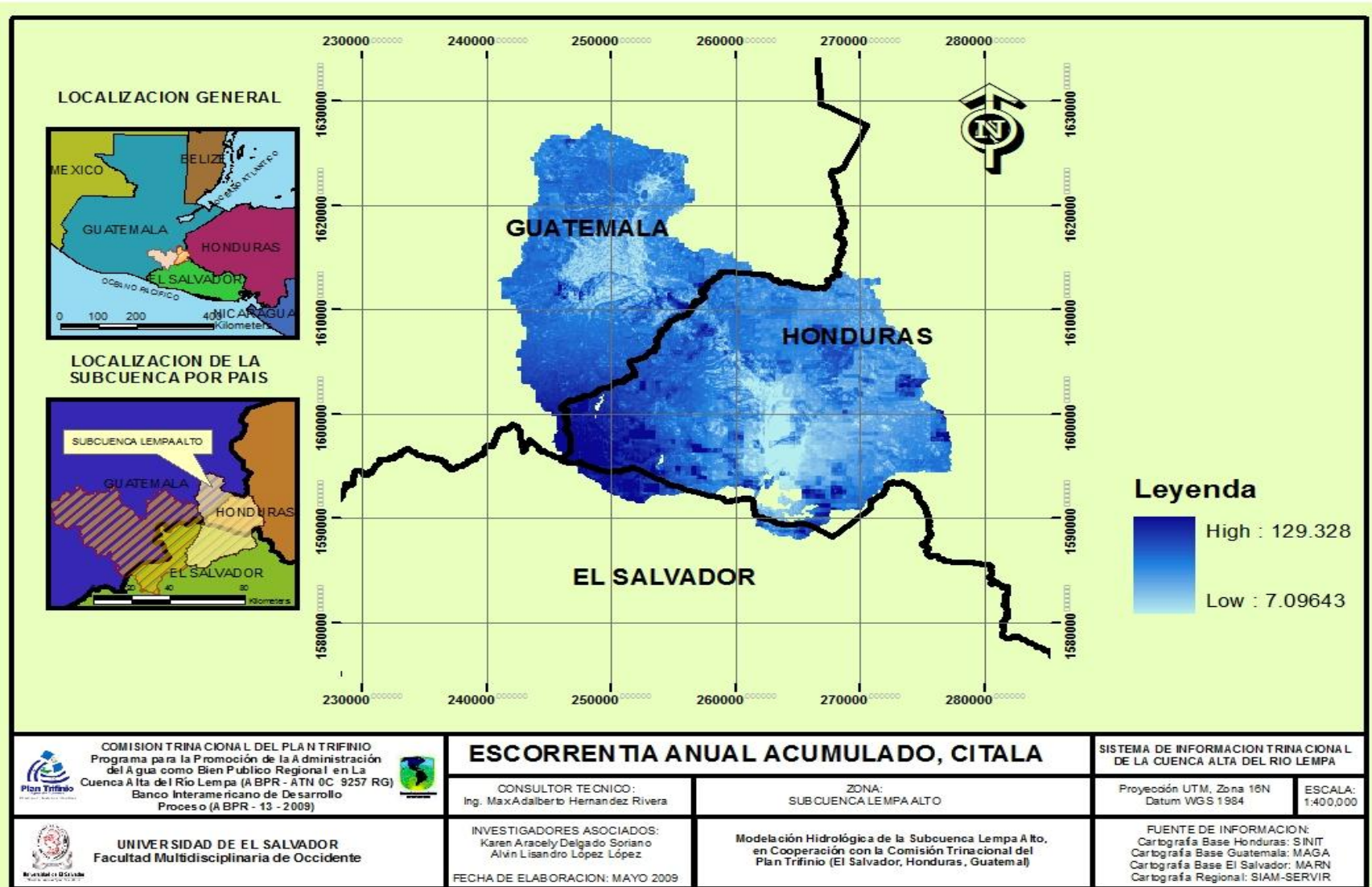
Debido a la carencia de una estación y registro histórico de caudales, en el punto de desagüe de la Sub-cuenca Lempa Alto, la calibración se ejecuto para la Micro-cuenca conformada por la Estación Telemétrica en Citalá, por lo que se procedió a substraer de los mapas ya realizados toda la información necesaria para llevar a cabo la obtención de los mapas de caudal, a continuación se muestra la metodología que se llevo a cabo:

a) Obtención de mapa de caudal acumulado anual

Para la obtención del mapa de caudal acumulado se utilizó el mapa de escorrentía anual acumulado (Ver mapa 13), de este mapa se cortó la información necesaria utilizando el parte agua conformado por la micro-cuenca de la estación del El Citalá, posteriormente se generó el mapa de flujo acumulado.

El caudal acumulado anual que se obtuvo es de 418.582 millones de $m^3/año$, al compararse este valor con el valor de 633.97 millones de $m^3/año$ de la estación de El Citalá, existe una diferencia de 195.388 millones de $m^3/año$, esta diferencia se corroboró con el mapa de recarga acuífera subterránea conformada por la micro-cuenca para la Estación de El Citalá el valor de la recarga acuífera subterránea es de 225.48 millones de $m^3/año$, este valor es bastante cercano a la diferencia obtenida con los valores de los caudales acumulados anuales. De acuerdo al estudio hidrogeológico realizado por ANDA la zona en estudio posee una zona geológica tal que evita la infiltración del agua hacia los mantos acuíferos por lo que se produce en la zona un flujo hortoniano, donde el suelo almacena el agua infiltrada y luego la libera lentamente como flujo sub-superficial hortoniano para entrar en la corriente como flujo base durante los periodos secos.

Debido a este fenómeno para la obtención del mapa de caudal acumulado se trabajó con el balance hídrico climático anual acumulado sin aplicarle ningún coeficiente de escorrentía, con el nuevo mapa de flujo de acumulado se obtuvo el siguiente valor de caudal al nivel de la Estación Telemétrica de El Citalá $19.02 m^3/s$, comparado con el de el registrado de la estación que es de $20.029 m^3/s$ la diferencia es de $1.01 m^3/s$ la cual es aceptable para el estudio realizado.



MAPA 13: ESCORRENTIA ANUAL ACUMULADA

b) Obtención de mapa de caudal acumulado mensual

Luego de la obtención del mapa de caudal acumulado anual se procedió a obtener el valor respectivo en porcentaje del caudal anual por mes como puede verse en tabla # 8, este porcentaje se multiplico por el mapa de balance hídrico anual acumulado y también se hizo la respectiva conversión de este balance a m^3 , esto se hizo para todos los meses del año y luego con este mapa se realizaron los mapas de caudales acumulados obteniéndose como resultado los caudales estimados estos pueden ser vistos en la tabla 4.8.

REGISTRO DE CAUDALES DE LA ESTACIÓN TELEMÉTRICA CÍTALA													
VARIABLE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
CAUDAL ESP.(LT/SEG/KM2)	4.61	3.13	2.16	2.87	5.97	41.64	45.53	40.37	72.88	49.25	12.26	7.84	24.04
CAUDAL PROM.(MT3/SEG)	3.840	2.610	1.800	2.390	4.970	34.690	37.930	33.630	60.720	41.030	10.210	6.530	20.029
VOL (MILLONES MT3)	10.29	6.54	4.82	6.19	13.31	89.92	101.59	90.07	157.39	109.89	26.46	17.49	633.97
PORCENTAJE DE CAUDAL ANUAL TOTAL	1.62%	1.03%	0.76%	0.98%	2.10%	14.18%	16.02%	14.21%	24.83%	17.33%	4.17%	2.76%	100.00%
CAUDAL ESTIMADO (MT3/SEG)	3.63	2.53	1.70	2.27	4.70	32.82	35.88	31.83	57.46	38.81	9.65	6.18	19.02
CAUDAL PROM-CAUDL ESTIMAD (MT3/SEG)	0.21	0.08	0.10	0.12	0.27	1.87	2.05	1.80	3.26	2.22	0.56	0.35	1.01
FACTOR DE CALIBRACIÓN	1.06	1.03	1.06	1.05	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.05
DÍAS PROMEDIOS POR MES	31.0	28.3	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	365.3

TABLA 4.8: REGISTRO DE CAUDALES DE LA ESTACIÓN TELEMÉTRICA CÍTALA

c) Obtención de factor promedio de calibración

Para la obtención del factor de calibración, se calculo, dividiendo el caudal medio mensual registrado con el caudal medio mensual estimado para ver estos valor observar la tabla 4.8, de estos valores se obtuvo el promedio dando un valor de 1.05, este valor se tomara como el factor de calibración para toda la Sub-cuenca Lempa Alto ya que para esta no se cuenta con un registro histórico de caudales a la altura del punto de desagüe en el municipio de Masahuat. Al finalizar el cálculo del factor de calibración promedio y el porcentaje de caudal anual total se procedió a multiplicar estos factores por el mapa de balance hídrico climático anual acumulado para toda la

Sub-cuenca Lempa Alto y este mapa de balance hídrico climático mensual calibrado se transformo de mm de altura de agua a m^3 , como paso final se elaboraron los mapas de caudales acumulados mensuales calibrados para toda la Sub-cuenca Lempa Alto (Ver anexo 6).

4.7 Generación de ecuación que rige el comportamiento hidrológico de la subcuenca Lempa Alto.

Las formulas elaboradas se realizaron para cada uno de los meses que conforman el año, tomando en cuenta 5 variables:

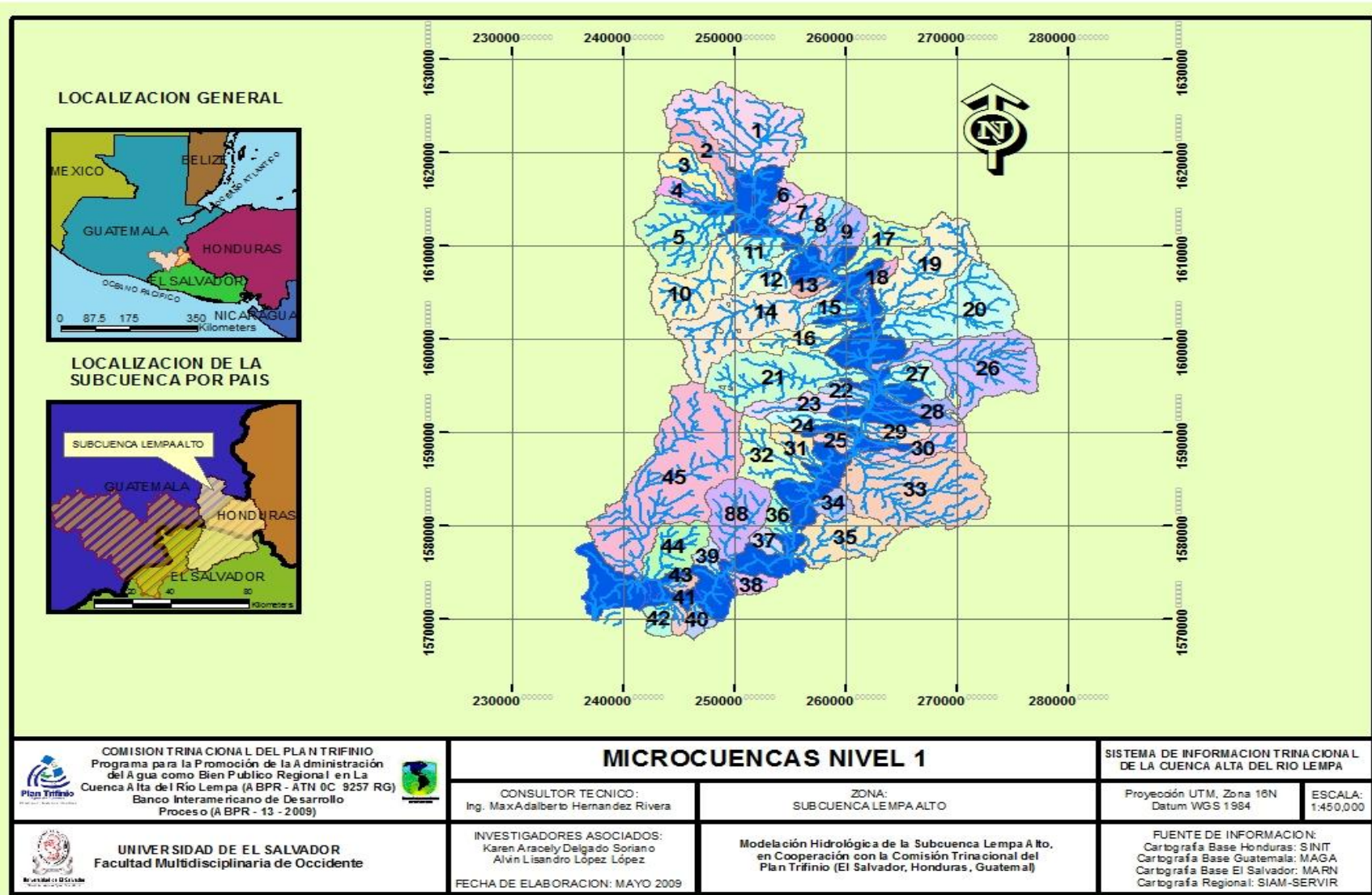
- Porcentaje de Área boscosa,
- Área de drenaje,
- Precipitación media

Para la elaboración de cada una de las formulas por mes se procedió de la siguiente manera:

- A. Como primer paso se comenzó por numerar las microcuencas, iniciando con las que se encontraba colindantes al cauce principal o una intercuenca, colocándose el nivel 1 (Ver Mapa 14), y de esta manera se numeraron las

microcuencas tributarias a todos los niveles 1, obteniéndose microcuencas hasta el nivel 5. Dejándose las intercuentas independientes con números correlativos.

- B. Todas las microcuencas con niveles iguales se unieron, para minimizar el análisis de las variables haciendo uso de la herramienta Merge.
- C. Se procede a relacionar las microcuencas del nivel 1 con las intercuentas y con ellas mismas, con el fin de acumular todos los atributos de cada una de ellas.
- D. Luego se procedió a realizar tablas de zonas estadísticas entre las microcuencas y las variables precipitación media y escorrentía mensual. Luego se unieron los resultados obtenidos de estas tablas con la tabla correspondiente a los atributos de las microcuencas.
- E. Para la obtención de la variable porcentaje de área boscosa se procedió de la siguiente manera:
- Selección de todos los tipos de bosque de la data Cobertura de Suelo haciendo uso de la herramienta Selec by Attribute.
 - Posteriormente de seleccionados todas las áreas de bosque se exporto solo las áreas de bosque ya seleccionadas, luego de esto se realizo una intersección entre la data de las microcuencas y la data de el bosque para obtener las aéreas de bosque por microcuenca.
 - Como último paso se obtuvo una suma de las diferentes áreas de bosque que poseían cada microcuenca para obtener una sola área de bosque, para obtener el porcentaje de area de bosque se realizo en Excel debido a que este porcentaje tiene que ser acumulativo con el área de drenaje respectivamente.



MAPA 14: MICROCUENCAS NIVEL 1

- F. Luego se exporto a Excel la tabla de los atributos de las microcuencas para proceder a la elaboración de una tabla dinámica, para poder acumular los valores de los atributos. Para la obtener la precipitación media se dividió la sumatoria de la precipitación con el numero de celda acumuladas para cada microcuenca e intercuenca, con esto se obtiene una precipitación media ponderada para todas las microcuencas.
- G. Para la obtención del porcentaje de área boscosa se obtuvo el cociente del área boscosa con el área de drenaje acumulado para cada microcuenca e intercuenca.
- H. Para la obtención de la ecuación que rige el comportamiento hidrológico de la Subcuenca Lempa Alto se realizo análisis de multiregresion lineal en Microsoft Excel (Ver anexo 7), primeramente se realizaron diferentes pruebas para obtener los mejores ajustes para no obtener ningún valor negativo y obtener también caudales que se ajustaran los más posible al caudal calculado con el modelo hidrológico Determinísticos espacialmente distribuido, luego de realizar las pruebas con las variables se utilizo el intercepto igual a cero para poder ajustar la línea de tendencia para que esta diera comienzo en el origen y con esto se evitaron todos los valores negativo, también se observo que en algunos meses la multiregresion se ajustaba mas utilizando las variables independientes y también el producto de la precipitación con el área de drenaje, este producto se llevo a cabo ya que en algunas microcuencas no existía una linealidad entre el caudal y el área de drenaje, ya que el caudal es variado considerablemente por los altos valores de precipitación en la parte alta de la microcuenca Lempa Alto. Este análisis se realizo para los doce meses de año y para el año, obteniéndose valores de confianza (R^2) de 0.99.

A continuación se muestran las ecuaciones que rigen el comportamiento hidrológico para los diferentes meses de año y para el año respectivamente.

1) Enero:

FORMULA ENERO
$Q=0.00057995*PREC-0.00395094*%AB+5.0143e-3*AD$

2) Febrero:

FORMULA FEBRERO
$Q=0.00041545*PREC-0.00097988*%AB+3.4923e-3*AD$

3) Marzo:

FORMULA MARZO
$Q=0.00531102*%AB+1.1853e-4AD*PREC$

4) Abril:

FORMULA ABRIL
$Q=0.00540093*%AB+5.7365e-5AD*PREC$

5) Mayo:

FORMULA MAYO
$Q=0.01296872*%AB+3.7487e-5AD*PREC$

6) Junio:

FORMULA JUNIO

$$Q=0.07086686*\%AB+1.3466E-4A*PREC$$

7) Julio:

FORMULA JULIO

$$Q=-0.02967634*\%AB+0.0001975*AD*PREC$$

8) Agosto:

FORMULA AGOSTO

$$Q=0.0484911*\%AB+0.00016031*AD*PREC$$

9) Septiembre:

FORMULA SEPTIEMBRE

$$Q=-0.11658699*\%AB+0.00023712*AD*PREC$$

10) Octubre:

FORMULA OCTUBRE

$$Q=0.01418587*\%AB+0.0002948*AD*PREC$$

11) Noviembre:

FORMULA NOVIEMBRE
$Q=1.3461e-8*Prec-0.00582687*%AB+1.3461e-2AD$

12) Diciembre:

FORMULA DICIEMBRE
$Q=0.00027545*PREC+0.00505358*%AB+8.5441e-3AD$

13) Anual:

FORMULA ANUAL
$Q=0.00318888*%AB+1.61329265085619E-05*A*PREC$

Donde:

Q: Caudal diario medio mensual (m³/s)

AD: Área de Drenaje (km²)

%AB: % Área de Bosque (decimal)

PREC: Precipitación acumulada mensual (mm)

Nota: La descripción de las variables aplica para las 13 ecuaciones

4.8 Validación Del Modelo hidrológico en la sub-cuenca Lempa Alto

4.8.1 Validación Del Modelo Genérico Espacialmente Distribuido y Modelo Empírico

La validación del modelo consiste en verificar los caudales obtenidos en el modelo hidrológico Determinísticos espacialmente distribuido y el modelo hidrológico empírico con el registro de caudales proporcionados por el Plan Trifinio, la validación se llevo a cabo para la estación telemétrica de registro de caudales de Citalá, para la ejecución de la validación del modelo se utilizo la siguientes metodología:

1. Obtención de los partes agua conformados desde los puntos de ubicación de las estaciones de registro de caudales para las estaciones del el Citalá (Ver mapa 15).
2. Para la obtención de los partes aguas se utilizo el software Arcview 3.3, utilizando las extensiones Basin1 y Spatial Analyst, el desarrollo que se efectúo para la adquisición del parte aguas es el siguiente:
 - a) Introducción de los raster grid del FlowAccumulation, el FlowDirecction y el Modelo de Elevación Digital.
 - b) Elección de los raster grid FlowAccumulation, el FlowDirecction utilizando el botón Initiate.
 - c) Utilización del botón RainDropPath para la conformación del cauce del rio de tal manera que este pase por el punto de interés.
 - d) Conformación de la microcuenca haciendo uso del botón BasinDelineate.
 - e) Conversión de la microcuenca Basin a un archivo Shapefile para ellos se utilizo la herramienta Convert to Shapefile.

3. Obtención de los valores de la precipitación media, área boscosa, caudal acumulado en el punto de descarga, los valores de la precipitación media y el caudal acumulado se obtuvieron para los diferentes meses del año y el valor respectivo anual, para ello se utilizo el software de ArcMap, realizando zonal estatics con la cuenca de El Citalá, El Olopa, los grid de la precipitación y el grid de la Escorrentía en m^3/s .
4. Obtención de los caudales estimados con las ecuaciones mensuales y anual utilizando los datos obtenidos en ArcMap, para ver los resultados de los caudales estimados con las ecuaciones, los caudales del modelo espacialmente distribuido y los caudales registrados ver la tabla 4.9, en la grafica 4.1 se puede observas la distribución de los caudales para la estación de registro.

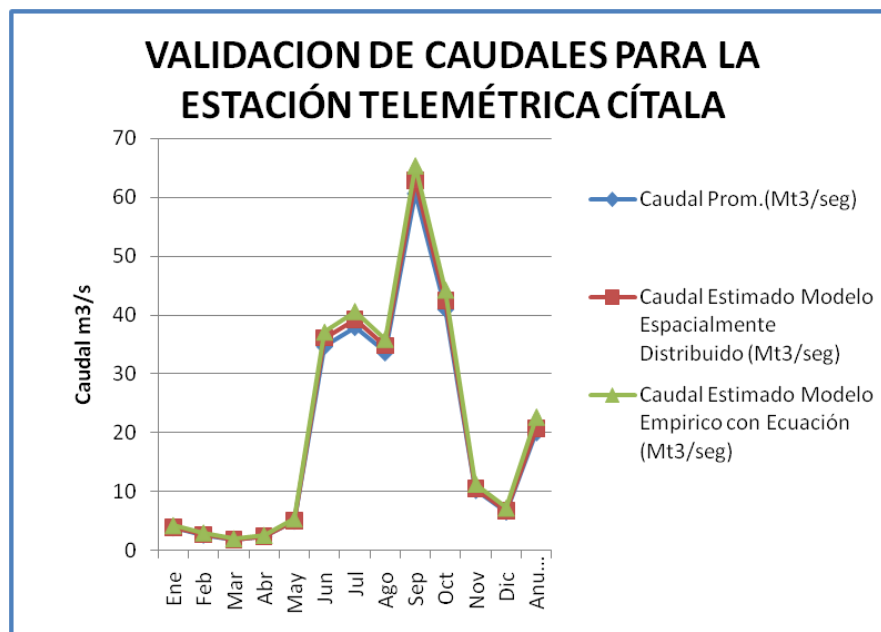
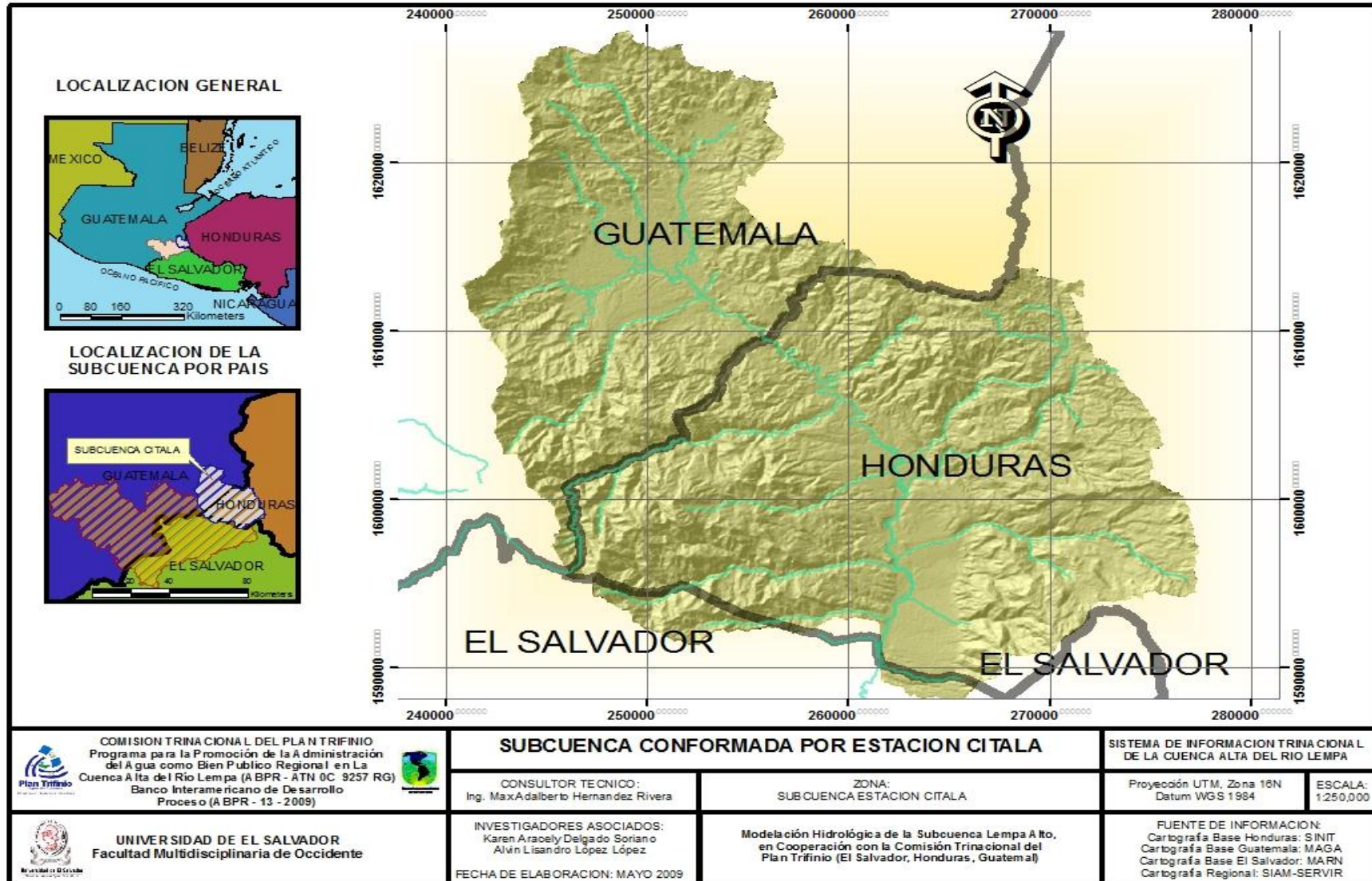


GRAFICO 4.1: VALIDACION DE CAUDALES DE LA ESTACIÓN TELEMÉTRICA CÍTALA

VALIDACION DE CAUDALES PARA LA ESTACIÓN TELEMÉTRICA CÍTALA													
VARIABLE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
CAUDAL PROM.(MT3/SEG) REGISTRADO ESTACION CITALA	3.84	2.61	1.8	2.39	4.97	34.69	37.93	33.63	60.72	41.03	10.21	6.53	20.03
CAUDAL ESTIMADO MODELO ESPACIALMENTE DISTRIBUIDO (MT3/SEG)	3.9736	2.7675	1.8642	2.4839	5.151	36.144	39.295	34.855	62.934	42.508	10.628	6.7698	20.832
DIFERENCIA MODELO ESPACIALMENTE DISTRIBUIDO CON CAUDAL PROM. REGISTRADO.	-0.1336	-0.1575	-0.0642	-0.0939	-0.181	-1.4537	-1.3645	-1.2248	-2.2141	-1.4777	-0.4176	-0.2398	-0.8033
CAUDAL ESTIMADO MODELO EMPIRICO CON ECUACIÓN (MT3/SEG)	4.19	2.92	1.92	2.50	5.29	37.07	40.59	35.86	65.37	44.22	11.22	7.13	22.63
AREA DE DRENAJE (KM ²)	833.97	833.97	833.97	833.97	833.97	833.97	833.97	833.97	833.97	833.97	833.97	833.97	833.97
%AREA BOScosa	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62
PRECIPITACION MEDIA (MM)	12.58	10.22	19.39	52.20	168.85	329.73	246.55	267.97	330.92	179.84	47.25	20.06	1681.84
DIFERENCIA MODELO EMPIRICO CON CAUDAL PROM. REGISTRADO.	-0.35	-0.31	-0.12	-0.11	-0.32	-2.38	-2.66	-2.23	-4.65	-3.19	-1.01	-0.60	-2.60

TABLA 4.9: VALIDACION DE CAUDALES DE LA ESTACIÓN TELEMÉTRICA CÍTALA



MAPA 15: SUBCUENCA CITALA

4.8.2 Toma de Caudal en Campo en El Rio Gramal

El Rio Gramal situado en el departamento de Chalatenango, Municipio La Palma con coordenadas N 14°18'15.5', O 89°9'38.5', se le realizo el aforo por el método manual de El Flotador, siguiendo la siguiente metodología:

Primer Paso: Selección del lugar adecuado. Se selección en el rio un tramo, al cual se le realizo todo el procedimiento necesario para dejar el tramo de manera uniforme, dejando que el agua fluya libremente, sin turbulencias ni impedimentos.



IMAGEN 4.1: SELECCIÓN DEL LUGAR Y CONFORMACIÓN DE CAUCE

Segundo Paso: Medición de Velocidad. Se ubicaron dos puntos un punto de entrada y uno de salida, con una distancia de 8 metros entre ellos. Se procedió a la toma de velocidades con el cronometro y el flotador.



IMAGEN 4.2: TOMA DE VELOCIDAD

Se tomaron 5 tiempos, a los cuales se les realizo la media para obtener un tiempo medio, obteniendo los siguientes resultados:

- $T_1 = 5$ segundos
- $T_2 = 5$ segundos
- $T_3 = 6$ segundos
- $T_4 = 5$ segundos
- $T_5 = 5$ segundos

Calculo de Velocidad:

$$T = 5 + 5 + 6 + 5 + 5 = 26$$

$$T = 26 / 5 = 5.2 \text{ seg}$$

$$V = 8 \text{ m} / 5.2 \text{ seg} = 1.54 \text{ m/seg}$$

Tercer Paso: Medición de Área de la sección Transversal. Se midió el ancho del cauce y luego las alturas de la sección transversal. Se midieron 5 alturas y luego se sacó una altura promedio.



IMAGEN 4.3: MEDICION DE ALTURAS DE LA SECCION TRANSVERSAL

Las alturas medidas son:

- H1 = 0.20 m
- H2 = 0.24 m
- H3 = 0.24 m
- H4 = 0.26 m
- H5 = 0.17 m

Calculo de Altura media:

$$H_m = 0.20 + 0.24 + 0.24 + 0.26 + 0.17$$

$$H_m = 1.11 / 5$$

$$\mathbf{H_m = 0.22 \text{ m}}$$

Ancho Del Cauce = 3.20 m

Por lo tanto el área de la sección transversal es:

$$\text{Área} = \text{Ancho del cauce} \times H_m$$

$$\text{Área} = 3.2 \text{ m} \times 0.22 \text{ m}$$

$$\mathbf{\text{Área} = 0.704 \text{ m}^2}$$

Cuarto Paso: Calculo de Caudal del Rio El Gramal. Con los datos obtenidos se procede a calcular el caudal del río, con base en la siguiente ecuación:

$$Q \text{ (m}^3\text{/s)} = \text{Velocidad (m/s)} \times \text{Area (m}^2\text{)}$$

Por lo tanto el caudal es:

$$Q \text{ (m}^3\text{/s)} = 1.54 \text{ (m/s)} \times 0.704 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$Q = 1.084 \text{ m}^3\text{/seg}$$

En el modelo generado en el sistema de información geográfica (SIG), Modelo Hidrológico Espacialmente Distribuido, para el mes de julio el caudal promedio obtenido es de $1.088 \text{ m}^3\text{/seg}$, en Rio El Gramal, ubicado en el departamento de Chalatenango, Municipio La Palma, sobre la carretera CA-4, con coordenadas N $14^{\circ}18'15.5''$, O $89^{\circ}9'38.5''$.

Con la visita de campo hecha al Rio El Gramal y la toma de caudal de dicho rio, podemos validar los datos obtenidos en El Modelo Hidrológico Espacialmente Distribuido. El dato de caudal obtenido en la visita de campo es de $1.084 \text{ m}^3\text{/seg}$, con lo que podemos observar una diferencia de $0.004 \text{ m}^3\text{/seg}$ correspondiente a un porcentaje 0.3%, con el dato del modelo genérico $1.088 \text{ m}^3\text{/seg}$.

4.9 Análisis de Resultados

Se presentan los resultados de los diferentes caudales y variables que intervienen dentro de este análisis, en la Subcuenca Lempa Alto, proyecto cuyo objetivo central es determinar la oferta de agua por microcuencas y proporcionar así información básica para la planificación de los recursos hídricos de la zona. El estudio incluye un análisis a nivel mensual de las principales variables hidrológicas, así como una base de datos geográficos.

4.9.1 Análisis de Precipitación

En el anexo 1 se presentan los mapas de precipitación mensual para la subcuenca Lempa Alto, en los cuales se pueden observar la distribución espacial de la precipitación.

Dentro de la Sub-cuenca Lempa Alto, se tiene una precipitación media anual de 1728.17 mm/año, a nivel espacial se observan diferencias en los mapas mensuales, en cuanto a las distribución de la lluvia, debido a las orografía y el clima de la zona.

Se observa que el mes de noviembre, mes de transición entre la época lluviosa - seca, se tienen valores de precipitación de 25.2 mm a 117.8 mm, a medida que avanza la época seca la precipitación va disminuyendo siendo menores a 5 mm, en los meses de diciembre, enero y febrero (Ver anexo 1).

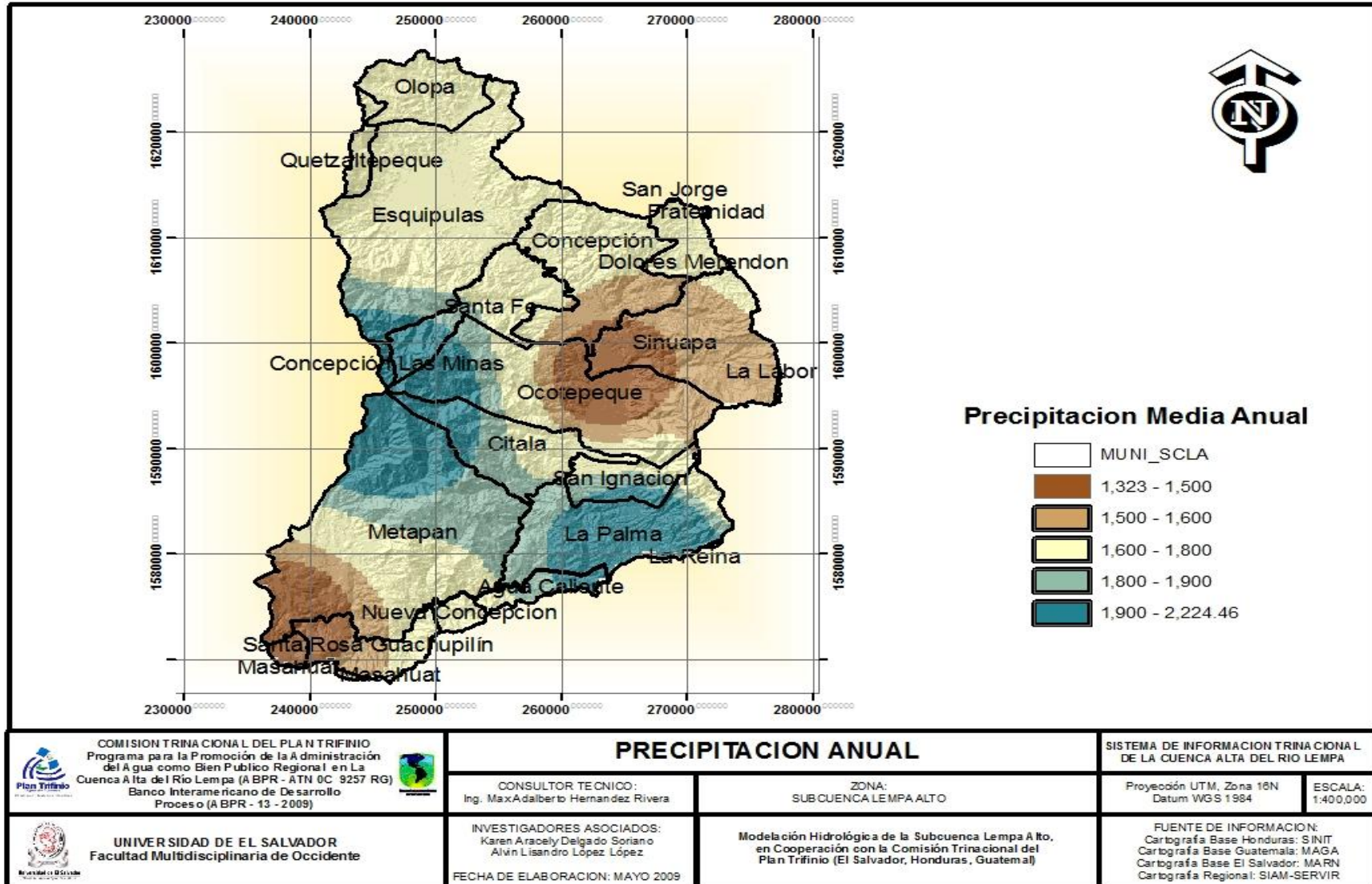
Para los meses de marzo y abril, se presenta un aumento en las precipitación, teniéndose las primeras lluvias, que marcan la transición de la época seca – lluviosa. Los valores de precipitaciones para el mes de marzo son 12.8 mm a 37.9 mm, aumentando en el mes de abril a 28.0 mm a 88.9 mm (Ver anexo 1).

El mes más lluviosos a nivel de la sub-cuenca Lempa Alto es el mes de Junio seguido por el mes de septiembre. Las precipitaciones de junio oscilan entre 264.4 mm a 490.6 mm, y en septiembre de 232.0 mm a 429.5 mm. Para los meses de julio y agosto se nota una reducción de lluvia (Ver anexo 1).

A nivel anual se registran lluvias mayores de 2224.5 mm, que se encuentra en las zonas de Citalá, Metapán, La Palma, San Ignacio y Agua Caliente en El Salvador; Ocotepeque y Santa Fe en Honduras; y en, Concepción las Minas y Esquipulas, en Guatemala (Ver mapa 16).

Los niveles más bajos de precipitación a nivel anual, que oscilan entre 1323 mm a 1500 mm, se encuentran en las zonas de El Salvador y en una mayor parte en Honduras como se observa en el mapa 16.

Los niveles medios de precipitación anual, valores que oscilan entre 1600 mm a 1800 mm, se encuentran en la zona de Guatemala, en los Municipios de Quezaltepeque, Olopa y Esquipulas.



MAPA 16: PRECIPITACION ANUAL

4.9.2 Análisis De Evapotranspiración

4.9.2.1 Análisis de Evapotranspiración Potencial

La variación espacial de la evapotranspiración potencial a nivel mensual y anual puede observarse en el anexo 2 de este documento, el cual no contiene una diferenciación tan representativa como es el caso de distribución de la precipitación a nivel mensual y anual. Los mayores valores de evapotranspiración potencial son obtenidos para los meses de enero, marzo, abril y mayo. El Rango de valores de evapotranspiración potencial del mes de enero oscilan de 76.19mm a 227.56 mm, para el mes de marzo de 91.16mm a 207.25mm, en el mes de abril de 132.18 mm a 211.74 mm y para el mes de mayo de 96.66 mm a 203.46.

Las zonas con los mayores valores de evapotranspiración calculados son para la parte baja de la Subcuenca Lempa Alto la cual está conformada por los municipios de Metapán, Santa Rosa Guachipilín y Nueva Concepción con la mayor pérdida potencial en el mes de enero que para estos municipios ya mencionados el valor fluctúa de 140 mm a 227.56 mm., este resultado se ve incrementado ya que la evapotranspiración calculada se encuentra en función de la elevación.

Las menores pérdidas potenciales de agua obtenidas son para las partes de mayor elevación de la Subcuenca Lempa Alto, el mes que registra la menor cantidad de perdidas es para el mes de diciembre con un rango de valores que van de los 84.97 mm a 154.92 mm.

4.9.2.2 Análisis de Evapotranspiración Real

La evapotranspiración real se ve afectada por la condiciones del tipo de uso de suelo de la zona en estudio, los usos de suelo que incrementan en un 10% la evapotranspiración potencial son Granos Básicos, Mosaico de cultivo y pastos, y Terrenos principalmente agrícolas. En el Anexo 3 puede observarse que le mayor valor

de evapotranspiración real se encuentra en el mes de abril con un rango de valores que va de 190 mm a 243.51 mm.

Los usos de suelos que reducen en una cantidad significativa las pérdidas de aguas potenciales son Tejidos urbanos discontinuos, Vegetación Arbusiva Baja, Zonas de extracción minera, Zonas Industriales o Comerciales, Zonas en construcción, Aeropuertos, Vegetación de transición, el menor valor de evapotranspiración real se registra para el caso del tipo de uso de suelo de vegetación arbusiva para el mes de noviembre con un rango de valores que fluctua de 16.92mm a 65 mm.

Los meses que poseen los mayores valores de evapotranspiración real para toda la subcuenca Lempa Alto son Enero, Marzo, Abril, Mayo y Junio, registrándose como el mayor de los valores para el mes de abril con valores que fluctúan de 26.96 mm a 243,51 mm.

Los valores más altos de evapotranspiración real se encuentran siempre ubicados en las partes bajas de la subcuenca partiendo desde el valle de Esquipulas y finalizando en el punto de desagüe de la cuenca, de la parte baja de la cuenca se excluye el área constituida por la vegetación arbusiva ya que esta no posee una alta pérdida de agua.

4.9.3 Análisis de Balance Hídrico Climático

En el anexo 3, se muestra el balance hídrico climático de la subcuenca Lempa Alto, de cada uno de los meses, resultado del análisis de variables de precipitación y evapotranspiración. El balance hídrico para los meses de enero y febrero, es deficiente, como se observan en los mapas del anexo 4, el aumento de la cantidad de BHC, se ve en la época de transición de época seca-lluviosa, esto es en los meses de marzo a abril.

El mayor valor de BHC, dentro de la zona, corresponde al mes de junio, seguido del mes de septiembre, valores que oscilan entre 418.47 – 84.92 mm y 355.01 – 59.6 mm correspondientemente.

Se nota una disminución de BHC, en la época de transición de época lluviosa-seca, correspondiente al mes de noviembre. El comportamiento del balance hídrico climático mensual se pueden observar en la tabla 4.10 y grafico 4.2.

MES	BHC (mm), Máximo
ENERO	30.6
FEBRERO	14.1
MARZO	3.1
ABRIL	54.5
MAYO	195.3
JUNIO	418.4
JULIO	258.4
AGOSTO	301.1
SEPTIEMBRE	355
OCTUBRE	189.4
NOVIEMBRE	94.74
DICIEMBRE	46.2

TABLA 4.10: BALANCE HIDRICO CLIMATICO MAXIMO MENSUAL

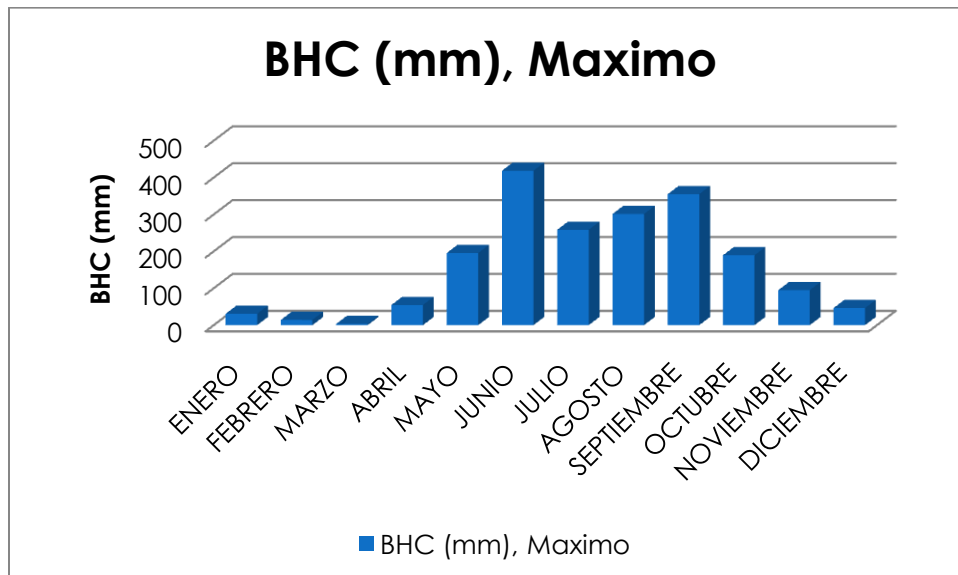


GRAFICO 4.2: BALANCE HIDRICO CLIMATICO MAXIMO

Teniéndose los valores mensuales de Evapotranspiración Potencial, Evapotranspiración Real y Precipitación, se obtiene balance hídrico. De esta manera se puede conocer el agua que se pierde por evaporación desde el suelo y por transpiración de las plantas, también la cantidad de agua almacenada en el suelo y aquella que se escurre superficialmente y en profundidad. Así habrá meses en que el aporte de agua será suficiente y meses en los que se registren excesos o deficiencias de agua en el suelo. También pueden darse situaciones extremas en que durante todo el año las lluvias sobrepasen las necesidades de agua o viceversa.

Se presenta el balance hídrico climático a nivel mensual, se observan déficit de agua en los meses de enero a abril, teniendo un exceso de agua del mes de mayo al mes de octubre, y luego un déficit en los meses de noviembre y diciembre. Esto coincide con las épocas de transición de época seca – lluviosa y viceversa. Podemos observar el comportamiento del BHC en el gráficos 4.3 y se pueden ver el déficit y los excesos en el grafico 4.4 y la tabla 4.11.

MES	ETR MEDIA (mm)	ETO MEDIA (mm)	PREMEDIA (mm)	DEFICIT (mm)	EXCESO (mm)
ENERO	109.078	115.789	12.3268	-103.4622	
FEBRERO	109.852	116.651	10.1196	-106.5314	
MARZO	136.549	145.013	20.6339	-124.3791	
ABRIL	153.945	163.077	58.1633	-104.9137	
MAYO	140.648	160.326	177.767		17.441
JUNIO	129.821	137.5	343.644		206.144
JULIO	134.406	142.355	251.012		108.657
AGOSTO	134.561	142.519	276.291		133.772
SEPTIEMBRE	118.757	125.78	332.073		206.293
OCTUBRE	116.417	123.302	179.613		56.311
NOVIEMBRE	101.045	107.228	47.1325	-60.0955	
DICIEMBRE	98.7226	104.854	19.5693	-85.2847	

TABLA 4.11: DEFICIT Y ESCESO DE DISPONIBILIDAD HIDRICA EN LA SUBCUENCA LEMPA ALTO

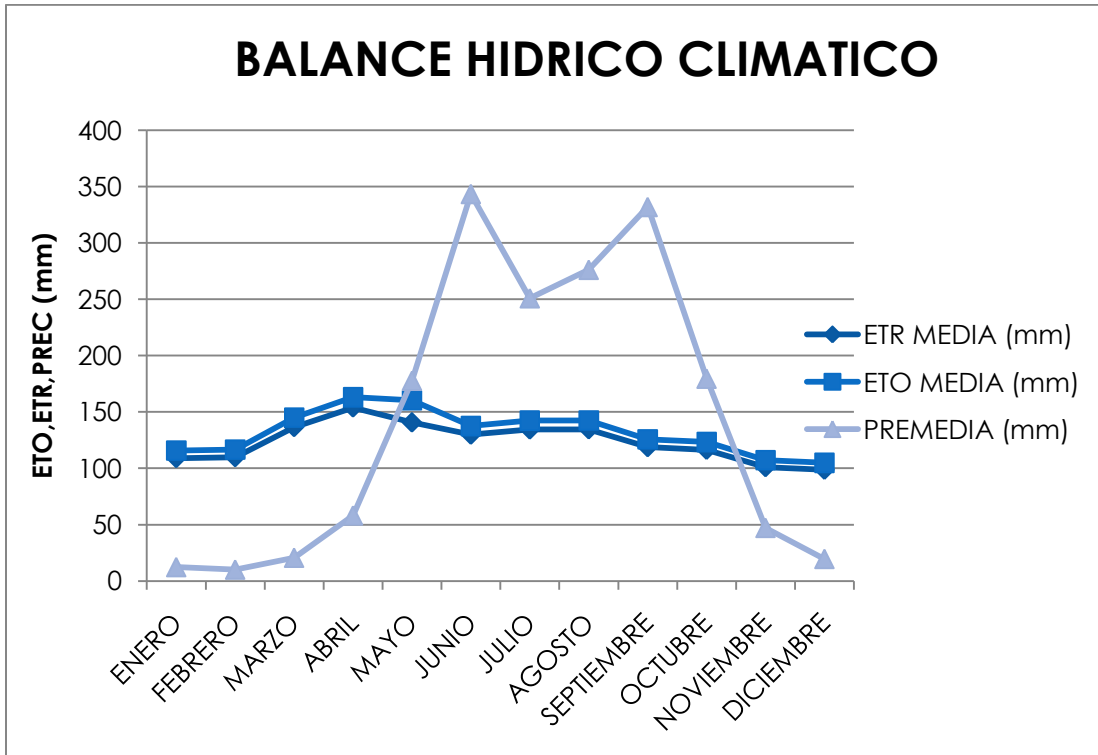


GRAFICO 4.3: COMPORTAMIENTO DE ETO MEDIA, ETR MEDIA Y PRECIPITACION MEDIA

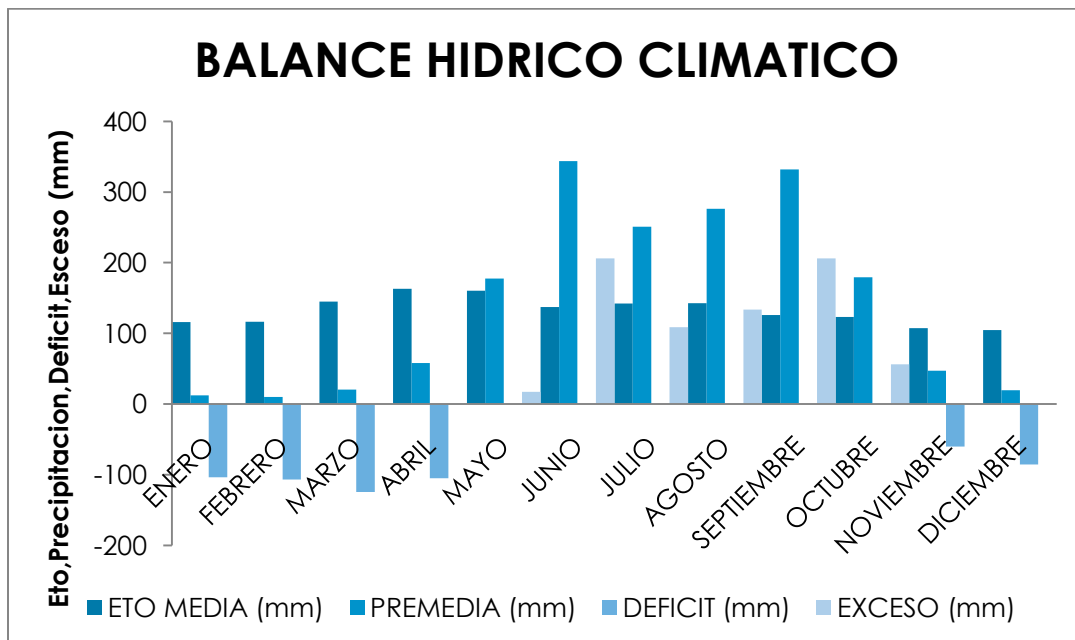


GRAFICO 4.4: DEFICIT Y ESCESO DE DISPONIBILIDAD HIDRICA

4.9.4 Análisis de Régimen de Caudales

Los resultados de los caudales medios mensuales acumulados espacialmente distribuidos pueden observarse en el anexo 6, el rango de valores para los mapas muestra los caudales máximos de toda la subcuenca Lempa Alto en el punto de desagüe. El mayor de los caudales medios mensuales es para el mes de septiembre el cual es uno de los meses más húmedos de la temporada lluviosa dicho caudal es de $110.128 \text{ m}^3/\text{s}$.

Los meses que registran los mayores valores de caudal son junio, julio, agosto, septiembre y octubre, el mes que sigue al mayor valor de caudal registrado es el mes de octubre con un valor de caudal medio mensual de $74.38 \text{ m}^3/\text{s}$.

El mes de noviembre evidencia una disminución muy significativa del caudal en el punto de desagüe de toda la subcuenca, debido a que este mes es de transición entre la época lluviosa – seca, el caudal registrado para este mes es de $18.79 \text{ m}^3/\text{s}$ (ver gráfico 4.4).

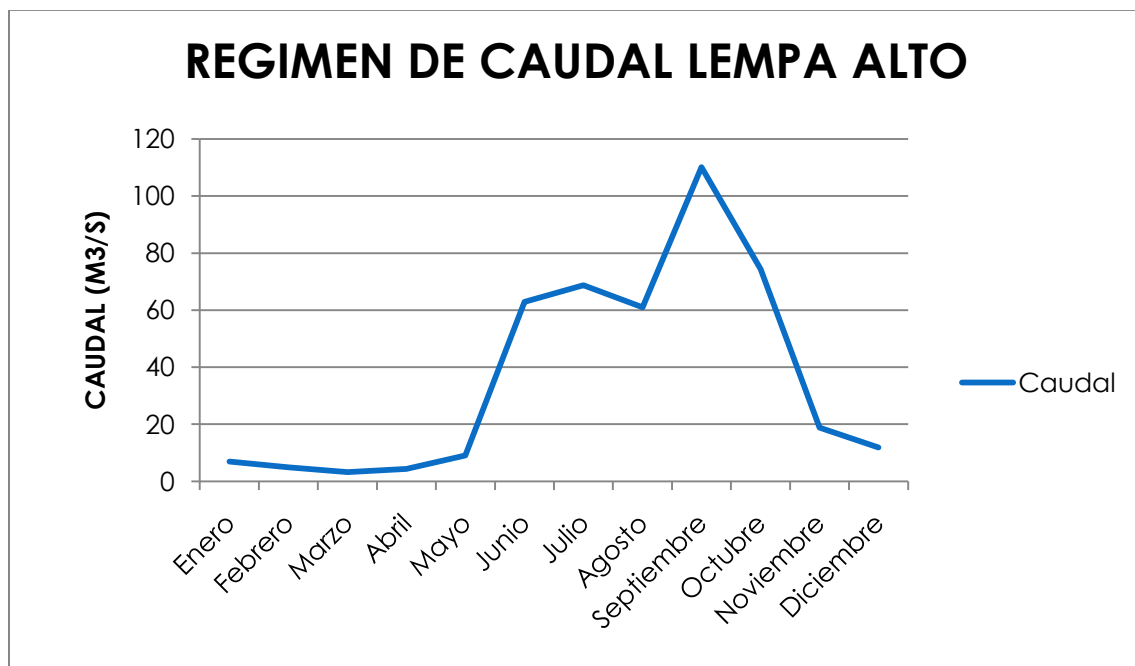


GRAFICO 4.5: REGIEMEN DE CAUDAL DE LA SUBCUENCA LEMPA ALTO

El mes que registra el menor valor de caudal medio mensual es para el mes de marzo con un valor de $3.26 \text{ m}^3/\text{s}$, después de este mes se evidencia el periodo de transición de seca-lluviosa el cual es el mes de abril para este mes se registran un incremento a $4.34 \text{ m}^3/\text{s}$. Para el mes de julio a agosto se presenta una disminución en el caudal medio mensual con una diferencia de $7.78 \text{ m}^3/\text{s}$. Esta diferencia se debe a que para este mes se presenta una disminución en los valores de precipitación para toda la subcuenca.

Para la Subcuenca Lempa Alto se realizó una priorización de microcuencas como puede verse en el mapa 17, esta priorización se realizó en función del mayor caudal medio mensual, al final quedo un número total de catorce microcuencas de nivel 1, las cuales todas son tributarias principales del cauce principal del río, en el grafico 4.6 puede apreciarse el régimen de caudales a nivel mensual para las catorce microcuencas. La microcuenca que presenta la mayor producción de caudal es la microcuenca del Río Tahuilapa con un caudal máximo de $10.63 \text{ m}^3/\text{s}$ para el mes de septiembre, la microcuenca que precede al valor de este caudal es para la del Río Nunuapa con un caudal máximo para el mes de septiembre de $110.12 \text{ m}^3/\text{s}$.

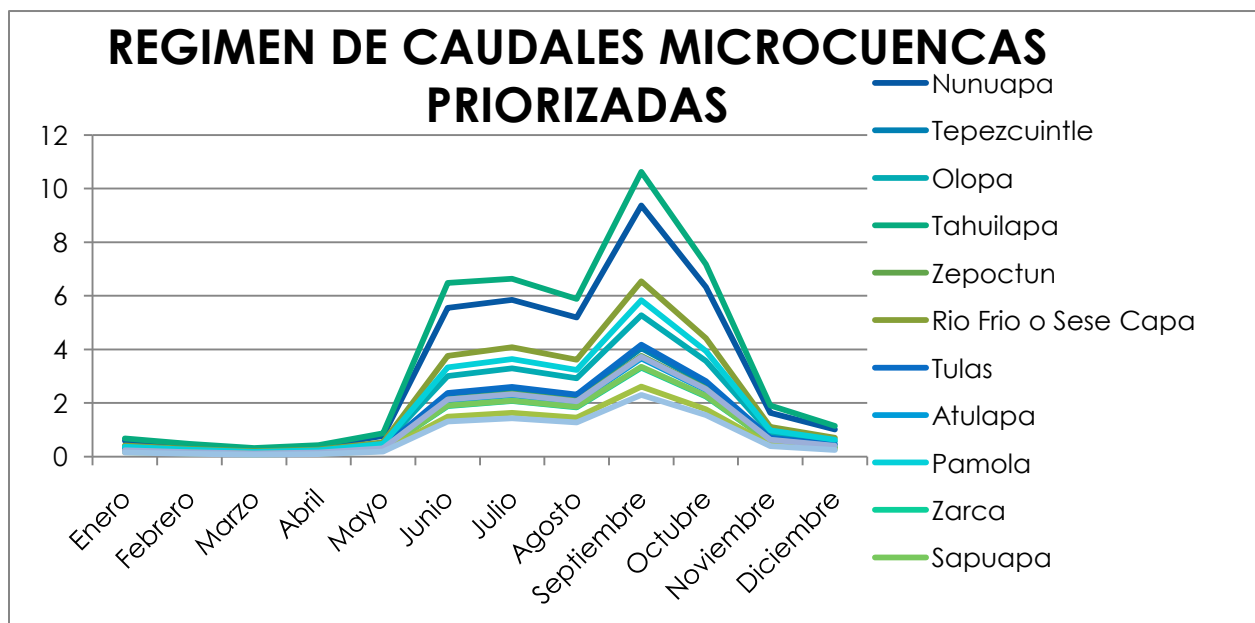
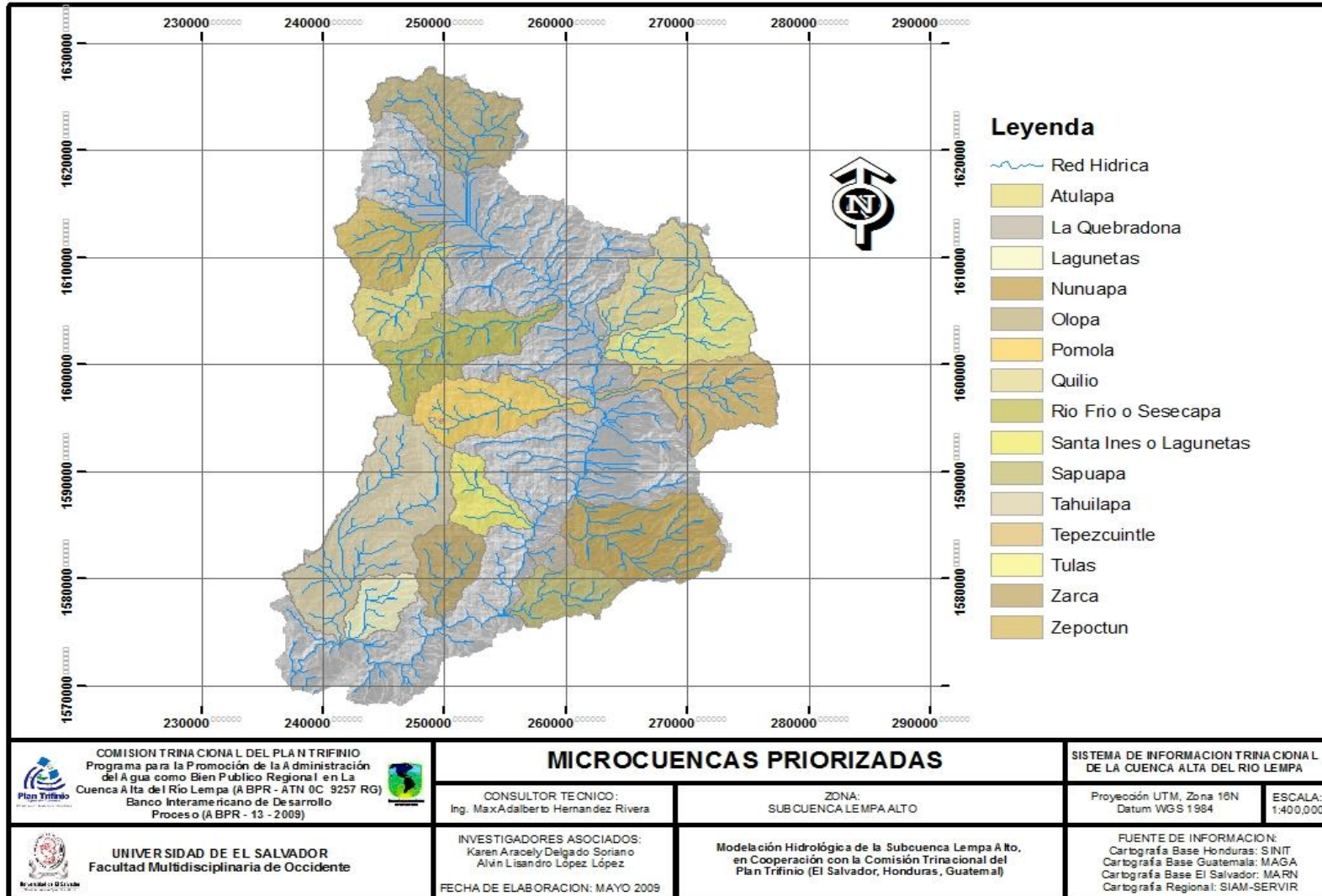


GRAFICO 4.6: REGIEMEN DE CAUDAL DE MICROCUENCAS PRIORIZADAS



MAPA 17: MICROCUENCAS PRIORIZADAS



MODELACION HIDROLOGICA LEMPA ALTO

CAPITULO V

PRIORIZACION DE MICROCUENCAS DE LA SUBCUENCA LEMPA ALTO

V. Priorización De Microcuencas De La Subcuenca Lempa Alto

5.1 Ordenamiento Territorial

Ordenamiento Territorial: es la proyección en el espacio geográfico de las políticas sociales culturales ambientales y económicas de una sociedad. El estilo de desarrollo da lugar al modelo territorial. El territorio, responde al intento de integrar la planificación socioeconómica con la física. Procura la consecución de la estructura espacial más adecuada para un desarrollo eficaz y equilibrado de la política, social, económica, cultural y económica de una sociedad.

Se realiza ordenación del territorio cuando se toma en cuenta el territorio en la definición de la estrategia de desarrollo equilibrado de las regiones y la organización física del espacio.

El Ordenamiento Territorial debe de ser:

- Democrático: Participación Ciudadana
- Global: Coordinadora e Integradora de Políticas Sectoriales
- Funcional: Adaptarse a las distintas conciencias regionales
- Prospectiva: considera tendencias y evoluciones en aspectos económicos, culturales, sociales y ambientales del territorio.

Técnicamente ha de ser una organización coherente entre sí y el medio, de acuerdo con criterios de eficiencia. Ha de conservar o proporcionar el equilibrio en la calidad de vida de acuerdo a un principio de equidad. Integrar los distintos ámbitos territoriales en los de rango superior de acuerdo con un principio de jerarquía.

Administrativamente es una función pública que controla el crecimiento espontáneo de las actividades para evitar conflictos y desequilibrios. Tiene carácter horizontal que

condiciona a la planificación económica y otra de nivel inferior que es el urbanismo o políticas urbanísticas, también conocida como planificación sectorial.

El proceso de ordenación del territorio regula la distribución de actividades según un conjunto de planes. La ordenación territorial se apoya en el instrumento de los planes, donde el nivel regional es el más adecuado y son un mecanismo técnico ineludible para llevarlo a cabo el plan de actuación.

Los planes han de ser equilibrados y han de pensar en el desarrollo armónico y equilibrado de las regiones. También deben ser abiertos y flexibles pero sin dar opción a la arbitrariedad de su gestión. El modelo territorial se constituye mediante planes territorial y estos planes vienen determinados por factores y estrategias desde el punto de vista de los recursos y desde el punto de vista de la capacidad de esos territorios.

Dentro de los objetivos básicos de un Ordenamiento Territorial tenemos:

- Proporcionar las oportunidades mínimas de calidad de vida.
- Conservar y desarrollar los fundamentos naturales de la vida.
- Mantener el potencial del uso del suelo y sus recursos.
- Desarrollo socioeconómico equilibrado de regiones y comarcas. (controlar el crecimiento de las regiones más dinámicas y estimular las más retrasadas).
- Utilización racional del territorio y gestión responsable de los recursos naturales.
- Coordinación administrativa de los distintos organismos sectoriales de mismo rango y entre los distintos niveles administrativos de decisión.

El proceso de elaboración de un plan es:

1º Análisis Territorial: es el primer punto a considerar en cualquier proyecto. Consiste en la información y diagnóstico del sistema objeto de estudio, implica el conocimiento e interpretación de la realidad. Es la fase del plan más importante en recursos, en tiempo, en equipo, en esfuerzo.

2º Planificación territorial: debe incluir la definición de objetivos a cumplir, y la propuesta para alcanzarlos lo que implica la modificación de la realidad y su modificación en el tiempo.

3º Gestión Territorial o aplicación a la realidad de las citadas propuestas.

Estas tres fases son iterativas en la planificación intervienen conocimientos y técnicas de diferentes campos, pero la multidisciplinariedad requiere la interacción de conocimiento e intereses conflictivos. La interacción representa en el campo de las ideas, la interacción entre componentes del sistema en el campo de la realidad.

5.2 Análisis Territorial: información y diagnóstico

Es la primera aproximación al conocimiento de la zona, valorando sus grandes problemas y condicionantes, de forma general. Es una tarea crucial porque condiciona todo el desarrollo posterior, es la preparación para la elaboración de un plan.

El Ordenamiento Territorial aborda los diferentes aspectos y componentes del territorio, relacionados con:

1. Medio Biofísico:

- a. Geología
- b. Geomorfología
- c. Hidrología
- d. Clima
- e. Usos del Suelo

- f. Biodiversidad
- g. Recursos Culturales y Turísticos
- h. Amenazas

2. Asentamientos Humanos:

- a. Población
- b. Equipamiento Social
- c. Infraestructura Física
- d. Crecimiento Urbano
- e. División Política Administrativas

3. Actividades Productivas:

- a. Sector Primario
- b. Sector Secundario
- c. Sector Terciario

El Análisis Territorial tiene por objeto el diagnóstico del territorio de forma muy sintética y elaborarla en los cuatro subsistemas:

A. Información y Diagnostico del medio físico: (territorio y recursos naturales)

Se estudia por una parte los recursos naturales y su potencialidad, es decir, el medio físico en sí y por otra parte la capacidad de degradaciones y amenazas, afecciones o estado legal del suelo.

B. Información y Diagnostico de la población y sus actividades: (producción, consumo, relaciones sociales).

El medio físico es el soporte del sistema territorial y tiene un carácter pasivo, y el medio antrópico es el centro con carácter activo. Adapta el medio físico para ubicar sus actividades. De lo q se trata es de detectar su dinámica, potencias, hábitos de consumo y sus relaciones sociales. De los recursos productores se estudia la capacidad de

desarrollo de actividades de producción, consumo de bienes y servicios; y de sus hábitos sociales, el tipo de relaciones sociales modos de diversión, actividades ya implantadas.

C. Información y Diagnostico del sistema de asentamientos e infraestructuras:

Se estudia la configuración espacial y las infraestructuras de relación; el modo de asentarse de la población. Ha de detectar el funcionamiento del sistema y su capacidad para acceder a la explotación de recursos naturales, Dotar de forma económica a la población de bienes y servicios sociales accesibles, Acceder con comodidad y rapidez a puestos de trabajo, Fluidéz de interrelación social. También hay que analizar la situación individualizada de cada núcleo de población, en términos de calidad, patrimonio, fuentes de riqueza y estructura de población para sostener un número mínimo de efectivos de población.

D. Información y Diagnostico del marco legal e institucional:

Consiste en conocer las reglas de funcionamiento y sus relaciones. Es necesario para cualquier plan y es la base donde se racionaliza la actuación pública y se orienta la privada. Las orientaciones que toma son:

- Condiciones o limitaciones que impone a las propuestas
- Oportunidades que ofrece
- Diagnóstico integrado del territorio: se trata de sintetizar en un esquema breve y coherente los diagnósticos sectoriales, se realiza porque los problemas están generalmente interconectados.

5.3 Priorización De Áreas De Intervención Dentro De La Subcuenca Lempa Alto.

Las áreas críticas dentro de una cuenca son aquellas que juegan un rol especialmente importante para sus ecosistemas, su gente o para ambos. Las áreas de vegetación próximas a un curso de agua pudieran no ser identificadas como importantes por los actores locales; sin embargo, pudieran cumplir funciones como filtro de polución, hábitat de especies importantes, control de inundaciones o bien ser sitios críticos para los esfuerzos de protección. Un área crítica también puede ser determinada por los usos del agua, como el abastecimiento a poblaciones, áreas recreativas, o hábitat frágiles de vida silvestre. El objetivo de la planificación en áreas críticas debe ser la identificación y ubicación de tales áreas para asegurar el mantenimiento de sus beneficios (EPA-US 2005).

La metodología aplicada para priorizar áreas de intervención en cuencas hidrográficas, utilizan el siguiente esquema general:

1. Definición del objetivo para la priorización.
2. Selección de criterios y cualidades para valorar las microcuencas en relación con los objetivos.
3. Determinación de peso relativa de cada criterio.
4. Valoración de microcuencas según los criterios.
5. Ajuste de criterios de intervención
6. Priorización



FIGURA 5.1: METODOLOGIA PARA PRIORIZACION DE MICROCUENCAS

A. Objetivo de la Priorización.

- Determinar las áreas críticas dentro de la sub-cuenca Lempa Alto, para asegurar el mantenimiento de sus beneficios.

B. Selección de criterios y cualidades para valorar las microcuencas en relación con los objetivos.

Los criterios tomados en cuenta para realizar la priorización son:

1. Caudal Medio Anual (Ver Anexo 8) :

Indica la disponibilidad hídrica superficial de la zona, siendo un agente importante y fundamental hidrológico para la determinación de las microcuencas que tienen un mayor aporte de agua al cauce principal.

2. Área Boscosa (Ver Anexo 9):

Los bosques filtran y limpian el agua, amortiguan las lluvias fuertes que de otra manera erosionarían los suelos, y mantienen en su lugar los bancos de los ríos. A su vez, el agua transporta nutrientes disueltos y los distribuye por todo el suelo del bosque. Los bosques actúan como "esponjas", capaces de recoger y almacenar grandes cantidades del agua de lluvia. Los suelos forestales absorben cuatro veces más agua de lluvia que los suelos cubiertos por pastos, y 18 veces más que el suelo desnudo.

3. Focos de Contaminación (Ver Anexo 10):

Los focos de contaminación alteran el estado de la calidad del agua, a través del vertido de aguas negras, desechos industriales, el arrastre de agua de los basureros, entre otros, lo que da lugar al exterminio de la fauna acuática presente en el recurso hídrico superficial, y a la disminución de los usos que se le podría dar a este recurso.

C. Determinación de peso relativo de cada criterio.

La tabla 5.1 muestra los criterios con los pesos máximos, la suma de los pesos máximos es de 100, los valores asignados están de acuerdo a la importancia del criterio:

CRITERIO	PESO MÁXIMO %
CAUDAL (M ³ /S)	65
%ÁREA BOSQUE	25
FOCOS DE CONTAMINACIÓN	10
TOTAL	100

TABLA 5.1: PESO RELATIVO A CADA CRITERIO

Los rangos establecidos para la asignación de los pesos según el criterio, para la priorización se muestran a continuación:

CAUDAL (M3/SEG)	PESO %
0-0.1	5
0.1-0.2	15
0.2-0.5	25
0.5-1	50
1-2.15	65

TABLA 5.2: PESO SEGÚN CAUDAL

%BOSQUE	PESO %
0-15	5
15-30	10
30-50	15
50-70	20
70-100	25

TABLA 5.3: PESO SEGÚN AREA BOSCOSOSA

FOCO DE CONTAMINACIÓN	PESO %
BASURERO	1
BASURERO, AGUAS NEGRAS. LAG OXID	5
BASURERO, AGUAS NEGRAS. LAG OXID, HECES DE GANADO	6
4 VERTIDOS DE DESECHOS INDUSTRIALES	10
AGUAS NEGRAS, 2 BASUREROS, 2 BENEFICIOS DE CAFÉ, GASOLINERA	10
6 BASUREROS	4
4 BASUREROS Y MELONERA POR AGROQUIMICOS	5
2 VERTIDOS DE DESECHOS INDUSTRIALES	5
AGUAS NEGRAS	2

TABLA 5.4: PESO DE ACUERDO A FOCO DE CONTAMINACION

D. Valoración de microcuencas según los criterios.

Se elaboro la matriz de priorización, a cada una de las microcuencas se le asigno el peso según los rangos establecidos de cada criterio (Ver tabla 5.5).

MICROCUEENCA	CAUDAL_ANU	%AREA_BOSQUE	FOCO_CONTAMINACION	PESO_CAUDAL	PESO_BOSQUE	PESO_CONTAMINACION
SHUSHULA	0.0131155	13.81%		5	5	
ESPINOS	0.0326816	40.18%		5	15	
PEDERNALES	0.0590929	49.01%		5	15	
TISHAN	0.110902	10.49%		15	5	
CUYUISCAT	0.124943	1.24%		15	5	
QUEBRADA DE LA MUERTE	0.00337152	31.45%	BASURERO	5	15	1
EL CHORRO	0.0144505	62.46%		5	20	
BREA	0.0464028	56.86%		5	20	
TOLO	0.0787321	57.23%		5	20	
GUAJIALA	0.102243	24.66%		15	10	
RIO DE POLCHO	0.148165	28.42%		15	10	
SAN FRANCISCO APANTA	0.16052	21.85%		15	10	
SALGUERO	0.00129182	97.44%		5	25	
AGUA CALIENTE	0.121596	44.23%		15	15	
JUPULA	0.158497	48.92%		15	15	
LA MINA O GUANTOL	0.165286	40.58%		15	15	
SALGUERO	0.178453	36.36%		15	15	
CAMULIAN	0.217521	9.55%		25	5	
EL CHUMELO	0.228948	4.23%		25	5	
LAS PAVAS	0.250698	0.15%		25	5	
LA MINA O GUANTOL	0.364062	0.24%		25	5	
NEJAPA	0.00535269	78.95%		5	25	
EL JICARON	0.470458	16.49%		25	10	
EL PRESIDENTE	0.174458	45.45%	BASURERO, AGUAS NEGRAS. LAG OXID, HECES DE GANADO	15	15	6
TECOMAPA	0.124096	54.29%	BASURERO, AGUAS NEGRAS.	15	20	5

			LAG OXID			
LAS TRENZAS	0.100752	83.20%		15	25	
EL SALITRE	0.206152	31.03%		25	15	
EL POY	0.3837584	39.63%		25	15	
SAN JUAN	0.250382	52.91%		25	20	
ARENAL	0.308885	58.77%		25	20	
MARCHALA	0.329196	52.75%		25	20	
SANTA INES O LAGUNETAS	0.6920567	4.54%		50	5	
SANTA INES O LAGUNETAS	0.9411345	1.05%		50	5	
QUILIO	0.80079423	28.48%		50	10	
LA QUEBRADONA	0.7090027	66.81%		50	20	
ZARCA	1.264032	19.04%		65	10	
TULA	1.5975807	38.76%		65	15	
POMOLA	1.27687	56.69%		65	20	
TEPEZCUINTLE	1.8116836	16.41%	AGUAS NEGRAS, 2 BASUREROS, 2 BENEFICIOS DE CAFÉ, GASOLINERA	65	10	10
TAHUILAPA	2.0089834	25.37%	4 VERTIDOS DE DESECHOS INDUSTRIALES	65	10	10
SAPUAPA	2.1435776	61.57%		65	20	
ZEPOCTUN	1.6961035	67.56%	6 BASUREROS	65	20	4
ATULAPA	1.46716369	94.87%		65	25	
NUNUAPA	1.9601127	60.66%	2 VERTIDOS DE DESECHOS INDUSTRIALES	65	20	5
RIO FRIO O SESECAPA	1.64461409	92.72%	AGUAS NEGRAS	65	25	2
OLOPA	1.2553774	77.14%	4 BASUREROS Y MELONERA POR AGROQUIMICOS	65	25	5

TABLA 5.5: MATRIZ DE PRIORIZACION

E. Ajuste de criterios de intervención.

Dentro de los criterios elegidos con los rangos establecidos anteriormente mencionados, se hicieron los ajustes necesarios para los pesos de cada uno de tal manera que estos representaran el nivel de importancia, de esta manera se podía obtener una priorización basada sobre todo al aporte de caudal de cada una de las microcuencas.

F. Priorización

La priorización está basada en la sumatoria de todos los pesos obtenidos en la asignación de los valores. La prioridad de cada una de las microcuencas se basa en los siguientes rangos (Ver tabla 5.6):

PESO	PRIORIZACION
0-39	Baja
40-69	Media
70-89	Alta
90-100	Muy Alta

TABLA 5.6: VALORES DE PRIORIZACION

5.3.1 Análisis De Priorización

Al momento de priorizar las microcuencas se da mayor prioridad según los pesos asignados a la cantidad de agua que se tiene partiendo de la premisa siguiente:

“Se puede mejorar la calidad del agua con un manejo integral, pero la cantidad de agua no se puede modificar por la naturaleza finita del ciclo hidrológico”.

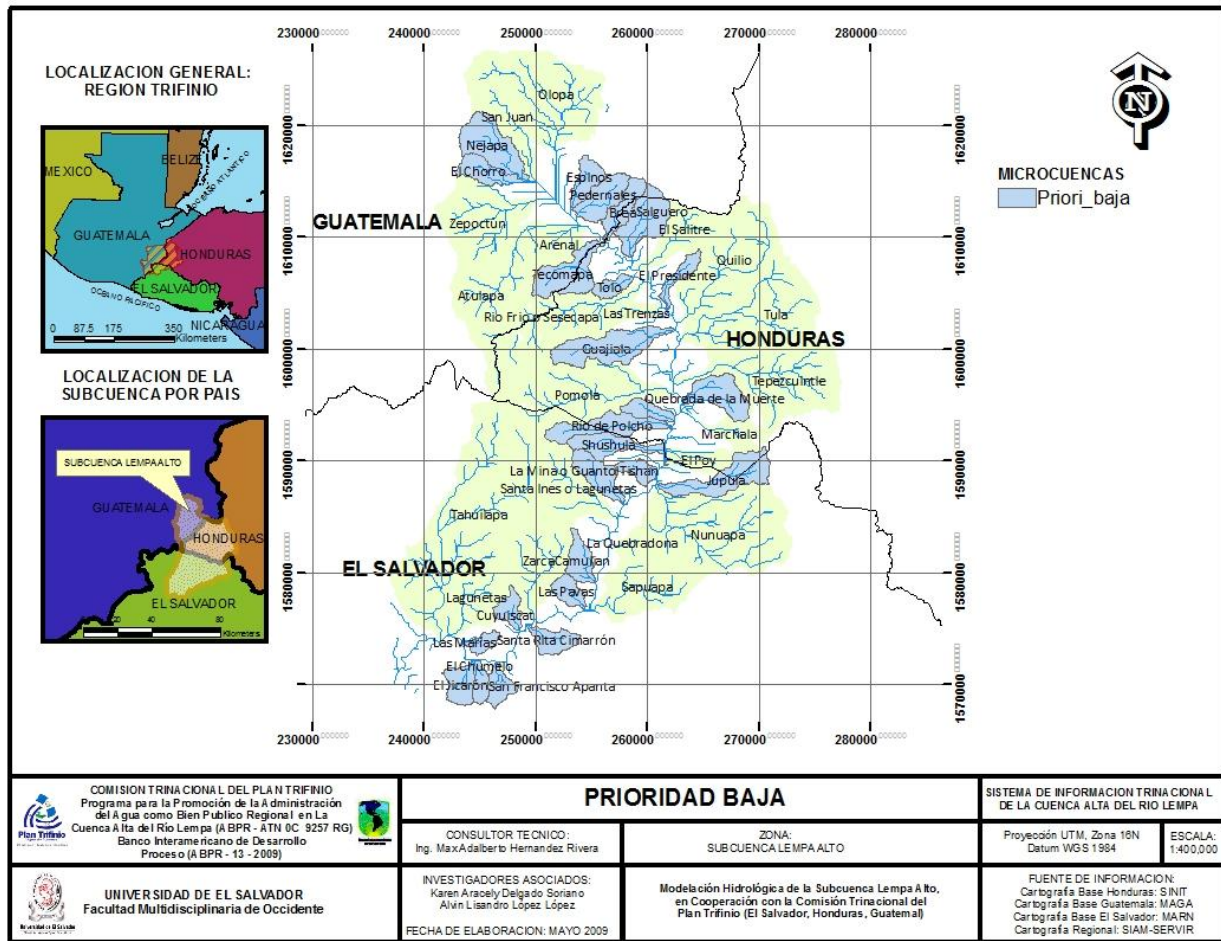
Según la tabla 5.6 tendrá mayor priorización los valores totales de los pesos más altos, esto es para poder rescatar o mantener las zonas correspondientes a cada microcuenca.

Prioridad Baja:

0 - 39 la prioridad es Baja, en donde el caudal que poseen estas microcuencas es bajo con área boscosa baja, como se muestra en la tabla 5.7, algunas sin problemas de contaminación, y otros con serias posibilidades de contaminación, en el mapa 18 se muestran las microcuencas respectivas.

Microcuenca	Caudal_Anu	%Area_Bosque	Foco_Contaminación	Peso_Total	Priorización
Shushula	0.0131155	13.81%		10	PRIORIZACION BAJA
Espinos	0.0326816	40.18%		20	
Pedernales	0.0590929	49.01%		20	
Tishan	0.110902	10.49%		20	
Cuyuiscat	0.124943	1.24%		20	
Quebrada de la Muerte	0.00337152	31.45%	basurero	21	
El Chorro	0.0144505	62.46%		25	
Brea	0.0464028	56.86%		25	
Tolo	0.0787321	57.23%		25	
Guajjala	0.102243	24.66%		25	
Rio de Polcho	0.148165	28.42%		25	
San Francisco Apanta	0.16052	21.85%		25	
Salguero	0.00129182	97.44%		30	
Agua Caliente	0.121596	44.23%		30	
Jupula	0.158497	48.92%		30	
La Mina o Guantol	0.165286	40.58%		30	
Salguero	0.178453	36.36%		30	
Camulian	0.217521	9.55%		30	
El Chumelo	0.228948	4.23%		30	
Las Pavas	0.250698	0.15%		30	
La Mina o Guantol	0.364062	0.24%		30	
Nejapa	0.00535269	78.95%		30	
El Jicarón	0.470458	16.49%		35	
El Presidente	0.174458	45.45%	basurero, aguas negras. Lag oxid, heces de ganado	36	

TABLA 5.7: PRIORIZACION BAJA DE MICROCUENCAS



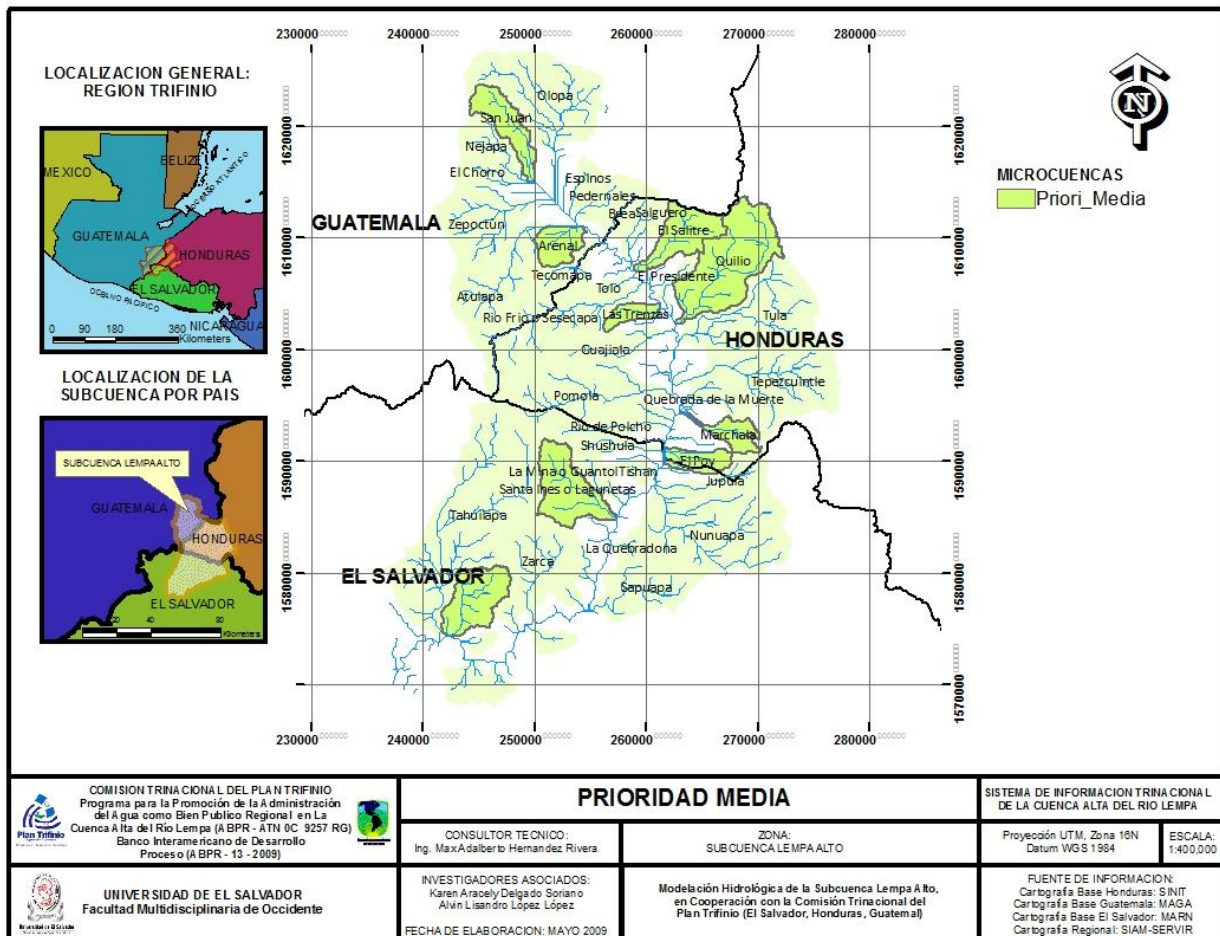
MAPA 18: PRIORIDAD BAJA

Prioridad Media:

40 – 69 la prioridad es Media, las microcuencas en este caso, poseen valores de caudales algunos considerables pero con áreas boscosas bajas y otras poseen caudales bajos con áreas boscosas altas, como se muestra en la tabla 5.8, sin problemas de contaminación, en el mapa 19 se muestra las microcuencas correspondientes.

Microcuenca	Caudal_Anu	%Area_Bosque	Foco_Contaminacion	Peso_Total	Priorizacion
Tecomapa	0.124096	54.29%	basurero, aguas negras. Lag oxid	40	PRIORIZACION MEDIA
Las Trenzas	0.100752	83.20%		40	
El Salitre	0.206152	31.03%		40	
El Poy	0.3837584	39.63%		40	
San Juan	0.250382	52.91%		45	
Arenal	0.308885	58.77%		45	
Marchala	0.329196	52.75%		45	
Lagunetas	0.6920567	4.54%		55	
Santa Ines o Lagunetas	0.9411345	1.05%		55	
Quilio	0.80079423	28.48%		60	

TABLA 5.8: PRIORIZACION MEDIA DE MICROCUENCAS



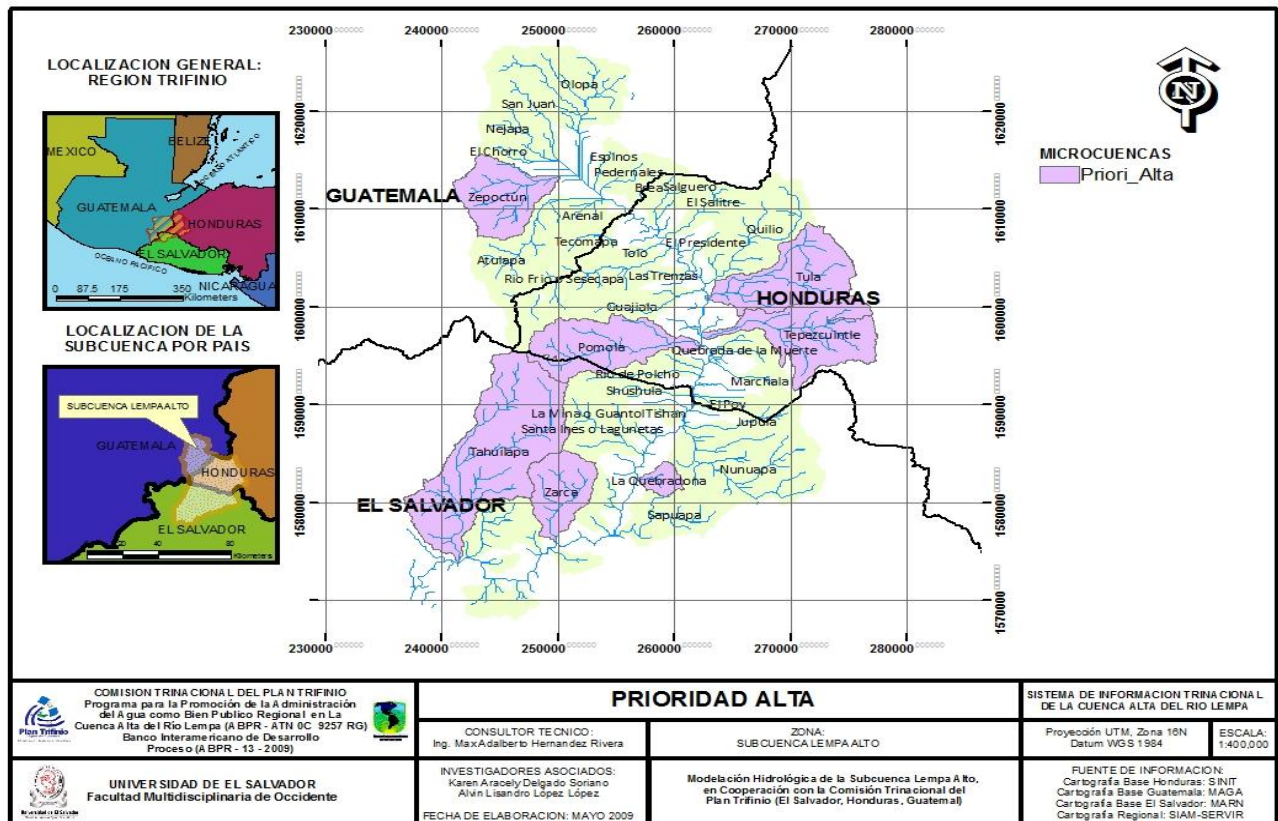
MAPA 19: PRIORIDAD MEDIA

Prioridad Alta:

70 - 89 la prioridad es Alta, en este caso las microcuencas poseen valores altos de caudal y valores considerables de área boscosa, pero poseen focos contaminantes exponiendo el aporte de caudal ver la tabla 5.9 y el mapa 20.

Microcuenca	Caudal_Anu	%Area_Bosque	Foco_Contaminacion	Peso_Total	Priorización
La Quebradona	0.7090027	66.81%		70	PRIORIZACION ALTA
Zarca	1.264032	19.04%		75	
Tula	1.5975807	38.76%		80	
Pomola	1.27687	56.69%		85	
Tepezcuintle	1.8116836	16.41%	aguas negras, 2 basureros, 2 beneficios de café, gasolinera	85	
Tahuilapa	2.0089834	25.37%	4 vertidos de desechos industriales	85	
Sapuapa	2.1435776	61.57%		85	
Zepoctun	1.6961035	67.56%	6 basureros	89	

TABLA 5.9: PRIORIDAD ALTA DE MICROCUENCAS



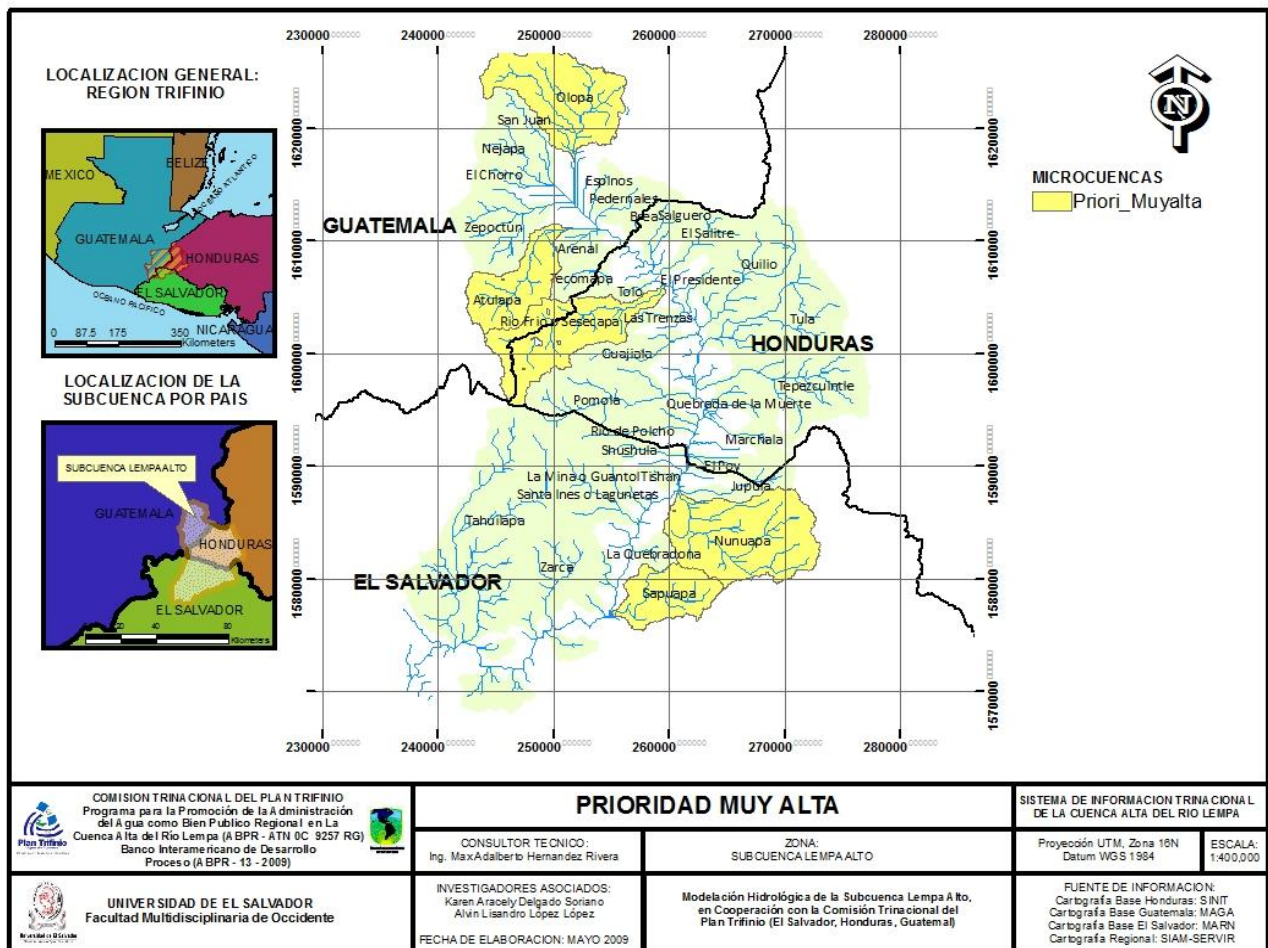
MAPA 20: PRIORIDAD ALTA

Prioridad Muy Alta:

90 - 100 la prioridad es Muy Alta, lo cual significa que las microcuencas que se encuentran dentro de este rango, poseen valores altos de caudal y área boscosa, pero sufren de serias posibilidades de contaminación, ver tabla 5.10 y mapa 21.

Microcuenca	Caudal_Anu	%Area_Bosque	Foco_Contaminacion	Peso_Total	Priorización
Atulapa	1.46716369	94.87%		90	PRIORIZACION MUY ALTA
Nunuapa	1.9601127	60.66%	2 vertidos de desechos industriales	90	
Rio Frio o Sese capa	1.64461409	92.72%	aguas negras	92	
Olopa	1.2553774	77.14%	4 basureros y Melonera por agroquímicos	95	

TABLA 5.10: PRIORIZACION ALTA DE MICROCUENCAS



MAPA 21: PRIORIZACION MUY ALTA

CONCLUSIONES

- Los caudales calculados para el modelo hidrológico espacialmente distribuido y el modelo hidrológico empírico son estimaciones medias mensuales, dichos caudales pueden variar de un periodo a otro en la realidad, ya que estos caudales fueron calculados con valores promedios en los valores de las diferentes variables.
- El régimen de caudales en la subcuenca Lempa Alto se ve afectado principalmente por el flujo hortoniano existe debido a la geología de la zona, este comportamiento es el que permite la existencia de caudal en la época de verano produciendo así el flujo base de toda la sub cuenca.
- La distribución de la precipitación en toda la subcuenca Lempa Alto no es uniforme ya que esta se ve alterada por la orogenia de la región, la cual está conformada por la cordillera de Sierra Madre, dando lugar a que en esta zona se produzcan caudales considerables para áreas pequeñas.
- El modelo hidrológico espacialmente distribuido y empírico hace de él una herramienta muy importante para la toma de decisiones en el cuidado y el manejo integral que conforman la subcuenca Lempa Alto, además es una herramienta muy importante para verificar la disponibilidad hídrica de todas las microcuencas que conforman la subcuenca.
- El modelo hidrológico empírico, que trata de explicar el comportamiento hidrológico de toda la subcuenca a través de una ecuación es una herramienta muy versátil para evaluar la disponibilidad hídrica o para la toma de decisiones, al contar con la información que esta necesita.
- En la sub-cuenca lempa alto no se produce la infiltración hasta el manto acuífero, sino que se produce de una manera sub-superficial, de tal manera que lo que se infiltra sale o regresa al cauca, produciendo así un flujo hortoniano.

- El caudal máximo en la sub-cuenca Lempa Alto se obtiene para el mes de septiembre con un valor de $110.128 \text{ m}^3/\text{seg}$, en donde es razonable su aumento debido a que en ese mes se dan precipitaciones frecuentes y mayores.
- El caudal mínimo es obtenido para el mes de marzo con un valor de $3.26207 \text{ m}^3/\text{seg}$, debido a que es época seca.
- El aumento de caudal en los meses de junio a octubre, se debe a varios factores dentro de los cuales tenemos la precipitación, la evapotranspiración y la escorrentía.
- La priorización de las microcuencas se baso fundamentalmente en el caudal y el área boscosa, el área boscosa es un factor muy importante para mantener el caudal en el periodo de estiaje, y ayuda a contrarrestar las inundaciones en un buen porcentaje.
- Para las microcuencas se tomo en cuenta los focos de contaminación porque es un agente muy perjudicial para las microcuencas, para la salud de las personas que hacen uso de estas y para la fauna acuática existente en el recurso superficial.
- La priorización realizada para las microcuencas puede ser utilizada por las autoridades del plan trifinio, esta autoridad debe poner mayor énfasis en la protección de las aéreas boscosas de las microcuencas de alta prioridad y promover programas de recuperación de áreas boscosas para aquellas microcuencas con bajos porcentajes de estas áreas.

RECOMENDACIONES

- Realizar campañas de aforo constante y permanente para la microcuencas prioritizadas, y así tener una mejor validación del modelo hidrológico.
- Se recomienda utilizar este modelo hidrológico como una herramienta esencial para la elaboración de un ordenamiento en lo que se refiere a recursos hídricos en la zona de la subcuenca Lempa Alto.
- Con las microcuencas prioritizadas, realizar estudios diversos para identificar cual microcuenca puede ser utilizada para abastecimiento de agua, dentro de la zona.
- El uso del modelo genérico de la subcuenca Lempa Alto, puede ser utilizado por las diferentes entidades de Gobierno, de cada uno de los países relacionados, para la valoración y el uso que se le pueda aplicar al recurso hídrico.
- El uso de las ecuaciones para la obtención del caudal mensual y anual, tiene que ser calculado con las variables ahí mencionadas en las condiciones dadas.
- No es recomendable utilizar el modelo hidrológico, cuando se quiere analizar eventos extremos, ya que el modelo arroja valores estimados.
- Las microcuencas de priorización muy alta deben de ser declaradas como áreas representativas y protegidas
- Deben establecerse estudios de investigación para realizar un plan de manejo integral para la Sub cuenca Lempa Alto.

BIBLIOGRAFIAS

Comisión Trinacional El Trifinio (Honduras, Guatemala, El Salvador). El Trifinio Y Su Ambiente. Primera Edición. Guatemala: 2008. 150 pg.

Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) – Servicio Hidrológico Nacional. Balance Hídrico Climático y Dinámico de El Salvador. El Salvador: 2005. 118 pg.

Comisión Trinacional El Trifinio (Honduras, Guatemala, El Salvador). Programa Trinacional de Desarrollo Sostenible Para la Cuenca Alta del Rio Lempa. Guatemala: 2004. 42 pg. Extraído en febrero/2009 desde <http://www.sica.int/busqueda/Proyectos>.

Martin Junker (Ing. Hidrogeologo). Metodo RAS, para determinar la Recarga Acuifera Subterranea. 20 pg.

Ven Te Chow. Hidrologia Aplicada. Colombia: 1994. 299 pg.

Benegas y de León. Criterios para priorizar áreas de intervención en cuencas hidrográficas. Costa Rica: 2009. 60 pg. Extraído en Junio/2009 desde <http://orton.catie.ac.cr/>

Eduardo Minder. Modelación Hidrológica en El Sistema Interconectado Central. Trabajo de Grado Universidad Catolica de Chile. Chile: 1997. 180 pg.

Faustino j. Metodología para priorización de cuencas, subcuencas y microcuencas en conservación de suelos y agua. Seminario Taller. Panamá: 1986. 44 pg.

IDEM (Instituto de Hidrologia, meteorología y estudios ambientales de Colombia). Criterios y parámetros para la clasificación y priorización con fines de ordenación de cuencas hidrográficas en Colombia. Colombia: 2002. 8 pg.

Asociación Mundial Para el Agua (GWP). Manejo Integrado de Recursos Hídricos. Primera Edición. Suecia: 2000. 80 pg.

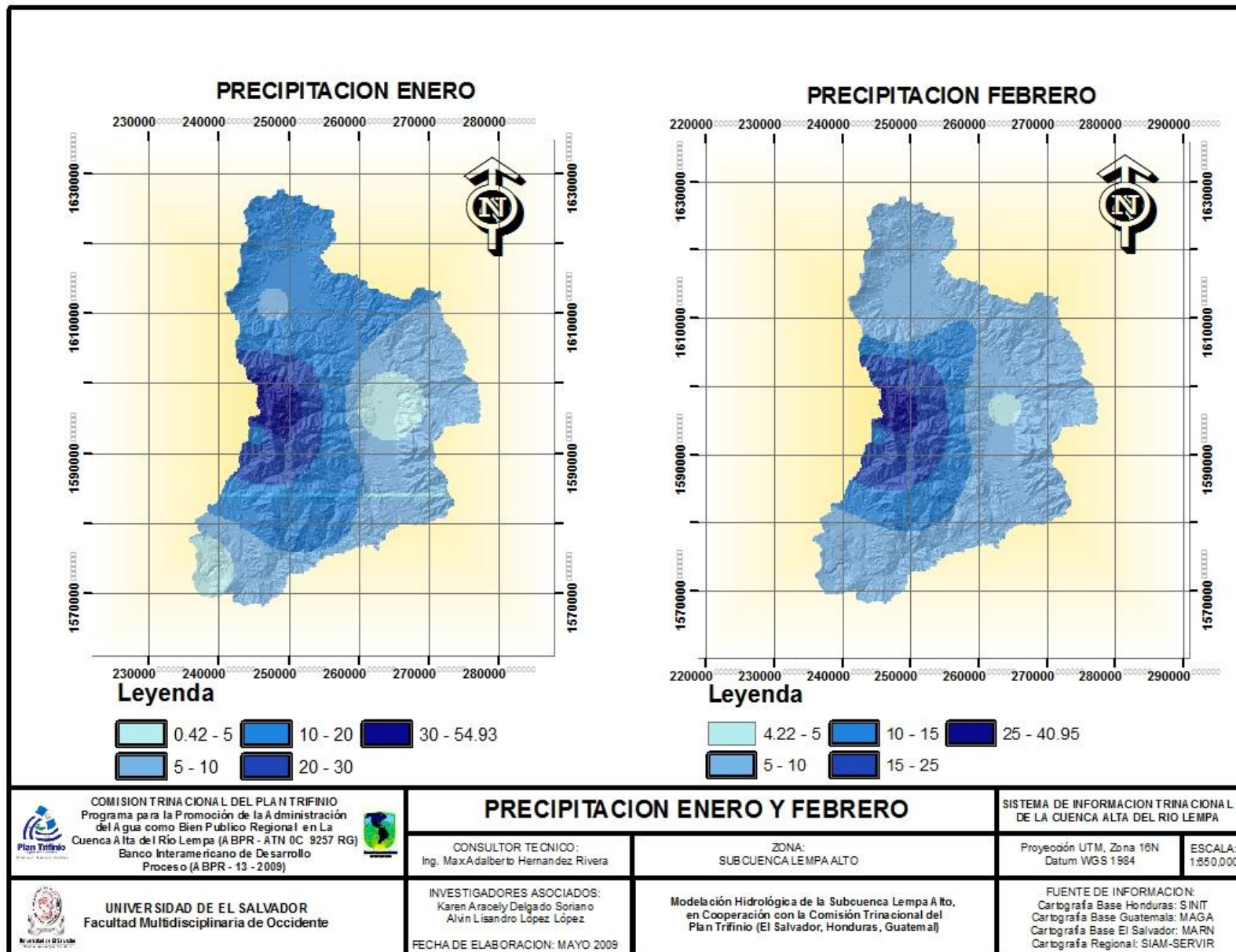
Julio Cesar de los Ríos. Aforo Método de Medición Manual. Lima: 2000. 14 pg.

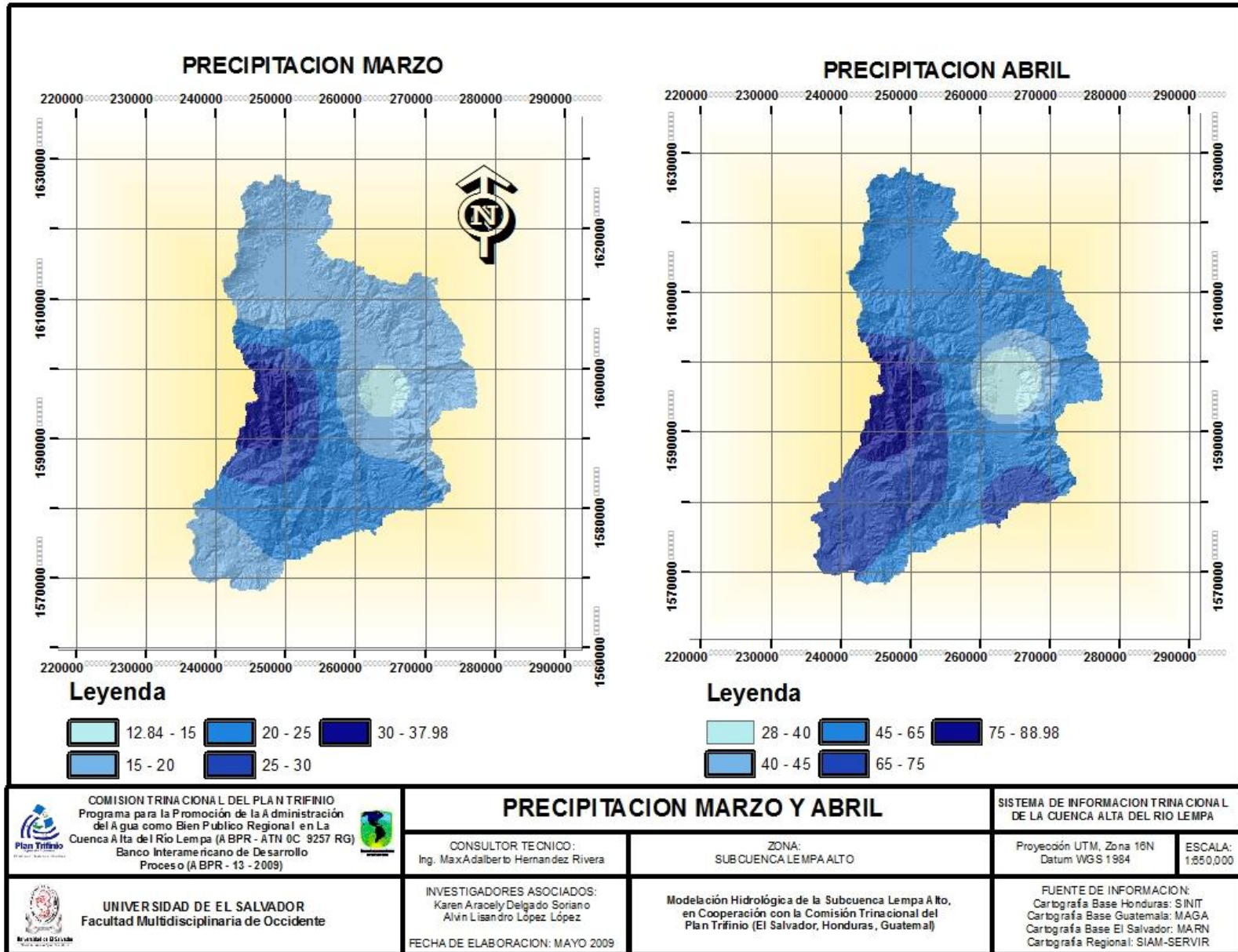


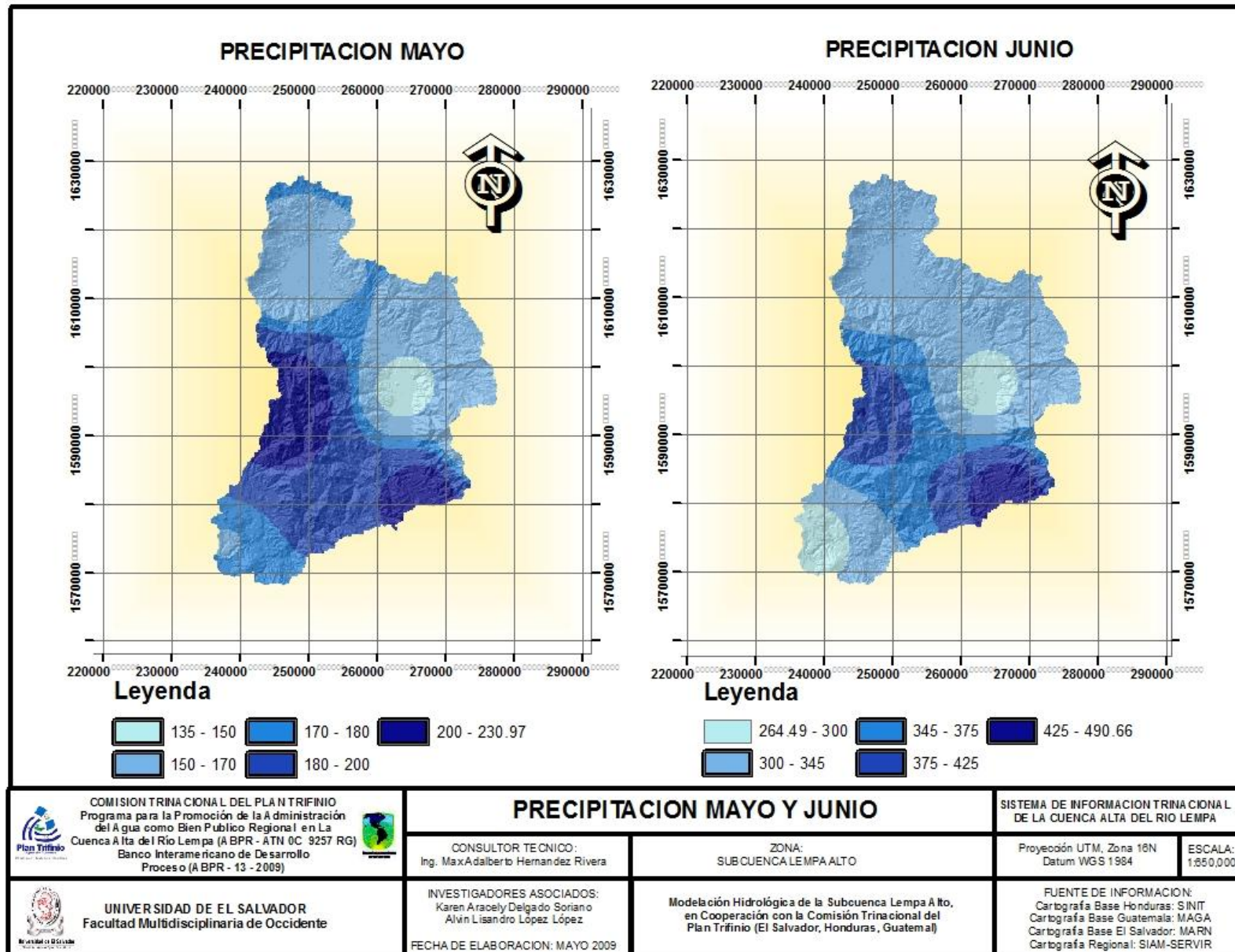
ANEXOS

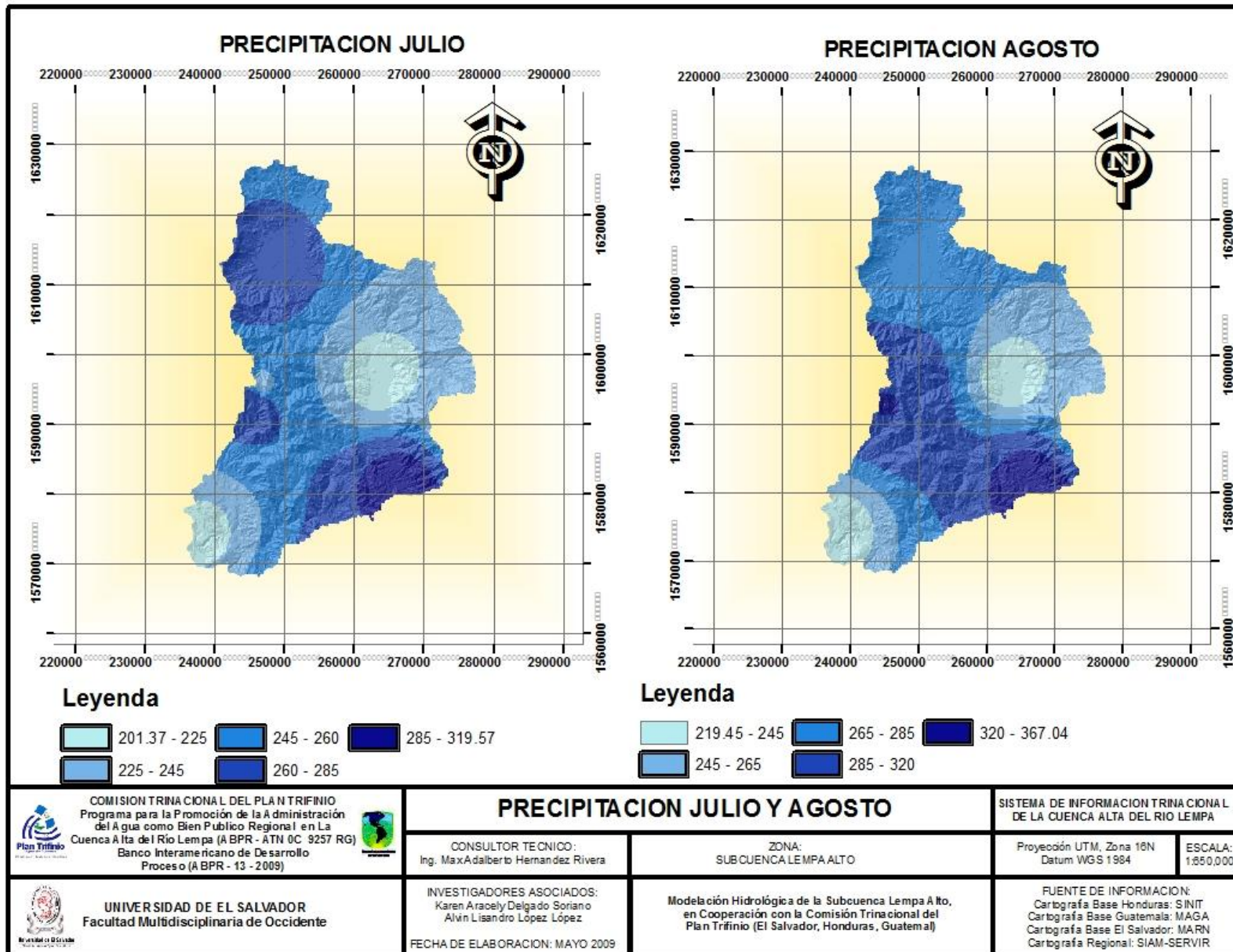


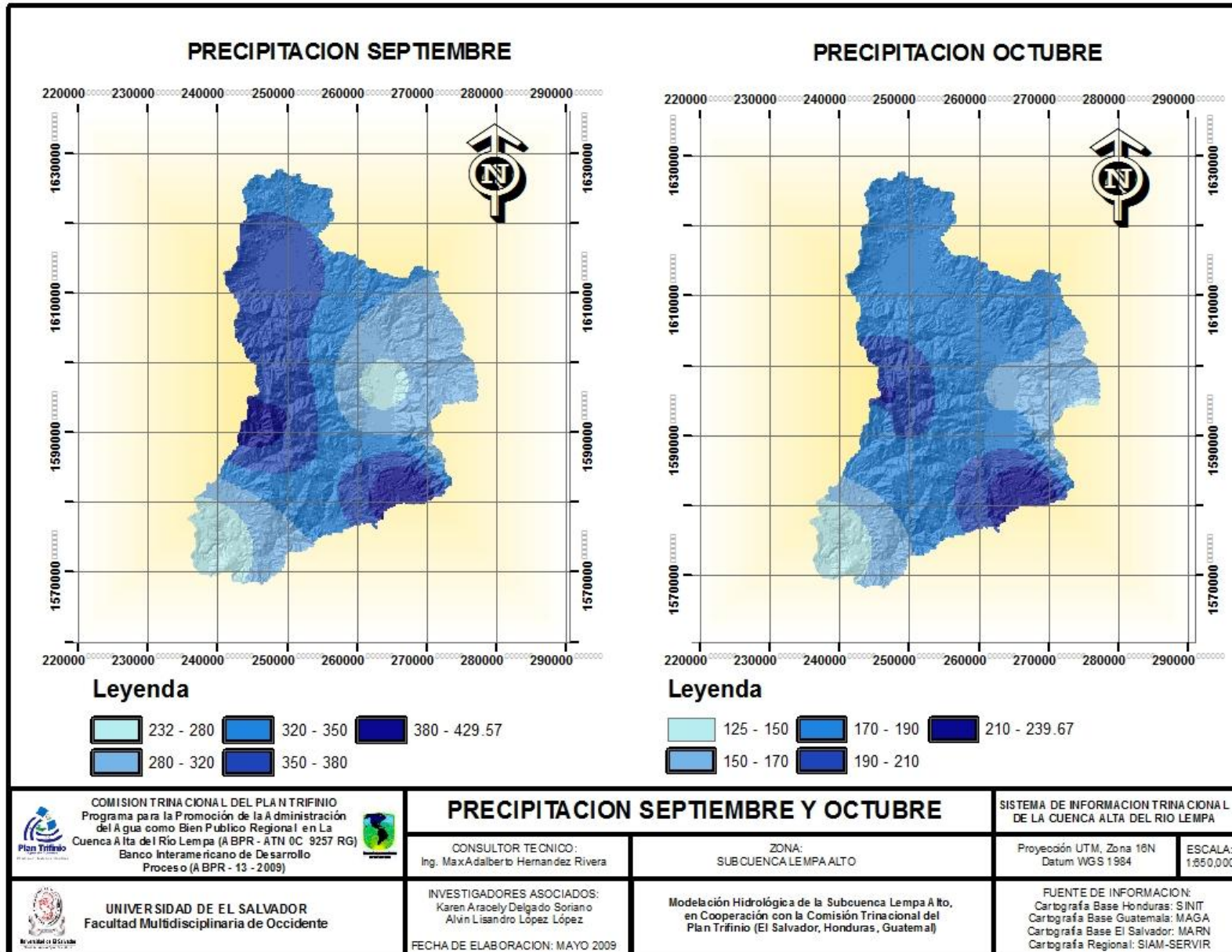
ANEXO 1: MAPAS DE PRECIPITACION MENSUAL (mm)

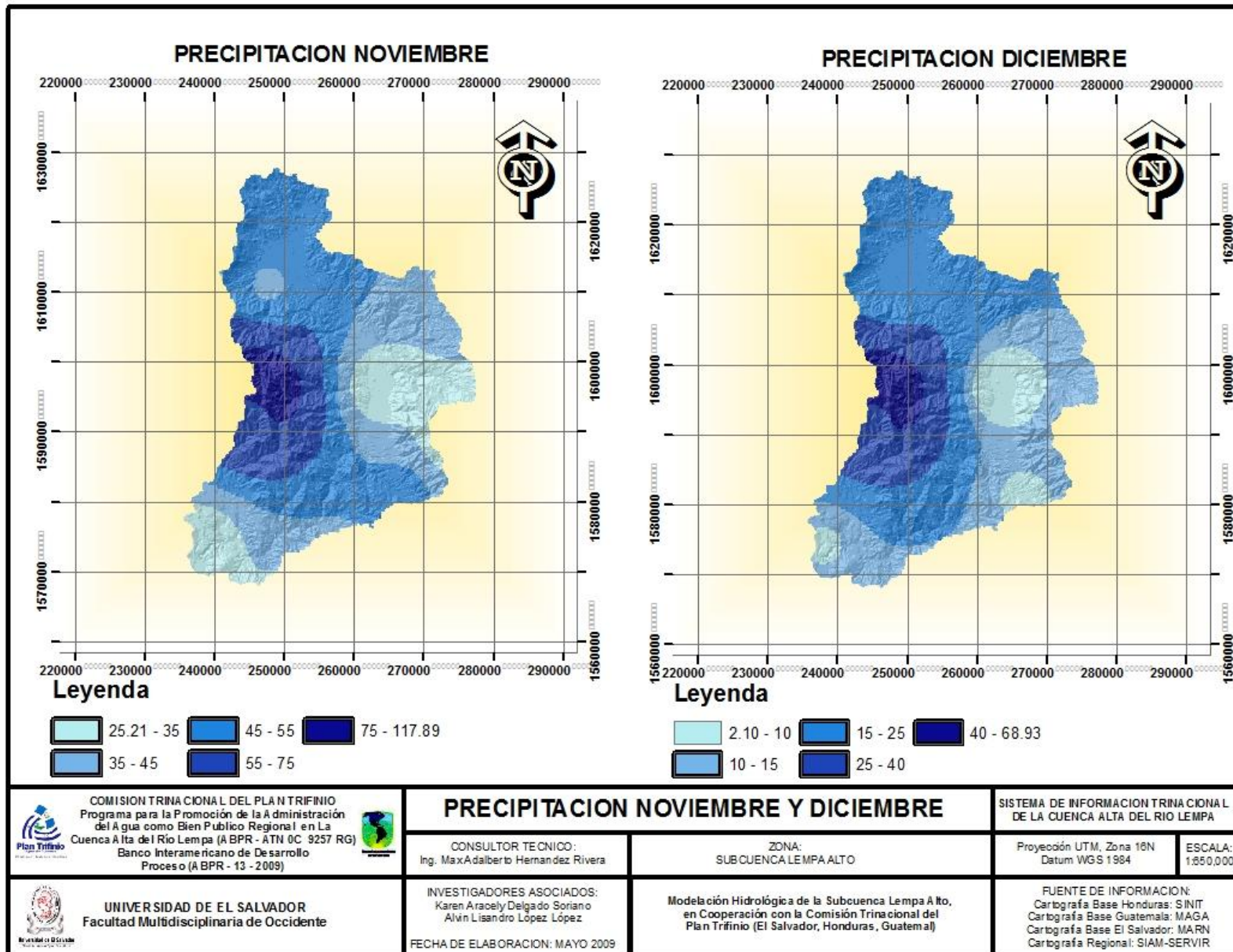






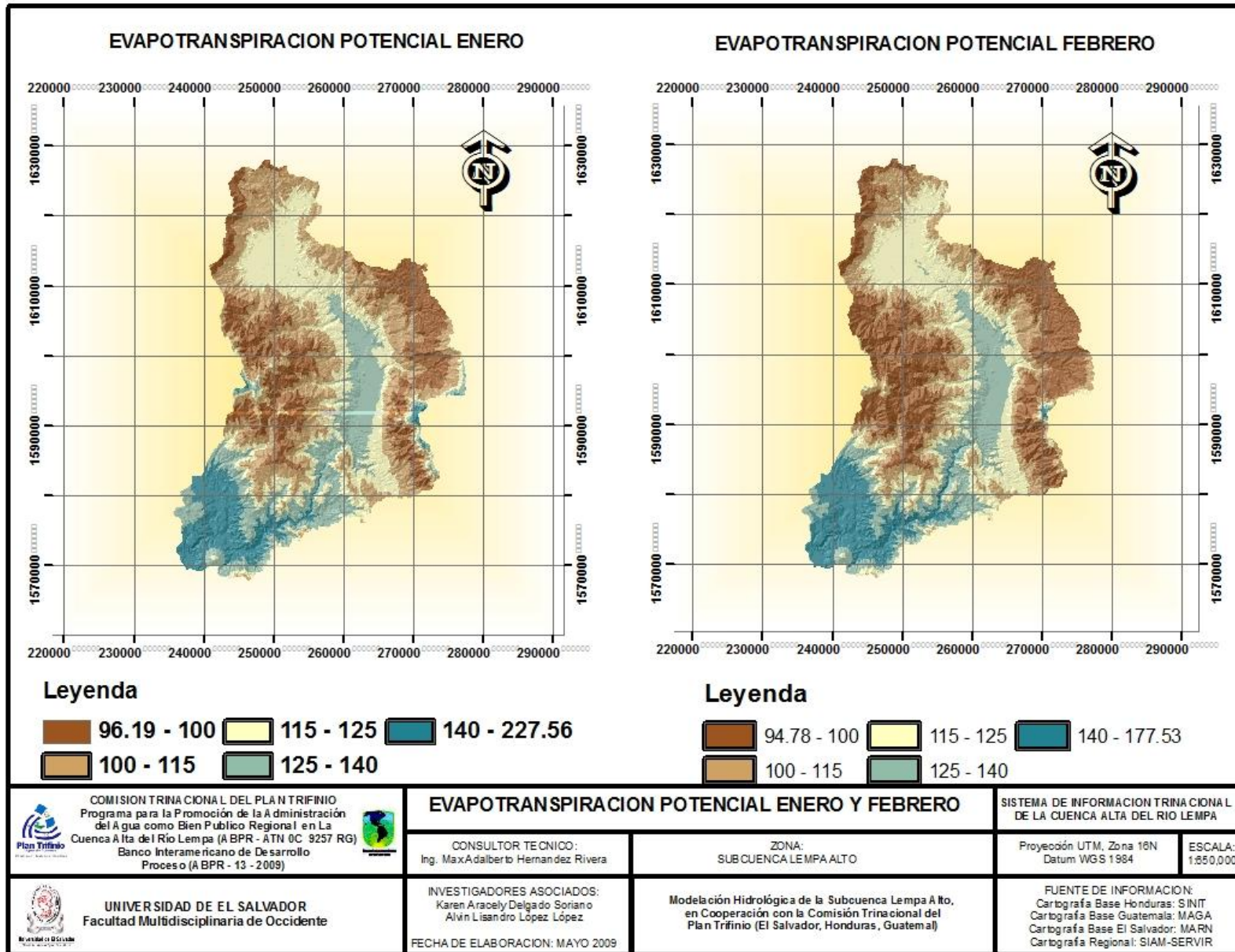


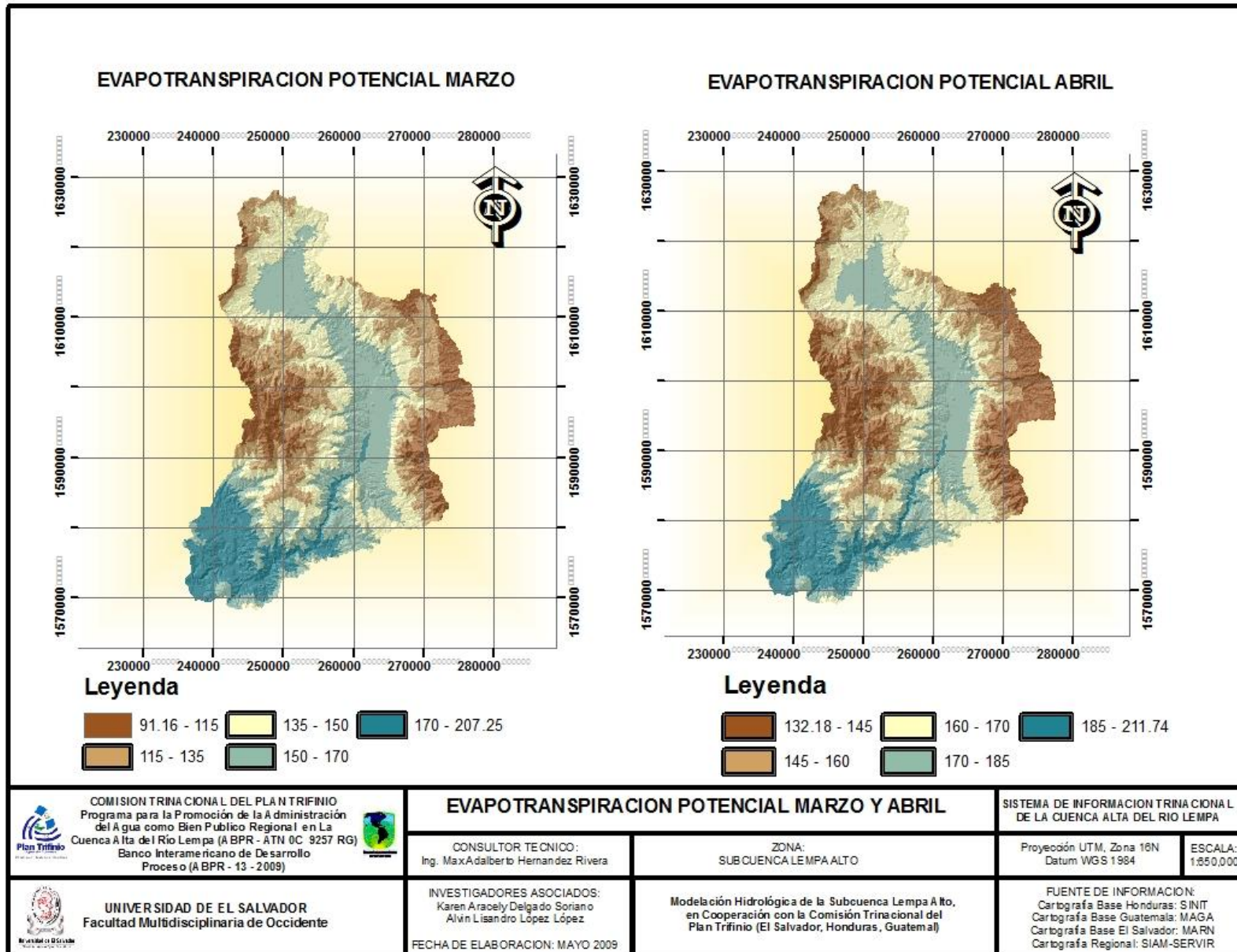


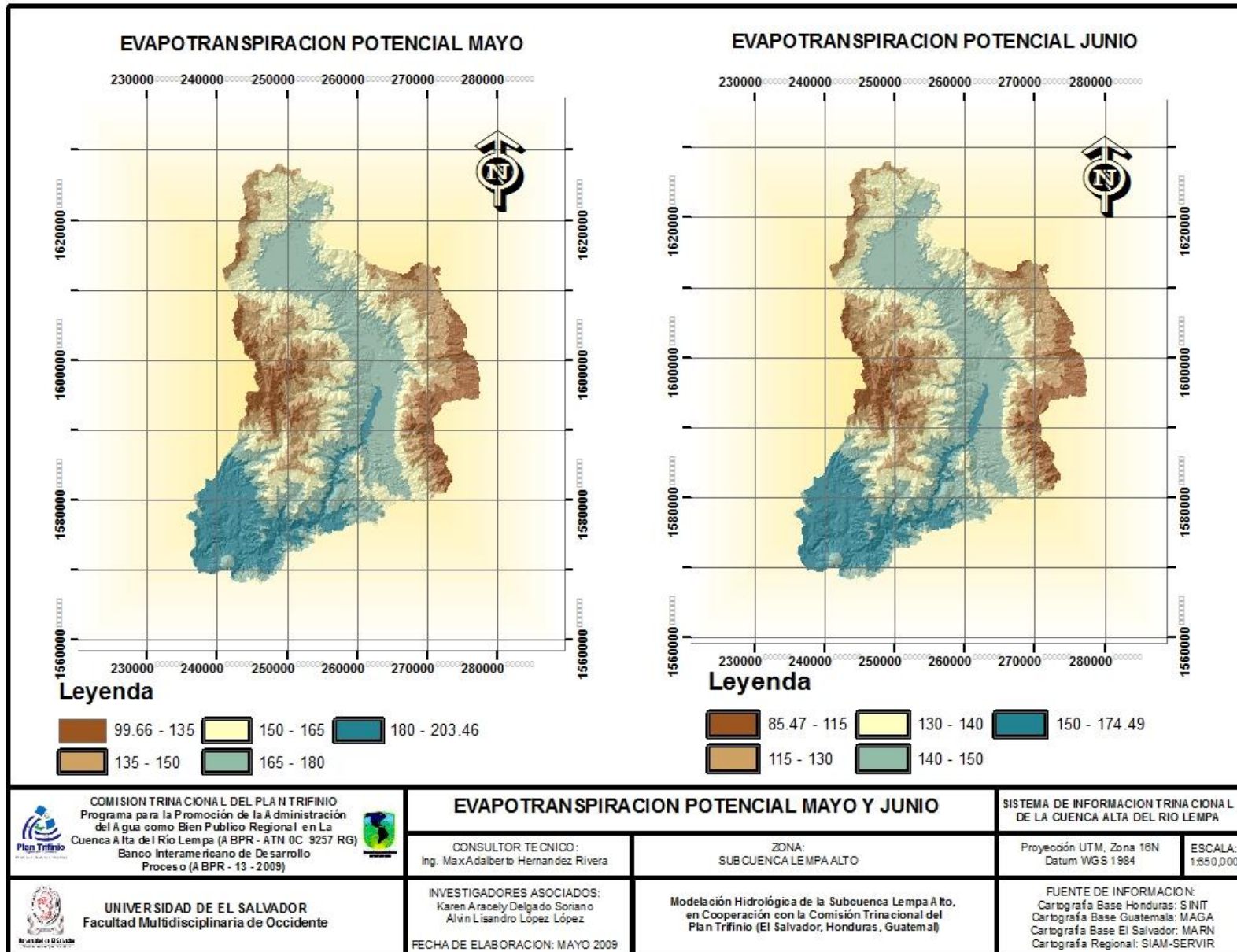


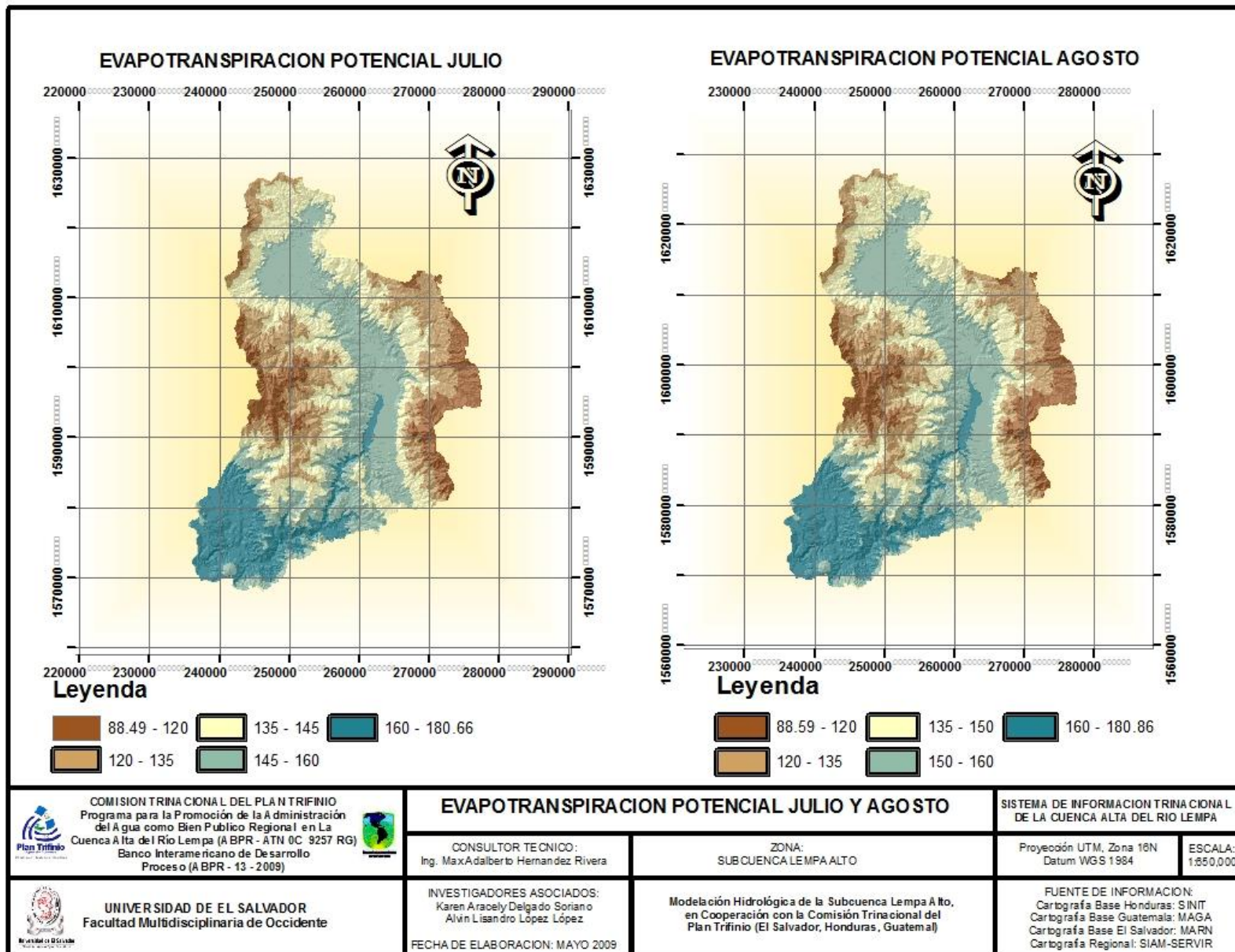


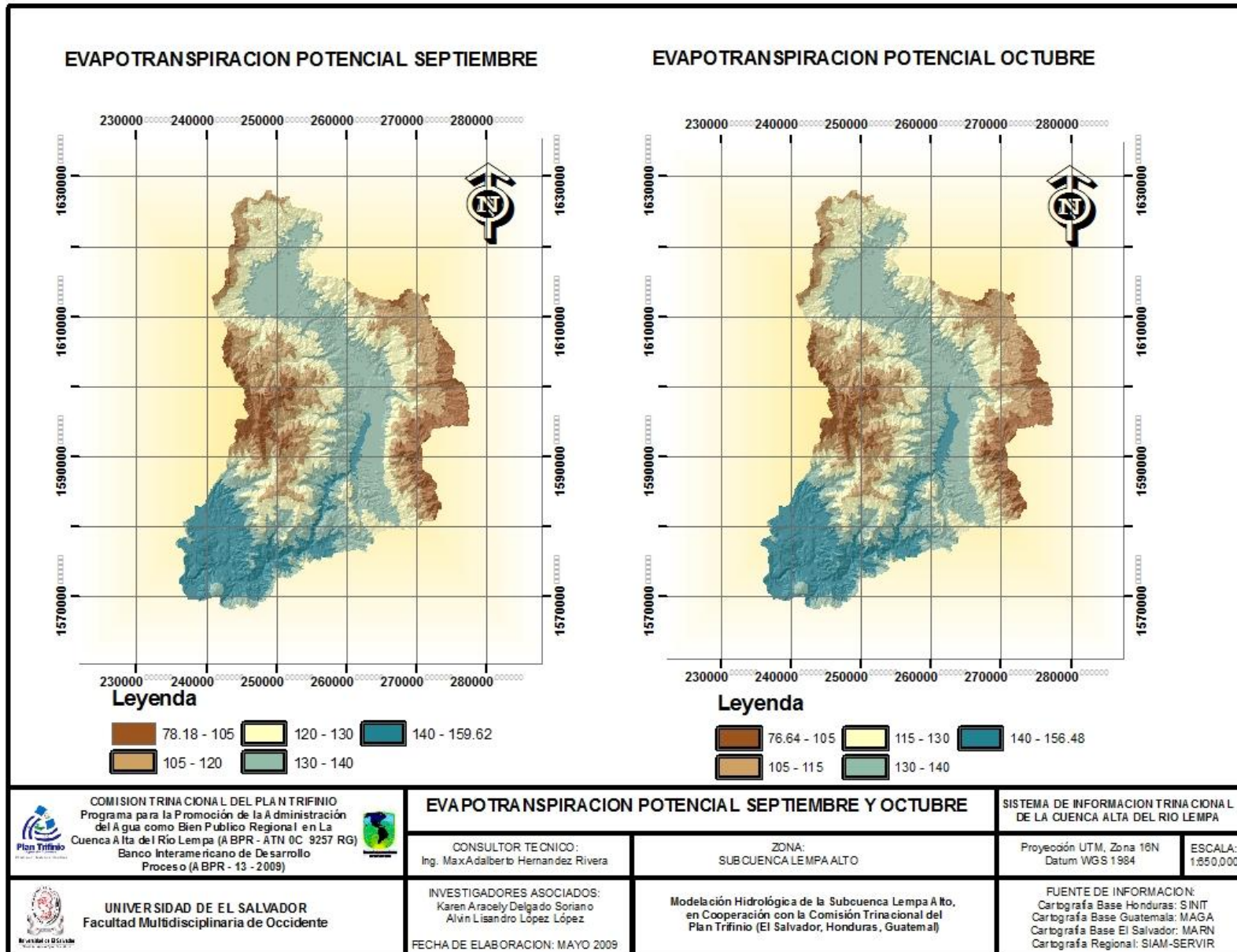
ANEXO 2: MAPAS DE EVAPOTRASPIRACION POTENCIAL MENSUAL (mm)

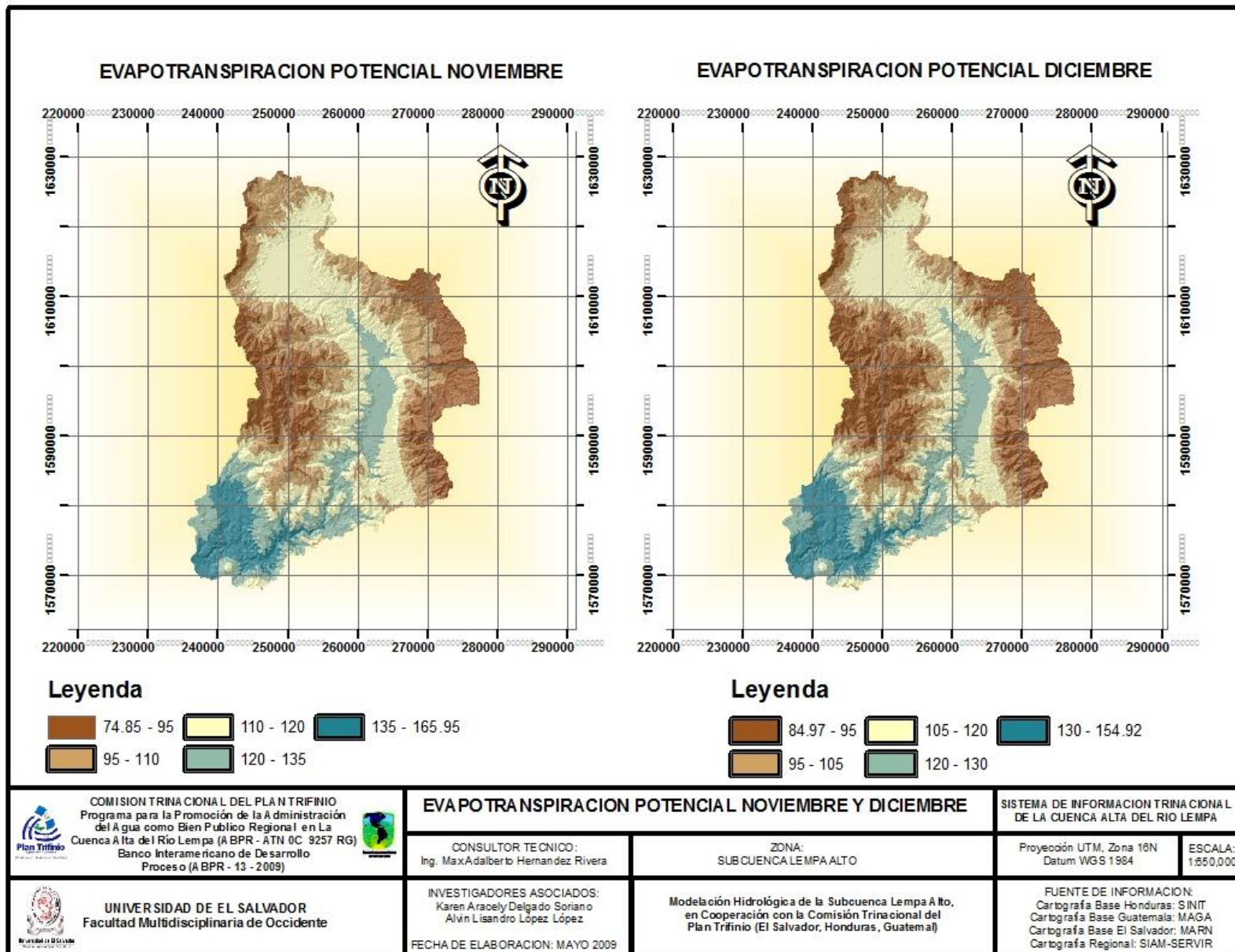






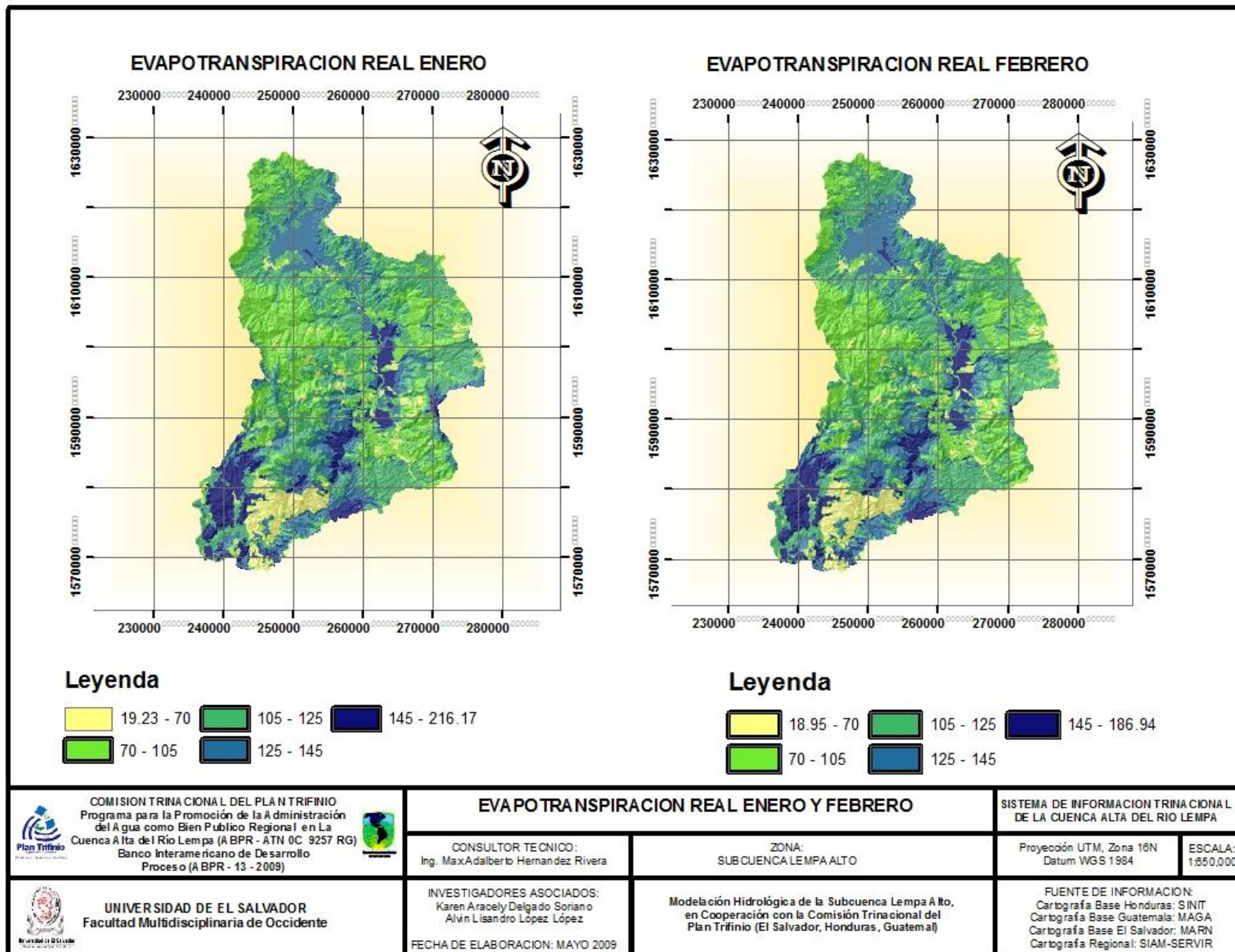


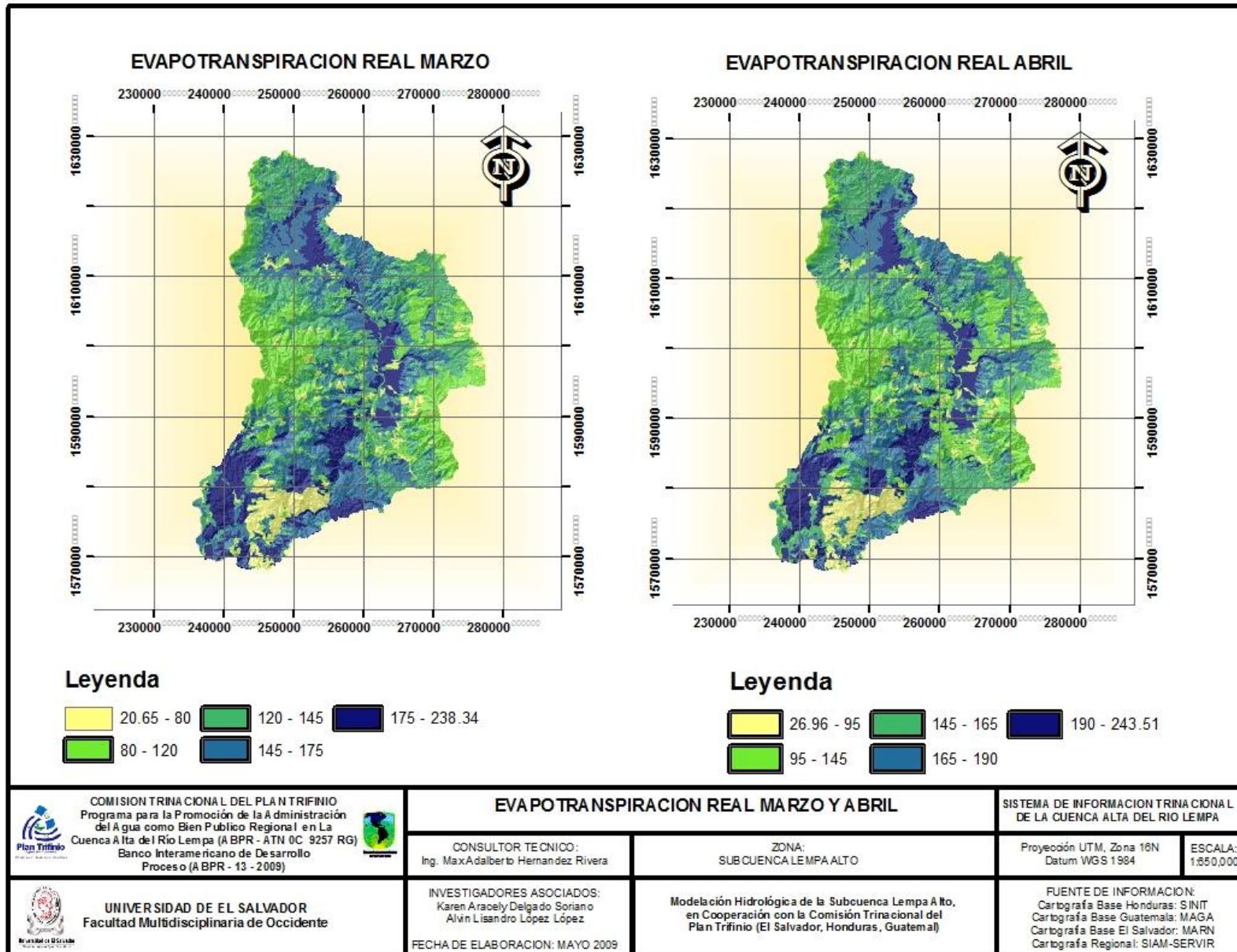


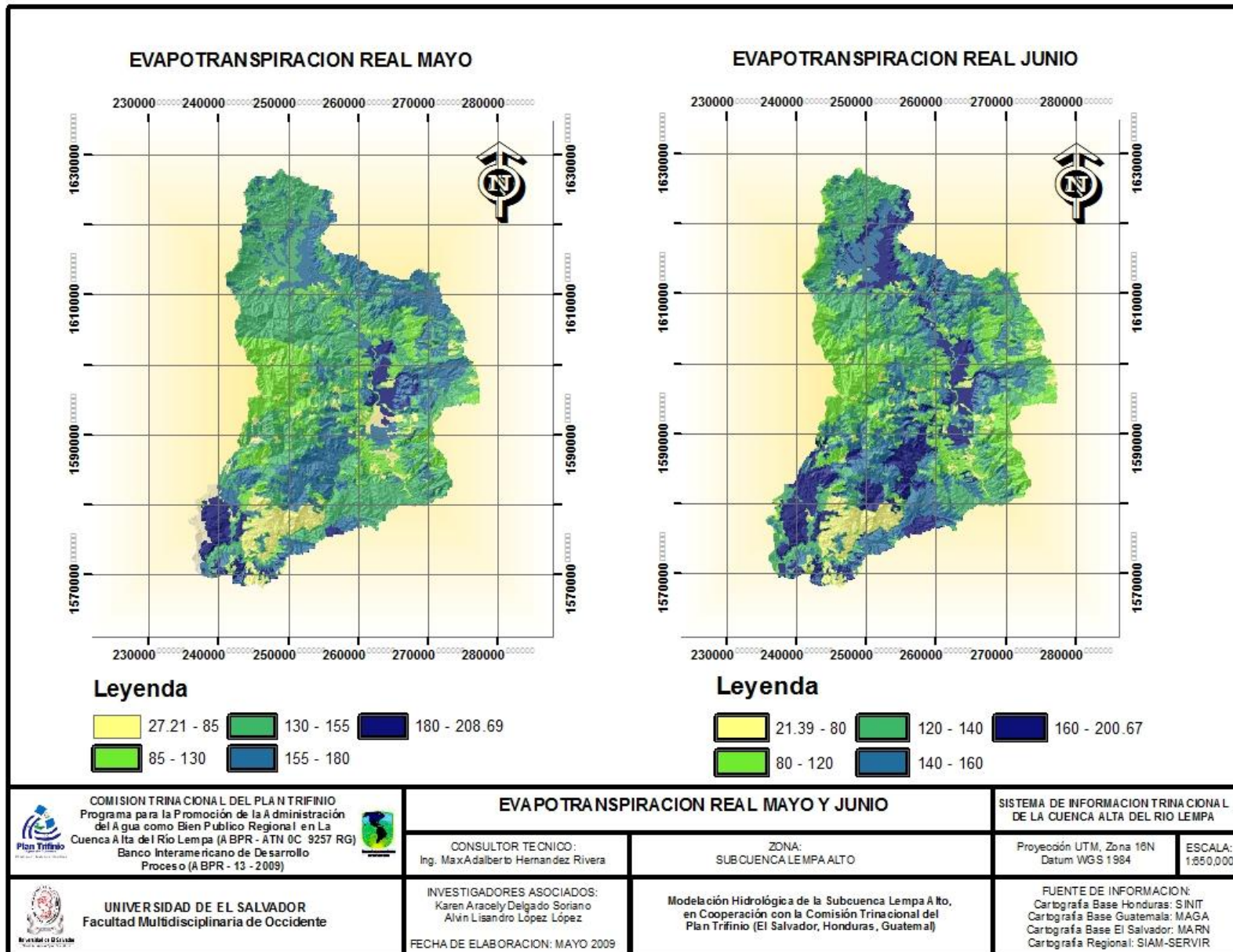


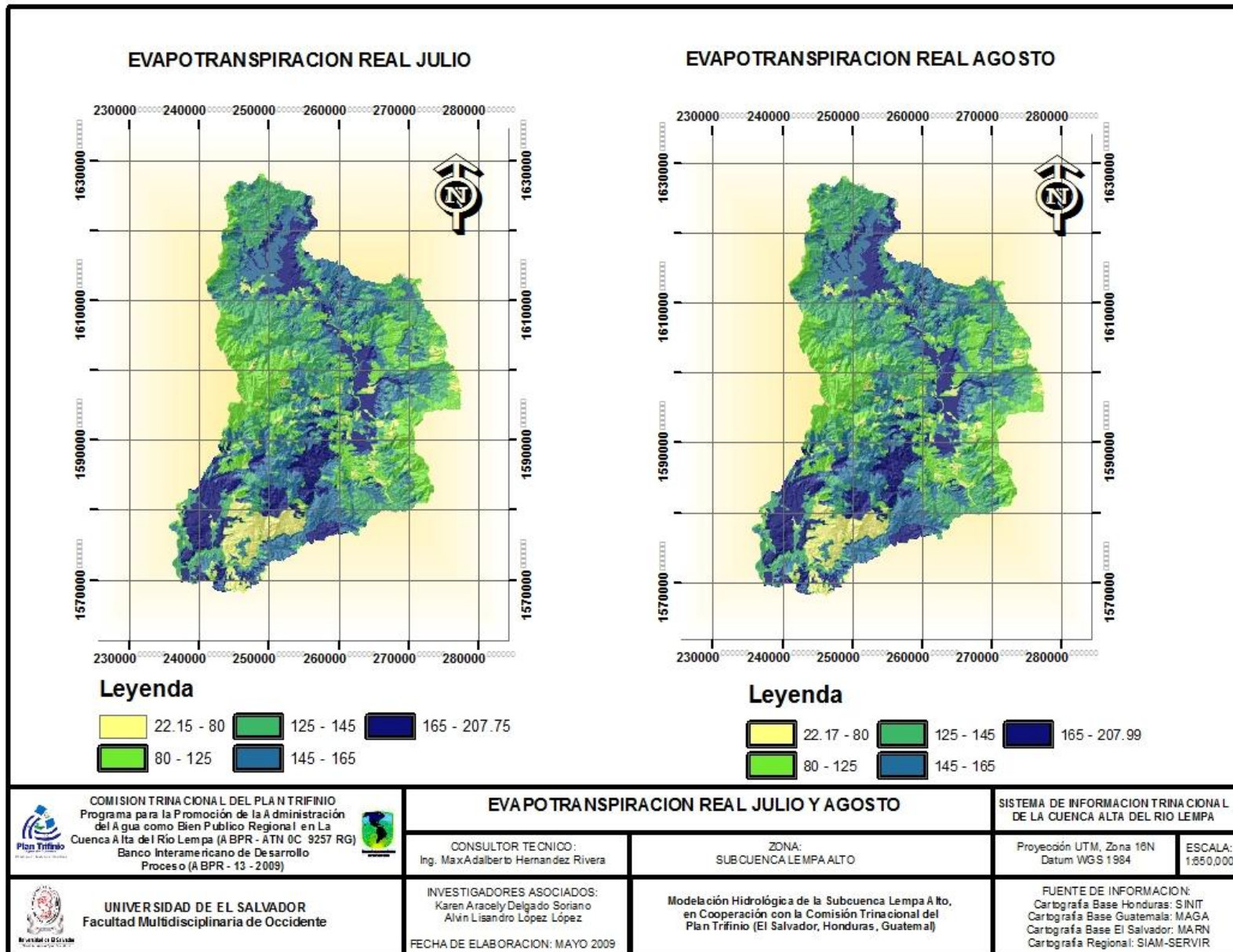


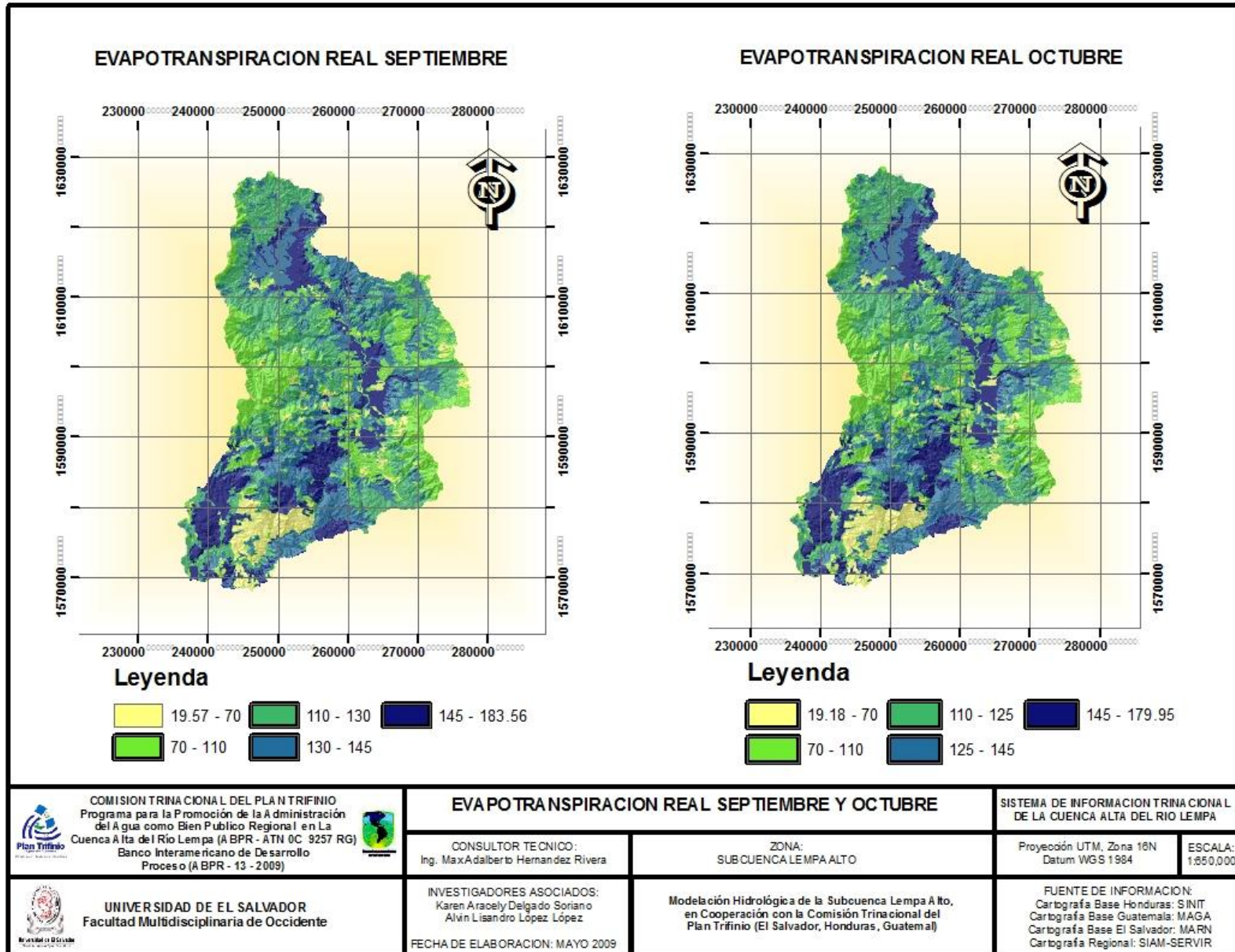
**ANEXO 3: MAPAS DE EVAPOTRASPIRACION REAL
MENSUAL (mm)**

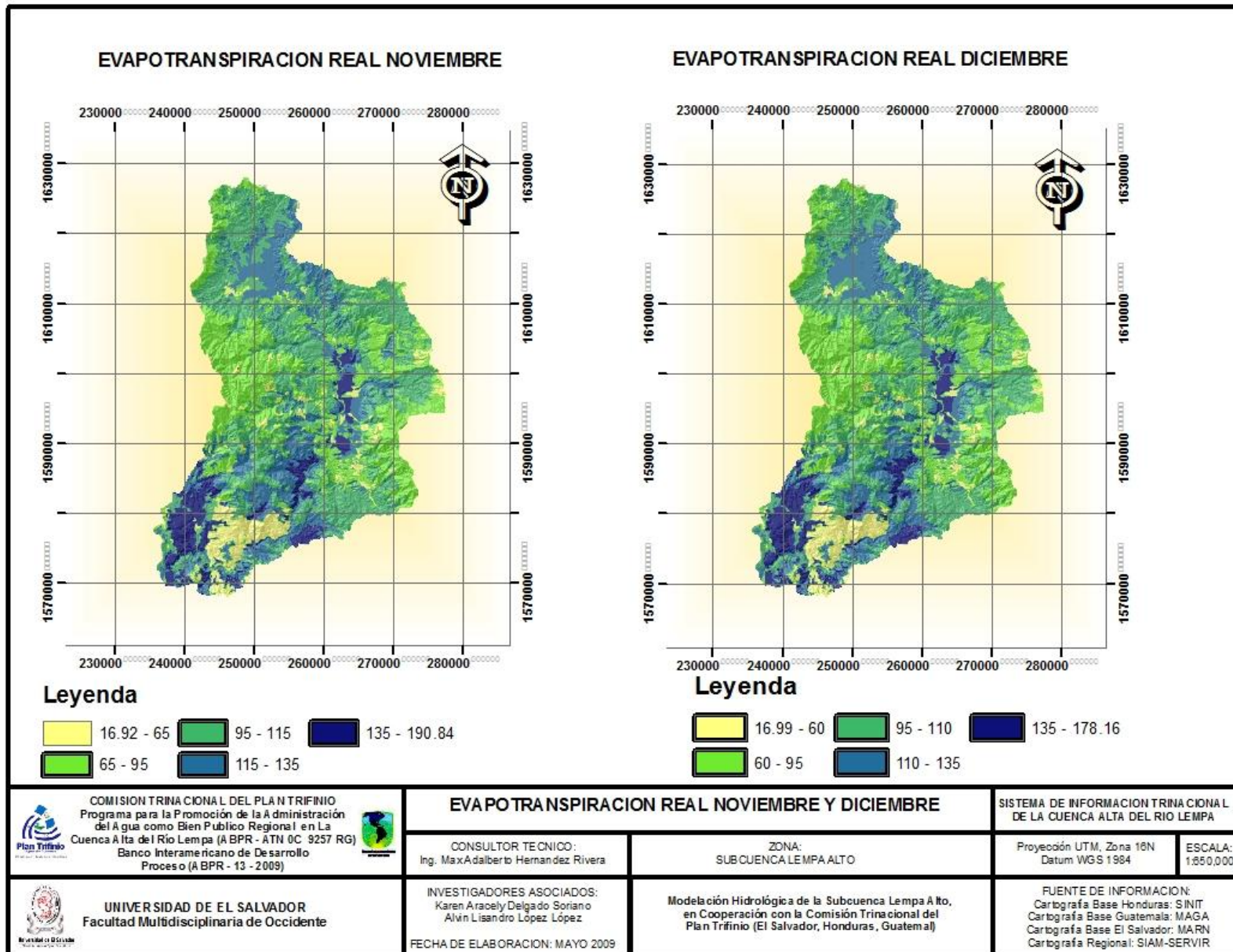






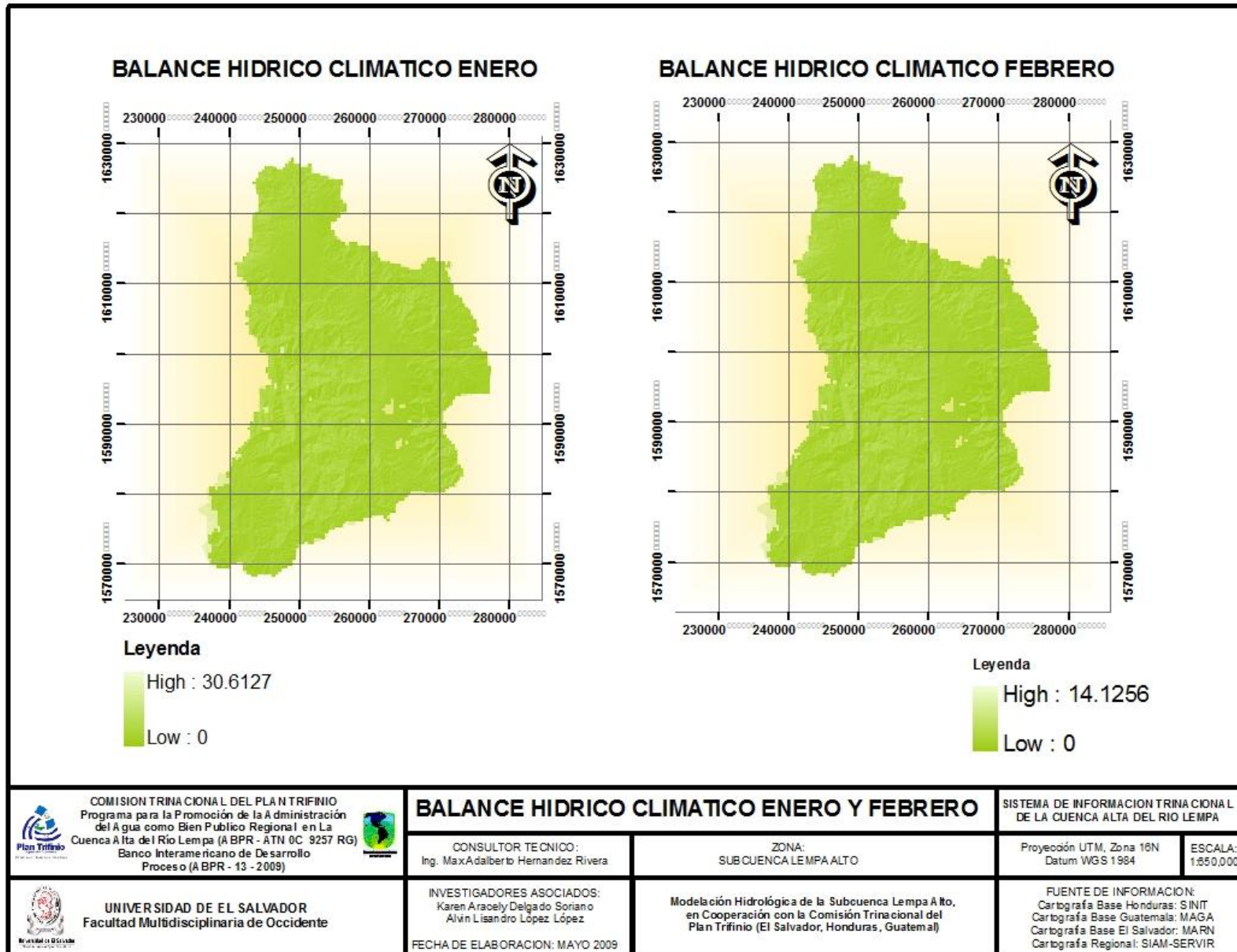


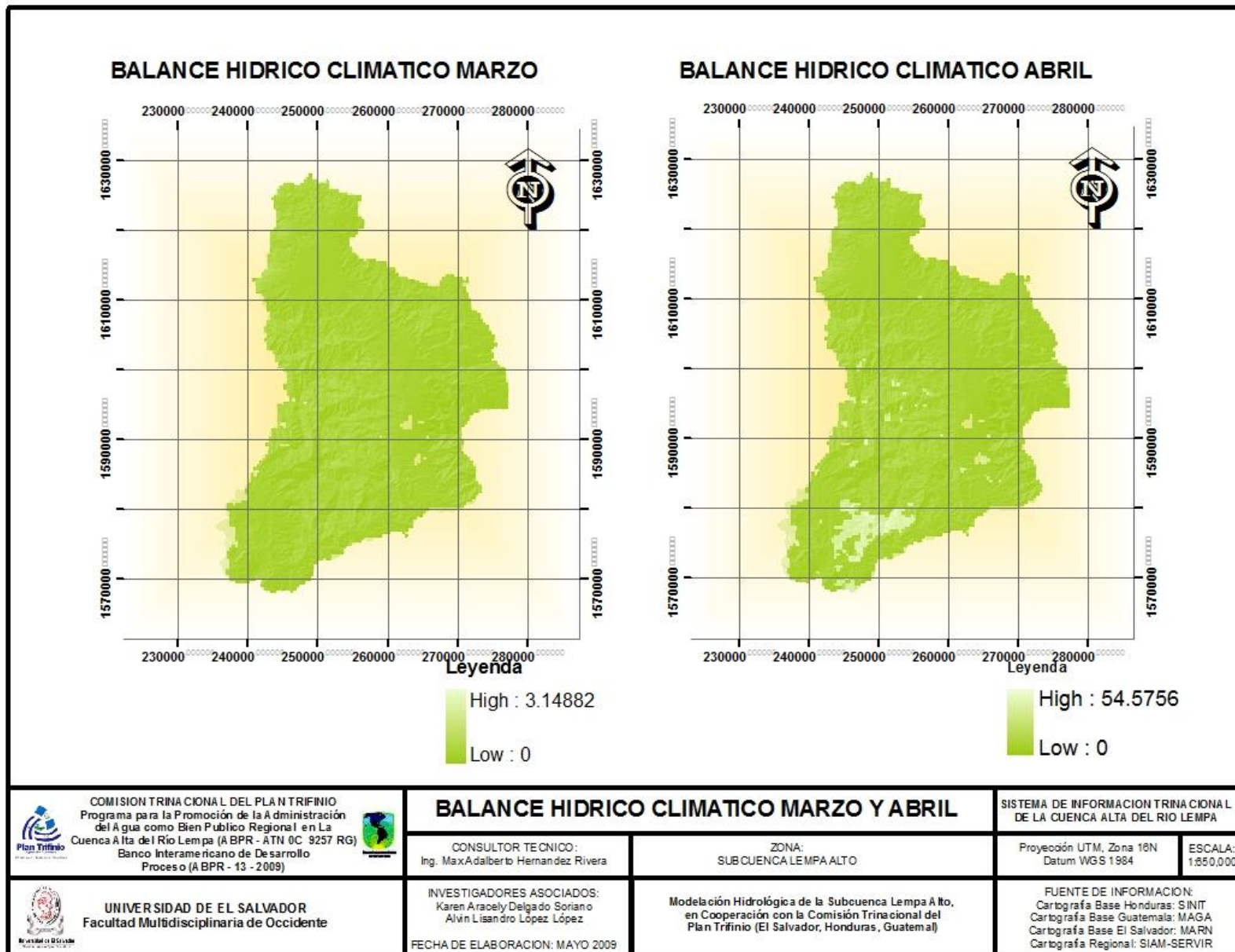


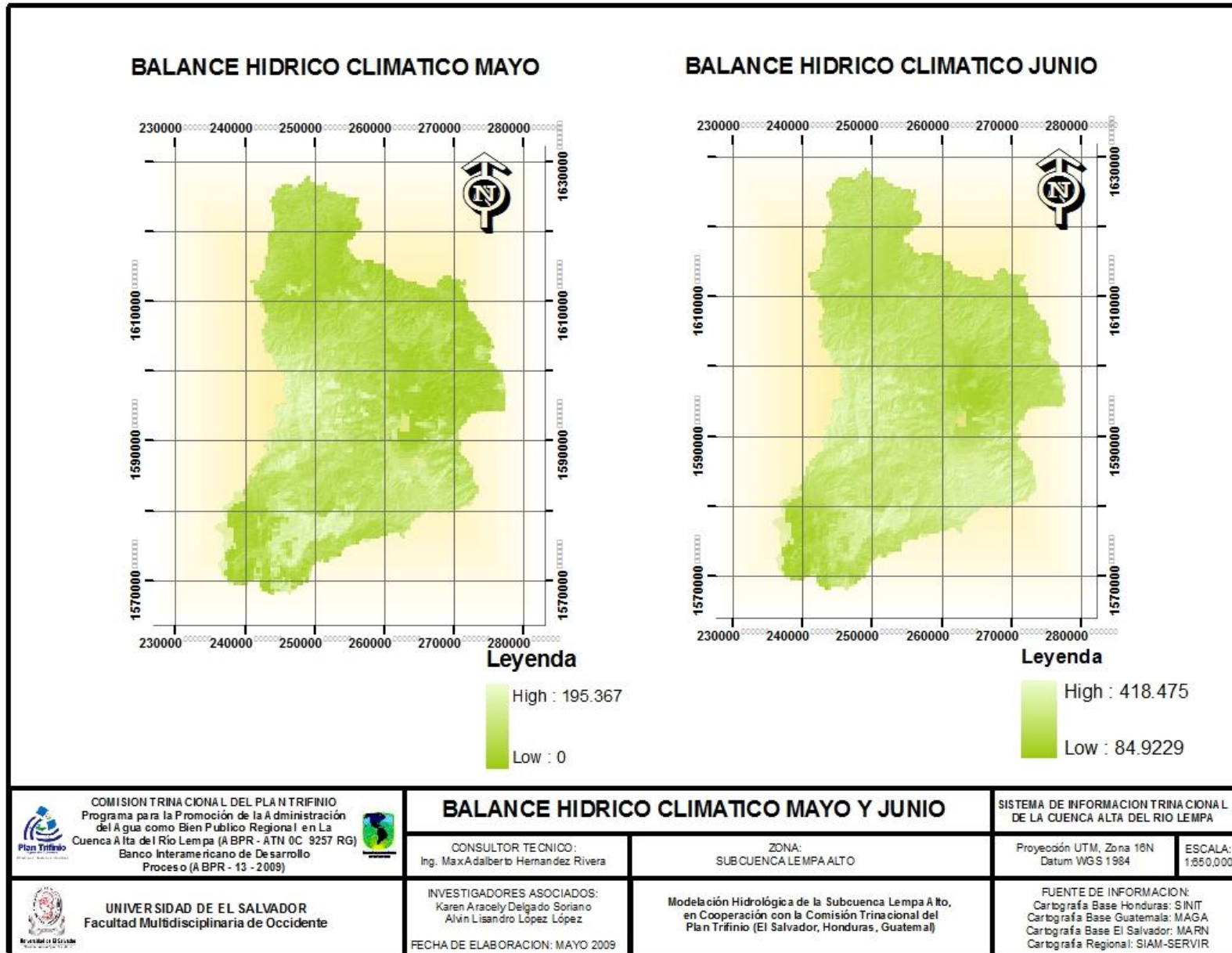


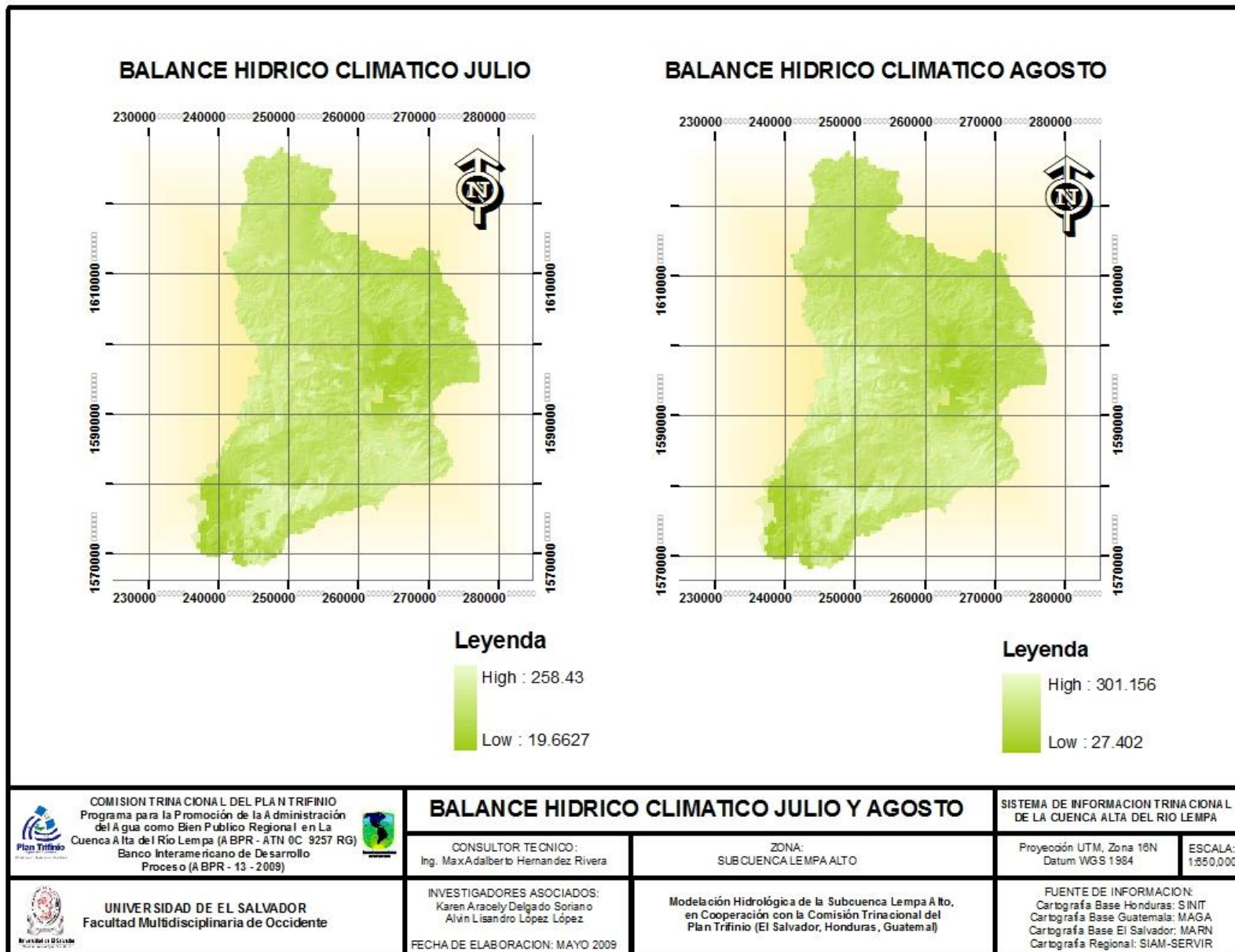


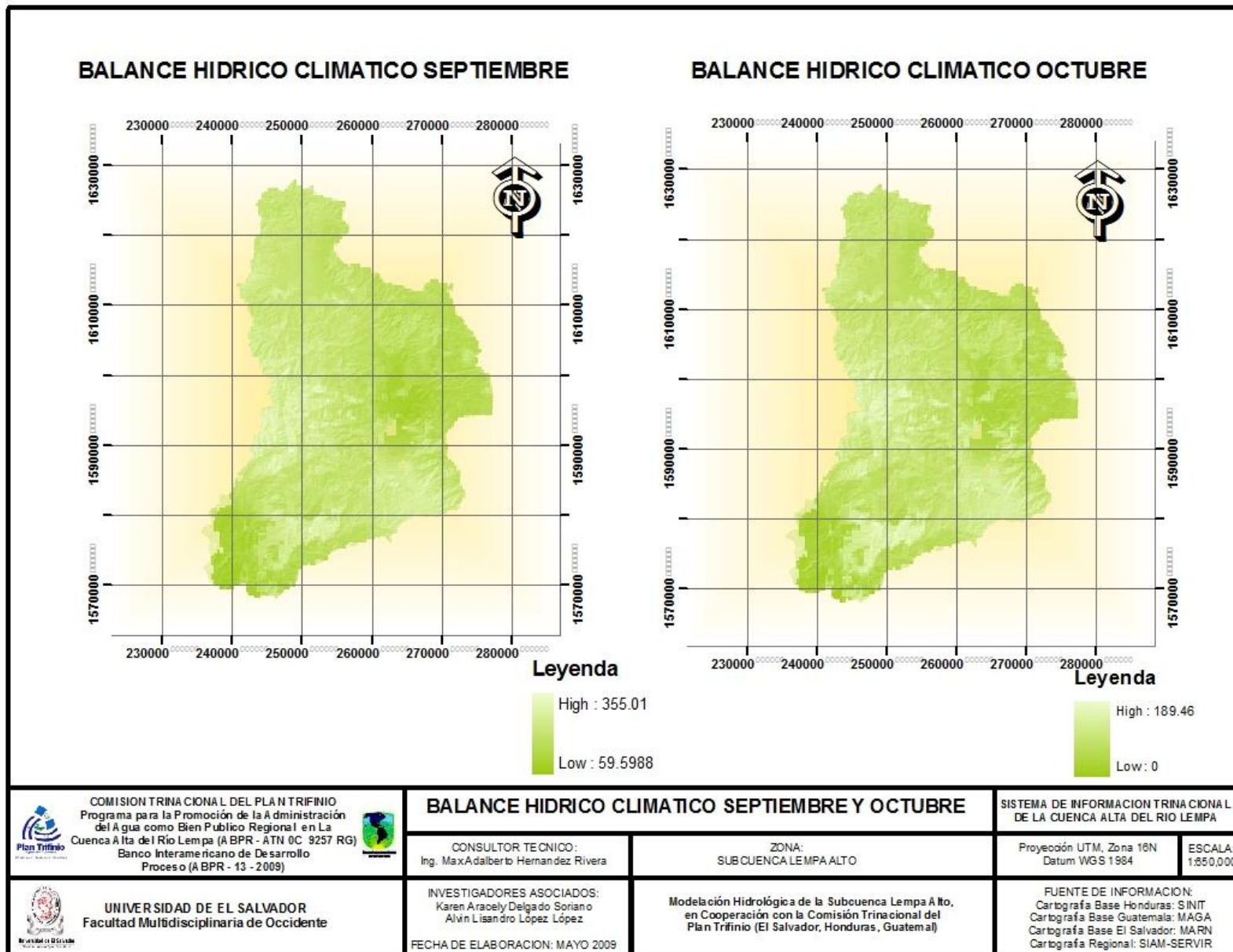
ANEXO 4: MAPAS DE BALANCE HIDRICO CLIMATICO MENSUAL (mm)

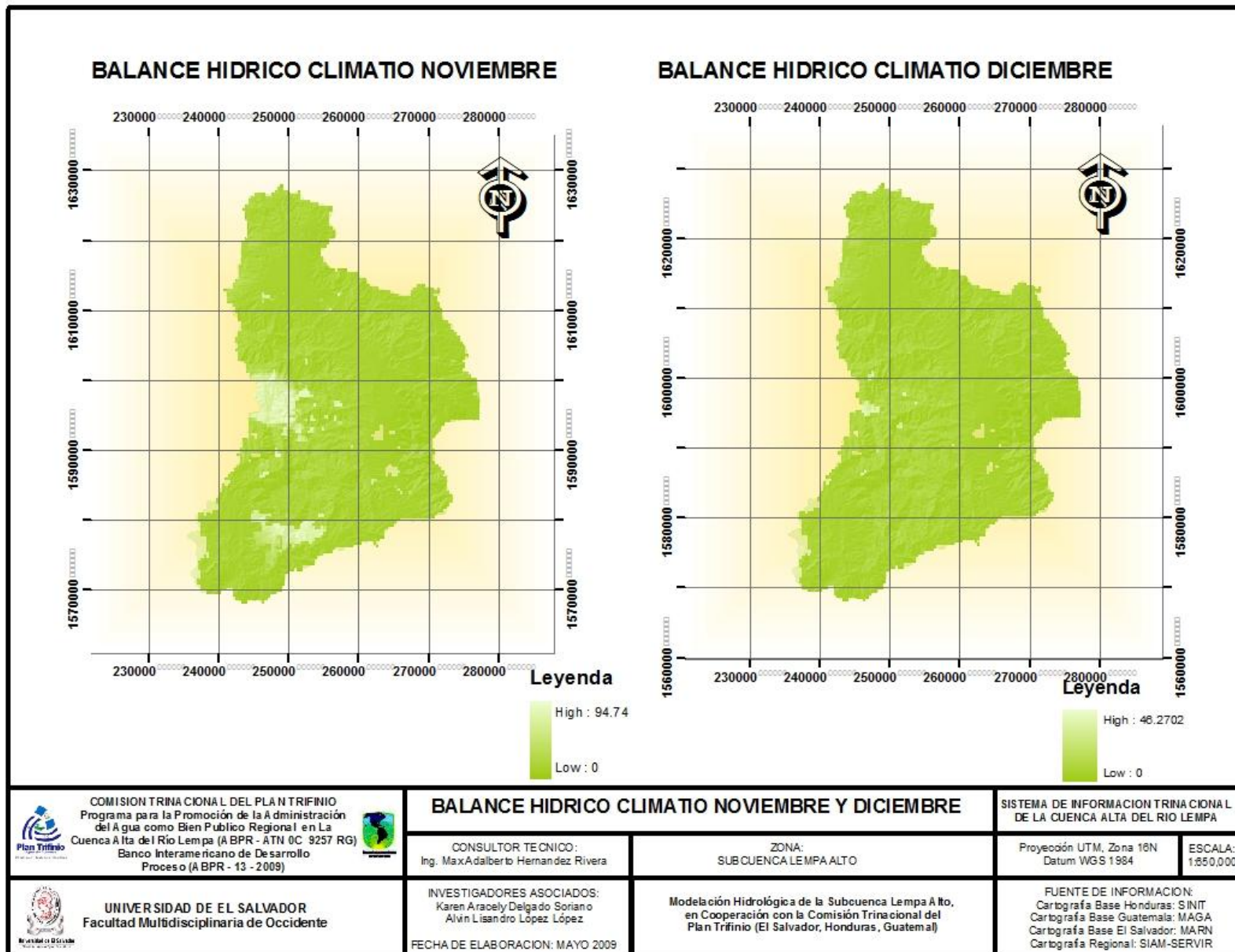






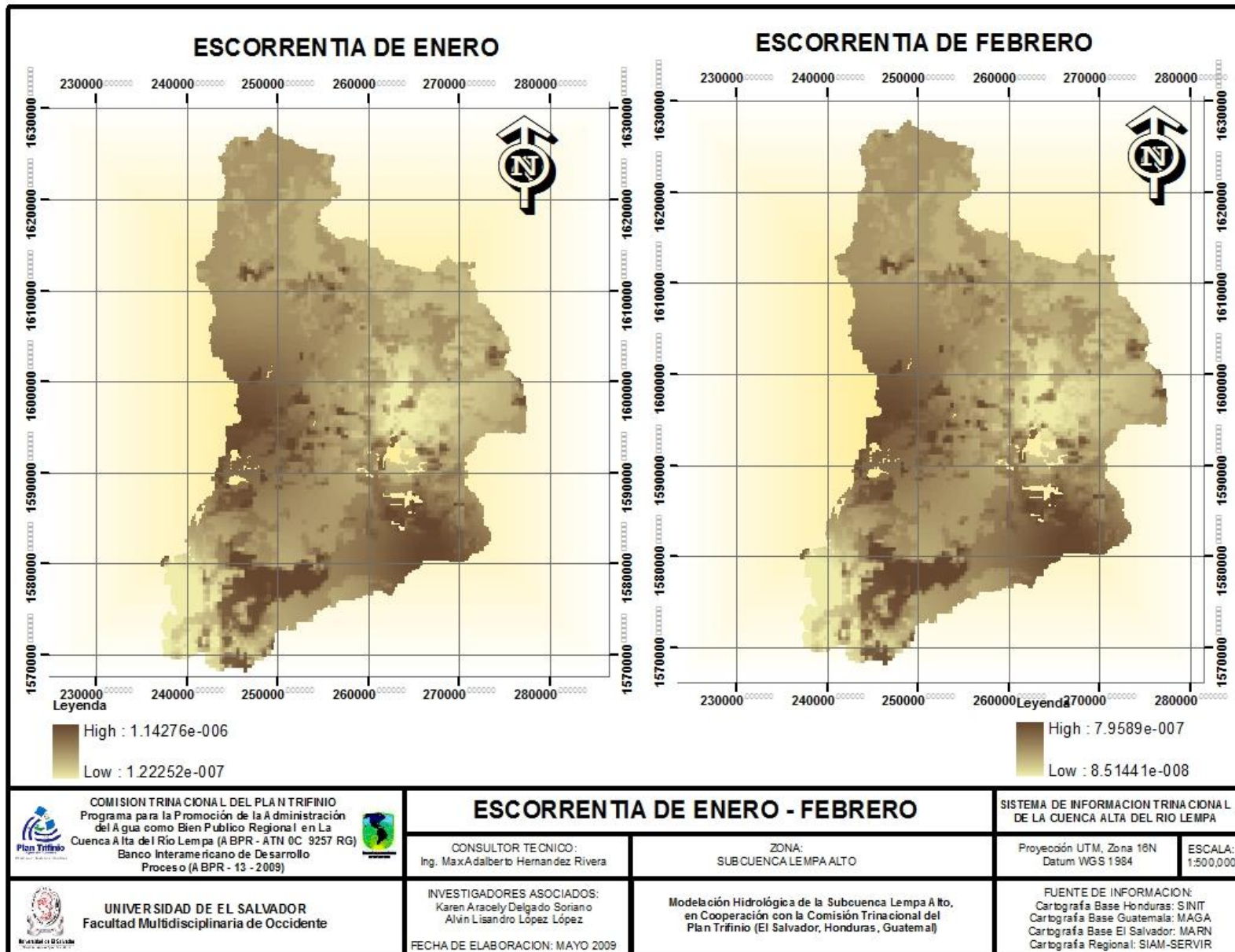


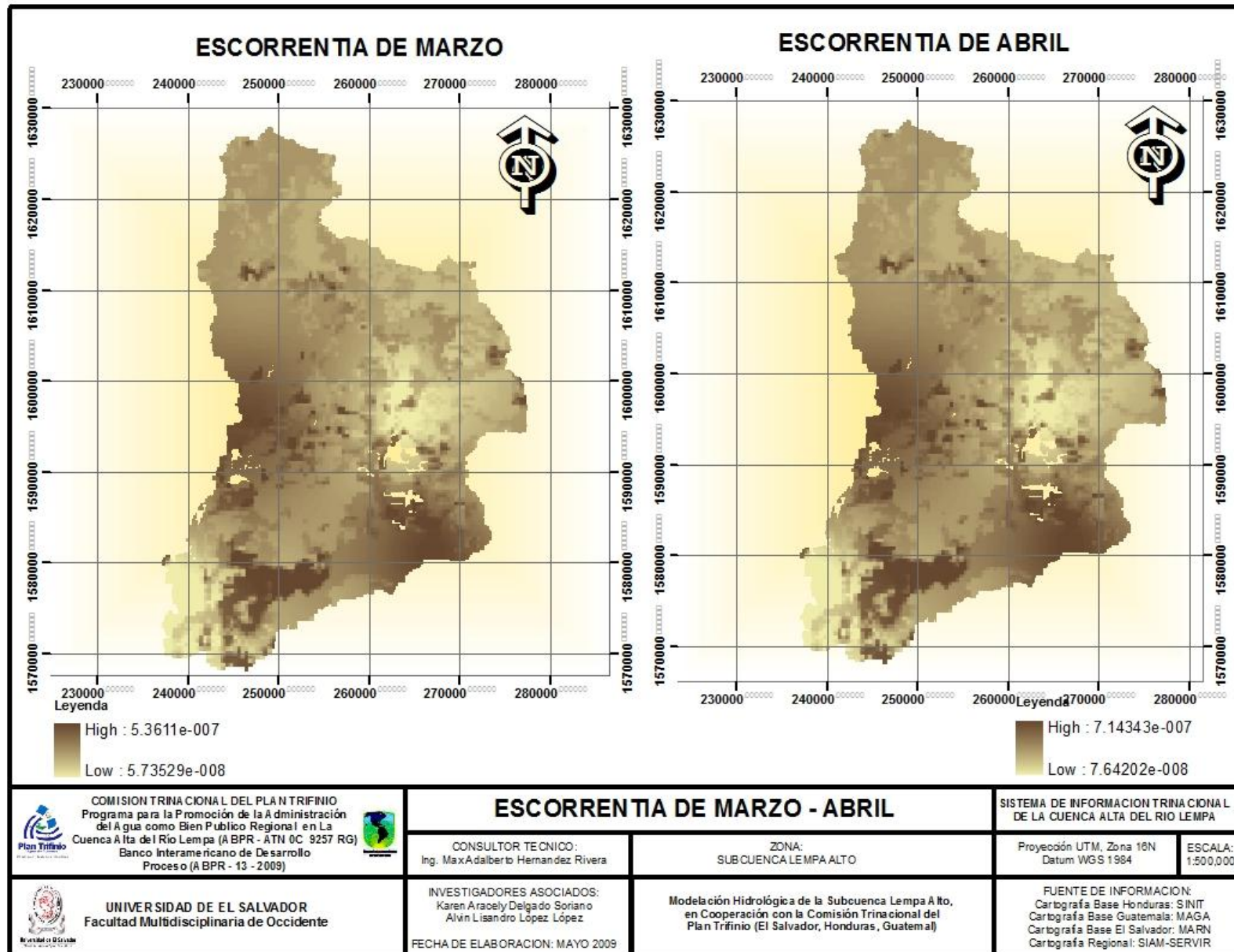


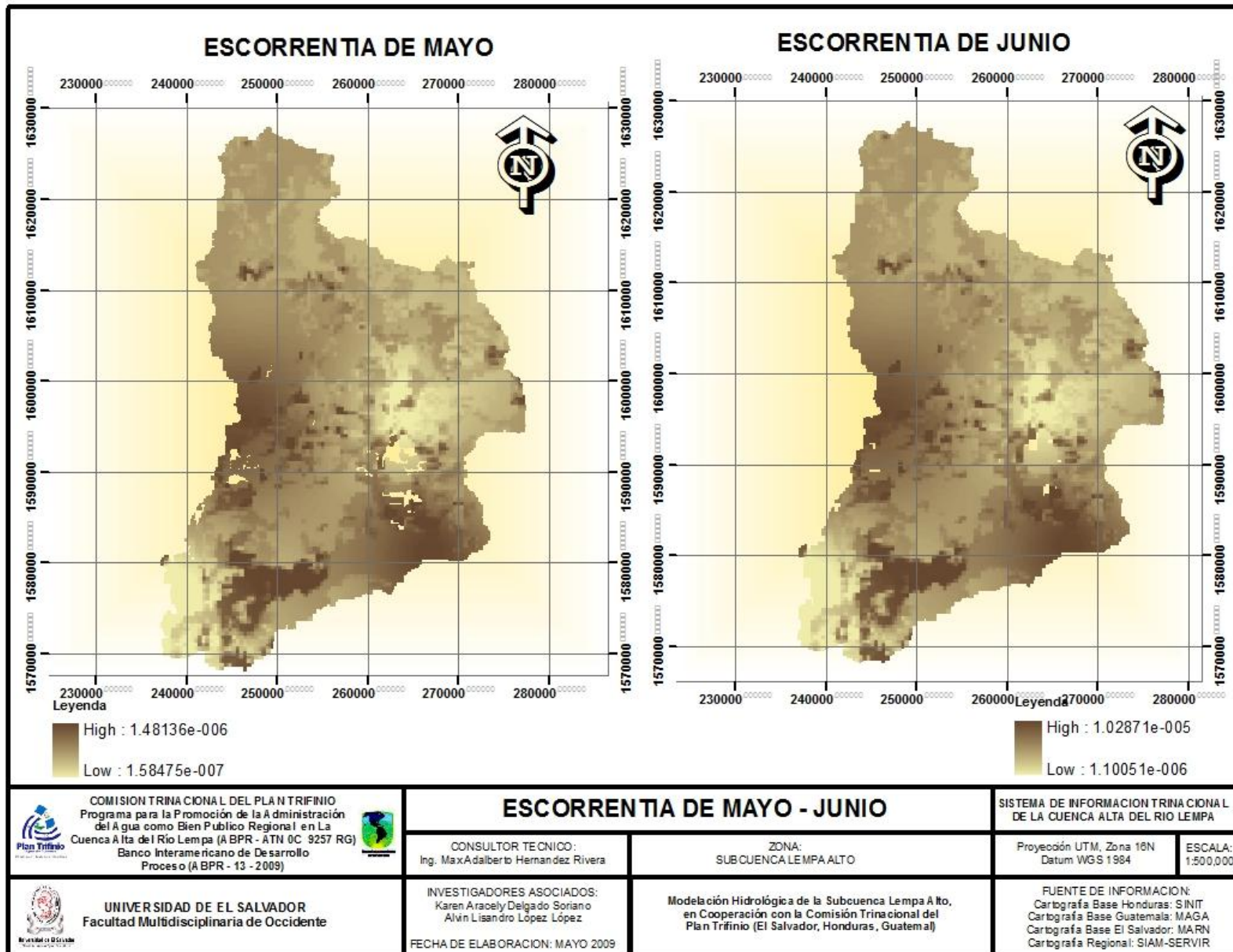


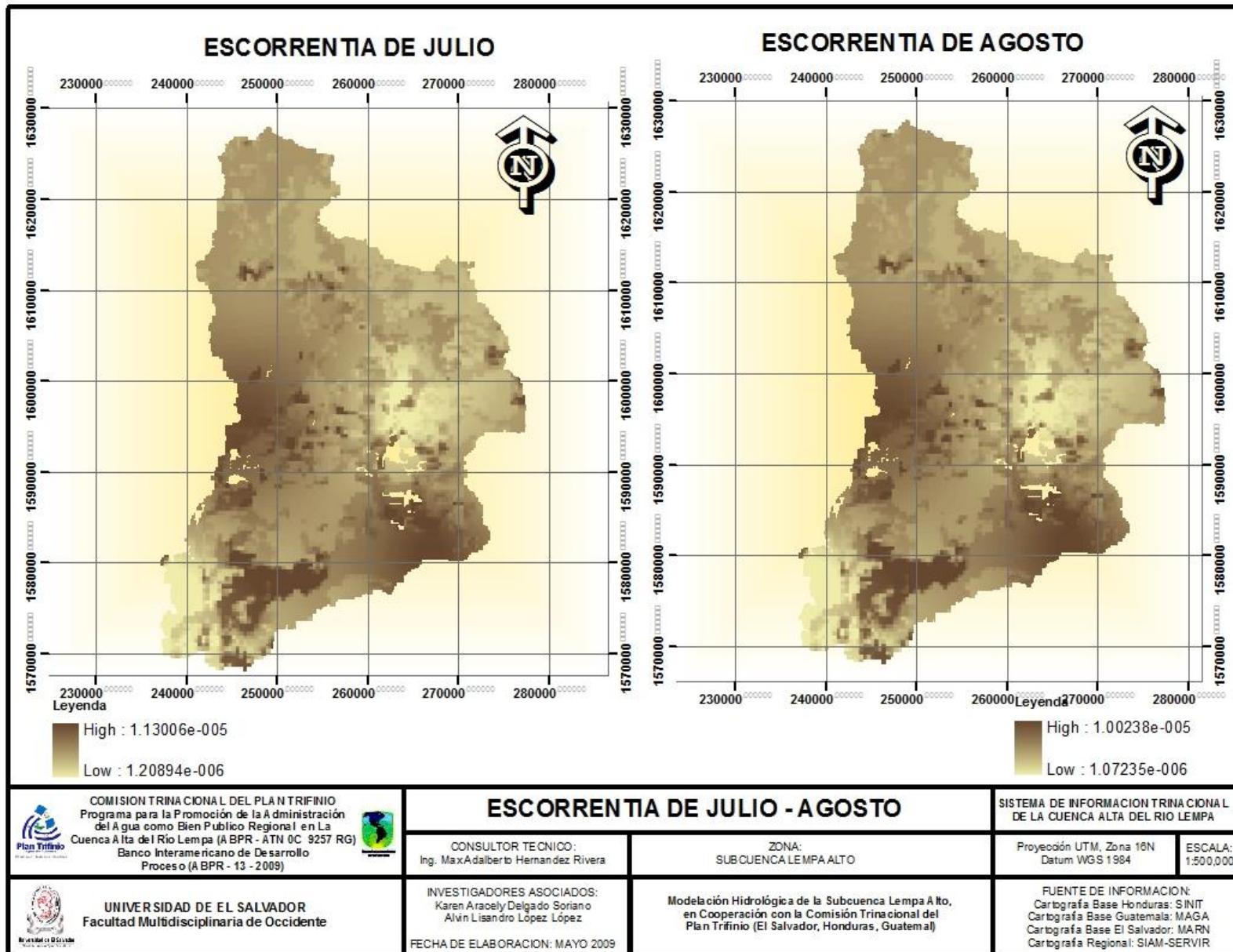


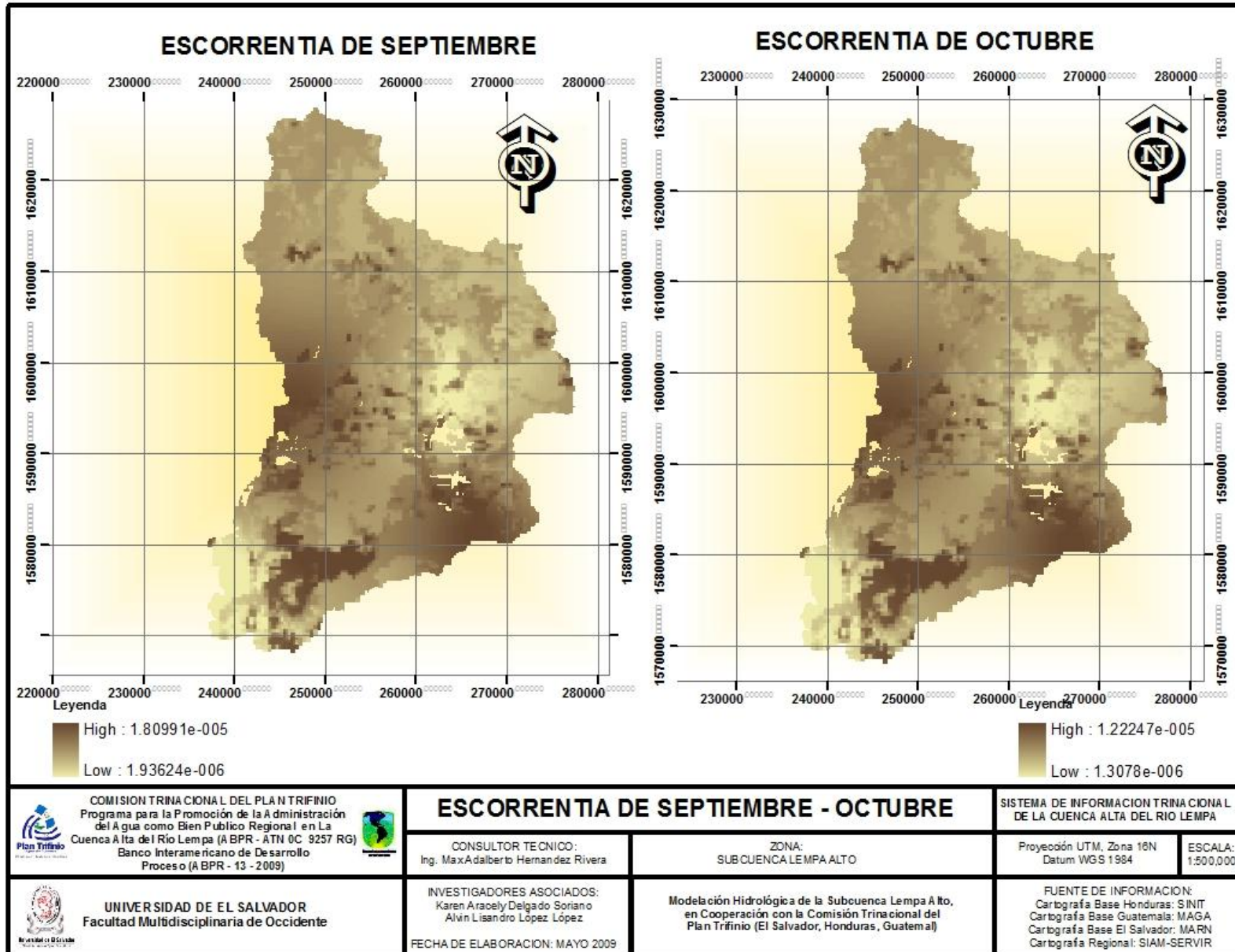
ANEXO 5: MAPAS DE ESCORRENTIA MENSUAL (mm)

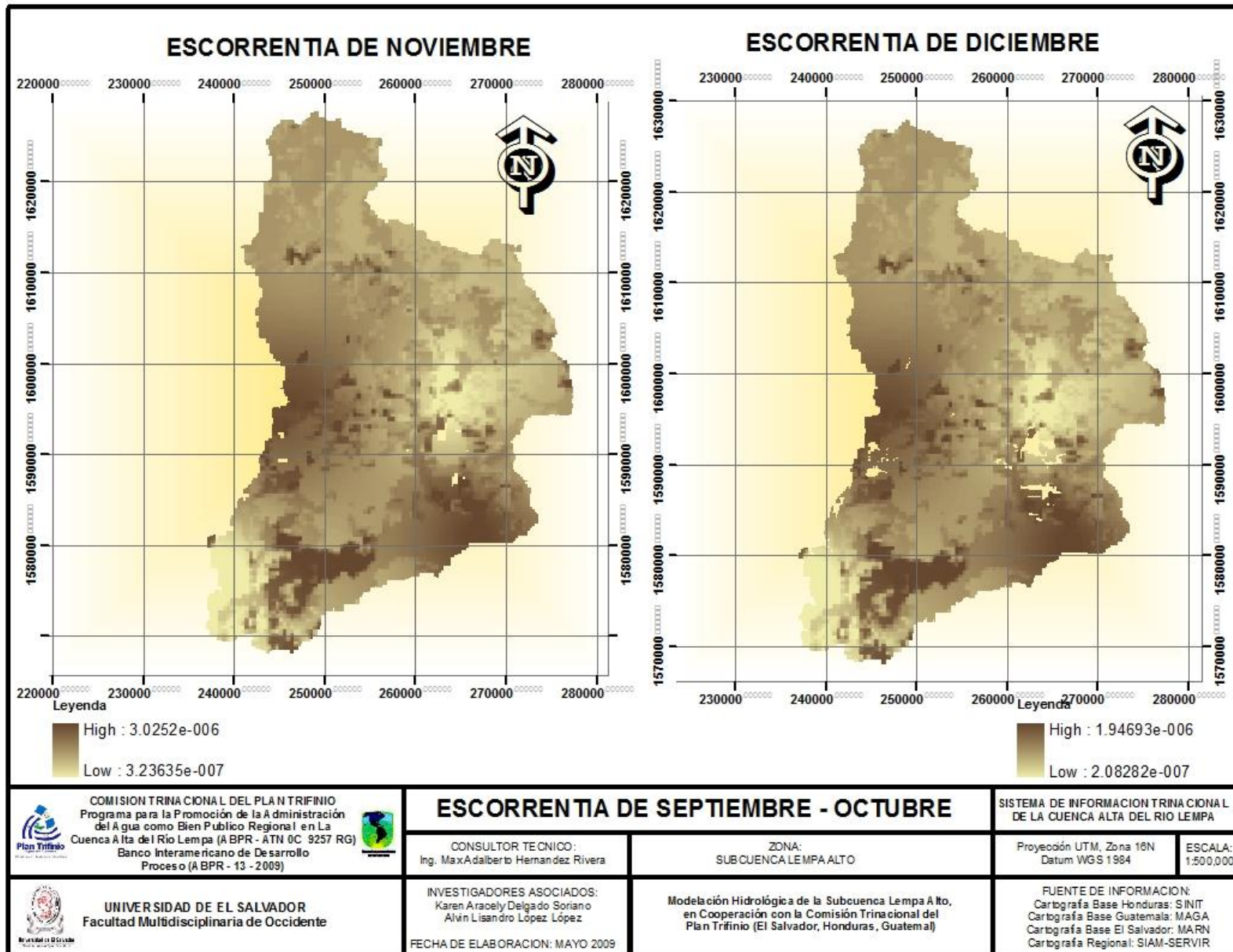






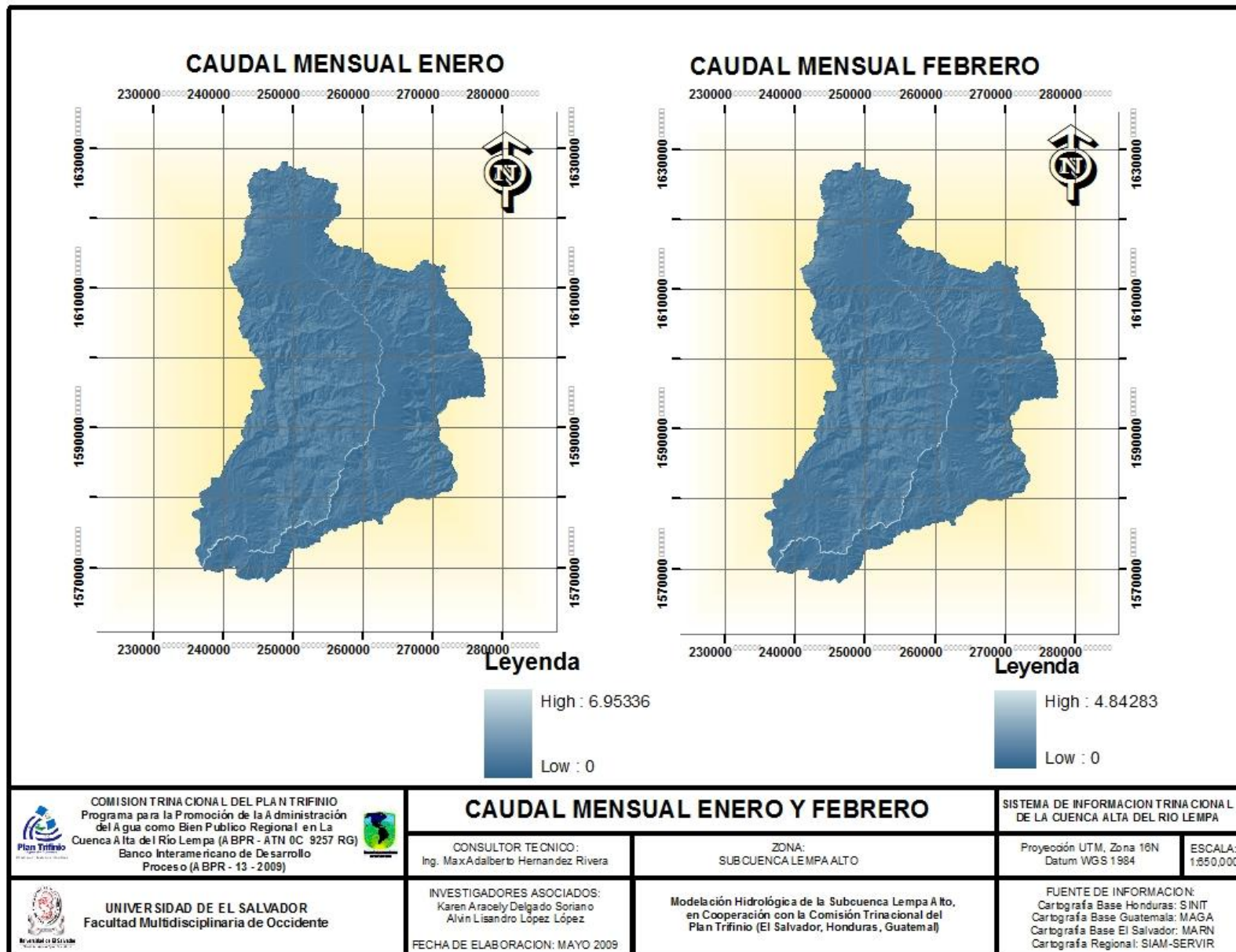


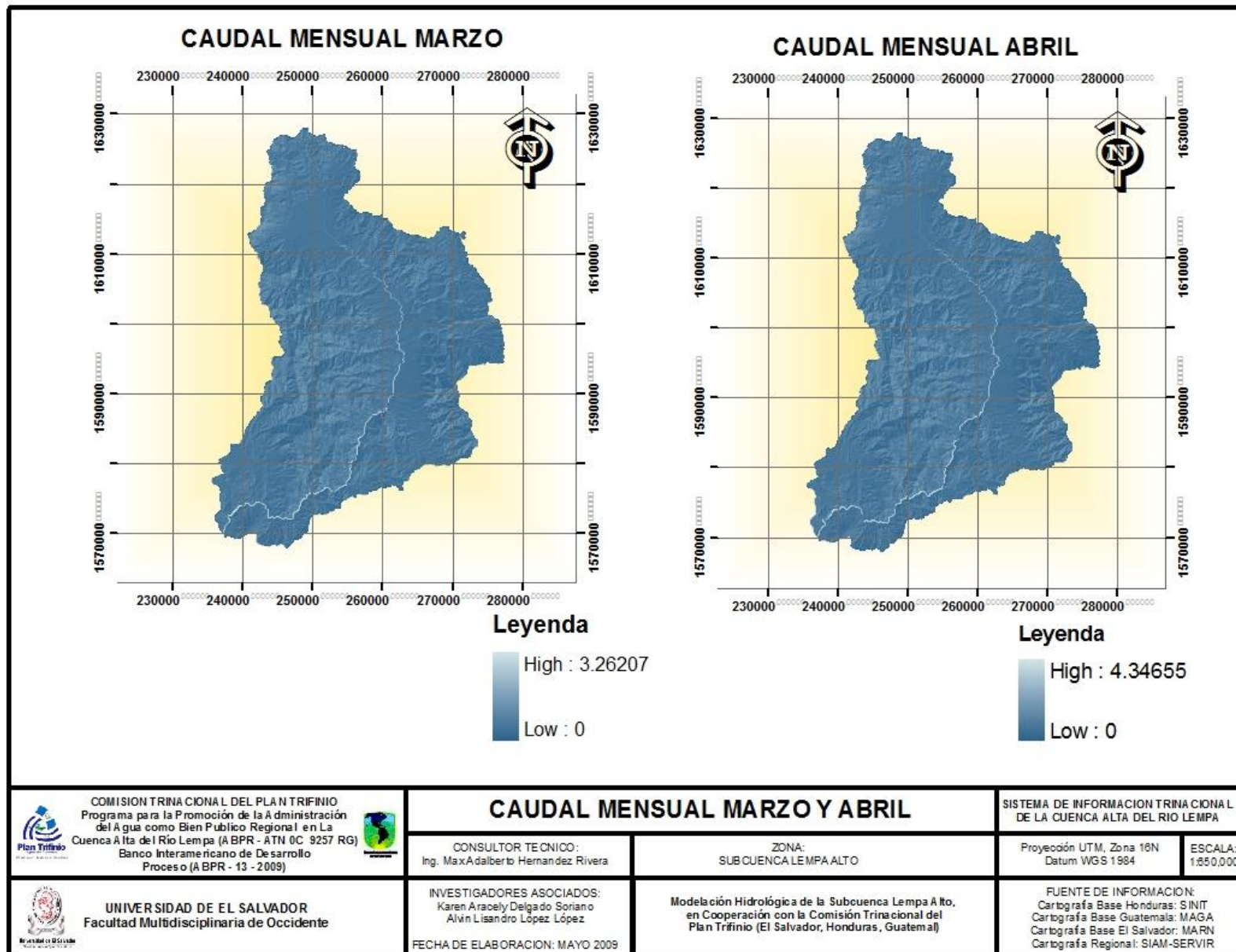


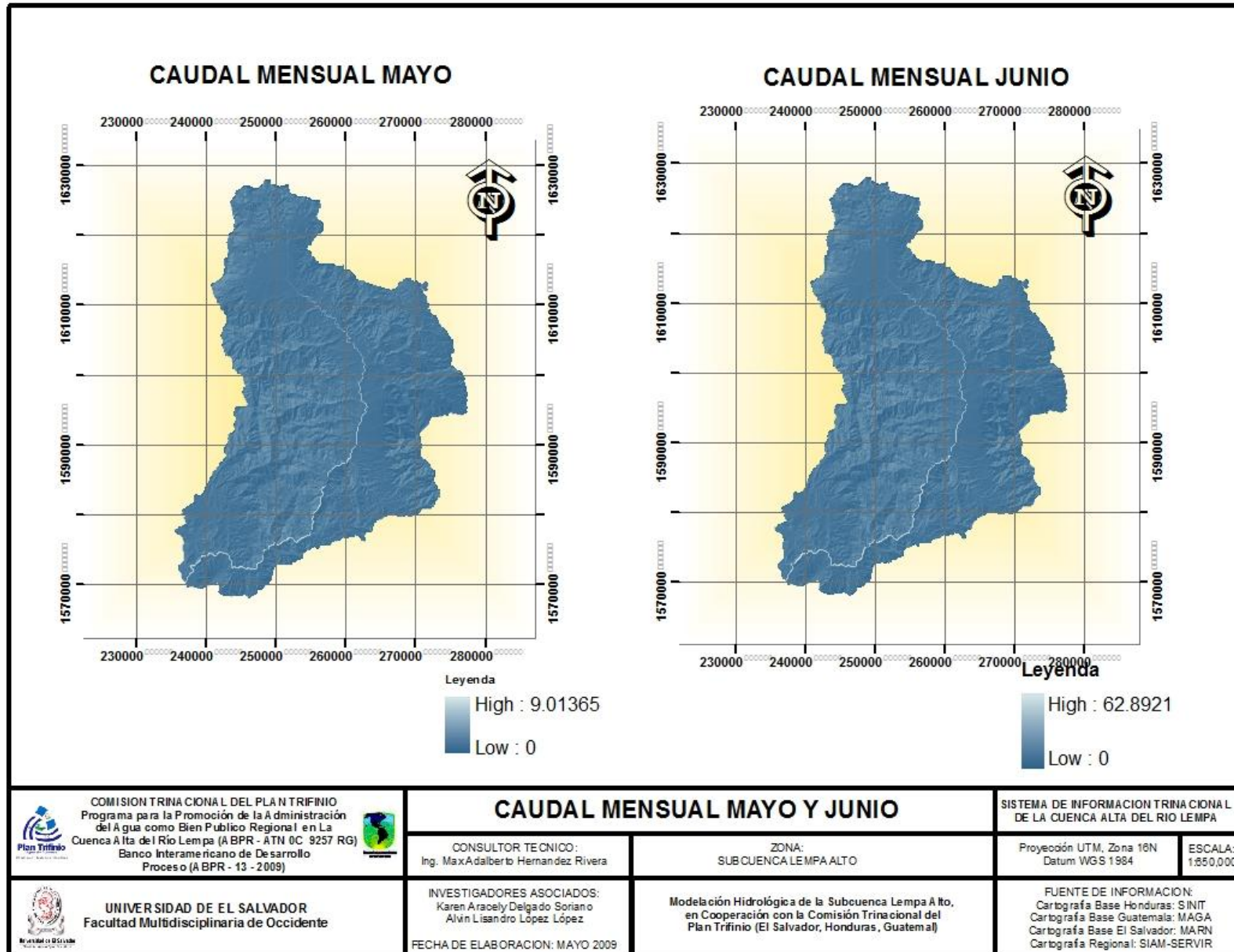


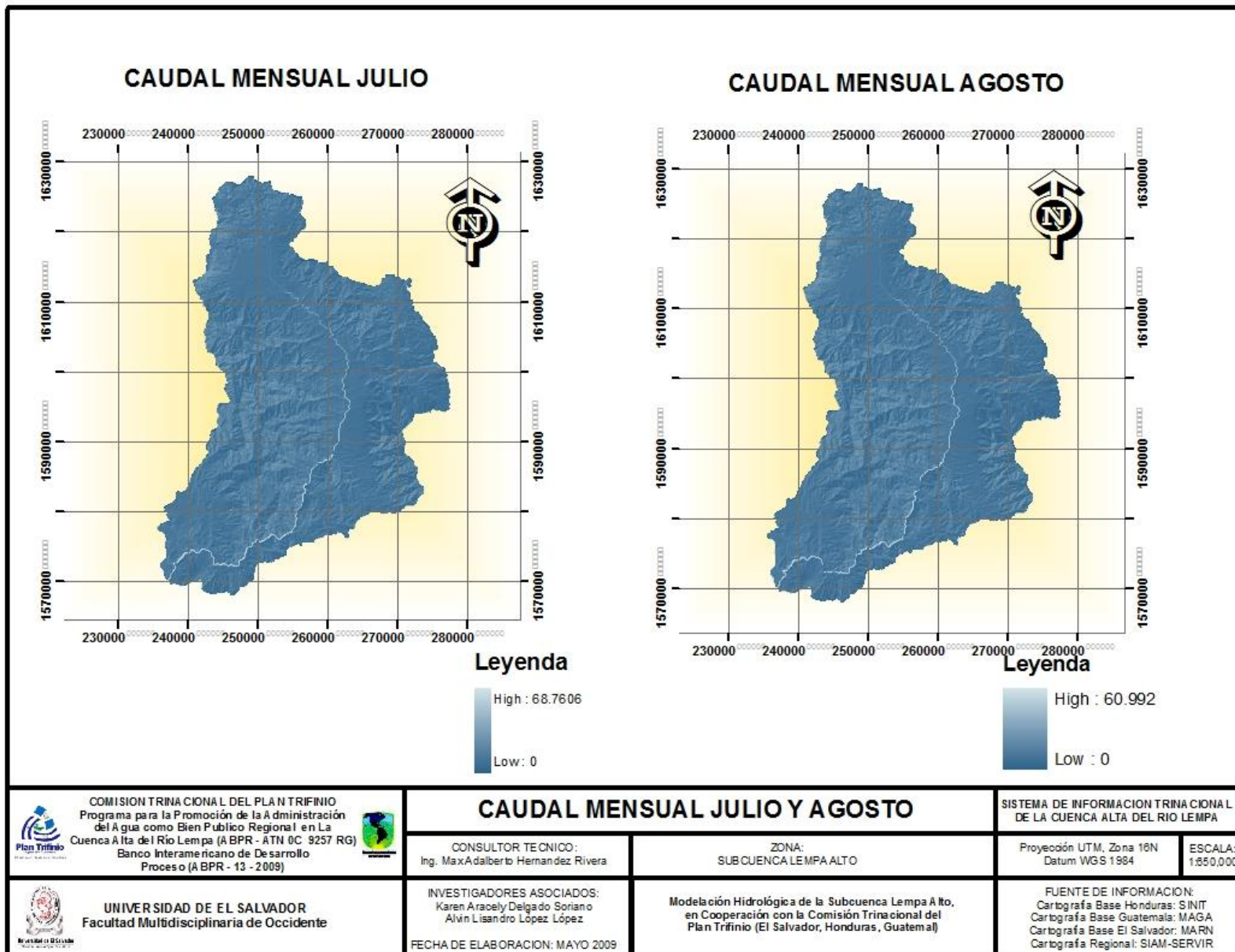


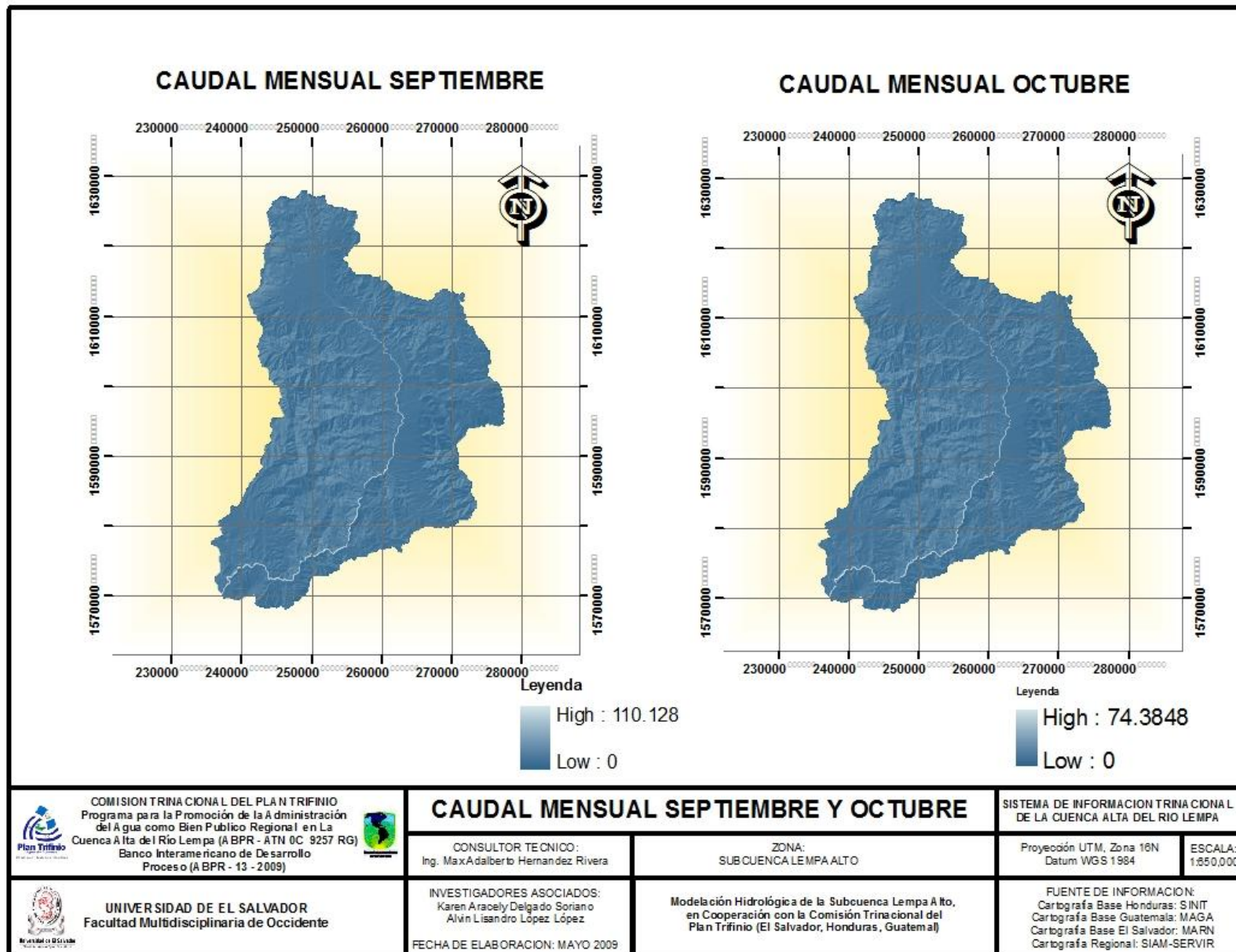
ANEXO 6: MAPAS DE CAUDALES MENSUALES (m³/seg)

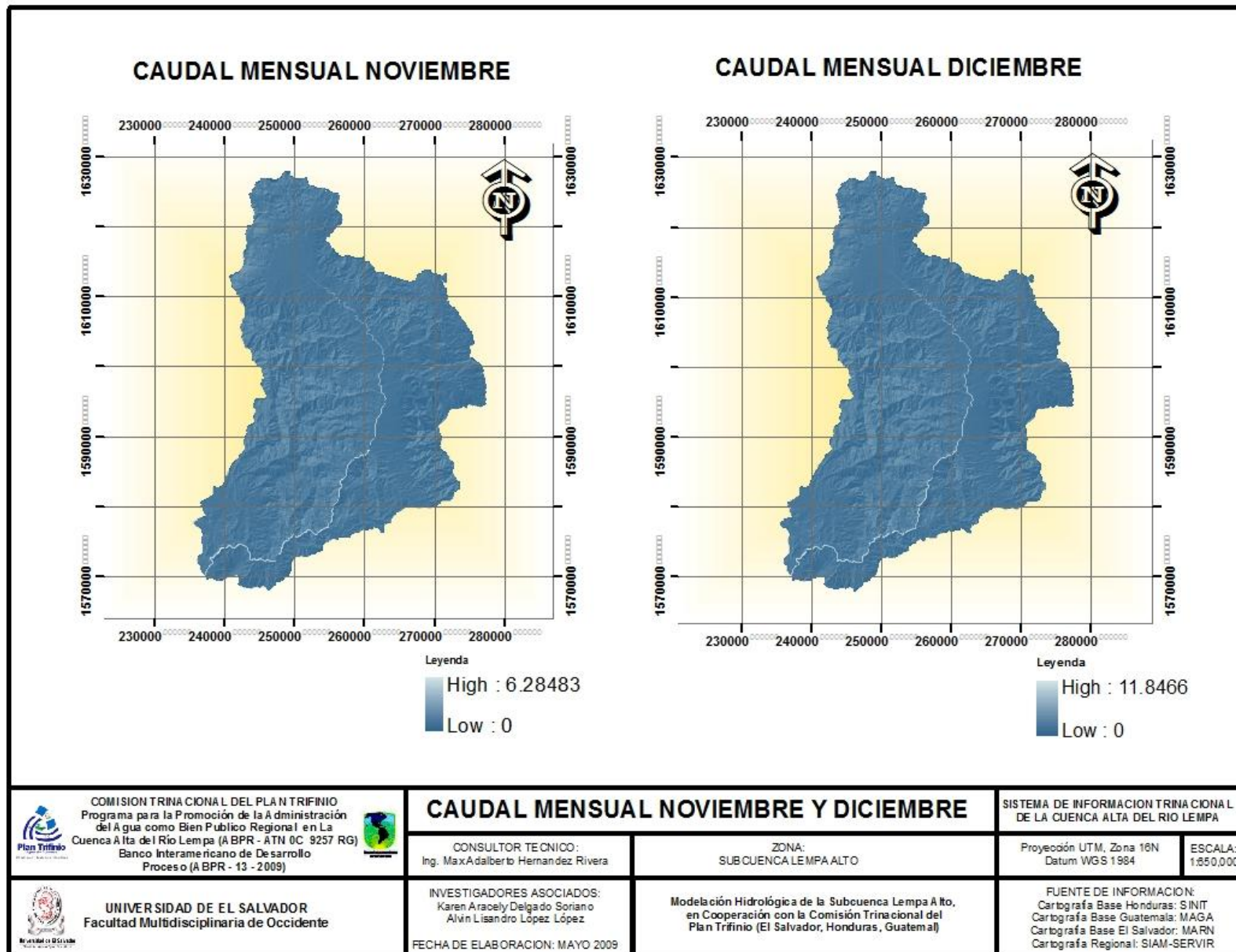














ANEXO 7: BASE DE DATOS PARA CÁLCULO DE ECUACIONES DE CAUDAL MENSUAL Y ANUAL

RESULTADOS DE MULTIREGRESION LINEAL PARA MES DE ENERO

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.999641608
Coefficiente de determinación R ²	0.999283345
R ² ajustado	0.993657315
Error típico	0.052637481
Observaciones	181

ANÁLISIS DE VARIANZA						
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>	
Regresión	3	687.6835008	229.2278336	82732.69254	3.2076E-278	
Residuos	178	0.49318538	0.002770704			
Total	181	688.1766861				

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	5.01426E-09	1.10931E-11	452.0170358	2.5851E-274	4.99237E-09	5.03615E-09	4.99237E-09
Variable X 2	-0.003950936	0.012498537	-0.316111885	0.752287954	-0.02861531	0.020713437	-0.02861531
Variable X 3	0.000579946	0.000488311	1.187657762	0.236550663	-0.000383677	0.001543569	-0.000383677

FORMULA ENERO

$$Q=0.00057995*\text{Prec}-0.00395094*AB+5.0143e-3AD$$

RESULTADOS DE MULTIREGRESION LINEAL PARA MES DE FEBRERO

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.999640663
Coefficiente de determinación R ²	0.999281455
R ² ajustado	0.993655404
Error típico	0.036708324
Observaciones	181

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	3	333.5667515	111.1889172	82514.90278	4.0497E-278
Residuos	178	0.239855185	0.001347501		
Total	181	333.8066067			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	3.4923E-09	7.75673E-12	450.2283646	5.2326E-274	3.47699E-09	3.50761E-09	3.47699E-09	3.50761E-09
Variable X 2	-0.000979883	0.008513234	-0.115101157	0.908494681	-0.017779737	0.015819971	-0.017779737	0.015819971
Variable X 3	0.000415452	0.00042883	0.968803507	0.33395777	-0.000430793	0.001261698	-0.000430793	0.001261698

FORMULA FEBRERO

$$Q=0.00041545*Prec-0.00097988*%AB+3.4923e-3AD$$

RESULTADOS DE MULTIREGRESION LINEAL PARA MES DE MARZO

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.999754015
Coefficiente de determinación R ²	0.99950809
R ² ajustado	0.99391875
Error típico	0.020401633
Observaciones	181

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	151.3851973	75.69259866	181854.2834	2.2983E-295
Residuos	179	0.07450457	0.000416227		
Total	181	151.4597019			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	1.185E-07	2.14841E-10	551.5692426	4.3262E-291	1.18076E-07	1.18924E-07	1.18076E-07	1.18924E-07
Variable X 2	0.005311021	0.002867556	1.852107114	0.065657293	-0.000347543	0.010969585	-0.000347543	0.010969585

FORMULA MARZO

$$Q=0.00531102*AB+1.1853e-4A*PREC$$

RESULTADOS DE MULTIREGRESION LINEAL PARA MES DE ABRIL

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.999760994
Coefficiente de determinación R ²	0.999522044
R ² ajustado	0.993932782
Error típico	0.026795925
Observaciones	181

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	268.7790096	134.3895048	187166.3839	1.7744E-296
Residuos	179	0.128525865	0.000718022		
Total	181	268.9075354			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	5.73655E-08	1.02517E-10	559.5679013	3.2924E-292	5.71632E-08	5.75678E-08	5.71632E-08	5.75678E-08
Variable X 2	0.005400928	0.003767506	1.433555473	0.153443578	-0.002033511	0.012835367	-0.002033511	0.012835367

FORMULA ABRIL

$$Q=0.00540093*\%AB+5.7365e-5A*PREC$$

RESULTADOS DE MULTIREGRESION LINEAL PARA MES DE MAYO

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.999900745
Coefficiente de determinación R ²	0.9998015
R ² ajustado	0.994213799
Error típico	0.035810338
Observaciones	181

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	1156.17166	578.08583	450791.2616	0
Residuos	179	0.229546072	0.00128238		
Total	181	1156.401206			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	3.74867E-08	4.31657E-11	868.4373164	0	3.74016E-08	3.75719E-08	3.74016E-08	3.75719E-08
Variable X 2	0.012968721	0.005033977	2.576237874	0.010794769	0.003035148	0.022902295	0.003035148	0.022902295

FORMULA MAYO

$$Q=0.01296872*\%AB+3.7487e-5A*PREC$$

RESULTADOS DE MULTIREGRESION LINEAL PARA MES DE JUNIO

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.999914281
Coefficiente de determinación R ²	0.999828569
R ² ajustado	0.99424102
Error típico	0.234258207
Observaciones	181

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	57290.14782	28645.07391	521987.7569	0
Residuos	179	9.822966463	0.054876908		
Total	181	57299.97079			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	1.34656E-07	1.44027E-10	934.9410765	0	1.34372E-07	1.34941E-07	1.34372E-07	1.34941E-07
Variable X 2	0.070866859	0.032923888	2.152445044	0.032701377	0.005897974	0.135835743	0.005897974	0.135835743

FORMULA JUNIO

$$Q=0.00861157*\%AB+1.0905e-5A*PREC$$

RESULTADOS DE MULTIREGRESION LINEAL PARA MES DE JULIO

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.999733248
Coefficiente de determinación R ²	0.999466566
R ² ajustado	0.993876994
Error típico	0.447827939
Observaciones	181

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	67260.97913	33630.48956	167691.4111	3.117E-292
Residuos	179	35.89842553	0.200549863		
Total	181	67296.87755			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	1.97508E-10	3.729E-13	529.6535958	6.11E-288	1.96772E-10	1.98244E-10	1.96772E-10	1.98244E-10
Variable X 2	-0.029676342	0.063052664	-0.470659611	0.638456845	-0.154098505	0.09474582	-0.154098505	0.09474582

FORMULA JULIO

$$Q = -0.02967634 * \%AB + 0.0001975 * A * PREC$$

RESULTADOS DE MULTIREGRESION LINEAL PARA MES DE AGOSTO

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.999893657
Coefficiente de determinación R ²	0.999787326
R ² ajustado	0.994199545
Error típico	0.250818894
Observaciones	181

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	52937.78218	26468.89109	420741.4021	0
Residuos	179	11.26091105	0.062910118		
Total	181	52949.04309			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	1.60315E-10	1.9108E-13	838.9918781	0	1.59937E-10	1.60692E-10	1.59937E-10	1.60692E-10
Variable X 2	0.048491099	0.035277316	1.374568834	0.170983529	-0.021121819	0.118104016	-0.021121819	0.118104016

FORMULA AGOSTO

$$Q=0.0484911*%AB+0.00016031*AD*PREC$$

RESULTADOS DE MULTIREGRESION LINEAL PARA MES DE SEPTIEMBRE

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.99964564
Coefficiente de determinación R ²	0.999291405
R ² ajustado	0.993700854
Error típico	0.826655476
Observaciones	181

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	172502.8826	86251.44131	126216.8296	2.9446E-281
Residuos	179	122.3213104	0.683359276		
Total	181	172625.2039			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	2.3712E-10	5.16036E-13	459.5023132	6.6527E-277	2.36102E-10	2.38138E-10	2.36102E-10	2.38138E-10
Variable X 2	-0.116586992	0.116453283	-1.001148177	0.318106626	-0.346384882	0.113210899	-0.346384882	0.113210899

FORMULA SEPTIEMBRE

$$Q = -0.11658699 * AB + 0.00023712 * A * PREC$$

RESULTADOS DE MULTIREGRESION LINEAL PARA MES DE OCTUBRE

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.999760388
Coefficiente de determinación R ²	0.999520833
R ² ajustado	0.993931564
Error típico	0.459145769
Observaciones	181

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	78715.26468	39357.63234	186692.8951	2.2229E-296
Residuos	179	37.73585591	0.210814837		
Total	181	78753.00054			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	2.94795E-10	5.27495E-13	558.8595954	4.1297E-292	2.93754E-10	2.95836E-10	2.93754E-10	2.95836E-10
Variable X 2	0.014185869	0.064612321	0.219553617	0.826468985	-0.113313972	0.141685709	-0.113313972	0.141685709

FORMULA OCTUBRE

$$Q=0.01418587*\%AB+0.0002948*A*PREC$$

RESULTADOS DE MULTIREGRESION LINEAL PARA MES DE NOVIEMBRE

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.999542019
Coefficiente de determinación R ²	0.999084248
R ² ajustado	0.993455981
Error típico	0.15966736
Observaciones	181

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	3	4950.813078	1650.271026	64732.59054	8.4834E-269
Residuos	178	4.537872503	0.025493666		
Total	181	4955.350951			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	1.34613E-08	3.4096E-11	394.8077549	7.2943E-264	1.33941E-08	1.35286E-08	1.33941E-08	1.35286E-08
Variable X 2	-0.005826868	0.045247523	-0.128777615	0.897679008	-0.095117463	0.083463727	-0.095117463	0.083463727
Variable X 3	0.0002333	0.000529582	0.440535328	0.660083956	-0.000811768	0.001278367	-0.000811768	0.001278367

FORMULA NOVIEMBRE

$$Q=1.3461e-8*Prec-0.00582687*%AB+1.3461e-2AD$$

RESULTADOS DE MULTIREGRESION LINEAL PARA MES DE DICIEMBRE

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.999639254
Coefficiente de determinación R ²	0.999278638
R ² ajustado	0.993652555
Error típico	0.089972725
Observaciones	181

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	3	1996.066396	665.3554655	82192.4605	5.7253E-278
Residuos	178	1.440926237	0.008095091		
Total	181	1997.507323			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	8.54409E-09	1.90606E-11	448.2592875	1.1409E-273	8.50648E-09	8.58171E-09	8.50648E-09	8.58171E-09
Variable X 2	0.005053578	0.021629875	0.233638799	0.815533885	-0.037630403	0.047737559	-0.037630403	0.047737559
Variable X 3	0.000275454	0.000562346	0.489830516	0.624856988	-0.000834269	0.001385177	-0.000834269	0.001385177

FORMULA DICIEMBRE

$$Q=0.00027545 * Prec + 0.00505358 * \%AB + 8.5441e-3AD$$

RESULTADOS DE MULTIREGRESION LINEAL ANUAL

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.998958915
Coefficiente de determinación R ²	0.997918914
R ² ajustado	0.992320696
Error típico	0.495073103
Observaciones	181

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	21037.63811	10518.81905	42916.89768	1.2934E-239
Residuos	179	43.8724305	0.245097377		
Total	181	21081.51054			

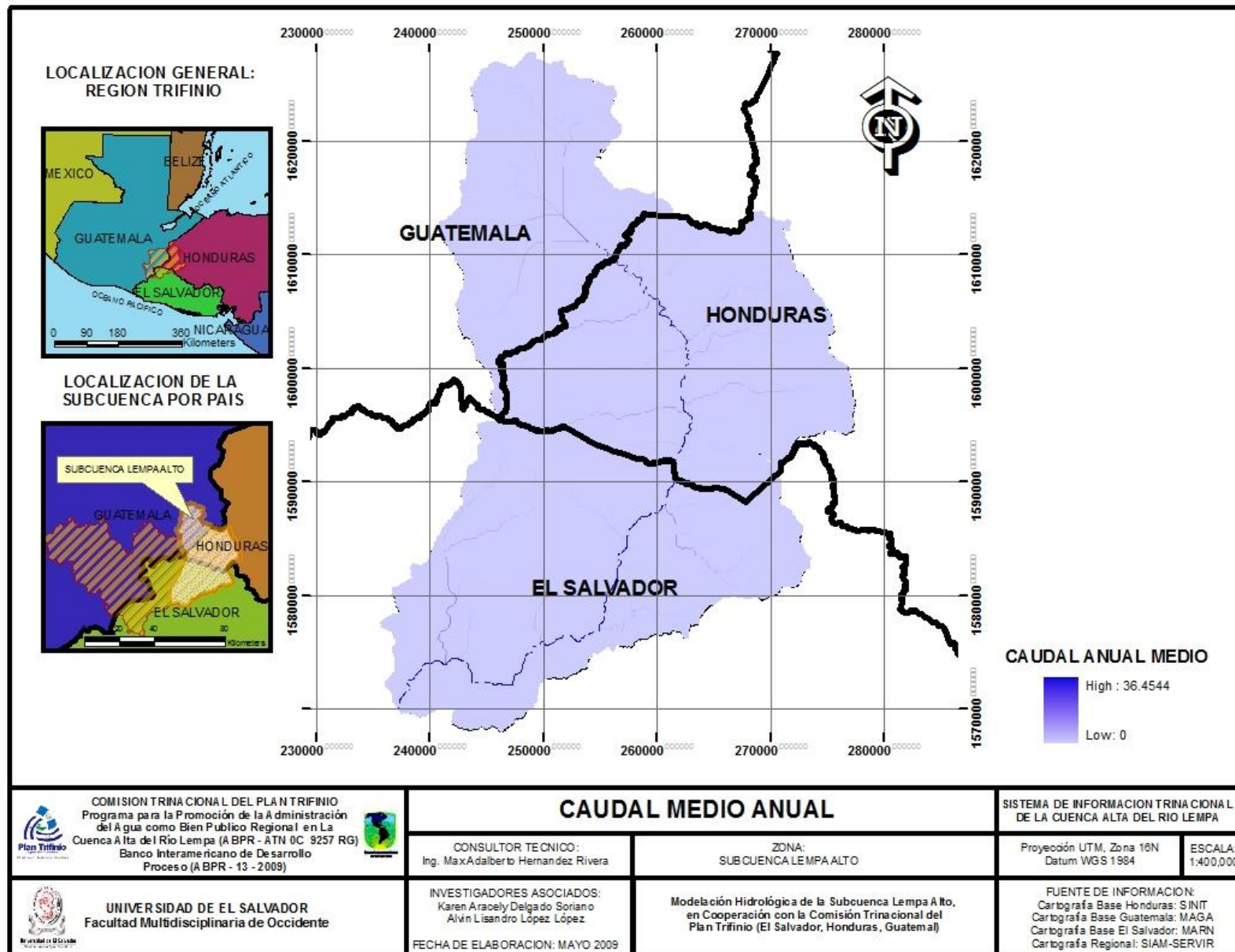
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	1.61E-08	6.02029E-11	267.9758218	4.7853E-235	1.60141E-08	1.62517E-08	1.60141E-08	1.62517E-08
Variable X 2	0.003188881	0.069667534	0.045772841	0.963542331	-0.134286439	0.140664201	-0.134286439	0.140664201

FORMULA ANUAL

$$Q=0.00318888*AB+1.61329265085619E-05*A*PREC$$

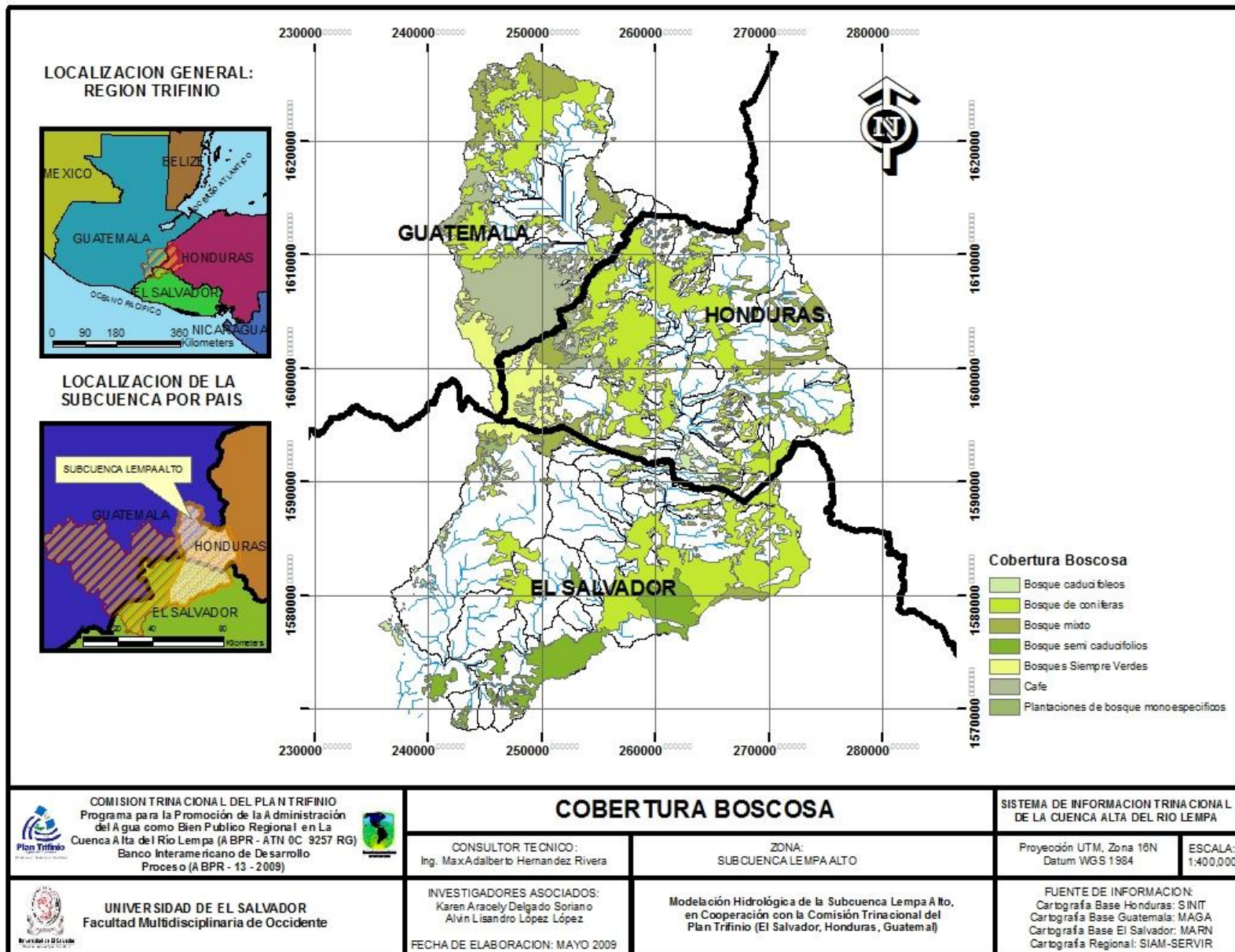


ANEXO 8: CAUDAL MEDIO ANUAL (m³/seg)





ANEXO 9: COBERTURA BOSCOSEA





ANEXO 10: FOCOS CONTAMINANTES

