

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



**“INSUMOS TÉCNICOS PARA LA MODELACIÓN
PROBABILÍSTICA DE RIESGO DE INUNDACIONES EN
LA CUENCA DEL RÍO SUCIO UTILIZANDO EL MODELO
CAPRA”**

PRESENTADO POR:

LILIANA MARÍA BENÍTEZ MARTÍNEZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO 2016

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR INTERINO :

LIC. JOSÉ LUIS ARGUETA ANTILLÓN

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DIRECTOR :

ING. JORGE OSWALDO RIVERA FLORES

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO CIVIL

Título :

**“INSUMOS TÉCNICOS PARA LA MODELACIÓN
PROBABILÍSTICA DE RIESGO DE INUNDACIONES EN
LA CUENCA DEL RÍO SUCIO UTILIZANDO EL MODELO
CAPRA”**

Presentado por :

LILIANA MARÍA BENÍTEZ MARTÍNEZ

Trabajo de Graduación aprobado por:

Docentes Asesores :

**ING. EDWIN SANTIAGO ESCOBAR RIVAS
ING. JOAQUÍN MARIANO SERRANO CHOTO
ING. ROBERTO ADOLFO CERÓN PINEDA
ING. JOSÉ RODOLFO VALLES LEÓN**

San Salvador, Junio 2016

Trabajo de Graduación aprobado por:

Docentes Asesores :

ING. EDWIN SANTIAGO ESCOBAR RIVAS

ING. JOAQUÍN MARIANO SERRANO CHOTO

ING. ROBERTO ADOLFO CERÓN PINEDA

ING. JOSÉ RODOLFO VALLES LEÓN

AGRADECIMIENTOS

Principalmente quiero agradecer a mis padres, por todo su esfuerzo y apoyo incondicional. Por ser mis guías y mi motivación.

A mis docentes directores, Ing. Edwin Santiago Escobar Rivas, Ing. Joaquín Mariano Serrano Choto, Ing. Roberto Adolfo Cerón Pineda e Ing. José Rodolfo Valles León, quienes a lo largo del desarrollo de la presente investigación compartieron su valioso conocimiento, el cual ha sido imprescindible para concluir de manera satisfactoria el presente Trabajo de Graduación.

Así mismo quiero agradecer al personal de las municipalidades que conforman la cuenca del río Sucio, ya que gracias a su valiosa colaboración pude conocer acerca del riesgo de inundación al cual están propensas algunas de las comunidades que las conforman. Aprovecho también para agradecer a Geólogos del Mundo, al Ing. Walter Licera y al personal de la Dirección General del Observatorio Ambiental por la orientación e información brindada para la realización de la presente investigación.

Al personal de la Escuela de Ingeniería Civil por su dedicación en la formación de nuevos profesionales.

A mis seres queridos, familia, amigos y compañeros de trabajo, por todo su apoyo brindado.

Infinitas gracias.

DEDICATORIA

A Dios, por darme fortaleza en cada momento. A la vida por ser tan maravillosa conmigo y regalarme una hermosa familia a quienes amo infinitamente.

A mis padres, Alirio Alexander Benítez Méndez y Lilian de Jesús Martínez de Benítez, quienes con sus consejos, ejemplo y carácter me han guiado para ser una mejor persona. Quienes día a día se han esforzado para hacer de mis hermanos y de mi persona, personas de bien.

A mis hermanos, Omar Alexander Benítez, Carlos Manuel Benítez, Víctor Alirio Benítez y Lilian Alexandra Benítez, por apoyarme en cada momento de mi vida y llenar de alegría nuestro hogar.

A mis sobrinos, Alirio Benítez y Dylan Benítez, quienes con su llegada llenan de sonrisas cada día de nuestras vidas.

A Rosi, mi tía, quién siempre me ha apoyado y aconsejado.

A mis amigos, por estar siempre pendiente de mi persona y por crear momentos únicos y agradables con su compañía.

A mi familia, abuelos, tíos y primos, con quienes a lo largo de mi vida hemos compartido gratos momentos.

A mi segunda familia, por todo su cariño y apoyo.

Liliana Benítez

ÍNDICE

RESUMEN.....	xxx
--------------	-----

CAPÍTULO 1: ANTEPROYECTO

1.1	INTRODUCCIÓN.....	2
1.2	ANTECEDENTES.....	3
1.3	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
1.4	OBJETIVOS.....	7
1.4.1	Objetivo General.....	7
1.4.2	Objetivos Específicos.....	7
1.5	ALCANCES.....	8
1.6	LIMITACIONES.....	8
1.7	JUSTIFICACIÓN.....	9

CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1	INTRODUCCIÓN.....	11
2.2	UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	11
2.3	CUENCA HIDROGRÁFICA.....	16
2.3.1	Tipo y forma de la cuenca.....	16
2.3.2	Características de una cuenca.....	18
2.3.3	Parámetros geométricos.....	18

2.3.4	Parámetros de forma.....	23
2.3.5	Parámetros de relieve.....	27
2.3.5.1	Elevaciones.....	27
2.3.5.2	Pendientes.....	38
2.3.5.3	Tiempo de concentración.....	44
2.3.6	Parámetros de drenaje.....	46
2.4	VEGETACIÓN.....	53
2.5	GEOLOGÍA.....	55
2.6	TIPO Y USO DE SUELO.....	57
2.6.1	Tipo de suelo.....	57
2.6.2	Uso de suelo.....	58
2.7	POBLACIÓN Y VIVIENDA.....	64
2.7.1	Población.....	64
2.7.2	Vivienda.....	65
2.8	INUNDACIONES HISTÓRICAS REGISTRADAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	66

CAPÍTULO 3: BASE TEÓRICA DE LA PLATAFORMA CAPRA

3.1	INTRODUCCIÓN.....	76
3.2	ESTADÍSTICA APLICADA A LA HIDROLOGÍA.....	76
3.2.1	Hidrología estocástica.....	77
3.2.2	Estimación de datos faltantes en los registros de lluvia.....	78

3.2.3	Elementos fundamentales del análisis de tormentas.....	82
3.3	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PLATAFORMA CAPRA.....	83
3.4	DESCRIPCIÓN DE LOS PROGRAMAS QUE CONSTITUYEN LA PLATAFORMA CAPRA.....	84
3.5	GENERALIDADES DE LOS MÓDULOS DE LA PLATAFORMA CAPRA.....	86
3.5.1	Módulo de amenaza.....	87
3.5.1.1	Modelo de evaluación de amenazas naturales.....	91
3.5.2	Módulo de vulnerabilidad.....	109
3.5.3	Módulo de exposición.....	112
3.5.3.1	Herramienta web CAPRA para el levantamiento de elementos expuestos.....	112
3.5.4	Módulo de daños y pérdidas.....	127

CAPÍTULO 4: IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO CAPRA A LA CUENCA DEL RÍO SUCIO

4.1	INTRODUCCIÓN.....	132
4.2	APLICACIÓN DEL MÓDULO DE AMENAZA A LA CUENCA DEL RÍO.....	133
4.2.1	Análisis de datos de lluvia.....	134
4.2.2	Generación de curvas PADF mediante el uso del programa ERN-AL. Curvas PADF.....	146

4.2.3	Generación de la malla de centros de tormenta en la cuenca del río Sucio.....	152
4.2.4	Generación de amenaza de lluvia no huracanada mediante el uso del programa ERN-LLUVIA NH.....	157
4.2.5	Generación de amenaza de inundación mediante el uso del programa ERN-INUNDACIÓN.....	159
4.3	APLICACIÓN DEL MÓDULO DE VULNERABILIDAD A LA CUENCA DEL RÍO SUCIO.....	164
4.4	APLICACIÓN DEL MÓDULO DE EXPOSICIÓN A LA CUENCA DEL RÍO SUCIO.....	169
4.4.1	Descripción de los municipios que conforman la cuenca.....	169
4.4.1.1	Municipio de Armenia, departamento de Sonsonate.....	170
4.4.1.2	Municipio de Ciudad Arce, departamento de La Libertad.....	175
4.4.1.3	Municipio de Coatepeque, Departamento de Santa Ana.....	180
4.4.1.4	Municipio de Colón, departamento de La Libertad.....	185
4.4.1.5	Municipio de El Congo, departamento de Santa Ana.....	190
4.4.1.6	Municipio de El Paisnal, departamento de San Salvador.....	194
4.4.1.7	Municipio de Izalco, departamento de Sonsonate.....	199
4.4.1.8	Municipio de Jayaque, departamento de La Libertad.....	201
4.4.1.9	Municipio de Nejapa, departamento de San Salvador.....	206
4.4.1.10	Municipio de Quezaltepeque, departamento de La Libertad	208
4.4.1.11	Municipio de Sacacoyo, departamento de La Libertad.....	213

4.4.1.12 Municipio de San Juan Ópico, departamento de La Libertad.....	218
4.4.1.13 Municipio de San Matías, departamento de La Libertad.....	223
4.4.1.14 Municipio de San Pablo Tacachico, departamento de La Libertad.....	228
4.4.1.15 Municipio de Santa Tecla, departamento de La Libertad.....	233
4.4.1.16 Municipio de Talnique, departamento de La Libertad.....	235
4.4.1.17 Municipio de Tepecoyo, departamento de La Libertad.....	240

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES.....	246
5.2 RECOMENDACIONES	249
BIBLIOGRAFÍA.....	251
ANEXOS.....	258

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Figura 2.1 Localización de la cuenca del río Sucio dentro del Mapa de El Salvador.	13
Figura 2.2 Delimitación de la cuenca del río Sucio dentro del Mapa Geomorfológico de El Salvador.	14
Figura 2.3 Situación política de la cuenca del río Sucio.....	15
Figura 2.4 Cuenca endorreica.	16
Figura 2.5 Cuenca exorreica.....	17
Figura 2.6 Representación de los parámetros geométricos de una cuenca.....	19
Figura 2.7 Obtención de la longitud axial de la cuenca del río Sucio.....	22
Figura 2.8 Mallado de la cuenca hidrográfica para la obtención de su elevación media.....	29
Figura 2.9 Aplicación del Método de la Red de Puntos en la Cuenca del Río Sucio.....	30
Figura 2.10 Mapa de distribución de elevaciones de la cuenca del río Sucio. ..	37
Figura 2.11 Pendiente del cauce principal.	41
Figura 2.12 Esquema gráfico del método de pendiente compensada.	42
Figura 2.13 Perfil del cauce principal de la cuenca del río Sucio.	43
Figura 2.14 Jerarquización de red de drenaje mediante el uso del Sistema Horton.....	47

Figura 2.15 Jerarquización de red de drenaje mediante el uso del Sistema Strahler.....	48
Figura 2.16 Jerarquización de la red de drenaje de la cuenca del río Sucio.	49
Figura 2.17 Mapa de vegetación de la cuenca del río Sucio.	60
Figura 2.18 Mapa geológico de la cuenca del río Sucio.	61
Figura 2.19 Mapa de suelos de la cuenca del río Sucio.	62
Figura 2.20 Mapa de uso de suelos de la cuenca del río Sucio.	63

CAPÍTULO 3: BASE TEÓRICA DE LA PLATAFORMA CAPRA

Figura 3.1 Modelo probabilista de riesgo y algunas aplicaciones.	87
Figura 3.2 Relación entre fenómenos de la naturaleza y eventos de amenaza.	89
Figura 3.3 Diagrama de flujo del modelo de amenaza por lluvias intensas.	93
Figura 3.4 Ejemplo de Mapa de Isoyetas.	95
Figura 3.5 Diagrama de flujo del modelo de amenaza por inundación.	106
Figura 3.6 Regiones de ampliación en zonas bajas.	108
Figura 3.7 Ventana principal de la aplicación web.	113
Figura 3.8 Selección de país y ciudad.	115
Figura 3.9 Selección del tipo de infraestructura y herramienta polígono para el levantamiento de información.	115
Figura 3.10 Botón actualizar vista.	116
Figura 3.11 Mensaje de alerta sobre el nivel de zoom en el visor.	117
Figura 3.12 Consulta terminada de actualización de la vista.	117

Figura 3.13 Icono Nueva Forma habilitado.....	118
Figura 3.14 Creación de un nuevo polígono.....	118
Figura 3.15 Modificación de los vértices de un polígono.	119
Figura 3.16 Ícono Eliminar Registro habilitado.	120
Figura 3.17 Cuadro de diálogo para la eliminación de polígonos.....	120
Figura 3.18 Formulario.	122
Figura 3.19 Icono añadir registro habilitado.....	123
Figura 3.20 Definición de color del polígono digitalizado según su destino económico.....	123
Figura 3.21 Visualización de la información asignada a un polígono.	124
Figura 3.22 Solicitud de código para la modificación de información de un elemento.....	125
Figura 3.23 Modificación de la información de un polígono.....	125
Figura 3.24 Descarga de registros de la base de datos.....	126
Figura 3.25 Vista General del Programa CAPRA-GIS.	127

CAPÍTULO 4: IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO CAPRA A LA CUENCA DEL RÍO SUCIO

Figura 4.1 Ubicación de las estaciones pluviométricas dentro de la cuenca del río Sucio.	135
Figura 4.2 Ventana de inicio del programa ERN-AL Curvas PADF.	146

Figura 4.3 Formato correcto para la conformación de la base de datos de Lluvia.....	147
Figura 4.4 Formato correcto para la conformación de la base de datos de Lluvia.....	147
Figura 4.5 Condicionantes para la búsqueda de eventos de lluvia.	148
Figura 4.6 Ejemplo de búsqueda de eventos de precipitación.	151
Figura 4.7 Condicionantes para la generación de curvas PADF.....	152
Figura 4.8 Mapa de Isoyetas del promedio multianual de datos de precipitación... ..	155
Figura 4.9 Mapa de probabilidad de lluvia en la cuenca del río Sucio.....	156
Figura 4.10 Ventana de inicio del programa ERN-Lluvia NH.....	157
Figura 4.11 Plataforma del programa ERN-Inundación.	160
Figura 4.12 Mapa de Número de Curva en condición saturada de la cuenca del río Sucio.	161
Figura 4.13 Interfaz de programa "Factores de exposición al viento e inundación".....	162
Figura 4.14 Vivienda tipo Mixto Alto (MA).....	164
Figura 4.15 Vivienda tipo Mixto Medio (MM).	165
Figura 4.16 Vivienda tipo Mixto Bajo (MB).....	165
Figura 4.17 Vivienda tipo Precario Medio (PM).	166
Figura 4.18 Vivienda Tipo Precario Bajo (PB).	166
Figura 4.19 Curvas de Vulnerabilidad para tipificaciones de edificaciones	168

Figura 4.20 División político administrativa del municipio de Armenia, Sonsonate.	172
Figura 4.21 Ubicación geográfica de los sitios registrados históricamente como zona de inundación del municipio de Armenia.	173
Figura 4.22 Levantamiento de infraestructura expuesta a la amenaza de inundación del municipio de Armenia.	174
Figura 4.23 División político administrativa del municipio de Ciudad Arce, La Libertad.	177
Figura 4.24 Ubicación geográfica de los sitios registrados históricamente como zona de inundación del municipio de Ciudad Arce.	178
Figura 4.25 Levantamiento de infraestructura expuesta a la amenaza de inundación del municipio de Ciudad Arce.	179
Figura 4.26 División político administrativa del municipio de Coatepeque, Santa Ana.	182
Figura 4.27 Ubicación geográfica de los sitios registrados históricamente como zona de inundación del municipio de Coatepeque.	183
Figura 4.28 Levantamiento de infraestructura expuesta a la amenaza de inundación del municipio de Coatepeque.	184
Figura 4.29 División político administrativa del municipio de Colón, La Libertad.	187
Figura 4.30 Ubicación geográfica de los sitios registrados históricamente como zona de inundación del municipio de Colón.	188

Figura 4.31 Levantamiento de infraestructura expuesta a la amenaza de inundación del municipio de Colón.....	189
Figura 4.32 División político administrativa del municipio de El Congo, Santa Ana.....	191
Figura 4.33 Ubicación geográfica del sitio registrado históricamente como zona de inundación del municipio de El Congo.....	192
Figura 4.34 Levantamiento de infraestructura expuesta a la amenaza de inundación del municipio de El Congo.....	193
Figura 4.35 División político administrativa del municipio de El Paisnal, San Salvador.....	196
Figura 4.36 Ubicación geográfica del sitio registrado históricamente como zona de inundación del municipio de El Paisnal.....	197
Figura 4.37 Levantamiento de infraestructura expuesta a la amenaza de inundación del municipio de El Paisnal.....	198
Figura 4.38 División político administrativa del municipio de Izalco, Sonsonate.....	200
Figura 4.39 División político administrativa del municipio de Jayaque, La Libertad.....	203
Figura 4.40 Ubicación geográfica del sitio registrado históricamente como zona de inundación del municipio de Jayaque.....	204
Figura 4.41 Levantamiento de infraestructura expuesta a la amenaza de inundación del municipio de Jayaque.....	205

Figura 4.42 División político administrativa del municipio de Nejapa, San Salvador.	207
Figura 4.43 División político administrativa del municipio de Quezaltepeque, La Libertad.....	210
Figura 4.44 Ubicación geográfica de sitios registrados históricamente como zonas de inundación del municipio de Quezaltepeque.	211
Figura 4.45 Ubicación geográfica del sitio registrado históricamente como zona de inundación del municipio de Quezaltepeque.	212
Figura 4.46 División político administrativa del municipio de Sacacoyo, La Libertad.....	215
Figura 4.47 Ubicación geográfica de sitios registrados históricamente como zonas de inundación del municipio de Sacacoyo.	216
Figura 4.48 Ubicación geográfica del sitio registrado históricamente como zona de inundación del municipio de Sacacoyo.	217
Figura 4.49 División político administrativa del municipio de San Juan Opico, La Libertad.....	220
Figura 4.50 Ubicación geográfica de sitios registrados históricamente como zonas de inundación del municipio de San Juan Opico.....	221
Figura 4.51 Ubicación geográfica del sitio registrado históricamente como zona de inundación del municipio de San Juan Opico.....	222
Figura 4.52 División político administrativa del municipio de San Matías, La Libertad.....	225

Figura 4.53 Ubicación geográfica de sitios registrados históricamente como zonas de inundación del municipio de San Matías.....	226
Figura 4.54 Ubicación geográfica del sitio registrado históricamente como zona de inundación del municipio de San Matías.	227
Figura 4.55 División político administrativa del municipio de San Pablo Tacachico, La Libertad.	230
Figura 4.56 Ubicación geográfica de sitios registrados históricamente como zonas de inundación del municipio de San Pablo Tacachico.	231
Figura 4.57 Ubicación geográfica del sitio registrado históricamente como zona de inundación del municipio de San Pablo Tacachico.	232
Figura 4.58 División político administrativa del municipio de Santa Tecla, La Libertad.....	234
Figura 4.59 División político administrativa del municipio de Talnique, La Libertad.....	237
Figura 4.60 Ubicación geográfica de sitios registrados históricamente como zonas de inundación del municipio de Talnique.	238
Figura 4.61 Ubicación geográfica del sitio registrado históricamente como zona de inundación del municipio de Talnique.	239
Figura 4.62 División político administrativa del municipio de Tepecoyo, La Libertad.....	242
Figura 4.63 Ubicación geográfica de sitios registrados históricamente como zonas de inundación del municipio de Tepecoyo.	243

Figura 4.64 Ubicación geográfica del sitio registrado históricamente como zona de inundación del municipio de Tepecoyo.....	244
---	-----

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1: ANTEPROYECTO

Tabla 1.1 Cuadro comparativo de pérdidas ocasionadas por eventos recientes.....	4
---	---

CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Tabla 2.1 Clasificación propuesta para el tamaño de cuencas.	18
Tabla 2.2 Formas de las cuencas de acuerdo al coeficiente de compacidad. ..	24
Tabla 2.3 Curva hipsométrica. Ejemplo de cálculo.....	31
Tabla 2.4 Cálculo de curva hipsométrica de la cuenca del río Sucio.....	35
Tabla 2.5 Característica del relieve de una cuenca de acuerdo a su pendiente.....	39
Tabla 2.6 Cálculo de pendiente media de la cuenca del río Sucio mediante el uso de un GIS.	40
Tabla 2.7 Caracterización de la red de drenaje de la cuenca del río Sucio.....	50
Tabla 2.8 Valores interpretativos de la densidad de drenaje.....	51
Tabla 2.9 Resumen de las características de la cuenca del río Sucio.....	52
Tabla 2.10 Clasificación del terreno de la cuenca del río Sucio con base a su elevación.	55
Tabla 2.11 Usos del suelo en la cuenca del río Sucio.....	59

Tabla 2.12 Población total, masculino y femenino, en los municipios que conforman la cuenca del río Sucio.	64
Tabla 2.13 Total de viviendas por municipios que conforman la cuenca del río Sucio.....	65
Tabla 2.14 Inundaciones registradas en la cuenca del río Sucio.	67

CAPÍTULO 3: BASE TEÓRICA DE LA PLATAFORMA CAPRA

Tabla 3.1 Orden de datos para la realización de la correlación.	82
Tabla 3.2 Componentes del Software CAPRA.	85
Tabla 3.3 Formato de archivos generados por los programas de la plataforma CAPRA.	86
Tabla 3.4 Eventos de amenaza.	88
Tabla 3.5 Parámetros de intensidad considerados para las diferentes amenazas.....	90
Tabla 3.6 Ejemplo de extracción de información de mapa de isoyetas.	96

CAPÍTULO 4: IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO CAPRA A LA CUENCA DEL RÍO SUCIO

Tabla 4.1 Ubicación geográfica de las estaciones pluviométricas utilizadas en el estudio de la cuenca del río Sucio.....	136
Tabla 4.2 Datos de lluvia resgistrados por los pluviómetros ubicados dentro de la cuenca del río Sucio.	137

Tabla 4.3 Relleno de datos del mes de Mayo.....	144
Tabla 4.4 Relleno de datos del mes de Septiembre.....	145
Tabla 4.5 Lluvia registrada durante la Depresión Tropical 12 E.....	150
Tabla 4.6 Promedio anual de precipitación del período lluvioso (Mayo- Octubre).....	153
Tabla 4.7 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de Armenia.	170
Tabla 4.8 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de Armenia.	171
Tabla 4.9 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de Ciudad Arce.....	175
Tabla 4.10 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de Ciudad Arce.	176
Tabla 4.11 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de Coatepeque.....	180
Tabla 4.12 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de Coatepeque.....	181
Tabla 4.13 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de Colón.	185
Tabla 4.14 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de Colón.	186
Tabla 4.15 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de El Congo.....	190

Tabla 4.16 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de El Congo.....	190
Tabla 4.17 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de El Paisnal.....	194
Tabla 4.18 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de El Paisnal.	195
Tabla 4.19 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de Izalco	199
Tabla 4.20 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de Jayaque.....	201
Tabla 4.21 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de Jayaque.....	202
Tabla 4.22 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de Nejapa.	206
Tabla 4.23 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de Quezaltepeque.....	208
Tabla 4.24 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de Quezaltepeque.....	209
Tabla 4.25 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de Sacacoyo.....	213
Tabla 4.26 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de Sacacoyo.	214
Tabla 4.27 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de San Juan Opico.	218

Tabla 4.28 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de San Juan Opico.	219
Tabla 4.29 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de San Matías.....	223
Tabla 4.30 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de San Matías.....	224
Tabla 4.31 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de San Pablo Tacachico.....	228
Tabla 4.32 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de San Pablo Tacachico.....	229
Tabla 4.33 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de Santa Tecla.....	233
Tabla 4.34 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de Talnique.....	235
Tabla 4.35 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de Talnique.....	236
Tabla 4.36 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de Tepecoyo.....	240
Tabla 4.37 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de Tepecoyo.....	241

ÍNDICE DE GRÁFICAS

CAPÍTULO 1: ANTEPROYECTO

Gráfica 1.1 Acumulado de lluvia máxima total y en 24 horas registrada durante eventos extremos en El Salvador (1960-2011).....	5
--	---

CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Gráfica 2.1 Curva hipsométrica de una cuenca.....	31
Gráfica 2.2 Gráfica de cuenca con valles extensos y cumbres escarpadas.....	32
Gráfica 2.3 Gráfica de cuenca con valles profundos y sabanas planas.....	33
Gráfica 2.4 Curvas hipsométricas características del ciclo de erosión.	33
Gráfica 2.5 Curva hipsométrica de la cuenca del río Sucio.	34
Gráfica 2.6 Gráfica de distribución de porcentaje de área de la cuenca.....	36

CAPÍTULO 3: BASE TEÓRICA DE LA PLATAFORMA CAPRA

Gráfica 3.1 Coeficiente de correlación $r=0$, correlación nula.	80
Gráfica 3.2 Coeficiente de correlación $r=1$, correlación directa óptima.....	80
Gráfica 3.3 Coeficiente de correlación $r=-1$, correlación inversa óptima.....	81
Gráfica 3.4 Ejemplo de gráfica de Curvas PAD para diferentes eventos.	97
Gráfica 3.5 Ejemplo de envolvente de curvas PAD para diferentes eventos del mismo año.....	98
Gráfica 3.6 Ejemplo de gráfico de curvas PADF.	99

Gráfica 3.7 Formato de Curva de Vulnerabilidad.	111
Gráfica 3.8 Ejemplo de Curva de excedencia de pérdidas.	130

CAPÍTULO 4: IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO CAPRA A LA CUENCA DEL RÍO SUCIO

Gráfica 4.1 Gráfico de correlación de datos de lluvia.	143
---	-----

ÍNDICE DE ANEXOS

CAPÍTULO 4: IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO CAPRA A LA CUENCA DEL RÍO SUCIO

Anexo 4-1 Mapa de Inundaciones del municipio de Ciudad Arce.	260
Anexo 4-2 Mapa de Multiamenaza del Municipio de Colón.	261
Anexo 4-3 Mapa multiamenaza del municipio de El Paisnal, San Salvador.	262
Anexo 4-4 Mapa de Riesgo del municipio de Jayaque	263
Anexo 4-5 Mapa de amenaza por inundación del municipio de Nejapa.	264
Anexo 4-6 Mapa histórico de amenazas de origen natural del municipio de Quezaltepeque.	265
Anexo 4-7 Mapa de amenaza de inundación del municipio de San Matías. ...	266
Anexo 4-8 Mapa de inundación del cantón Atiocoyo del municipio de San Pablo Tacachico.	267
Anexo 4-9 Mapa de afectaciones del municipio de Santa Tecla.	268
Anexo 4-10 Mapa de amenaza por inundaciones del municipio de Tepecoyo.	269
Anexo 4-11 Ubicación de las zonas de inundación en la cuenca del río Sucio.	271
Anexo 4-12 Levantamiento de los elementos expuestos a inundación en la cuenca del río Sucio.	273

TABLA DE SIGLAS

BID	Banco Interamericano de Desarrollo
BM	Banco Mundial
CAPRA	Programa de Evaluación Probabilística de Riesgos para América Central (Central America Probabilistic Risk Assessment Program, por sus siglas en inglés)
CEPREDENAC	Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central
DesInventar	Sistema de Inventario de Desastres
DGOA	Dirección General del Observatorio Ambiental
DIGESTYC	Dirección General de Estadística y Censos
EIRD	Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres
MARN	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
PROCAFÉ	Fundación Salvadoreña para la Investigación del Café
USDA SCS	Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos

RESUMEN

El presente Trabajo de Graduación titulado “INSUMOS TÉCNICOS PARA LA MODELACIÓN PROBABILÍSTICA DE RIESGO DE INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO SUCIO UTILIZANDO EL MODELO CAPRA”, busca ser una guía para la modelación de inundaciones con base en amenazas de lluvia generadas, que representen las precipitaciones ocurridas en la cuenca en estudio.

Debido a los recurrentes eventos de inundaciones que son provocados por las intensas lluvias en nuestro país y que afectan a la población y las zonas productivas del mismo, se da la necesidad de implementar la gestión preventiva de riesgo ante eventos con alta frecuencia de ocurrencia así como también eventos extraordinarios. Para ello existe la plataforma CAPRA, la cual es una iniciativa basada en sistemas de información geográfica (SIG), que ofrece información sobre el riesgo que las amenazas naturales representan para la población e infraestructura expuesta, utilizando información referente a exposición y vulnerabilidad de las mismas.

El área en estudio designada como “Cuenca del Río Sucio”, comprende 17 municipios, ubicados en los departamentos de La Libertad, San Salvador, Santa Ana y Sonsonate.

Para conocer de manera general el comportamiento de la precipitación en la cuenca, se realizó un estudio de las características morfométricas y de drenaje

de la misma, así como también un análisis de los datos de precipitación correspondientes a las estaciones pluviométricas ubicadas dentro de la cuenca. Debido a la finalidad de la presente investigación se recopiló información referente a las zonas de inundación y la infraestructura expuesta. Posteriormente se realizó la ubicación georeferencial de la infraestructura expuesta, asignándole a cada una de ellas características en cuanto a su vulnerabilidad.

Con el presente trabajo de graduación se pretende generar los insumos suficientes para desarrollar posteriormente estudios de riesgo que tomen en cuenta las condiciones de la zona en estudio.

Se espera que los resultados obtenidos sean una base para el análisis de riesgo probabilístico de inundaciones y puedan ayudar en la toma de decisiones a instituciones del gobierno central y gobiernos locales, para el planeamiento territorial de la zona

CAPÍTULO 1:

ANTEPROYECTO

1.1 INTRODUCCIÓN

El Salvador se caracteriza por ser uno de los países más vulnerables del mundo, con una ubicación geográfica el cual es blanco de eventos de origen climáticos, provenientes del Océano Atlántico y del Océano Pacífico. En el último evento ocasionado por el paso de la Depresión Tropical 12E los daños y pérdidas representaron casi el 4% del Producto Interno Bruto del país (CEPAL, 2011). Los efectos más notables en el área de estudio causados por las fuertes lluvias fueron el daño de viviendas, daño al patrimonio cultural, así como también el colapso en tramos de la infraestructura vial (DesInventar, 2011).

Debido a los recurrentes eventos de inundaciones que son provocados por las intensas lluvias en nuestro país y que afectan a la población y las zonas productivas del mismo, se da la necesidad de implementar la gestión preventiva de riesgo ante eventos con alta frecuencia de ocurrencia así como también eventos extraordinarios; por tanto, se desarrolla la presente investigación titulada “INSUMOS TÉCNICOS PARA LA MODELACIÓN PROBABILÍSTICA DE RIESGO DE INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO SUCIO UTILIZANDO EL MODELO CAPRA”, con la cual se espera que sus resultados sean una base para el análisis de riesgo probabilístico de inundaciones y puedan ayudar en la toma de decisiones a instituciones del gobierno central y gobiernos locales, para el planeamiento territorial de la zona; y con ello proporcionar información que ayude a minimizar las posibles pérdidas en las que se incurriría en proyectos de futuro desarrollo que se quieran llevar a cabo dentro de la zona en estudio.

1.2 ANTECEDENTES

Como consecuencia de los desastres provocados por fenómenos naturales, los territorios con menor desarrollo humano han sido los que concentran los mayores daños y pérdidas; y dada la vulnerabilidad y la frecuencia con la que El Salvador experimenta desastres naturales (Inundaciones en la mayoría de épocas lluviosas y sequías moderadas a fuertes de manera cíclica), es obligatorio que la gestión de riesgo este en la agenda de los tomadores de decisión.

Durante el paso de la tormenta Ida en el año 2009, 2,350 viviendas fueron dañadas, 24 puentes colapsaron y 55 quedaron dañados; 198 personas fallecieron y 4,200 fueron albergadas. Sufriendo inundaciones por el desbordamiento de los ríos, los departamentos de La Paz, La Libertad, San Vicente y San Salvador. Se estimó un total de 314.8 millones de dólares en daños y pérdidas.

Por otra parte, en el año 2010 la tormenta Agatha dejó 25 puentes dañados y 8,272 viviendas en riesgo; ocasionando a su vez el fallecimiento de 12 personas. Las regiones más afectadas fueron la zona oriental y costera del país. El impacto económico de la tormenta Agatha sobrepasó los 112 millones de dólares equivalentes a un 0.5% del Producto Interno Bruto (PIB) de El Salvador (CEPAL, 2011). La tormenta Agatha con 483 mm. de lluvia en 24 horas, superó los niveles registrados durante el huracán Mitch (375 mm. de lluvia en 24 horas) (MARN, Descripción y Cronología de la Depresión Tropical 12E y Sistema Depresionario sobre El Salvador, 2011). Estos eventos han desnudado la alta

vulnerabilidad del territorio y de la población ante el embate de los fenómenos naturales de tipo climático.

La Tabla 1.1 compara las pérdidas ocasionadas por algunos de los eventos meteorológicos mostrados en Gráfica 1.1 que han afectado en mayor medida al país en los últimos 50 años.

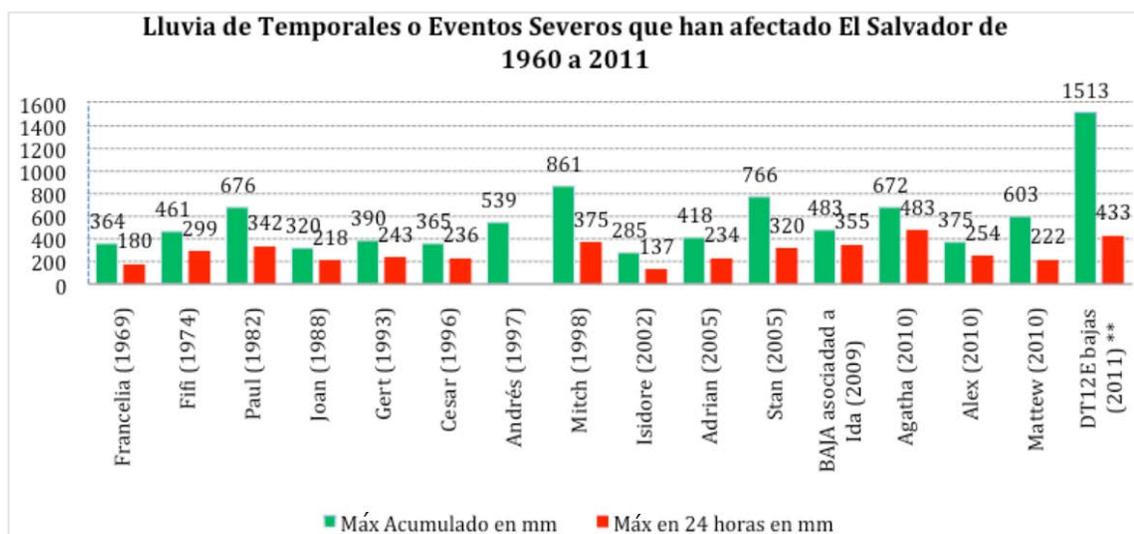
Tabla 1.1 Cuadro comparativo de pérdidas ocasionadas por eventos recientes.

Daños	Huracán Mitch 1998	Tormenta Ida 2009	Tormenta Agatha 2010	Baja Presión 12E 2011
Daños y pérdidas estimadas	\$388.1 millones 2.3% del PIB	\$314.8 millones 1.44% del PIB	\$112.1 millones 0.5% del PIB	\$840.4 millones 4% del PIB
Territorio afectado	Zona oriental del país y Sonsonate (el 40% del territorio)	Zona central y en especial San Vicente y La Paz	Buena parte de la zona oriental y costera	Daños en 181 municipios, el 70% del país
Nivel máximo de agua acumulada	861 mm	483 mm	672 mm	1,513 mm
Nivel máximo de lluvia en 24 horas	375 mm	355 mm	483 mm	433 mm
Fallecidos	240	198	12	34
Puentes	10 destruidos 68 afectados	55 dañados 24 colapsados	25 dañados	8 colapsados 26 dañados
Viviendas dañadas y en riesgo	10,372	2,350	8,272	8,118
Daños en carreteras	Daños en 60% de la red vial	132 carreteras	61 carreteras	40% de la red vial

Fuente: Elaboración propia con base en (CEPAL, 2011).

En la actualidad existen Modelos o Plataformas desde las cuales se puede realizar la evaluación de riesgos con técnicas probabilísticas para el análisis de amenazas y pérdidas causadas por eventos naturales, utilizando información

referente a exposición y vulnerabilidad para poder determinar, en este caso, riesgos por inundaciones. En el caso del MARN, se ha optado por utilizar la Plataforma de Evaluación Probabilística de Riesgos en Centroamérica (CAPRA, por sus siglas en inglés), con la cual se busca fomentar la comprensión del riesgo de desastres dentro de la región Centroamericana.



Gráfica 1.1 Acumulado de lluvia máxima total y en 24 horas registrada durante eventos extremos en El Salvador (1960-2011).

Fuente: (CEPAL, 2011)

La iniciativa ha establecido una plataforma basada en sistemas de información geográfica (SIG), la cual ofrece información sobre el riesgo que las amenazas naturales representan para la población e infraestructura expuesta, por lo tanto, CAPRA es una herramienta que permite que las instancias decisorias gestionen el riesgo en los ámbitos local, nacional e incluso regional.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante la época lluviosa y debido a los altos niveles que presenta el río Sucio, se generan inundaciones y desbordamientos en poblaciones aledañas, provocando pérdidas materiales que se ven reflejadas en los daños a la infraestructura, en su mayoría viviendas; además, del daño al que se exponen los cultivos de las zonas inundadas.

Actualmente se han realizado Mapas Probabilísticos de Riesgos a Inundaciones en algunas cuencas del territorio nacional con la implementación de la plataforma CAPRA como son: Río Jiboa, río Sensunapán y Arenal de Monserrat (MARN, Presentan mapa de riesgo por inundaciones para cuencas hidrográficas de ríos Arenal de Monserrat y Sensunapán, 2014), sin embargo, la cuenca del río Sucio no ha sido incluida en dicho análisis.

No obstante, en la cuenca del río Sucio se han realizado análisis hidrológicos, también se han establecido Sistemas de Alerta Temprana por Inundación para algunas comunidades de los municipios de Ciudad Arce y Colón, mapas de riesgo de inundación; sin embargo, se desconoce información respecto a la infraestructura que puede sufrir pérdidas económicas producidas por las inundaciones recurrentes.

Además, producto del inventario de amenazas naturales registradas por diferentes entidades, con ayuda de las municipalidades, se han generado mapas multi-amenazas a partir de la información existente, experiencia previa de las

poblaciones, por lo que en la actualidad la prevención de riesgos no está basada en estudios probabilísticos.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

- Describir los insumos técnicos necesarios para la modelación probabilística de riesgo de inundaciones en la cuenca del río Sucio utilizando el método estocástico CAPRA.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Recolectar y procesar los datos de intensidades de lluvia obtenidos de las estaciones pluviométricas ubicadas dentro de la cuenca en estudio para realizar una evaluación de la amenaza en la cuenca.
- Describir las curvas de vulnerabilidad apropiadas para su utilización dentro de la plataforma CAPRA.
- Investigar los tipos de construcciones que hayan sido afectadas por inundaciones y que se encuentren dentro de la cuenca del río Sucio.
- Describir el procedimiento utilizado por el método CAPRA para evaluar el riesgo de inundaciones.

1.5 ALCANCES

- Los datos de precipitación a utilizar corresponderán a las estaciones pluviométricas con las que cuenta el MARN dentro de la cuenca en estudio.
- La información de infraestructura a recolectar corresponderá a toda aquella que se encuentre en las cercanías de los cauces de ríos que componen la cuenca en estudio.
- Se describirá el método simplificado para la modelación de inundaciones mediante el uso del modelo CAPRA.

1.6 LIMITACIONES

- Se utilizarán los datos de precipitación de las estaciones pluviométricas que cumplan como requisito contar con 30 años de registro de lluvia como mínimo.
- La información a recolectar referente a infraestructura estará limitada a aquella que ha sido registrada oficialmente por las municipalidades como zonas históricamente inundables.
- En el presente Trabajo de Graduación no se pretende realizar el estudio de riesgo de inundación, por lo que está limitado a la recolección de información en términos de vulnerabilidad, exposición y amenaza.

1.7 JUSTIFICACIÓN

La falta de Sistemas de Alerta Temprana por inundaciones, sumada a los eventos de lluvia recurrentes en el área de estudio, producen mayor vulnerabilidad, tanto humana como a nivel de infraestructura.

Con el presente Trabajo de Graduación se pretende generar los insumos suficientes para desarrollar posteriormente estudios de riesgo que tomen en cuenta las condiciones de la zona en estudio. La importancia de contar con información detallada correspondiente a amenaza, vulnerabilidad y exposición de la cuenca del río Sucio, permitirá a los entes delegados de la gestión de riesgo desarrollar estrategias de intervención que incluyan la prevención, mitigación, respuesta a emergencia, reconstrucción y rehabilitación, así como también la protección financiera tanto de la población en general como del Estado.

CAPÍTULO 2:

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1 INTRODUCCIÓN

Debido a la importancia que posee el manejo integral de las cuencas hidrográficas para el desarrollo de un país, es necesario conocer las características de una cuenca en todo análisis hidrológico; por lo que en el presente capítulo se realizará un estudio detallado de la cuenca del río Sucio, utilizando como base la información digital proporcionada por la Dirección General del Observatorio Ambiental del MARN, la cual será analizada para poder determinar las características morfométricas y de la red de drenaje de la cuenca en estudio; dado que, el comportamiento del caudal y de las crecidas puede verse modificado por las mismas. Por tanto, se ampliará el conocimiento respecto al comportamiento hidráulico de la cuenca, así como también de los factores antrópicos por los cuales puede ser afectada.

Además se presenta el registro de las inundaciones acontecidas en la cuenca del río Sucio, en el cual se describen los daños provocados por las intensas lluvias en la zona en estudio.

2.2 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Se identifica como Área de Estudio, la cuenca del río Sucio, la cual se sitúa dentro de la cuenca del río Lempa, que ha sido designada como región hidrográfica A.

En la Figura 2.1 se muestra la cuenca del río Sucio dentro del territorio nacional, mientras que en la Figura 2.2, la cuenca se enmarca en el mapa geomorfológico del país; en el cual se destaca que la misma se sitúa sobre la cadena volcánica joven, la cadena costera y la gran depresión central.

La cuenca del río Sucio se encuentra delimitada geomorfológicamente al norte con una suave cresta alargada producida por un flujo piroclástico de la caldera del lago de Coatepeque y una serie de cerros terciarios; al este con el volcán de San Salvador, cuyo cráter, El Boquerón, constituye la máxima elevación de la cuenca; al sur con la Cordillera del Bálsamo y al oeste limita con la caldera del lago de Coatepeque (Fernández Novales, 2015).

Altitudinalmente, varía aproximadamente, entre los 248 m.s.n.m cota correspondiente a su desembocadura en el río Lempa y los 1,892 m.s.n.m. punto más alto de la cuenca, ubicado en el Volcán de San Salvador.

Políticamente, tal como se observa en la Figura 2.3, el Área de Estudio se ubica dentro de cuatro departamentos, La Libertad, San Salvador, Santa Ana y Sonsonate; conteniendo los municipios indicados a continuación:

- **La Libertad:** Ciudad Arce, Colón, Jayaque, Quezaltepeque, Sacacoyo, San Juan Opico, San Matías, San Pablo Tacachico, Santa Tecla, Talnique y Tepecoyo.
- **San Salvador:** El Paisnal y Nejapa.
- **Santa Ana:** El Congo y Coatepeque.
- **Sonsonate:** Armenia e Izalco.

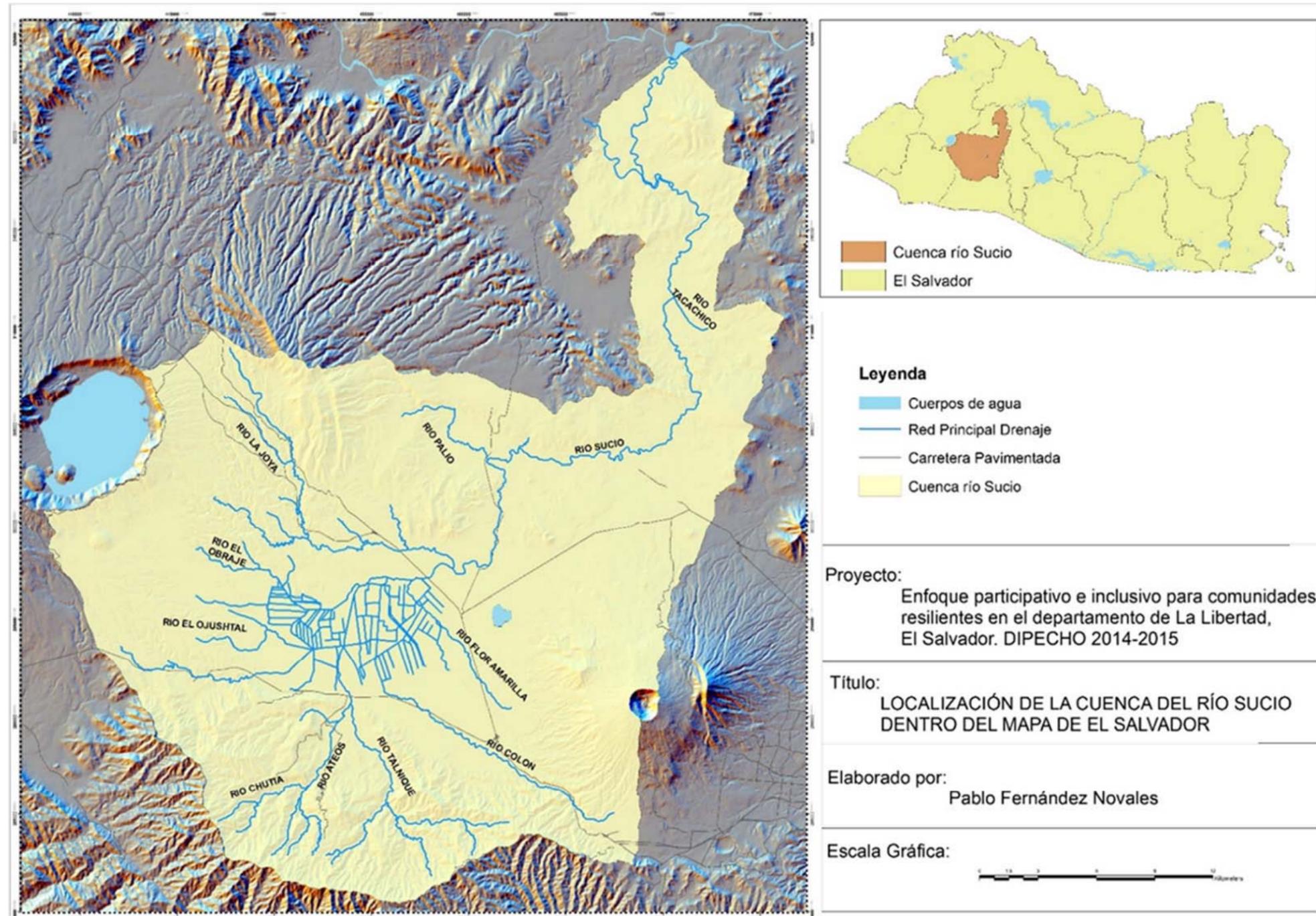


Figura 2.1 Localización de la cuenca del río Sucio dentro del Mapa de El Salvador.

Fuente: (Fernández Novales, 2015).

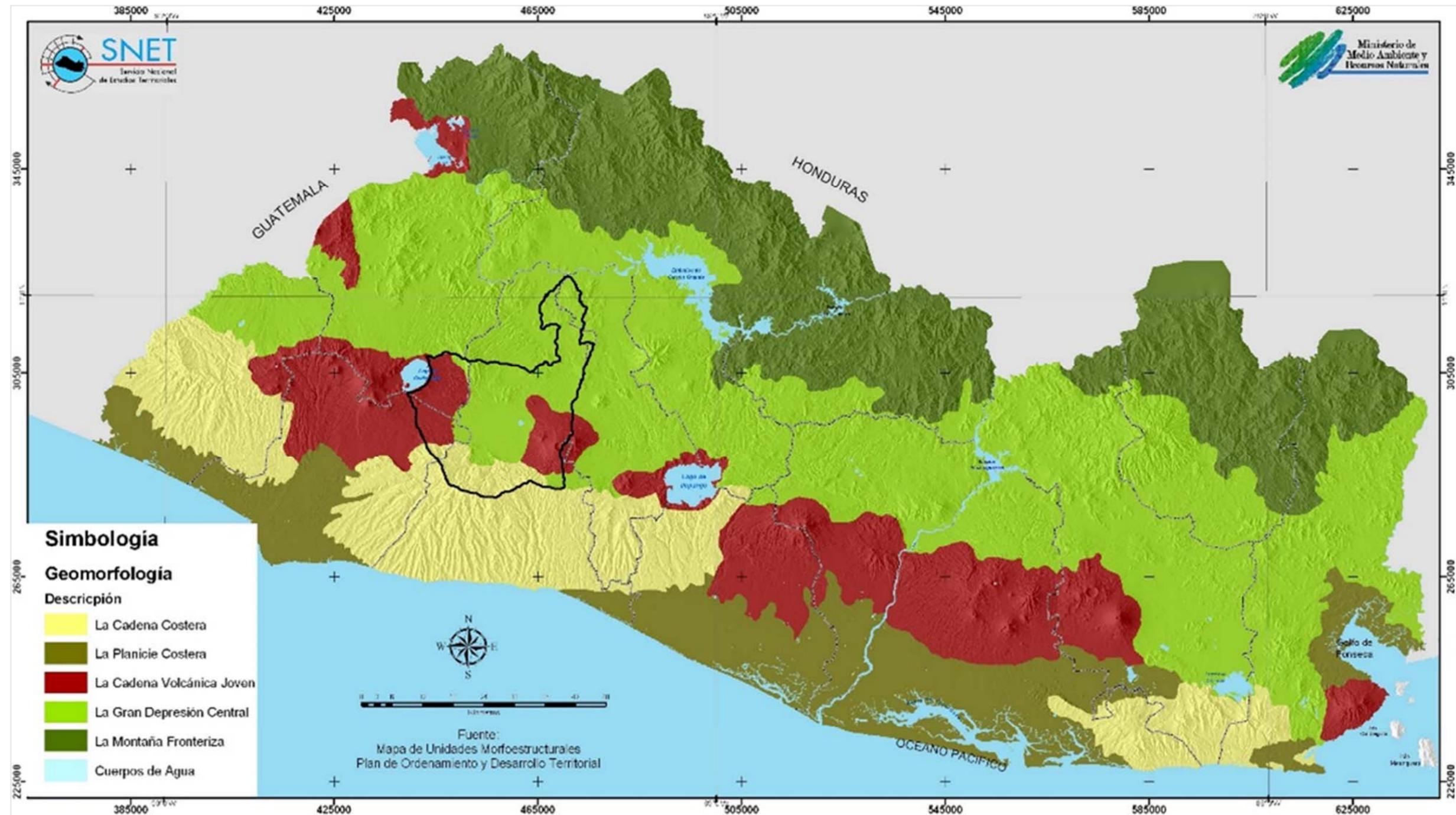


Figura 2.2 Delimitación de la cuenca del río SUCIO dentro del Mapa Geomorfológico de El Salvador.

Fuente: (MARN, SNET, 2009)

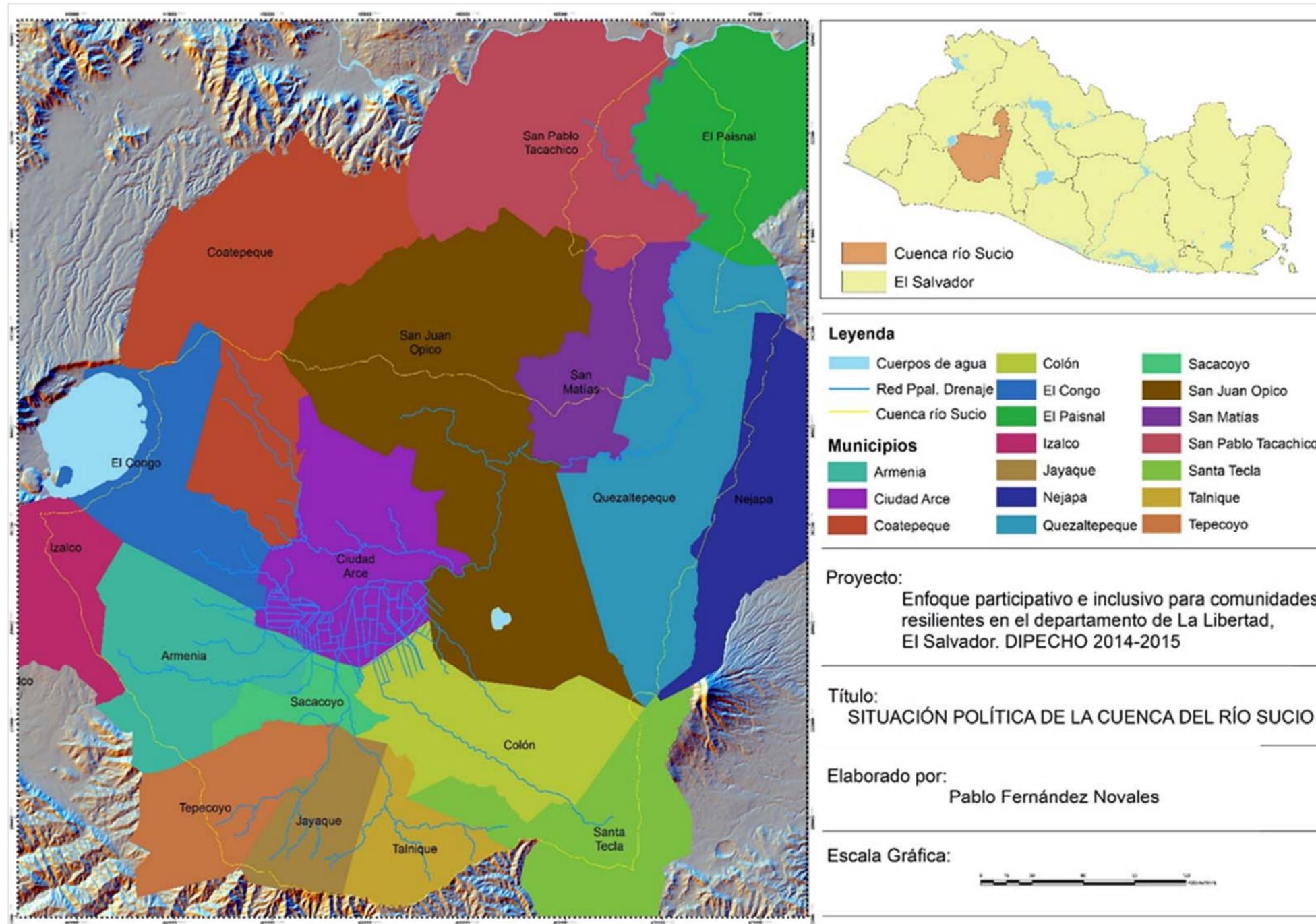


Figura 2.3 Situación política de la cuenca del río Sucio.

Fuente: (Fernández Novales, 2015).

2.3 CUENCA HIDROGRÁFICA

La cuenca hidrográfica constituye la unidad básica de estudio de la hidrología, y según (Aparicio Mijares, 1992), “una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes, hacia un mismo punto de salida”; refiriéndose a una cuenca superficial.

2.3.1 TIPO Y FORMA DE LA CUENCA

En función de la ubicación de la desembocadura de las cuencas, se clasifican dos tipos: endorreicas y exorreicas (Yugar Morales & Cahuana Andia, 2009).

CUENCAS ENDORREICAS

Las cuencas endorreicas se define como aquellas en las que su punto de salida se encuentra en el interior de la cuenca (véase Figura 2.4); generalmente las conforman las cuencas pertenecientes a lagos o lagunas.



Figura 2.4 Cuenca endorreica.
Fuente: elaboración propia.

CUENCAS EXORREICAS

Las cuencas exorreicas se definen como las cuencas que poseen su punto de salida en el perímetro o parteaguas, desembocando generalmente en el nivel más bajo de la cuenca; pudiendo ser una corriente de agua o el mar (véase Figura 2.5).



Figura 2.5 Cuenca exorreica.

Fuente: Elaboración propia.

La cuenca del río Sucio es clasificada como una cuenca exorreica, debido a que su cauce principal desemboca en otra corriente, definida como el río Lempa (véase Figura 2.1). La cuenca posee un perímetro de 173 km, el cual encierra un área aproximada de 818 km². El cauce principal de la cuenca, el río Sucio; nace en la Laguna del Valle de Zapotitán y desemboca en el río Lempa a unos 10 km aguas arriba del embalse Cerrón Grande, luego de un recorrido de aproximadamente 62 km en dirección E-NE.

2.3.2 CARACTERÍSTICAS DE UNA CUENCA

Las características de las cuencas generalmente son determinadas por las condiciones geomorfológicas de las mismas, la cuales se centran en el estudio de las formas del relieve; siendo este el resultado de diferentes fenómenos, como por ejemplo la hidrografía; las diferentes características proporcionan la posibilidad de conocer el comportamiento de la cuenca hidrográfica, de allí la importancia de éstas.

2.3.3 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

ÁREA DE LA CUENCA

Es la superficie en proyección, delimitada por la divisoria de agua, también llamada parteaguas (véase Figura 2.6); la cual está definida como una línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico, que separa la cuenca en estudio de las cuencas vecinas (Aparicio Mijares, 1992). El área de la cuenca es expresada en kilómetros cuadrados. En la Tabla 2.1 se presenta la clasificación las cuencas con base a su superficie.

Tabla 2.1 Clasificación propuesta para el tamaño de cuencas.

Tamaño de la cuenca (km ²)	Descripción
25 <	Muy Pequeña
25 - 250	Pequeña
250 - 500	Intermedia Pequeña
500 – 2,500	Intermedia Grande
2,500 - 5000	Grande
> 5000	Muy Grande

Fuente: (Campos , 1992)

Según la clasificación para el tamaño de cuenca propuesta por (Campos , 1992), la cuenca del río sucio se considera como una cuenca Intermedia – Grande.

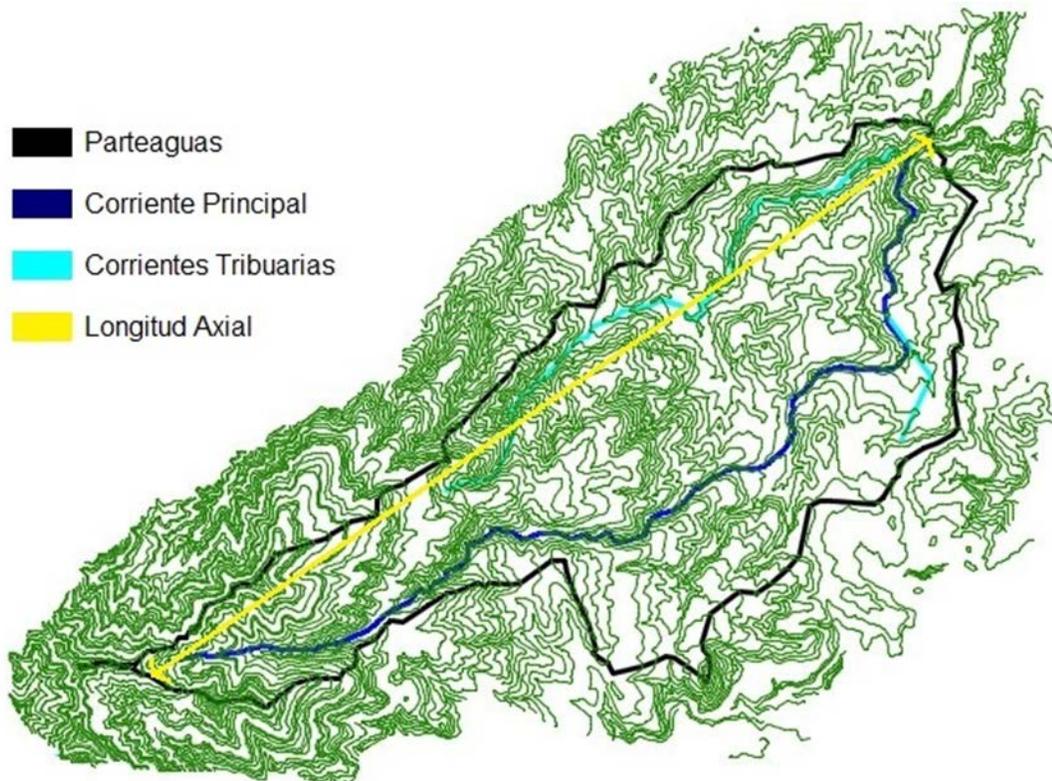


Figura 2.6 Representación de los parámetros geométricos de una cuenca.

Fuente: Elaboración propia.

PERÍMETRO DE LA CUENCA

Se refiere a la longitud del contorno de la cuenca proyectada en un plano horizontal, el valor del perímetro se expresa en kilómetros.

LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL

El cauce principal según Aparicio Mijares “es la corriente que pasa por la salida de la cuenca; las demás corrientes se denominan cauces secundarios (tributarios)”; refiriéndose solamente a las cuencas exorreicas (véase Figura 2.5). Por lo general, la longitud de las corrientes se mide a lo largo de su eje sin considerar meandros. La longitud de las corrientes está relacionada con la pendiente de la cuenca.

LONGITUD AXIAL

La longitud axial se define como la distancia de mayor dimensión de la cuenca, medida desde la desembocadura hasta el límite extremo del parteaguas de la cuenca, paralela al cauce principal en línea recta (véase Figura 2.6).

La cuenca del río sucio posee una longitud axial de 47.43 km, la cual está definida desde el inicio de su desembocadura, hasta el punto más alejado del perímetro (véase Figura 2.7).

ANCHO PROMEDIO

Es la relación entre el área de la cuenca y la longitud axial de la misma. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$B = \frac{A}{L_A}$$

Ecuación 2.1

Dónde:

B= Ancho promedio (km)

A= Área de la cuenca (km²)

L_A= Longitud axial de la cuenca (km)

Considerando que la cuenca del río Sucio posee una longitud axial de 47.43 km y un área de 818.42 km², se procede a evaluar la Ecuación 2.1 para obtener el valor del ancho promedio de la misma.

$$B = \frac{818.43}{47.43} = 17.26 \text{ km}$$

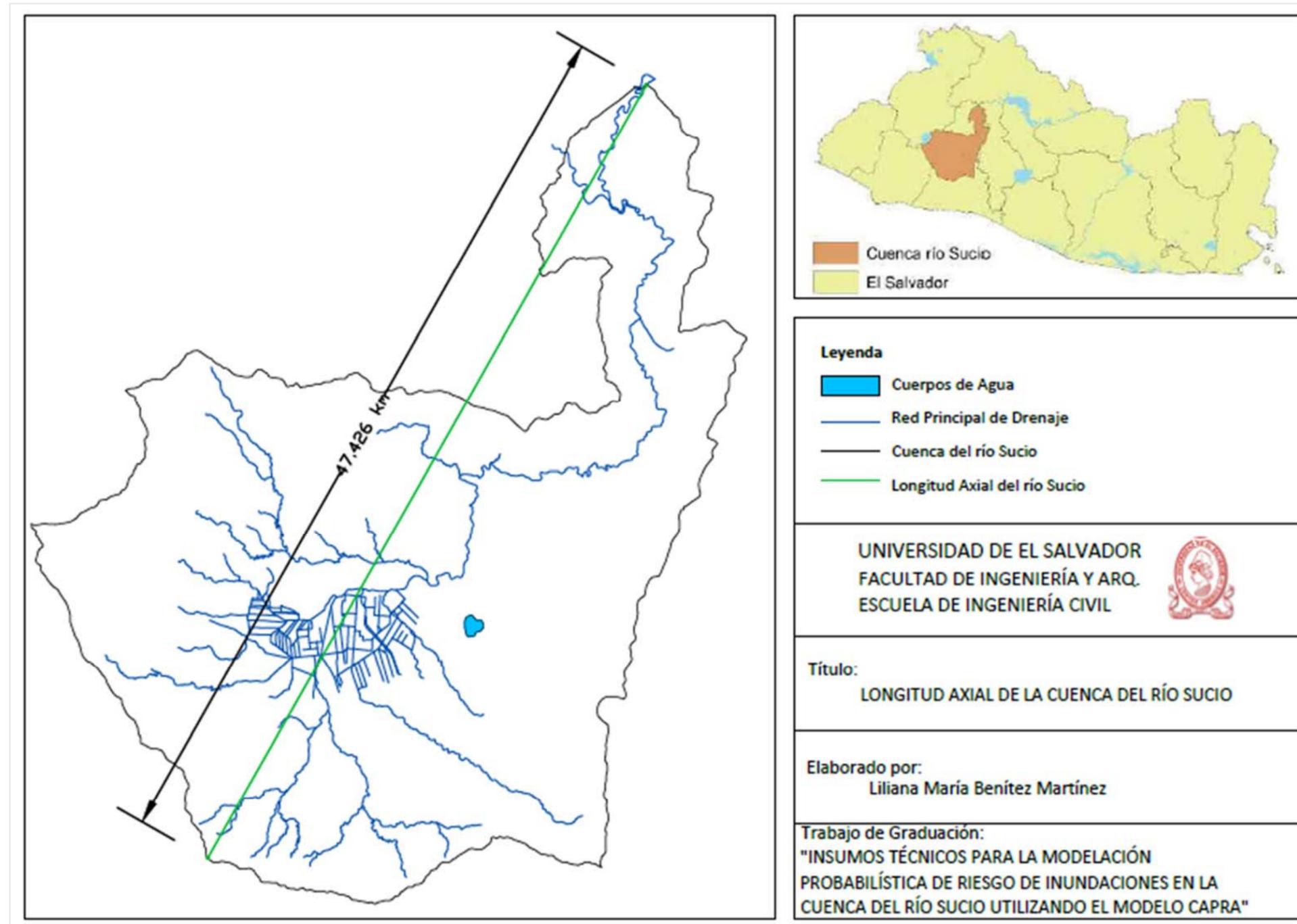


Figura 2.7 Obtención de la longitud axial de la cuenca del río Sucio.

Fuente: Elaboración propia

2.3.4 PARÁMETROS DE FORMA

La forma de la cuenca es de gran importancia dado que relacionan el movimiento del agua y la respuesta de la cuenca al mismo; influyendo en la descarga de la corriente.

COEFICIENTE DE COMPACIDAD DE GRAVELIUS

Es la relación entre el perímetro de la cuenca y la circunferencia de un círculo que tenga igual superficie que la de la cuenca. Este coeficiente se calcula mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

$$K_c = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Ecuación 2.2

Donde:

K_c = Coeficiente de Compacidad o Índice de Gravelius (adimensional)

P = Perímetro de la cuenca (km)

A = Área de la cuenca (km²)

Una cuenca con el coeficiente mínimo, igual a uno, contará con una forma circular, por tanto, cuanto mayor es el coeficiente de compacidad, la cuenca tiende a ser alargada. El índice de compacidad, trata de expresar la influencia del perímetro y el área de una cuenca en la esorrentía; lo cual indica que entre más bajo sea K_c mayor será la concentración de agua (Paredes Escalante, 2014); y aumentará la peligrosidad de la cuenca a crecidas, debido a que las distancias relativas de los puntos de la divisoria con respecto a uno central, no presentan

diferencias mayores y el tiempo de concentración reduce, por lo tanto mayor será la posibilidad de que las ondas de crecidas sean continuas (Henao, 1998); de tal manera que existirá mayor tendencia a las crecientes a medida en que este número sea próximo a la unidad debido a que una cuenca circular presenta una respuesta hidrológica lenta. En la Tabla 2.2 se muestran los diferentes tipos de cuenca según su coeficiente de compacidad.

Tabla 2.2 Formas de las cuencas de acuerdo al coeficiente de compacidad.

Índice K_c	Descripción
1 – 1.25	Redonda – Óvalo redonda
1.25 – 1.50	Óvalo redonda – Óvalo oblonga
1.50 – 1.75	Óvalo oblonga – Rectangular oblonga
> 1.75	Rectangular – Muy lobulada

Fuente: Citado por (Fernández Novales, 2015).

Para conocer el Coeficiente de compacidad de la cuenca del río Sucio, se realizará la evaluación de la Ecuación 2.2 con el valor del perímetro de la cuenca de 173.07 km y un área de 818.42 km², que sustituidos en la fórmula, queda:

$$K_c = 0.282 \frac{173.08}{\sqrt{818.43}} = 1.71$$

De la evaluación anterior, resulta un k_c de 1.71, que de acuerdo a la clasificación citada por (Fernández Novales, 2015) , se concluye que la cuenca del río Sucio posee una forma *Óvalo oblonga – Rectangular oblonga*; la cual posee gran importancia debido a que tiene que ver con la capacidad que tiene la cuenca en administrar el volumen de agua que por ella circula, (González, 2004) menciona que la forma de la cuenca permite gobernar la tasa de suministro de agua al

cauce principal, desde su nacimiento hasta su desembocadura; por tanto, con dicha forma intensifica el vigor de las avenidas al menos en las desembocaduras y la onda de crecida que puede manifestarse fuertemente antes del cauce principal (VIRAMONTES-OLIVAS, y otros, 2007).

FACTOR DE FORMA

El factor de forma está definido como la relación entre el ancho medio y la longitud axial de la cuenca.

$$K_f = \frac{A}{L_A^2}$$

Ecuación 2.3

Donde:

K_f = Factor de Forma

A= Área de la cuenca (km²)

L_A = Longitud axial de la cuenca (km)

Una cuenca con factor de forma bajo está menos sujeta a crecidas, que otra del mismo tamaño pero con mayor factor de forma (Monsalve Sáenz, 1999). Según (Villón, 2002) valores de forma mayores a la unidad indican una forma redondeada de la cuenca, con tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente grandes crecidas; en cambio, valores menores a la unidad señalan formas alargadas de las mismas.

Evaluando la Ecuación 2.3 mediante los resultados de área y longitud axial de la cuenca en estudio, se obtiene:

$$K_f = \frac{818.43}{47.43^2} = 0.36$$

A consecuencia del coeficiente de forma obtenido, se verifica que la cuenca del río Sucio posee una forma alargada; indicando que tiene una respuesta regular a las crecidas.

RELACIÓN DE ELONGACIÓN

Definida por (Schumn, 1956) como el cociente entre el diámetro de un círculo que tiene la misma superficie de la cuenca y la longitud máxima de la cuenca (L_A).

Dicha relación se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$R_e = \frac{D}{L_A} = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{L_A}$$

Ecuación 2.4

Donde:

R_e = Relación de elongación

A = Área de la cuenca (km^2)

L_A = Longitud axial de la cuenca (km)

La relación de elongación está fuertemente relacionada con el relieve de la cuenca; de manera que valores de R_e cercanos a la unidad, implicará considerar la cuenca con relieve bajo; en cambio, si el valor de R_e varía entre 0.6 y 0.8 se asocia a fuertes relieves y pendientes pronunciadas del terreno (Campos Aranda, 1987).

La longitud axial (L_A) obtenida de la cuenca es de 47.43 km (véase Figura 2.7), y el área de 818.43 km². Sustituyendo en la Ecuación 2.4, se obtiene:

$$R_e = 1.128 \frac{\sqrt{818.43}}{47.43} = 0.68$$

El resultado anterior indica que la cuenca del río Sucio puede ser considerada como una cuenca con relieve pronunciado; el cual influye en el aumento de la escorrentía superficial, debido a que al aumentar su velocidad disminuye la infiltración de ésta en el suelo (Monsalve Sáenz, 1999).

2.3.5 PARÁMETROS DE RELIEVE

2.3.5.1 ELEVACIONES

ELEVACIÓN MÁXIMA DE LA CUENCA ($E_{máx}$)

Se define como la elevación del punto más alto de la cuenca respecto al nivel del mar, se expresa en m.s.n.m.

ELEVACIÓN MÍNIMA DE LA CUENCA ($E_{mín}$)

Se define como la elevación del punto más bajo de la cuenca respecto al nivel del mar, se expresa en m.s.n.m. (León Delgado, Montoya López, & Rivera Galdámez, 2013).

ELEVACIÓN MEDIA DE LA CUENCA (E_m)

La elevación media de la cuenca es un parámetro fisiográfico que promedia las diferentes variaciones de las elevaciones de una cuenca. Constituye un criterio

de la variación territorial del escurrimiento resultante de una región. Entre los métodos para el cálculo del presente parámetro están: Red de puntos y curva hipsométrica.

Método de la red de puntos: Consiste en utilizar una malla de cuadrados dentro del mapa topográfico de la cuenca (véase Figura 2.8), teniendo en cuenta que deben existir al menos 100 intersecciones dentro del mismo; la elevación media será el resultado del promedio aritmético de las elevaciones de todas las intersecciones existentes en la cuenca.

$$E_m = \frac{\sum \text{Elevaciones}}{N^\circ \text{ Intersecciones}}$$

Ecuación 2.5

Donde:

E_m = Elevación media de la cuenca

\sum Elevaciones= Suma de las elevaciones correspondientes a cada intersección de la cuadrícula.

N° Intersecciones= Número de intersecciones contenidas en la cuadrícula dibujada dentro de la cuenca.

Para el cálculo de la elevación media de la cuenca mediante el presente método, se sugiere el siguiente procedimiento:

- Dibujar una cuadrícula dentro del mapa topográfico de la cuenca.
- Obtener la elevación de cada intersección de la cuadrícula.
- Realizar un promedio de las elevaciones de las intersecciones contenidas dentro de la cuenca.

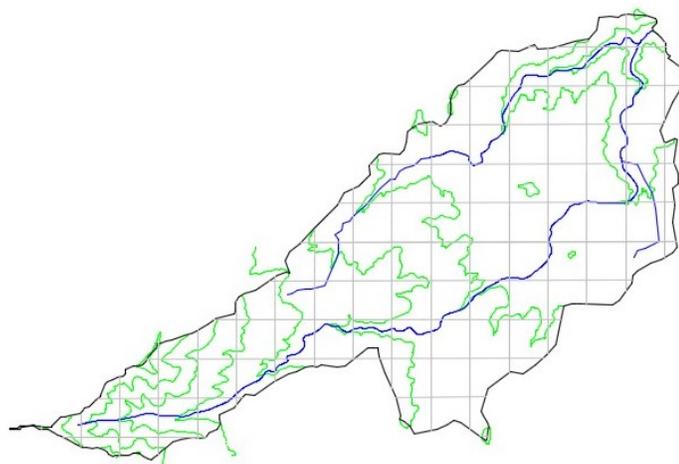


Figura 2.8 Mallado de la cuenca hidrográfica para la obtención de su elevación media.

Fuente: Elaboración propia.

Al aplicar el método de la red de puntos para la obtención de la elevación media de la cuenca del río Sucio (véase Figura 2.9), se generaron 128 intersecciones, para las cuales se calcularon sus respectivas elevaciones, sumando un total de 77,882. Al hacer uso de la ecuación 2.5 y sustituyendo los valores obtenidos, la elevación media resulto de 608.45 m.s.n.m.

$$E_m = \frac{77,882}{128} = 608.45 \text{ m}$$

Método de la curva hipsométrica: Consiste en representar gráficamente el relieve de una cuenca; indicando el porcentaje de área de la cuenca (en km²) que existe por encima de una cota determinada (Yugar Morales & Cahuana Andia, 2009). Tal como se muestra en la Gráfica 2.1 la curva hipsométrica relaciona el valor de la cota, en las ordenadas, con el porcentaje del área acumulada, en las abscisas (Monsalve Sáenz, 1999).

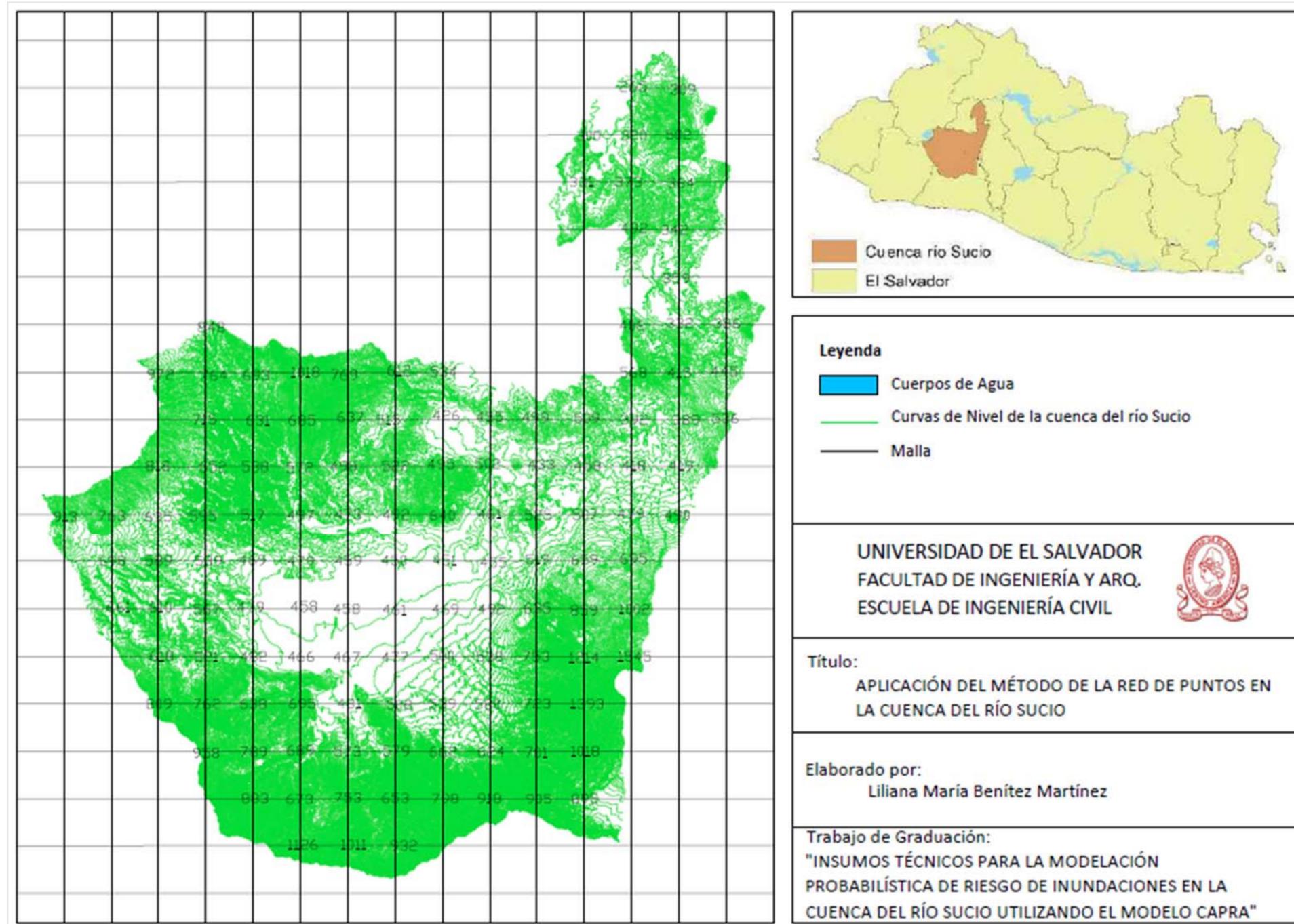
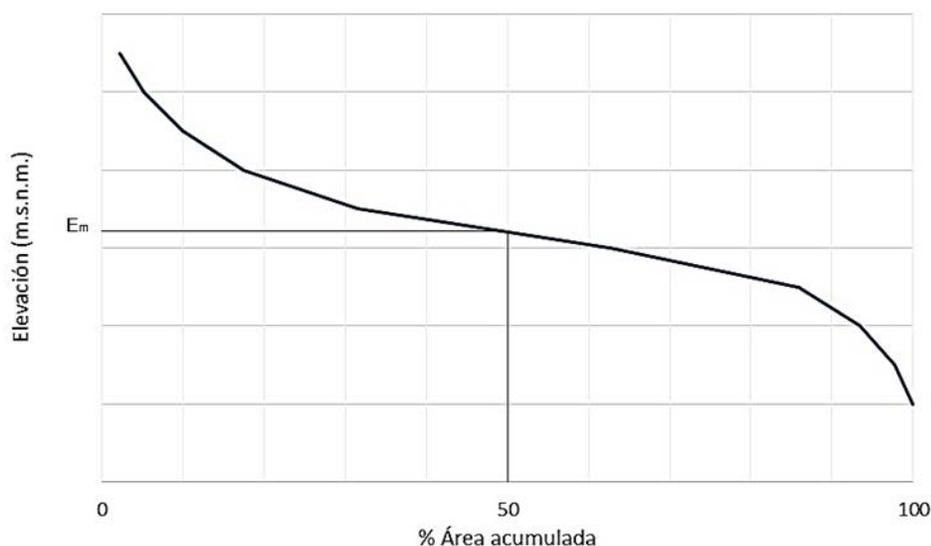


Figura 2.9 Aplicación del Método de la Red de Puntos en la Cuenca del Río Sucio.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la curva hipsométrica se puede determinar la elevación media de la cuenca, correspondiendo a aquella elevación para la cual el 50% del área de la cuenca está situada por encima de dicha elevación y el 50% está situada debajo de ella (Reyes Carrasco, 1992).



Gráfica 2.1 Curva hipsométrica de una cuenca.

Fuente: Elaboración propia.

Análogamente, para la obtención del valor de la elevación media de la cuenca se elabora una tabla de la siguiente manera:

Tabla 2.3 Curva hipsométrica. Ejemplo de cálculo.

Núm	Cota (msnm)		Área (km ²)				
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
.	Cotas intervalo de clase (msnm)	Cota media del intervalo (msnm)	Área (km ²)	Área Acumulada (km ²)	Porcentaje de Área (%)	Porcentaje Acumulado de Área (%)	Columna (2) x Columna (3)
1							
.							
.							
Σ			*				*

*Calcular sumatoria de parámetros.

Fuente: elaboración propia con base en (Monsalve Sáenz, 1999).

Haciendo uso del formato de la Tabla 2.3, se puede obtener el valor de la elevación media de la cuenca mediante el uso de la Ecuación 2.6.

$$E_m = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Cota media del intervalo}_i \times A_i)}{\sum_{i=1}^n (A_i)}$$

Ecuación 2.6

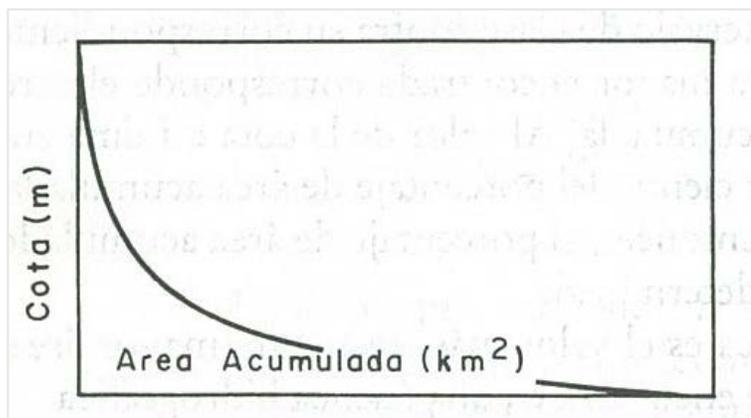
Dónde:

E_m = Elevación media de la cuenca (msnm)

A = Área de la cuenca (km^2)

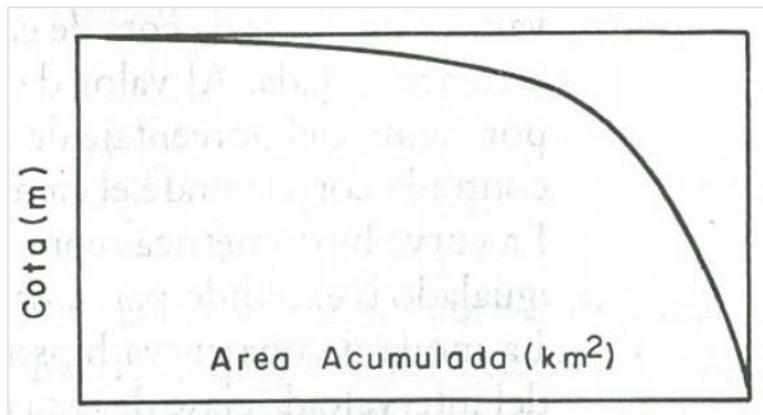
n = Número de intervalos de clase

Las curvas hipsométricas también son utilizadas para definir características fisiográficas de las cuencas (Monsalve Sáenz, 1999); ejemplo de ello son las gráficas que se presentan a continuación:



Gráfica 2.2 Gráfica de cuenca con valles extensos y cumbres escarpadas.

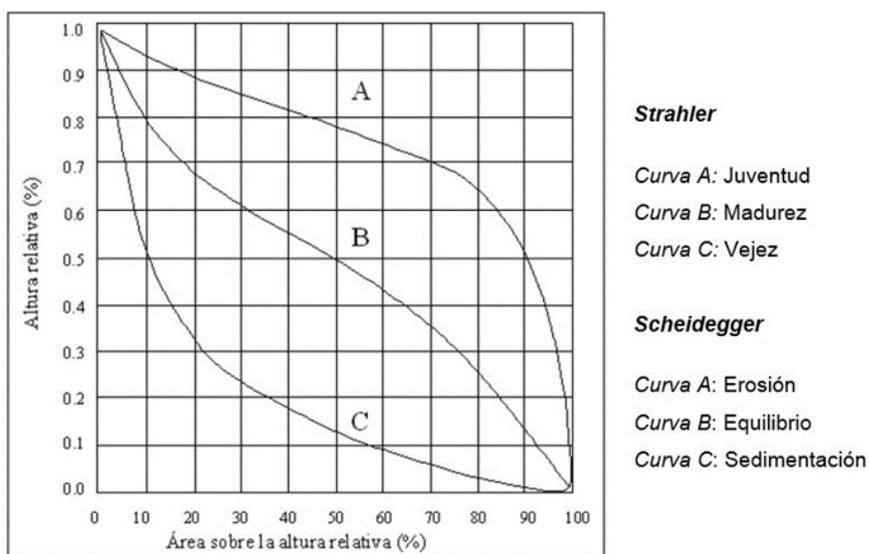
Fuente: (Monsalve Sáenz, 1999).



Gráfica 2.3 Gráfica de cuenca con valles profundos y sabanas planas.

Fuente: (Monsalve Sáenz, 1999).

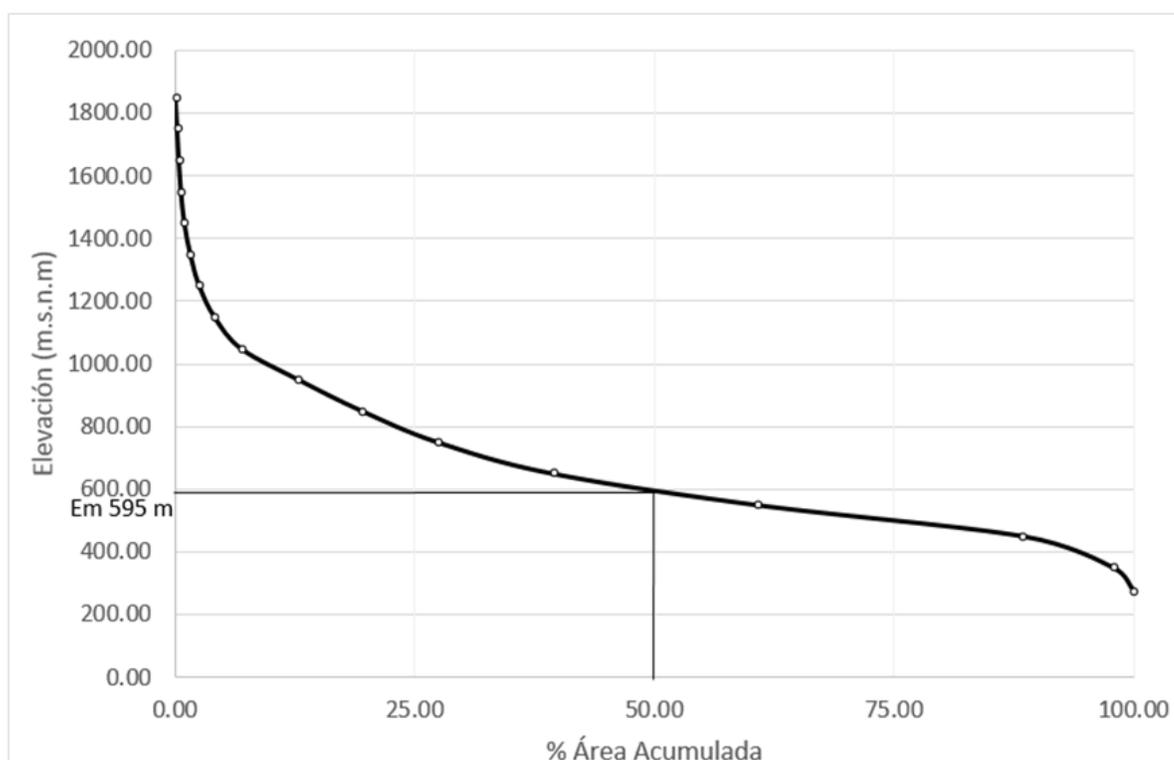
Así como también las curvas hipsométricas han sido asociadas con el ciclo de erosión de las cuencas. En la Gráfica 2.4 se observan tres tipos de curvas hipsométricas, las cuales según Scheidegger pueden ser asociadas a varios procesos de erosión y al grado de madurez de la cuenca según Strahler (Fernández Novales, 2015).



Gráfica 2.4 Curvas hipsométricas características del ciclo de erosión.

Fuente: Elaboración propia con base en (Fernández Novales, 2015).

Según (Schumn, 1956), citado por (Silva, 1999), atendiendo la dinámica de los sedimentos, una fase de Juventud-Erosión implica una zona en donde predomina la producción de sedimentos y aguas; una fase de Madurez-Equilibrio se refiere a una zona en la cual predomina el transporte de ambos y una zona en fase de Vejez-Sedimentación es caracterizada por la disposición de sedimentos. Para el cálculo de la elevación media de la cuenca del río Sucio, también se implementó el método de la curva hipsométrica, el cual esta graficado en la Gráfica 2.5 y resumido en la Tabla 2.4.



Gráfica 2.5 Curva hipsométrica de la cuenca del río Sucio.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la Gráfica 2.5, la cual se representa la hipsometría de la cuenca del río Sucio, de manera gráfica se obtuvo una elevación media de 595m, y con base en las clasificaciones realizadas por Strahler y Scheidegger presentadas en la Gráfica 2.4, se puede definir que la cuenca del río Sucio se encuentra en una fase de madurez – equilibrio, predominando en ella el transporte de sedimentos y aguas.

Tabla 2.4 Cálculo de curva hipsométrica de la cuenca del río Sucio.

Núm	Cota (msnm)		Área (km ²)				
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	Cotas intervalo de clase (msnm)	Cota media del intervalo (msnm)	Área (km ²)	Área Acumulada (km ²)	Porcentaje de Área (%)	Porcentaje Acumulado de Área (%)	Columna (2) x Columna (3)
1	1800-1892	1846.00	0.47	0.47	0.06	0.06	876.07
2	1700-1799	1749.50	1.24	1.71	0.15	0.21	2165.66
3	1600-1699	1649.50	1.51	3.22	0.18	0.39	2487.03
4	1500-1599	1549.50	1.85	5.07	0.23	0.62	2873.75
5	1400-1499	1449.50	2.96	8.04	0.36	0.98	4295.92
6	1300-1399	1349.50	5.08	13.11	0.62	1.60	6849.35
7	1200-1299	1249.50	7.59	20.70	0.93	2.53	9482.07
8	1100-1199	1149.50	13.22	33.93	1.62	4.15	15199.47
9	1000-1099	1049.50	22.58	56.51	2.76	6.90	23698.63
10	900-999	949.50	49.33	105.83	6.03	12.93	46837.05
11	800-899	849.5	54.19	160.03	6.62	19.55	46037.70
12	700-799	749.5	64.91	224.94	7.93	27.48	48651.02
13	600-699	649.5	98.14	323.08	11.99	39.48	63743.81
14	500-599	549.5	174.37	497.45	21.31	60.78	95817.33
15	400-499	449.5	227.2	724.69	27.77	88.55	102143.6
16	300-399	349.5	76.29	800.98	9.32	97.87	26663.01
17	248-299	273.5	17.45	818.43	2.13	100.00	4771.50
Σ			818.5				502592.9

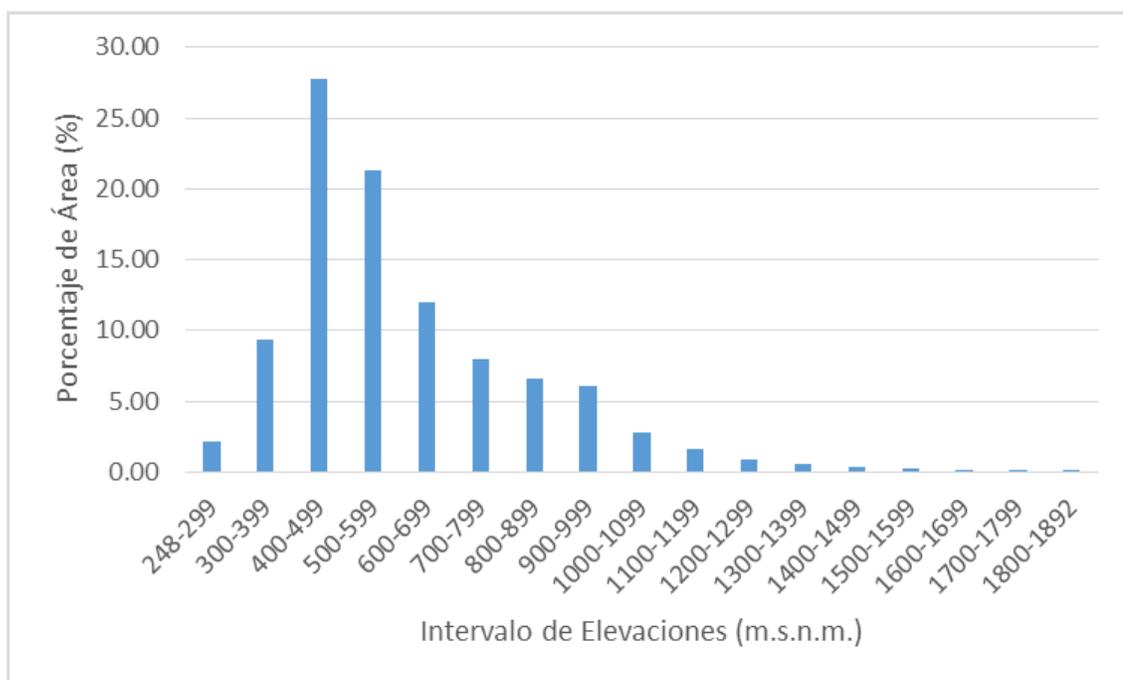
Fuente: Elaboración propia con base en (Monsalve Sáenz, 1999).

Haciendo uso de los datos proporcionados por la Tabla 2.4, se procede a evaluar la Ecuación 2.6:

$$E_m = \frac{502592.93}{818.43} = 614.10 \text{ m. s. n. m}$$

Obteniendo de esta forma una elevación media de 614.10 m.s.n.m para la cuenca del río Sucio.

En la Figura 2.10 se determina la distribución de elevaciones que posee la cuenca del río Sucio y en la gráfica 2.6 se puede observar que el mayor porcentaje de área de la cuenca posee una elevación entre los 400 y 499 m.s.n.m.



Gráfica 2.6 Gráfica de distribución de porcentaje de área de la cuenca.

Fuente: Elaboración propia.

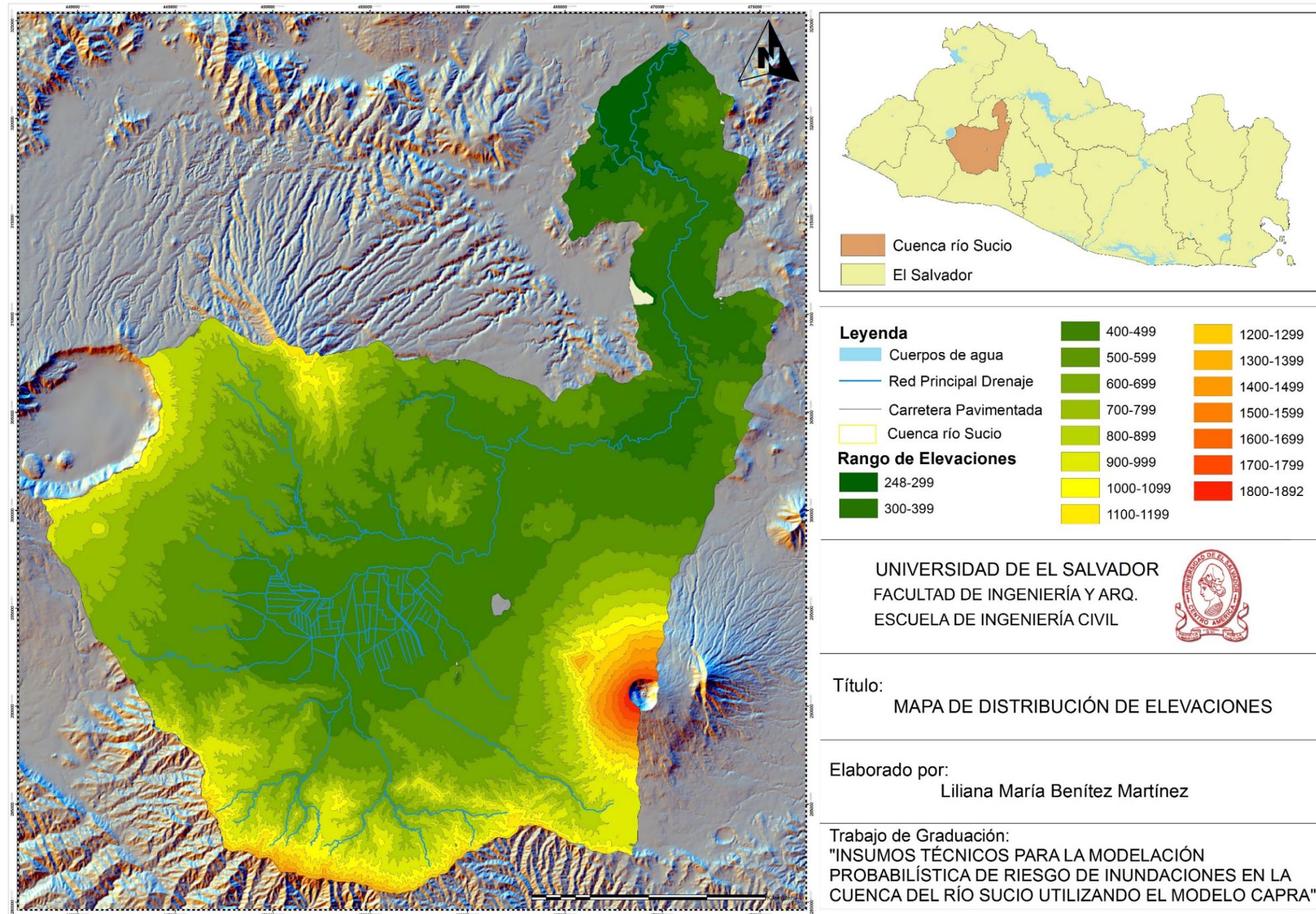


Figura 2.10 Mapa de distribución de elevaciones de la cuenca del río Sucio.

Fuente: Elaboración propia.

2.3.5.2 PENDIENTES

PENDIENTE DE LA CUENCA

La pendiente de una cuenca posee gran importancia, pues guarda relación con el movimiento del agua en la superficie, la capacidad de infiltración del suelo y su contribución a la corriente principal del cauce; influyendo en el tiempo de concentración de las aguas en un determinado punto del mismo.

Para calcular la pendiente de la cuenca existen diversos métodos; entre los cuales se encuentra el Criterio de J.W. Alvord, citado por (Reyes Carrasco, 1992), quien propuso obtener la pendiente de la cuenca mediante la obtención previa de las pendientes existentes entre las curvas de nivel, llegando a definir la siguiente ecuación:

$$S_c = \frac{D \times L_{curvas}}{A} \times 100$$

Ecuación 2.7

Donde:

S_c = Pendiente de la cuenca (%)

D = Desnivel constante entre curvas de nivel (km)

L_{curvas} = Longitud total de las curvas de nivel dentro de la cuenca (km)

A = Área de la cuenca (km²)

Los terrenos de las cuencas son clasificados según su pendiente, en la Tabla 2.5 se muestra la clasificación de los terrenos realizada por (Pérez, 1979) para diferentes rangos de pendiente.

Tabla 2.5 Característica del relieve de una cuenca de acuerdo a su pendiente.

Rango de Pendiente (%)	Clasificación del Terreno
0 - 2	Llano
2 - 5	Suave
5 - 10	Accidentado medio
10 - 15	Accidentado
15 - 25	Fuertemente accidentado
25- 50	Escarpado
> 50	Muy escarpado

Fuente: (Pérez, 1979).

Evaluando la Ecuación 2.7 para el cálculo de la pendiente de la cuenca del río Sucio, con valores de 0.1 km, 19,537.01 km y 818.43 km²; para el desnivel de curvas, la longitud total de las curvas de nivel dentro de la cuenca y el área de la misma respectivamente, se obtiene el resultado siguiente:

$$S_c = \frac{0.1 \times 19537.01}{818.43} = 23.87\%$$

Sin embargo, realizando el análisis de pendiente mediante el uso de un Sistema de Información Geográfico (GIS, por sus siglas en inglés), el cual está basado en el método de cuadrículas asociadas a un vector (Monsalve Sáenz, 1999) se obtienen los datos presentados en la Tabla 2.6, los cuales posteriormente se introducen en la Ecuación 2.8, para obtener de esta forma la pendiente media de la cuenca.

$$S_c = \frac{\sum_{i=1}^k \text{Pendiente promedio} \times \text{Número de ocurrencias}}{\sum_{i=1}^k \text{Número de ocurrencias}}$$

Ecuación 2.8

Donde:

K= Número de intervalos de clase de la pendiente

Tabla 2.6 Cálculo de pendiente media de la cuenca del río Sucio mediante el uso de un GIS.

(1) Intervalo de Pendiente (%)	(2) Pendiente media del intervalo	(3) Área Km ²	(4) Número de Ocurrencias	(5) Columna (2) x Columna (4)
0 - 2	1	220.16	880643	880643
2 - 5	3.5	69.61	278425	974487.5
5 - 10	7.5	90.84	363363	2725222.5
10 - 15	12.5	69.05	276195	3452437.5
15 - 25	20	111.58	446309	8926180
25 - 50	37.5	145.37	581461	21804787.5
>50	70	111.83	447318	31312260
	Σ	818.43	3273714	70076018

Fuente: elaboración propia con base en (Monsalve Sáenz, 1999)

Evaluando la Ecuación 2.8 con los resultados obtenidos en la Tabla 2.6, queda:

$$S_c = \frac{70076018}{3273714} = 21.41\%$$

Para una pendiente del 21.41 %, según la clasificación propuesta por (Pérez, 1979), el relieve de la cuenca del río Sucio puede ser clasificado como fuertemente accidentado; lo cual afecta el régimen de escurrimiento ya que aumenta la velocidad de la escorrentía y disminuye el tiempo que lleva el agua de la lluvia para concentrarse en los lechos fluviales que constituyen la red de drenaje (Monsalve Sáenz, 1999).

PENDIENTE DE LA CORRIENTE PRINCIPAL

La pendiente del cauce principal es un indicador fundamental en lo que respecta al grado de respuesta de la cuenca ante una tormenta.

Debido a que la pendiente del cauce principal varía a lo largo del mismo, se da la necesidad de definir una pendiente media. Entre los métodos para calcular la

pendiente media del cauce Aparicio Mijares menciona tres, de los cuales dos serán abordados en la presente investigación: El método de la pendiente media ponderada y el método del área compensada.

Método de la pendiente media ponderada: Definida como el desnivel entre los extremos de la corriente, dividido entre su longitud medida en planta (véase Figura 2.11). La pendiente estará dada por la siguiente ecuación:

$$S = \frac{H}{L} \times 100$$

Ecuación 2.9

Donde:

S= Pendiente media ponderada del cauce principal (%)

H= Diferencia total de elevación del cauce del río ($H_{\text{máx}} - H_{\text{mín}}$, m)

L= Longitud de la corriente (m)

La pendiente será más real en cuanto el tramo del cauce principal sea lo más uniforme (Reyes Carrasco, 1992).

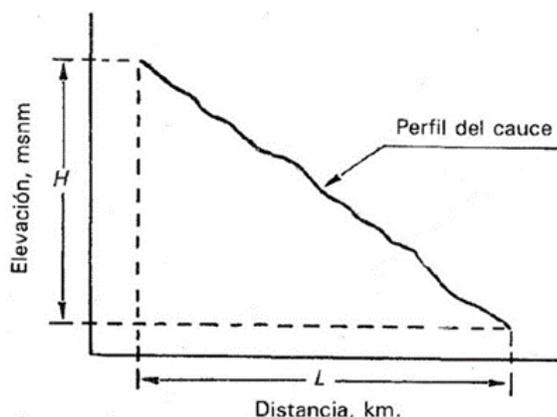


Figura 2.11 *Pendiente del cauce principal.*

Fuente: (Aparicio Mijares, 1992).

Método del área compensada: Es una línea recta que, apoyándose en el extremo de aguas debajo de la corriente, hace que se tengan áreas iguales entre el perfil del cauce y arriba y debajo de dicha línea (véase Figura 2.12).

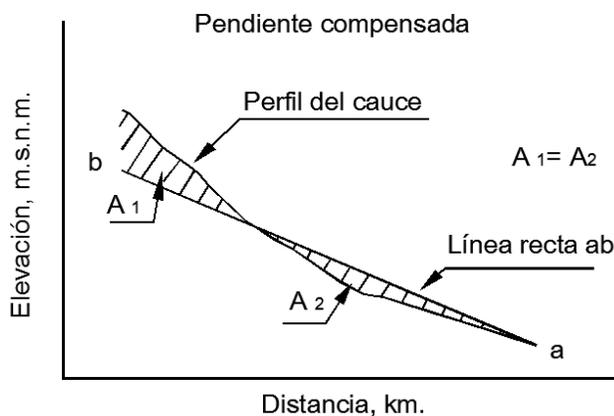


Figura 2.12 Esquema gráfico del método de pendiente compensada.

Fuente: (Aparicio Mijares, 1992)

El cauce principal de la cuenca en estudio, el río Sucio, posee una elevación máxima de 460 m.s.n.m, llegando a una elevación mínima en su desembocadura de 248 m.s.n.m., luego de un recorrido de 62 km (véase Figura 2.13). Utilizando la Ecuación 2.9, se obtiene una pendiente de 0.34 %, resultado similar al obtenido mediante el uso del Método del Área Compensada; sin embargo, mediante el uso de un sistema de información geográfica se obtiene una pendiente media de 2.05%, indicando que el río Sucio posee un desnivel aproximado de 21 m/km. De los resultados obtenidos, se puede caracterizar al cauce principal de la cuenca como ligeramente inclinado, con una baja velocidad de flujo, resultando hidrogramas con menores picos; sin embargo, debido a que las pendientes de sus afluentes son mayores, generan una gran cantidad de caudal y transporte de sedimentos, depositándolos en el cauce principal originando inundaciones.

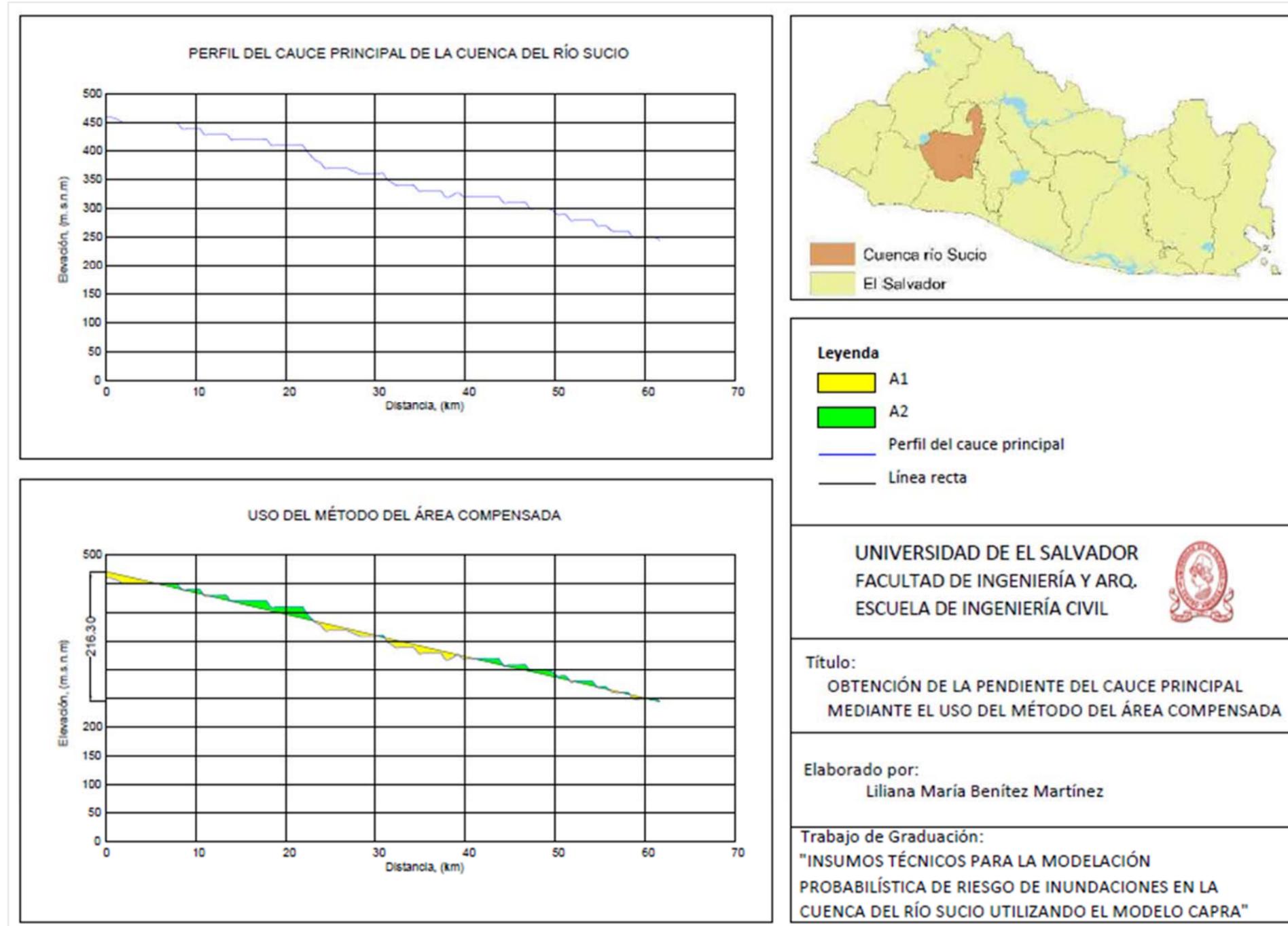


Figura 2.13 Perfil del cauce principal de la cuenca del río Sucio.

Fuente: Elaboración propia.

2.3.5.3 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

El tiempo de concentración está definido como el tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento del gasto de equilibrio, y equivale al tiempo que tarda el agua en pasar del punto más alejado hasta la salida de la cuenca (Aparicio Mijares, 1992); siendo un parámetro característico de cada cuenca, ya que depende tanto de su tamaño, forma y topografía (Ibañez Asensio, Moreno Ramón, & Gisbert Blanquer, Métodos para la determinación del tiempo de concentración(t_c) de una cuenca hidrográfica, 2011).

El cálculo del tiempo de concentración se puede realizar utilizando las siguientes ecuaciones:

FÓRMULA DE KIRPICH

Desarrollada a partir de la información del Servicio de conservación de Suelos (SCS) de EE.UU. obtenida en siete cuencas rurales en Tennessee con canales bien definidos y pendientes entre 3% y 10% (Carías Juárez, Chacón Novoa, & Martínez Márquez, 2004).

$$t_c = 0.01947 L^{0.77} S^{-0.385}$$

Ecuación 2.10

Donde:

t_c = Tiempo de concentración (min)

L= Longitud del cauce principal (m)

S= Pendiente media del cauce principal (m/m)

DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS

$$t_c = 0.3 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76}$$

Ecuación 2.11

Donde:

t_c = Tiempo de concentración (horas)

L= Longitud del cauce principal (km)

S= Pendiente media del cauce principal (m/m)

Según el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje del Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Gobierno de Perú; el tiempo de concentración real depende de muchos factores, entre otros de la geometría en planta de la cuenca (una cuenca alargada tendrá mayor tiempo de concentración) y de su pendiente, pues una mayor pendiente producirá flujos más veloces resultando un menor tiempo de concentración.

Haciendo uso de los datos del cauce principal de la cuenca del río Sucio, longitud y pendiente, y de la Ecuación 2.10; se obtiene el siguiente valor para el tiempo de concentración:

Longitud del cauce más largo= 90,926.69 m (90.92 km)

Pendiente del cauce principal= 20.49/1000= 0.02049 m/m

$$t_c = 0.01947 (90926.69)^{0.77} (0.02049)^{-0.385} = 426.21 \text{ min} \cong 7 \text{ horas } 6 \text{ min}$$

2.3.6 PARÁMETROS DE DRENAJE

El drenaje de una cuenca se refiere a la forma de cómo es evacuada el agua caída dentro de los límites de la misma.

La rapidez con la cual la cuenca evacua el agua caída sobre ella, dependerá de ciertos factores, entre los cuales se encuentra la red de drenaje; llamada así por ser un sistema de cauces por los cuales fluyen los escurrimientos de manera temporal o permanente.

Las corrientes que conforman la red de drenaje pueden clasificarse de varias maneras:

Por el tiempo en que transportan agua una corriente puede clasificarse como efímera, intermitente o permanente. Una corriente efímera solamente transporta agua cuando llueve e inmediatamente después. La corriente intermitente lleva agua la mayor parte del año, sobre todo en época de lluvia; pero su aporte cesa en el momento en el que el nivel freático se ubica debajo del fondo del cauce. La corriente permanente transporta agua todo el año, debido a que su nivel freático se encuentra siempre por encima del fondo del cauce (Reyes Carrasco, 1992).

Las características de una red de drenaje pueden describirse mediante diferentes indicadores del grado de bifurcación, dentro de los cuales se pueden mencionar:

El orden de las corrientes y la densidad de drenaje de la cuenca.

ORDEN DE LAS CORRIENTES DE UNA CUENCA

Según (Reyes Carrasco, 1992) “una corriente puede ser tributaria de otra mayor y así sucesivamente, de manera que por esta razón se les puede asignar un orden de importancia dentro de la cuenca”.

Para establecer la jerarquización de una cuenca existen diferentes sistemas, siendo los más utilizados los siguientes:

Sistema Horton: El presente sistema tal como se muestra en la Figura 2.14, se basa en la asignación del primer orden a cauces que no poseen tributarios, el segundo orden es asignado a cauces que poseen afluentes de primer orden; y los cauces de tercer orden reciben influencia de cauces de segundo orden así como también pueden llegar a recibir directamente cauces de primer orden. Lo anterior indica que un cauce de orden n puede ser influenciado por tributarios de orden 1 hasta $n-1$ (Yugar Morales & Cahuana Andia, 2009).

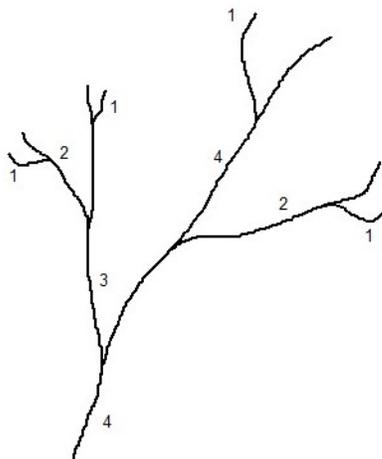


Figura 2.14 Jerarquización de red de drenaje mediante el uso del Sistema Horton.

Fuente: Elaboración propia.

Sistema de Strahler: Strahler minimizó la subjetividad respecto a la designación en los nacientes; por tanto asigno un primer orden a los ríos que carecen de afluentes, un segundo orden a los resultantes de la unión de dos de primer orden; un tercer orden a los ríos resultantes de la unión de dos de segundo orden, y así sucesivamente (véase Figura 2.15).

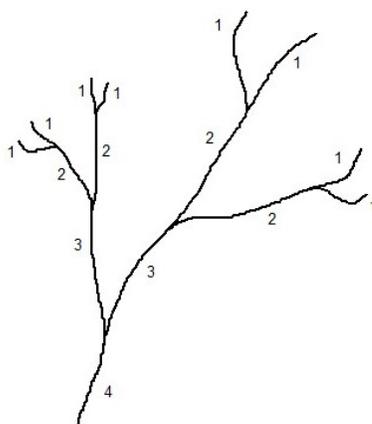


Figura 2.15 Jerarquización de red de drenaje mediante el uso del Sistema Strahler.

Fuente: Elaboración propia.

Según Aparicio Mijares un orden de corrientes alto refleja una cuenca que responde rápidamente ante una tormenta. Un orden de corrientes bajo es característico de suelos resistentes a la erosión, o muy permeables.

La cuenca del río Sucio es drenada por los ríos Flor amarilla, Colón, Ateos, Chutia, Agua Caliente, El Ojushtal, El Obraje, Las Lágrimas, La Joya, Palio y Tacachico. La red de drenaje de la cuenca del río Sucio, según la clasificación de Strahler, posee un orden de corriente 8 (véase Figura 2.16).

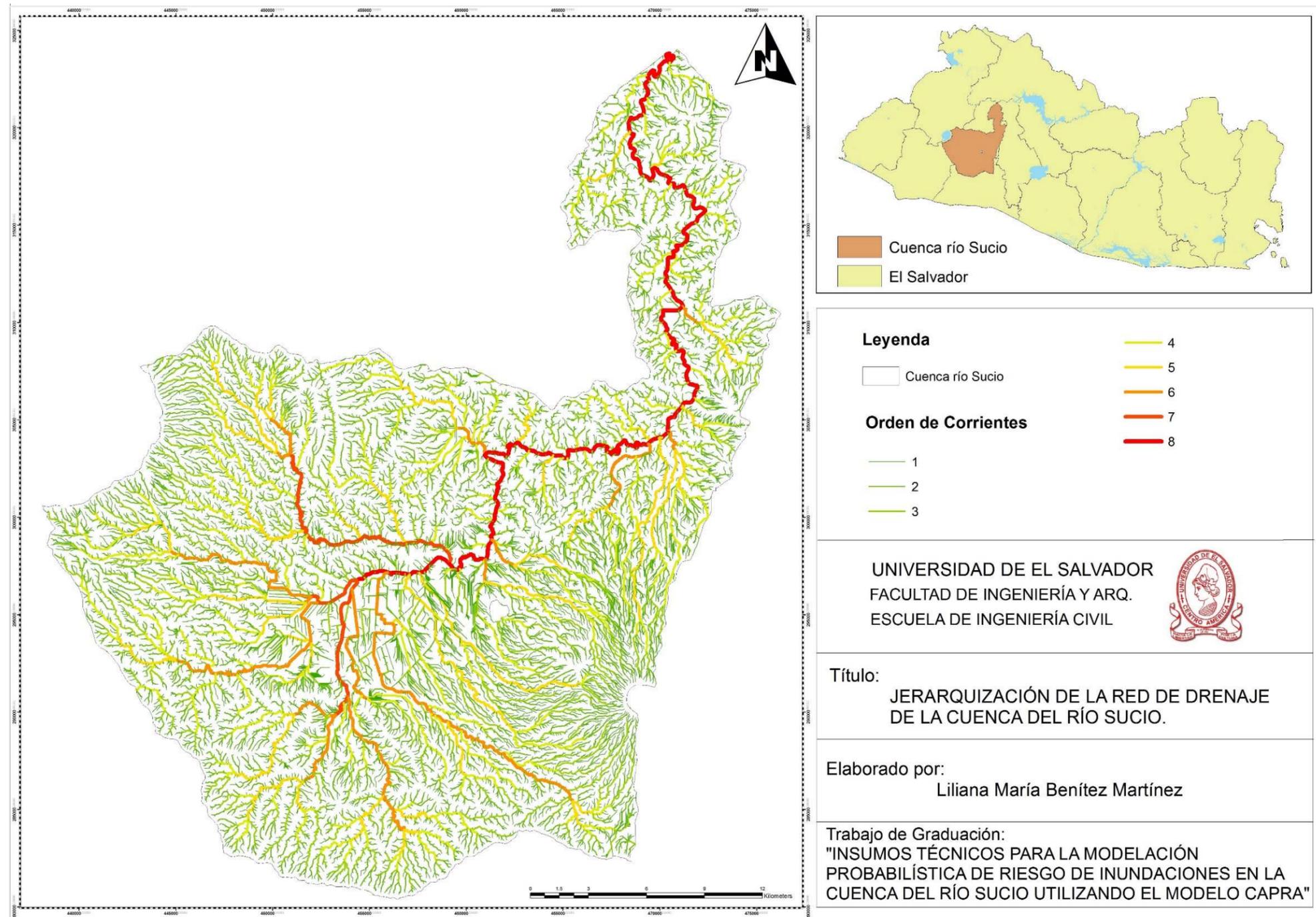


Figura 2.16 Jerarquización de la red de drenaje de la cuenca del río Sucio.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 2.7 se observa la longitud total que abarca cada clasificación comprendida dentro de la cuenca.

Tabla 2.7 Caracterización de la red de drenaje de la cuenca del río Sucio.

Orden de Corriente	Nº de Corrientes	Longitud Total
1	18333	2603.65
2	8035	1183.12
3	4674	692.83
4	2568	368.62
5	1208	164.24
6	627	86.27
7	208	26.88
8	524	62.01
Σ	36177	5187.63

Fuente: Elaboración propia.

DENSIDAD DE DRENAJE

La densidad de drenaje es definida como la longitud de corrientes por unidad de área. Se obtiene mediante el uso de la Ecuación 2.12.

$$D_d = \frac{L}{A}$$

Ecuación 2.12

Donde:

D_d = Densidad de drenaje por kilómetro

L= Longitud total de las corrientes permanentes e intermitentes de la cuenca (km)

A= Área de la cuenca (km²)

En general una densidad de drenaje alta refleja una mayor estructuración de la red fluvial, que responde rápidamente a una tormenta. Según (Monsalve Sáenz, 1999), la densidad de drenaje puede tomar valores entre 0.5 km/km² para

cuencas con drenaje pobre hasta 3.5 km/km² para cuencas excepcionalmente bien drenadas. En la Tabla 2.8 se presenta una clasificación para los diferentes valores de densidad de drenaje.

Tabla 2.8 Valores interpretativos de la densidad de drenaje.

Densidad de Drenaje (km/km ²)	Categoría
< 1	Baja
1 – 2	Moderada
2 – 3	Alta
>3	Muy alta

Fuente: (Delgadillo & Paez, 2008).

Evaluando la ecuación 2.12 con valores de 5,187.63 para la longitud total de corrientes y un área de 818.43 km², se obtiene el siguiente valor de densidad de drenaje para la cuenca del río Sucio:

$$D_d = \frac{5187.63}{818.43} = 6.34 \text{ km/km}^2$$

Dado los valores de densidad de drenaje y orden de corrientes, se concluye con base en (Aparicio Mijares, 1992), que la cuenca del río Sucio posee una alta estructuración de red fluvial, definida por un alto orden de corrientes, el cual refleja que es una cuenca que responde rápidamente ante una tormenta; además, el suelo de la cuenca puede estar propenso a erosionar al poseer escasa cobertura vegetal.

Tabla 2.9 Resumen de las características de la cuenca del río Sucio.

Parámetro	Unidad	Valor	Análisis de Resultados
Parámetros Geométricos			
Área	km ²	818.43	La cuenca es considerada Intermedia Grande, lo cual influye directamente en la cantidad de agua de escorrentía que la misma pueda generar. Por su tipo de desembocadura es clasificada como una cuenca exorreica.
Perímetro	km	173.08	
Longitud del Cauce Principal	km	62.01	
Longitud Axial	km	47.43	
Ancho Promedio	km	17.26	
Parámetros de Forma			
Coefficiente de Compacidad de Gravelius	Adimensional	1.71	La cuenca es clasificada con una forma Ovalo Oblonga-Rectangular Oblonga, lo cual intensifica el vigor de las avenidas en las desembocaduras y la onda de crecida que puede manifestarse fuertemente antes del cauce principal.
Factor de Forma	Adimensional	0.36	
Parámetros de Relieve			
Elevación Máxima de la cuenca	m.s.n.m.	1892.00	La cuenca es clasificada en una fase de Madurez-Equilibrio, lo que indica que predomina el transporte de sedimentos y agua, y debido a que posee un relieve fuertemente accidentado, afecta el régimen de escurrimiento al aumentar su velocidad, por tanto, disminuye la infiltración en el suelo y su tiempo de concentración.
Elevación Mínima de la cuenca	m.s.n.m.	248.00	
Elevación Media de la cuenca (M. Red de Puntos)	m.s.n.m.	608.45	
Elevación Media de la cuenca (M. Curva Hipsom.)	m.s.n.m.	614.10	
Relación de Elongación	Adimensional	0.68	
Pendiente de la cuenca	%	21.41	
Pendiente de la corriente ppal.	m/km	20.49	
Tiempo de Concentración	horas	7.00	
Parámetros de Drenaje			
Orden de Corrientes (Sistema Strahler)	Adimensional	8.00	La cuenca posee una alta estructuración de red fluvial, el cual refleja una respuesta rápida ante una tormenta y un suelo propenso a erosionar.
Densidad de Drenaje	km/km ²	6.34	

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos.

2.4 VEGETACIÓN

Según (Lauer), el cambio de estaciones y la cantidad de lluvia caracterizan el aspecto general de la vegetación, siendo esta modificada por la orografía, el suelo y el régimen del agua de fondo.

Con base a la observación directa de la vegetación natural existente en El Salvador, (Lauer) clasificó las formaciones vegetales a partir de su localización en elevación respecto al nivel del mar:

TIERRA CALIENTE Y CÁLIDA

Zona caracterizada por una temperatura media anual dentro de los 26° y 22° C; es localizada hasta los 800 o 1000 m.s.n.m. En ella se encuentran los siguientes tipos de vegetación:

- Vegetación de playa: Dependiente del carácter fisiográfico de la costa se pueden distinguir dos tipos de formaciones: Vegetación de playa y de los esteros.
- Bosques salados (manglares)
- Boques húmedos de los terrenos bajos: Localizados en la planicies de la costa y en los valles de los ríos.

- Sabanas semihúmedas y bosques perennifolios de los ríos: Pueden ser denominados sabanas semihúmedas los paisajes ligeramente ondulados, más planos y suavemente ascendentes. Los ríos que atraviesan las sabanas semihúmedas están bordeados de bosques siempre verdes; bien llamados “bosques perennifolios”.
- Bosques semihúmedos caducifolios: El bosque ocupa la mayor parte de la superficie de El Salvador. Bota el follaje, llamado por ello “caducifolio”, y se encuentra en laderas, colinas y montañas hasta 800 ó 1000 m hacia arriba.
- Sabanas secas (morrales) y montes secos (chaparrales): Son una variación seca bajo condiciones especiales del terreno, pueden encontrarse dentro de la sabana y bosque semihúmedo; también sobre suelos de barro sólido formados en antiguos lagos y sobre terrazas de ríos.

TIERRA TEMPLADA

Ubicada arriba de los 800 ó 1000 metros de altura, donde hay una temperatura media anual de 21 hasta 17° C. Dentro de la presente clasificación, se observan los bosques serranos mesofíticos (encinares y pinares).

TIERRA FRÍA

Su localización es en zonas con temperaturas medias anuales de menos de 17° C, en alturas arriba de 1800 (2000) metros. En dicha región se encuentran los

bosques nebulosos y sabanas altas, motivados por la influencia de neblinas y nubes.

Con base en el estudio realizado por Wilhelm Lauer, en la Tabla 2.10 se observa el área correspondiente para cada clasificación de Terreno según la elevación de la cuenca del río Sucio; además, en la Figura 2.17 se observa el tipo de vegetación existente en la zona en estudio.

Tabla 2.10 *Clasificación del terreno de la cuenca del río Sucio con base a su elevación.*

Rango de Elevación	Clasificación del Terreno	Área (km ²)
245 - 800	Tierra Caliente y Cálida	659.24
800 - 1000	Tierra Caliente y Cálida - Tierra Templada	103.17
1000 - 1800	Tierra Templada	55.54
1800 - 1892	Tierra Fría	0.47
Σ		818.43

Fuente: Elaboración propia.

2.5 GEOLOGÍA

Según el Estudio Hidrológico de la Cuenca del Río Sucio realizado por Geólogos del Mundo en Marzo de 2015, El Salvador desde un punto de vista geológico es un país joven debido a que en él afloran materiales formados hace unos 200 millones de años; sin embargo, en el área de estudio se encuentran materiales con edad de tan solo dos millones de años.

Los materiales presentes en la zona corresponden a rocas cuaternarias de los períodos Pleistoceno a Holoceno, los cuales tienen su origen en los centros de actividad volcánica constituidos por el Volcán de San Salvador, la Cordillera del

Bálsamo y la Caldera de Coatepeque; por tanto conciernen a procesos vinculados a la cadena costera, a la depresión central y a la cadena volcánica reciente, descritos con anterioridad.

De acuerdo al Mapa Geológico de El Salvador (1972) dentro de la cuenca en estudio se localizan tres formaciones geológicas (véase Figura 2.18) descritas a continuación:

- Formación Bálsamo: Comprendida en el terciario superior; siendo la formación más antigua dentro de la zona de estudio. Está compuesta por tres miembros definidos como:
 - b1: Epiclástitas volcánicas y piroclástitas, localmente efusivas básicas-intermedias intercaladas.
 - b2: Efusivas básicas-intermedias, piroclástitas, epiclástitas volcánicas subordinadas.
 - b3: Efusivas básicas intermedias.
- Formación Cuscatlán: Constituido en el Plioceno-Pleistoceno. Definida como una secuencia volcano-sedimentaria dentro de la cual se distinguen tres miembros, de los cuales dos se encuentran presentes en la zona de estudio:
 - c1: Piroclástitas acidas, epiclástitas volcánicas.
 - c3: Efusivas básicas-intermedias.
- Formación San Salvador: Comprendida en el Pleistoceno-Holoceno, prácticamente tiene representación en la mayor parte de la superficie de

la cuenca. Los materiales predominantes son producto del proceso eruptivo del complejo volcánico de San Salvador, de la Caldera de Coatepeque, durante el pleistoceno y del vulcanismo de Ilopango. Dentro de la cuenca se pueden diferenciar ocho miembros correspondientes a la formación San Salvador:

s1: Piroclástitas acidas, epiclastitas volcánicas, localmente efusivas básicas-intermedias.

s2: Efusivas básicas-intermedias, piroclástitas subordinadas.

s3a: Piroclástitas acidas, epiclastitas volcánicas (“tobas color café”).

s4: “Tierra blanca”. Piroclástitas acidas y epiclastitas volcánicas subordinadas.

s5a: Efusivas básicas-intermedias.

s5b: Conos de acumulación (escorias, tobas de lapilli, cinder).

s5c: Cenizas volcánicas y tobas de lapilli.

Qf: Depósitos sedimentarios del cuaternario.

2.6 TIPO Y USO DE SUELO

2.6.1 TIPO DE SUELO

Según la Taxonomía de Suelos (Soil Taxonomy) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés), el cual clasifica los suelos considerando su granulometría con base al contenido de arena, arcilla y limo

(Santamarina & Narsilio); se distinguen 12 órdenes que representan los taxones más generales agrupados según una (máximo dos) característica común (Comisión Europea et al., 2013); de las cuales dentro del área en estudio, según información proporcionada por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (véase Figura 2.19); encontramos las siguientes:

- Alfisoles: Suelos con un horizonte de iluviación de arcilla con alta saturación de bases.
- Andisoles: Suelos derivados de cenizas volcánicas.
- Entisoles: Suelos minerales de formación reciente que tienen poca o ninguna evidencia de desarrollo.
- Inceptisoles: Suelos en fase inicial de desarrollo.
- Molisoles: Suelos con una capa superficial rica en humus.
- Vertisoles: Suelos arcillosos que se expanden con la humedad y se contraen cuando están secos.

Las órdenes antes descritas son distinguidas según los regímenes de humedad a excepción de los entisoles, los cuales han sido determinados con base a otros criterios.

2.6.2 USO DE SUELO

El uso del suelo es un factor de gran importancia debido a que las intervenciones humanas combinadas con la topografía, juegan un papel determinante en el deterioro de una cuenca; por tanto, de ello puede depender el proceso erosivo

que pueda generarse en la misma. La distribución del uso de suelo de la cuenca en estudio que a continuación se presenta (véase Figura 2.20), ha sido facilitada por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

En el área en estudio se observa una cobertura predominante de cultivos permanentes, seguido de cultivos anuales y mixtos y en menor proporción bosques, vegetación arbustiva y pastos.

Se observan también zonas industriales al igual que áreas urbanas de las cuales se puede mencionar que las mismas están en crecimiento; como una actividad adicional en la cuenca se encuentra actividad minera.

En la Tabla 2.11 se muestra la distribución del uso de suelo en la cuenca del río Sucio; la cual fue realizada con base al mapa de uso de suelo elaborado por la Universidad de El Salvador y la Fundación Salvadoreña para la Investigación del Café (PROCAFÉ) en el año 2010.

Tabla 2.11 Usos del suelo en la cuenca del río Sucio.

USO DE SUELO	ÁREA EN km ²	% DE ÁREA
Café	242.48	29.0
Granos básicos	151.50	18.1
Mosaico de cultivos y pastos	101.29	12.1
Caña de azúcar	93.86	11.2
Tejido urbano	82.13	9.8
Sistemas agroforestales	57.16	6.8
Usos y coberturas diversas	32.97	3.9
Vegetación herbácea natural	26.50	3.2
Bosques	26.41	3.2
Pastos naturales	20.40	2.4
Pastos cultivados	0.76	0.1

Fuente: (Fernández Novales, 2015).

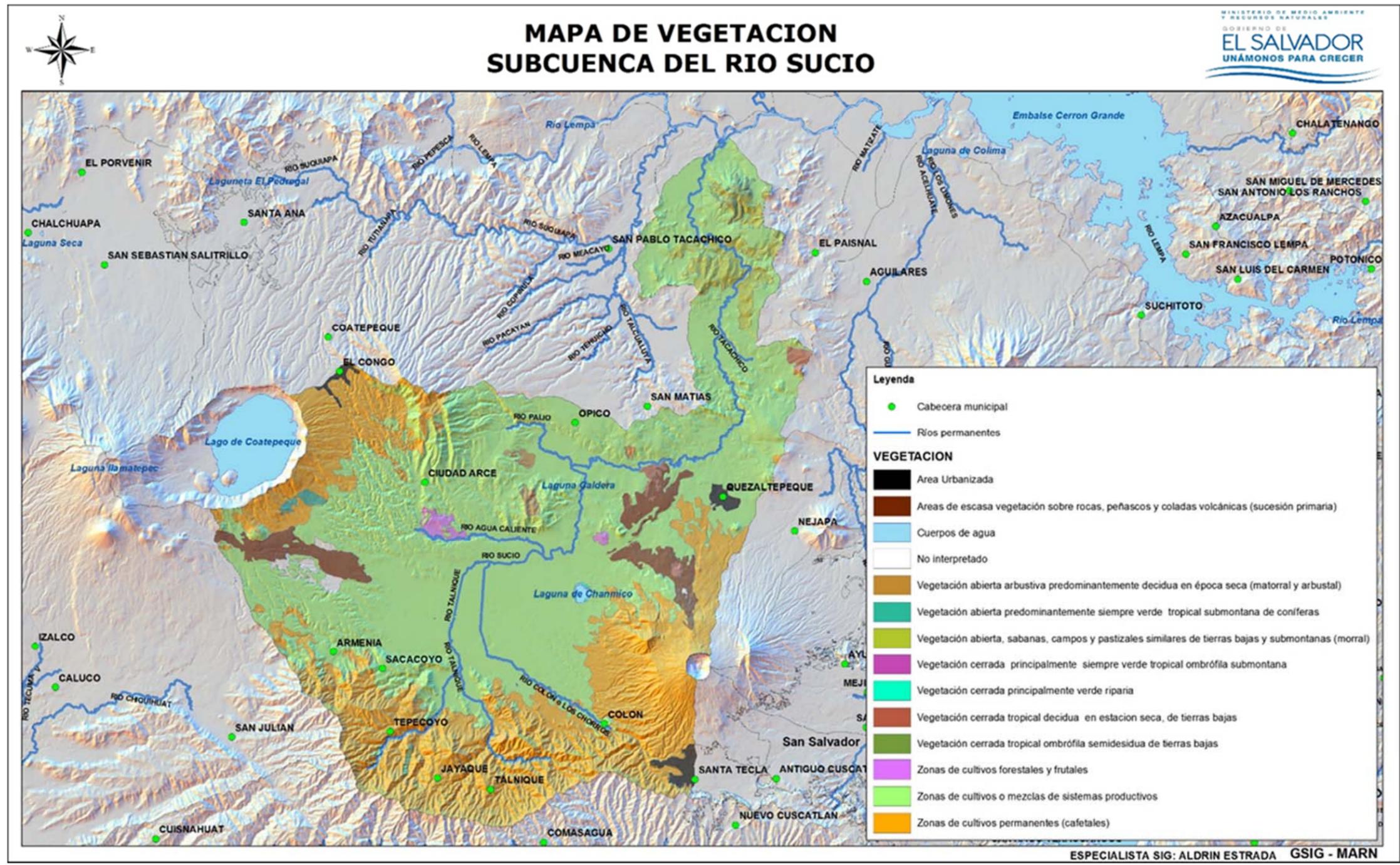


Figura 2.17 Mapa de vegetación de la cuenca del río Sucio.
Fuente: MARN.

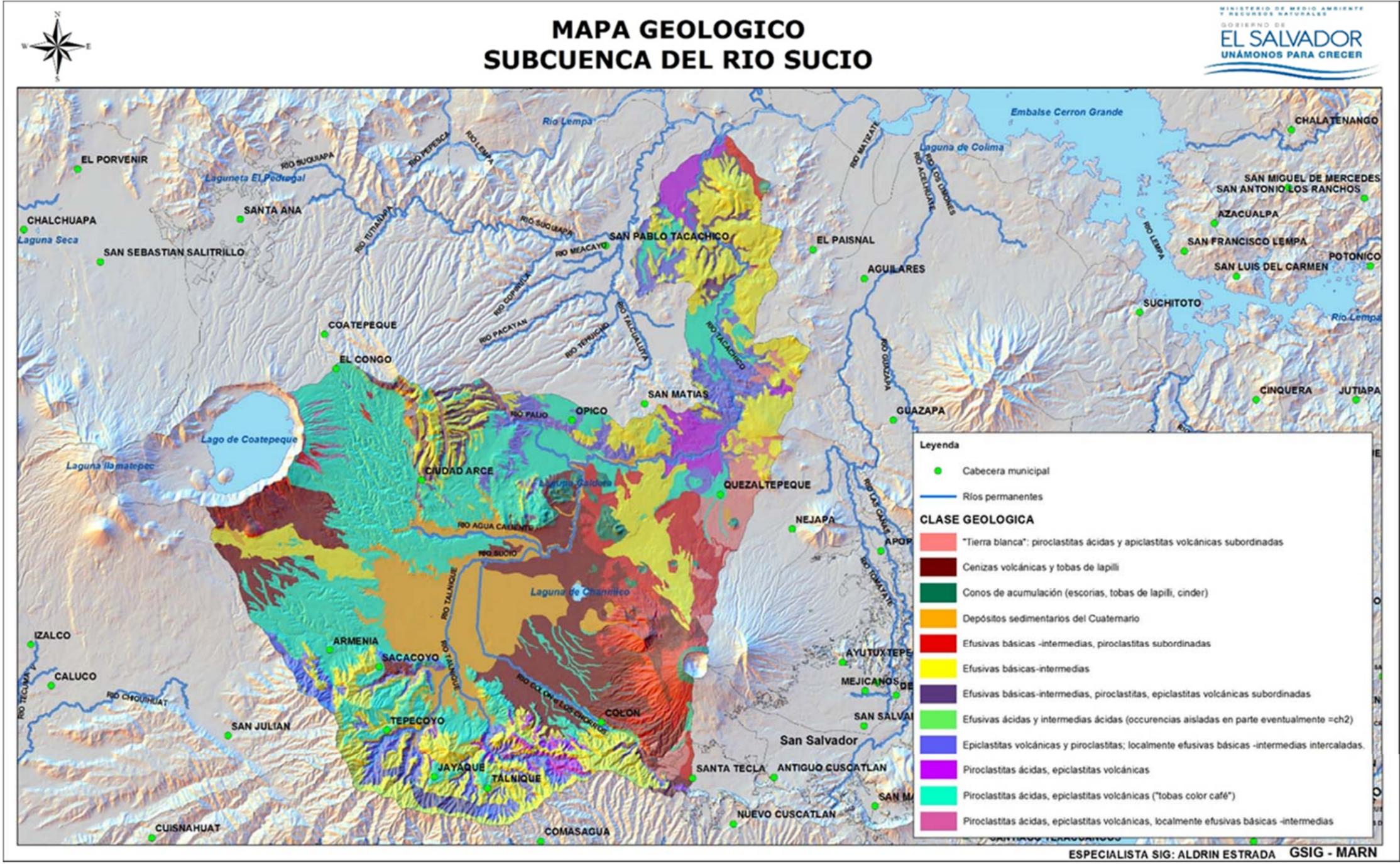


Figura 2.18 Mapa geológico de la cuenca del río Sucio.
Fuente: MARN.

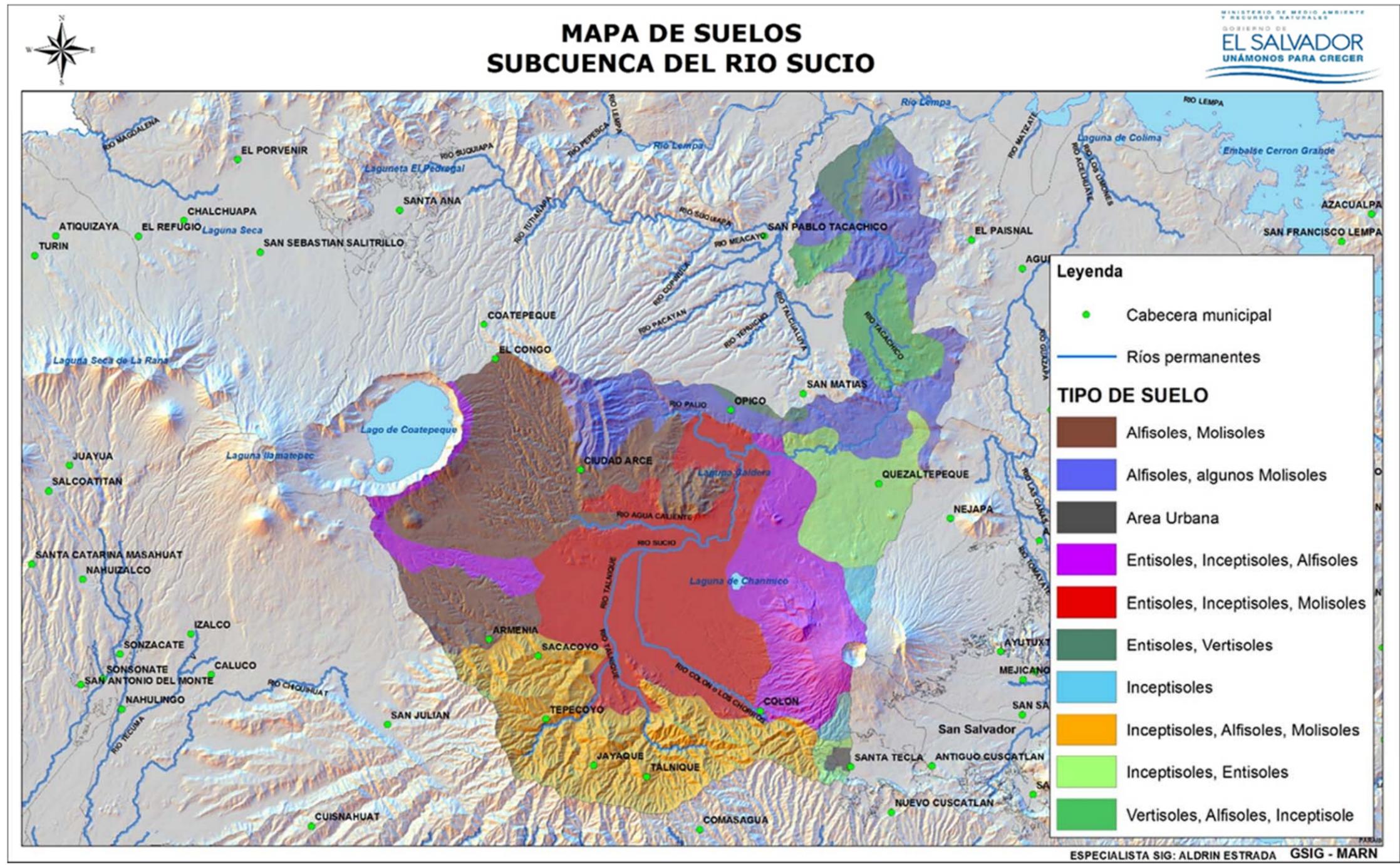


Figura 2.19 Mapa de suelos de la cuenca del río Sucio.
Fuente: MARN.

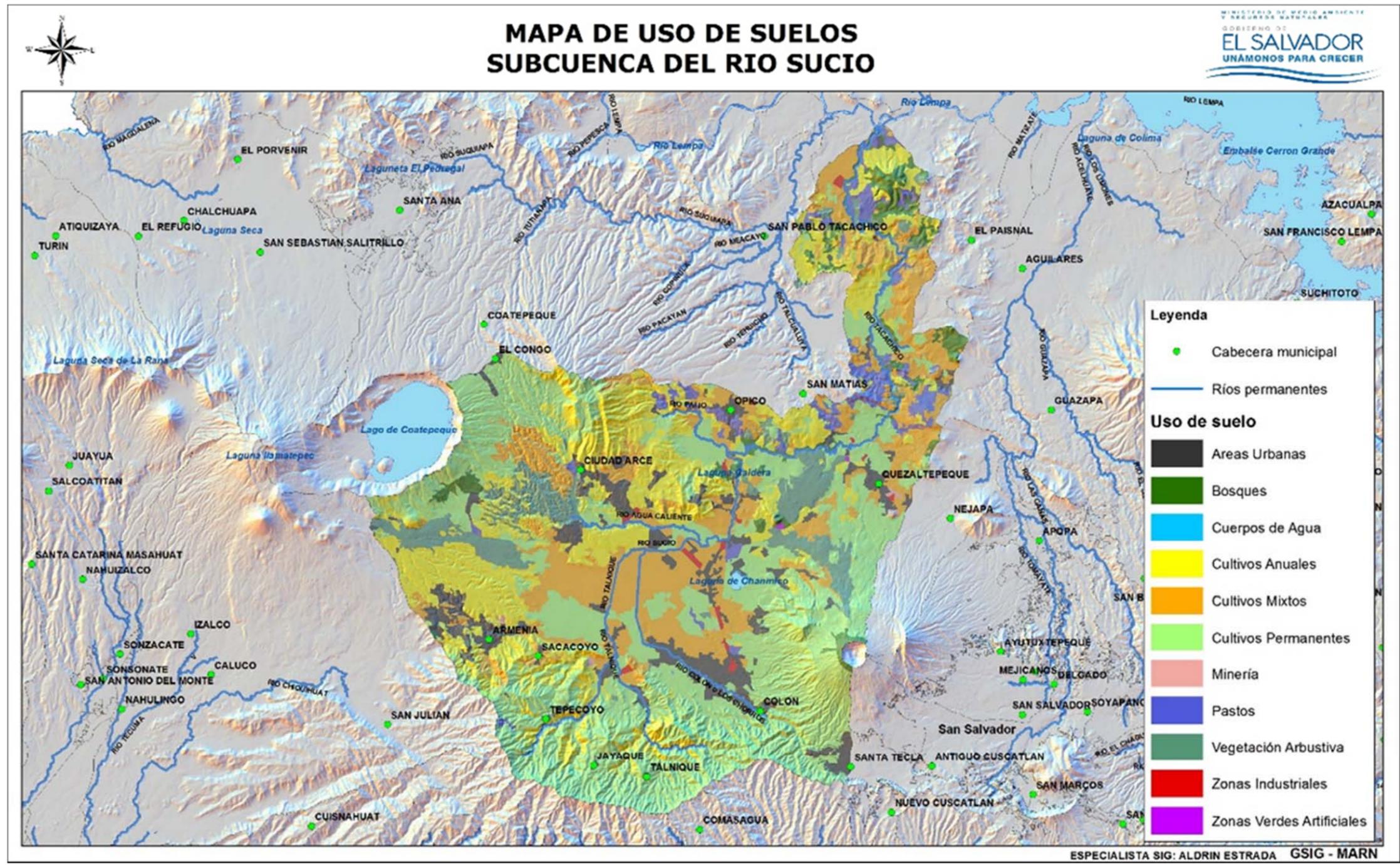


Figura 2.20 Mapa de uso de suelos de la cuenca del río Sucio.

Fuente: MARN.

2.7 POBLACIÓN Y VIVIENDA

La información referente a población y vivienda de los municipios ubicados dentro de la cuenca del río Sucio ayudan a determinar la cantidad de habitantes e infraestructura que podrían estar expuestos ante una amenaza.

2.7.1 POBLACIÓN

De acuerdo al último censo registrado por la DIGESTYC en el año 2007, la población contenida en los municipios que se encuentran dentro de la cuenca hidrográfica del río Sucio asciende a 690,614 personas, de las cuales el 68.69% habita en el área urbana y el 31.31% en el área rural; en los datos anteriores se incluye información referente a las áreas que se encuentran fuera de la cuenca. En la Tabla 2.12 se presenta un resumen de la información extraída de la página web de la DIGESTYC:

Tabla 2.12 Población total, masculino y femenino, en los municipios que conforman la cuenca del río Sucio.

MUNICIPIO	POBLACIÓN		
	TOTAL	HOMBRES	MUJERES
SANTA ANA			
Coatepeque	36,768	17,937	18,831
El Congo	24,219	11,488	12,731
SONSONATE			
Armenia	34,912	16,798	18,114
Izalco	70,959	34,420	36,539
LA LIBERTAD			
Ciudad Arce	60,314	29,073	31,241
Colón	96,989	45,781	51,208
Jayaque	11,058	5,409	5,649

MUNICIPIO	POBLACIÓN		
	TOTAL	HOMBRES	MUJERES
Quezaltepeque	52,643	24,915	27,728
Sacacoyo	12,299	5,974	6,325
San Juan Opico	74,280	35,550	38,730
San Matías	7,314	3,569	3,745
San Pablo Tacachico	20,366	9,928	10,438
Santa Tecla	121,908	55,780	66,128
Talnique	8,254	4,068	4,186
Tepecoyo	14,322	6,985	7,337
SAN SALVADOR			
El Paisnal	14,551	7,084	7,467
Nejapa	29,458	14,290	15,168
TOTAL	690,614	329,049	361,565

Fuente: DIGESTYC, VI Censo de población.

2.7.2 VIVIENDA

Según el V Censo de Vivienda, realizado en el año 2007, el número de viviendas dentro de la zona ronda las 179,035; en la Tabla 2.13 se desglosa el total de viviendas por municipio:

Tabla 2.13 Total de viviendas por municipios que conforman la cuenca del río Sucio.

Departamentos y Municipios	N° Viviendas
SANTA ANA	
Coatepeque	9,732
El Congo	6,481
SONSONATE	
Armenia	9,147
Izalco	18,018
LA LIBERTAD	
Ciudad Arce	17,554
Colón	30,307
Jayaque	2,970
Quezaltepeque	3,528
Sacacoyo	3,860
San Juan Opico	15,850
San Matías	2,018

Departamentos y Municipios	N° Viviendas
San Pablo Tacachico	5,424
Santa Tecla	35,982
Talnique	2,171
Tepecoyo	3,675
SAN SALVADOR	
El Paisnal	3,860
Nejapa	8,458
TOTAL	179,035

Fuente: DIGESTYC V Censo de Vivienda.

2.8 INUNDACIONES HISTÓRICAS REGISTRADAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

En la Tabla 2.14 se presenta el registro histórico de inundaciones acontecidas en la cuenca del río Sucio. La información ha sido extraída de la base de datos de DesInventar, la cual ha recopilado información desde el año 1900 a la fecha, así como también del inventario de inundaciones que posee cada una de las alcaldías que conforma la cuenca en estudio.

Tabla 2.14 Inundaciones registradas en la cuenca del río Sucio.

Municipio de Armenia, Departamento de Sonsonate					
Fecha	Cantón	Río	Afectados	Viviendas afectadas	Descripción
01/10/2005	Cantón Tres Ceibas, El Rosario, Los Mangos Cantón La Puerta, Cantón Las Crucitas 1ra zona y Colonia San Damián.		300-400 personas		Tormenta Stan
01/10/2012	Cantón Tres Ceibas, El Rosario, Los Mangos Cantón La Puerta, Cantón Las Crucitas 1ra zona y Colonia San Damián.		300-400 personas		Depresión tropical 12E
Municipio de Ciudad Arce, Departamento de La Libertad					
23/09/1944	Zapotitán	Río Sucio			Desbordamiento del río Sucio provocó la inundación en la Hacienda Zapotitán y Chilamatal provocando. Resultaron varias viviendas destruidas y personas damnificadas.
04/10/1953		Río Sucio			El desbordamiento del río Sucio provocó el daño de varias viviendas.
09/09/1961	San Andrés y Sitio del Niño	Río Sucio			El río Sucio causó inundaciones en San Andrés y Sitio del Niño. Ocasionó la pérdida de varios cultivos.
27/05/1905	Carretera Panamericana, Zapotitán				Huracán Fifi. Caída de árboles y pérdidas del 90% de las cosechas en Zapotitán
20/06/1905	Comunidades Tempisque, Paso Ondo, Arenal, Santa María, San Juan entre otras			32 viviendas dañadas	Huracán Mitch
27/06/1905	San Andrés, Cerro de Plata			50 viviendas inundadas	Huracán Stan. Daños en el puente que une San Andrés I con San Antonio Abad y pérdidas en los cultivos.
03/07/1905	La Joyita 2ª Zona, Nueva Esperanza, Santa Rosa, San Carlos II, San Andrés I, Cerro de Plata, Lomas de Andalucía y Pequeña Inglaterra		8 muertos, 11 lesionados		Depresión Tropical 12E. Destrucción de viviendas e infraestructura vial, varias familias evacuadas.
05/07/1905	San Andrés I			20 viviendas dañadas	
10/06/2013	Zapotitán				Comandos de salvamento informaron que en Zapotitán evacuaron 12 personas en colonia 3 de abril por inundaciones en la zona.
13/06/2013	Colonia Las Lupitas	La Joya			Desbordamiento del río La Joya en colonia Las Lupitas en ciudad Arce.
<p><i>Fuente: DesInventar.org registro histórico de inundaciones del SNET (Ahora DGOA) e inventario de inundaciones de municipios que conforman la cuenca del río Sucio.</i></p>					

Municipio de Colón, Departamento de La Libertad					
Fecha	Cantón	Río	Afectados	Viviendas afectadas	Descripción
01/10/1906	Cantón Entre Ríos	Río Sucio			Fuerte temporal dejó como resultado un puente de mampostería colapsado, personas fallecidas y damnificadas.
12/06/1922					Inundaciones en las zonas rurales, las cuales dejaron como resultado varias viviendas dañadas y personas damnificadas.
20/09/1974					Tras el paso del huracán Fifi se produjo el desbordamiento de algunos ríos.
16/06/2004			10 familias		10 familias resultaron afectadas por la tormenta luego que esta destruyera sus viviendas
Municipio de El Congo, Departamento de Santa Ana					
20/06/2001			345 personas	69 viviendas	Las fuertes lluvias ocasionaron la destrucción de 69 viviendas precarias y 345 personas damnificadas.
Municipio de El Paisnal, Departamento de San Salvador					
20/06/1905	Cantón El Tronador				Huracán Mitch. Pérdidas en cultivos
27/06/1905	Cantón Natividad, comunidad Santiago Torres; Cantón Natividad, caserío Central.		12 familias		Huracán Stan. Pérdida de cultivos y caída de puente afectando 12 familias.
01/07/1905	Cantón El Tronador, zona de cultivos; Cantón Natividad, comunidad Santiago Torres.				Tormenta Ida, Daños en cultivos y caída del puente por segunda vez
02/07/1905	Cantón El Tronador, zona de Cultivos.				Tormenta Agatha, daño de cultivos
16/08/2010	Cantón La Cabaña				Se originaron inundaciones que provocaron la evacuación de 12 familias hacia a un centro escolar, destrucción de varias viviendas y la inhabilitación de una unidad de salud.
Municipio de Izalco, Departamento de Sonsonate					
01/10/1913					Fuerte temporal dejó estragos en el poblado de Izalco; resultaron varias viviendas destruidas y personas fallecidas.
Municipio de Jayaque, Departamento de La Libertad					
09/05/1905					Inundaciones en Jayaque provocaron el daño de viviendas y la pérdida de cultivos.
16/05/1905		Río Shutia			Temporal en octubre
<p><i>Continuación Tabla 2.14 Inundaciones registradas en la cuenca del río Sucio. Fuente: DesInventar.org registro histórico de inundaciones del SNET (Ahora DGOA) e inventario de inundaciones de municipios que conforman la cuenca del río Sucio.</i></p>					

Municipio de Jayaque, Departamento de La Libertad					
Fecha	Cantón	Río	Afectados	Viviendas afectadas	Descripción
21/09/1974		Río Shutia y Río Talnique			Huracán Fifi, Desbordamiento de ambos ríos. Fuertes lluvias desencadenadas por el huracán Fifi ocasionaron la pérdida de infraestructura eléctrica y de cultivos.
20/06/1905	Cantón Las Flores y La Labor	Río Shutia y Río Talnique		8 viviendas de la Col. Llano Verde, 7 viviendas destruidas en La Labor y 3 en la Col. 2 de mayo	Huracán Mitch, Desbordamiento de ambos ríos, inundaciones en la parte baja del municipio
24/06/1905					Tormenta Tropical Isidore
27/06/1905					Huracán Adrián
27/06/1905	Colonia Divina Providencia, Col. Independencia y Caserío Las Graditas		Evacuación de todas las personas de la Col. 2 de mayo, Llano Verde 1, Caserío Peñate y Colonia Divina Providencia	31 viviendas en Col. 2 de mayo	Huracán Stan
01/07/1905					Tormenta tropical Ida
02/07/1905					Tormenta tropical Agatha
02/07/1905					Tormenta tropical Alex
02/07/1905					Tormenta tropical Alex
03/07/1905	Todo el municipio			Destrucción de 35 viviendas e inundación de 40 en el Caserío Las Graditas. Inundación de 12 viviendas y 1 destruida en la Col. 2 de Mayo. También 2 viviendas destruidas y 5 inundadas en la col. Nueva Esperanza, 2 viviendas dañadas en el Caserío Ojo de Agua, además de la destrucción de 2 viviendas en la Col. La Ceiba	Depresión Tropical 12E. Dos puentes destruidos: San Francisco y Shutia. Río Talnique inundó las colonias Llanos verdes I y II incluyendo el albergue lo que obligó a evacuar nuevamente a las personas albergadas al Caserío Curasao. Evacuación de habitantes del Caserío El Pinal por peligro de deslizamiento. Inundación de la granja de aves Santa Inés, destrucción del Centro Escolar, la Iglesia y la pasarela que comunica Las Graditas con la Hacienda El Valor.
Municipio de Nejapa, Departamento de San Salvador					
20/06/1905	Comunidad Cuesta Blanca, caserío El Anonal, hacienda Mapilapa, comunidad Barba Rubia, Casco Hacienda Tutultepeque, caserío Los Amates, El Puerto, caserío La Escuela, Ceiba Rosales				Huracán Mitch, Vías de acceso obstruidas y pérdida de cultivos
27/06/1905	Caserío Las Mesas, Cedral N° 2, Caserío Los Amates, Caserío El Potrerito, Caserío La Escuela				Tormenta Tropical Adrián, Vías de acceso obstruidas y pérdida de cultivos

Continuación Tabla 2.14 Inundaciones registradas en la cuenca del río Sucio.

Fuente: DesInventar.org registro histórico de inundaciones del SNET (Ahora DGOA) e inventario de inundaciones de municipios que conforman la cuenca del río Sucio.

Municipio de Nejapa, Departamento de San Salvador					
Fecha	Cantón	Río	Afectados	Viviendas afectadas	Descripción
01/07/1905	Caserío Las Mesas, caserío El Anonal, comunidad Barba Rubia, Casco Hacienda Tutultepeque				Tormenta Tropical Ida, Vías de acceso obstruidas y pérdida de cultivos
02/07/1905	Caserío Las Mesas, El Puerto				Tormenta Tropical Agatha, Pérdida de cultivos
03/07/1905	Caserío Las Mesas, Caserío El Anonal, hacienda Mapilapa, El Llanito, cantón El Salitre, El Puerto				Perdidas en cultivos, daños en viviendas.
Municipio de Quezaltepeque, Departamento de La Libertad					
01/06/1934	Zona de amortiguación del Rio Sucio	Rio Sucio			Desbordamiento del río Sucio, desagüe de la laguna Ciega; éste destruyó el puente del Ferrocarril ubicado en la zona del Sitio del Niño. La planta de luz eléctrica, situada en San Lorenzo, quedó completamente inundada. Hubo damnificados y viviendas destruidas y afectadas.
01/10/1998	Cantón Segura.	Quebrada de caserío Valle Nuevo.			Crecimiento de la quebrada del caserío Valle Nuevo en época lluviosa, con peligro para el paso peatonal y vehicular que atraviesan dicha quebrada.
01/09/2006		Rio Acayo	El río arrastró a una mujer de 36 años. El cadáver fue encontrado 2 km. río abajo. Hubo heridos.		Lluvias provocaron el aumento de caudal del río Acayo,
12/05/2009	Caserío Vía Esperanza	Quebrada Zanjón	28 familias resultaron con grandes pérdidas		La fuerte lluvia provocó el desborde de la quebrada Zanjón.
2009 a la fecha	Cantón Santa Rosa				Daños materiales en viviendas y en cultivos
01/10/2011	En todo el caserío El Aguacate, del cantón Tacachico. Cantón Las Mercedes, comunidad Las Mercedes	Quebradas y Rio Sucio			Tormenta 12E. Desborde de quebradas y río Sucio, causando pérdidas de cultivos, árboles y ganado; deslizamientos y caída del puente de hamacas hacia el Cantón El Jocote.
01/01/2012	Cantón Santa Rosa, comunidad El Guitarrón.	Quebrada sin nombre			Inundación de casas próximas a la quebrada sin nombre que atraviesa la comunidad.
04/07/1905	Cantón Sitio de Los Nejapa . (El Centro y Abajo)	Quebrada El Zapote		8 viviendas	Se rebalsó una quebrada, inundando una casa. Se dañaron 8 casas en total. Desborde de la quebrada El Zapote, que ocasionó daños en viviendas.

Continuación Tabla 2.14 Inundaciones registradas en la cuenca del río Sucio.

Fuente: DesInventar.org registro histórico de inundaciones del SNET (Ahora DGOA) e inventario de inundaciones de municipios que conforman la cuenca del río Sucio.

Municipio de Quezaltepeque, Departamento de La Libertad					
Fecha	Cantón	Río	Afectados	Viviendas afectadas	Descripción
2012-2013	Casco Urbano Quezaltepeque, ADESCO Sur Poniente				Pérdidas materiales, bloqueo de paso vehicular (sólo hay paso peatonal).
05/07/1905	Cantón San Francisco, caserío El Cerrito			2 viviendas	
17/07/2013					Se reportó inundación en la calle de Opico hacia Quezaltepeque.
01/08/2013	Cantón Santa Rosa				Daños materiales en viviendas
01/08/2013	Cantón Primavera, caserío Primavera Abajo			1 casa colapsada y 10 casas inundadas	
Todos los años	Cantón Las Mercedes, caserío El Tinteral				Obstrucciones de caminos hacia caseríos aledaños, quedando como pasos peatonales.
Todos los años	Cantón Las Mercedes, caserío La Tanquilla				Obstrucciones de caminos hacia caseríos aledaños, quedando como pasos peatonales.
Municipio de Sacacoyo, Departamento de La Libertad					
27/05/1905	Cantón Ateos	Río Talnique			Fuertes lluvias tras el paso del Huracán Fifi generaron inundación en el Cantón Ateos por desbordamiento del río Talnique
04/06/1905	Inundación Catón Ateos, Lotificación Los Compadres, Caserío El Tigre	Ríos: Chuchucato, Talnique, Copapayo, Ateos, Shutia, y Quebrada El Zope.		Viviendas destruidas.	Pérdida de Cultivos. Pérdida de Ganado.
20/06/1905	Cantón Ateos	Río Talnique y ríos Chuchucato, Copapayo, Frío, Ateos, Shutia y Quebrada el Zope.		Viviendas destruidas. Destrucción por la inundación en la Colonia el Milagro en Cantón Ateos.	Pérdida de Cultivos. Pérdida de materiales.
27/06/1905	Cantón Ateos	Río Talnique			Tormenta Stan
06/10/2005	Valle de Zapotitán	Río Frío y Copapayo			Debido al desbordamiento de los ríos se originaron inundaciones en el Valle de Zapotitán, dejando grandes pérdidas en cultivos.
03/07/1905			26927 personas damnificadas, 689 familias damnificadas	13 viviendas con paredes derrumbadas. 55 casas destruidas.	Depresión Tropical 12E. Puente de Ateos colapsado, 3 calles colapsadas en el Caserío El Tigre, 2 puentes dañados en Lot. Valle Dorado, Centro Escolar Lot. El Predio y Centro Escolar Colonia Escalante inundados al igual que el Centro de Salud en Villa Tzu-Chi
01/08/2011	Comunidades ubicadas a las orillas del río Chuchucato	Río Chuchucato		2 viviendas afectadas levemente en las cercanías al río	

Continuación Tabla 2.14 Inundaciones registradas en la cuenca del río Sucio.

Fuente: DesInventar.org registro histórico de inundaciones del SNET (Ahora DGOA) e inventario de inundaciones de municipios que conforman la cuenca del río Sucio.

Municipio de Sacacoyo, Departamento de La Libertad					
Fecha	Cantón	Río	Afectados	Viviendas afectadas	Descripción
01/08/2011	Caserío El Refugio y Cantón San Antonio. Residencial California	Río Shutia		Drenaje de Residencial California debido a problemas con drenaje (de 10 a 70 cm los niveles de inundación)	
Municipio de San Juan Ópico, Departamento de La Libertad					
20/09/1974	Valle del Zapotitán				Tras el paso del huracán Fifi, ríos cercanos al valle del Zapotitán se desbordaron, lo que ocasionó una serie de inundaciones que dañaron los cultivos.
04/06/1905	Cantón Nombre de Dios, Cantón San Pedro Oriente, Cantón Las Delicias, Cantón El Jabalinon, Cantón Las Granadillas, Cantón Chanmico			Casas inundadas	Tormenta Tropical Alberto. Pérdidas en cosechas, daños en puentes y deslizamientos en laderas
20/06/1905	Cantón Pitichorro, Cantón Nombre de Dios, Cantón El Jabalinon, Cantón Las Granadillas, Cantón Chanmico				Huracán Mitch, Deslizamiento de laderas, inundaciones
27/06/1905	Cantón San Pedro Oriente				Huracán Stan
10/10/2005			1 persona		Las fuertes lluvias ocasionaron la crecida de ríos, provocando la muerte de una persona.
09/10/2008	Caserío Los Bajíos	Río Palillo y Quebrada suluncho		15 viviendas	El desbordamiento del río Palillo y la quebrada Suluncho dejó como resultado 15 viviendas afectadas y varias familias evacuadas del caserío Los Bajíos.
12/05/2009	Comunidad Chanmico			11 viviendas	Las fuertes lluvias provocaron que 11 viviendas resultarán inundadas en la comunidad Chanmico.
01/07/1905	Cantón El Castillo, Cantón Buena Vista, Cantón Nombre de Dios, Cantón San Pedro Oriente, Cantón San Nicolás Los Encuentros, Cantón Las Delicias, Cantón El Jabalinon, Cantón Las Granadillas, Cantón Chanmico, Cantón San Felipe	Desborde de quebradas y ríos, en especial el Río Sucio			Tormenta Tropical Ida, Deslizamiento de laderas, pérdida de cosechas
02/07/1905	Cantón Nombre de Dios, Cantón San Pedro Oriente, Cantón San Nicolás Los Encuentros, Cantón Las Delicias, Cantón El Jabalinon, Cantón Las Granadillas, Cantón Chanmico				Tormenta Tropical Agatha. Daños en cultivos y deslizamientos
<p><i>Continuación Tabla 2.14 Inundaciones registradas en la cuenca del río Sucio.</i> Fuente: DesInventar.org registro histórico de inundaciones del SNET (Ahora DGOA) e inventario de inundaciones de municipios que conforman la cuenca del río Sucio.</p>					

Municipio de San Juan Ópico, Departamento de La Libertad					
Fecha	Cantón	Río	Afectados	Viviendas afectadas	Descripción
03/07/1905	Cantón El Castillo, Cantón Buenavista, Cantón Barranca Honda, Cantón San Pedro Oriente, Cantón San Nicolás Los Encuentros, Cantón Las Delicias, Cantón El Jabalí, Cantón Las Granadillas, Cantón Chanmico, Cantón San Felipe				Depresión Tropical 12E. Pérdidas en cosechas, deslizamientos y destrucción de tuberías de agua potable
17/07/2013	Colonia Nuevo Sitio				Desbordamiento de quebrada afluente al río Sucio en colonia Nuevo Sitio
Municipio de San Matías, Departamento de La Libertad					
01/06/1934	San Pedro Las Flores, El Jocote, El Jícaro				Destrucción de puentes y caminos y 100 manzanas de cultivos
01/09/1974	San Pedro Las Flores, El Jocote, El Jícaro				Huracán Fifi, Pérdida de cultivos
01/11/1998	San Pedro Las Flores, El Jocote, El Jícaro, Santa Teresa, Santa Rosa y Área Urbana				Huracán Mitch, Pérdida de cultivos y animales y un puente hamaca
01/10/2005	San Pedro Las Flores, El Jocote, El Jícaro, Santa Teresa, Santa Rosa y Área Urbana				Huracán Stan, Pérdida de cultivos y animales, inundación del centro del cantón El Jocote
01/11/2009	San Pedro Las Flores, El Jocote, El Jícaro, Santa Teresa, Santa Rosa y Área Urbana				Tormenta Ida, Pérdida de cultivos y un puente hamaca
01/05/2010	San Pedro Las Flores, El Jocote, El Jícaro, Santa Teresa, Santa Rosa y Área Urbana			4 viviendas inundadas en Cantón El Jícaro y viviendas inundadas en Masajapa Centro y Santa Teresa	Tormenta Agatha, Pérdida de cultivo, inundación del centro del cantón, Daños en puentes de hamaca en Cantón San Pedro Las Flores
17/07/2010	Cantón Masajapa.				Debido a un campo depresionario se evacuaron varias personas de manera preventiva del cantón Masajapa.
01/10/2011	San Pedro Las Flores, El Jocote, Santa Teresa, Santa Rosa y Área Urbana		24 personas evacuadas en Cantón La Puebla, 52 familias evacuadas en San Pedro Las Flores y 3 familias en Cantón El Jocote	1 vivienda colapsada y 100 inundadas en Cantón San Pedro Las Flores. En Cantón El Jocote, caída de rocas afecta casas en caserío Los Cortez, y 3 casas destruidas en Caserío El Cerro, 4 viviendas inundadas en Cantón El Jícaro, 8 casas inundadas en Santa Teresa	Depresión Tropical 12E
Municipio de San Pablo Tacachico, Departamento de La Libertad					
01/10/1998	Atiocoyo				Huracán Mitch. Daños en puente hamaca y pérdidas de cultivos y ganado
01/10/2011	Caserío San Jorge del Cantón Obraje Nuevo	Huisisilapa			Depresión Tropical 12E. Daños en puente hamaca y pérdidas de cultivos y ganado
04/07/1905	Límite con El Paisnal	Huisisilapa			Tormenta Stan. Daños estructurales en puente Huisisilapa

Continuación Tabla 2.14 Inundaciones registradas en la cuenca del río Sucio.

Fuente: DesInventar.org registro histórico de inundaciones del SNET (Ahora DGOA) e inventario de inundaciones de municipios que conforman la cuenca del río Sucio.

Municipio de Talnique, Departamento de La Libertad					
Fecha	Cantón	Río	Afectados	Viviendas afectadas	Descripción
06/10/1916					Situación atemporalada a nivel nacional, provocó que los ríos que conducen al valle de Zapotitán se salieran de sus cauces y desencadenaran inundaciones en la zona de Talnique y sus periferias; resultando varias personas damnificadas.
01/10/1998			100 familias evacuadas	Viviendas inundadas	Huracán Mitch. Deslizamientos en carreteras
Municipio de Tepecoyo, Departamento de La Libertad					
06/10/1916					Situación atemporalada a nivel nacional, provocó que los ríos que conducen al valle de Zapotitán se salieran de sus cauces y desencadenaran inundaciones en la zona de Talnique y sus periferias; resultando varias personas damnificadas.
17/09/1955					Constantes lluvias ocasionaron inundaciones que dejaron un resultado de varias viviendas destruidas y personas evacuadas.
20/06/1905					Huracán Mitch, Daños en cultivos en todo el municipio
15/08/2011	Cantón El Zope		45 damnificados	12 viviendas	Debido a la influencia de una onda tropical, se produjeron inundaciones por las cuales se contabilizo el daño de 12 viviendas en el cantón El Zope.
01/10/2011					Depresión Tropical 12E, grandes deslizamientos en caminos vecinales y desbordamiento de quebradas
<p><i>Continuación Tabla 2.14 Inundaciones registradas en la cuenca del río Sucio.</i> <i>Fuente: DesInventar.org registro histórico de inundaciones del SNET (Ahora DGOA) e inventario de inundaciones de municipios que conforman la cuenca del río Sucio.</i></p>					

CAPÍTULO 3:

BASE TEÓRICA DE LA PLATAFORMA

CAPRA

3.1 INTRODUCCIÓN

La Evaluación Probabilística de Riesgo para América Central (CAPRA) es un esfuerzo realizado por el Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central (CEPREDENAC) en colaboración con los gobiernos de la región Centroamericana, la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (EIRD), el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y el Banco Mundial (BM) para apoyar la toma de decisiones del gobierno central y gobiernos locales en la gestión del riesgo ante desastres naturales (Jaimes, y otros, 2011).

Uno de los objetivos del proyecto CAPRA es la creación de una plataforma que con base en la modelación de la amenaza, exposición y vulnerabilidad, realice de manera probabilista el análisis de riesgo ante un fenómeno natural.

En éste capítulo se presenta la estadística básica y aspectos hidrológicos esenciales en los cuales se fundamenta la evaluación de las amenazas naturales mediante el uso de la plataforma CAPRA. De igual forma se presenta una breve descripción de los programas desarrollados para cada uno de sus cuatro módulos (amenaza, vulnerabilidad, exposición y riesgo).

3.2 ESTADÍSTICA APLICADA A LA HIDROLOGÍA

Según (Martínez Marín, 2005) se poseen dos niveles en el estudio estadístico de los datos hidrológicos. A partir del primer nivel se puede comprender un

fenómeno mediante el conocimiento de distribuciones, medias, etc, y mediante el segundo se pueden inferir sucesos del futuro partiendo de datos conocidos; lo que permitirá el conocimiento de la probabilidad de que se produzcan determinados eventos.

El presente apartado estará enfocado en el desarrollo de conceptos que permitan conocer acerca del segundo enfoque antes descrito.

3.2.1 HIDROLOGÍA ESTOCÁSTICA

Según (Linsley, Kohler, & Paulus, 1997) Jacob Bernoulli definió la ciencia estocástica, como el arte de estimar en mejor forma la probabilidad de ocurrencia de eventos. En la estadística, la palabra estocástico es sinónimo de aleatorio, y en el caso de la hidrología se usa de manera especial para referirse a series de tiempo que son parcialmente aleatorias. Es importante diferenciar la hidrología estocástica de la hidrología determinística y probabilística; ya que el interés de la hidrología probabilística se encuentra en la probabilidad de que un evento sea igualado o excedido; la hidrología determinística supone que mediante diferentes variables utilizando un modelo apropiado, la variabilidad de un fenómeno en el tiempo puede ser totalmente explicada, y la base primordial en la hidrología estocástica es la secuencia del tiempo ya que a través de ella se generan secuencias de eventos con igual probabilidad de ocurrencia y en los que cada secuencia tienen propiedades estadísticas similares. (Linsley, Kohler, & Paulus, 1997).

Cada secuencia de eventos de entrada producirá una secuencia de eventos de salida que tendrán las mismas características estocásticas del registro histórico base.

3.2.2 ESTIMACIÓN DE DATOS FALTANTES EN LOS REGISTROS DE LLUVIA.

La información pluviométrica antes de ser estudiada en su comportamiento debe ser revisada, ya que para realizar un estudio del comportamiento de la información pluviométrica mediante un modelo matemático según (Chereque Morán, 1989) es necesario que dicha información reúna tres requisitos: Completa, consistente y de extensión suficiente.

Debido a que en los registros de lluvia pueden faltar datos, existen diferentes métodos con los cuales se puede complementar la información faltante. En dichos métodos es necesario realizar una correlación con base en datos de estaciones índices que posean registros con datos completos, para generar los datos faltantes. Las estaciones índices son seleccionadas según la cercanía y altitud parecida a la estación en estudio, ya que distancia y altitud son factores de suma importancia para la selección de las estaciones índice, principalmente por la condición climática.

En el presente trabajo de graduación el método utilizado para la generación de los datos faltantes en los registros de lluvia, ha sido el método de la recta de regresión (Mínimos cuadrados), el cual se describe a continuación:

MÉTODO DE LA RECTA DE REGRESIÓN (Mínimos Cuadrados)

El presente método designa con la variable “y” a la estación con datos incompletos y con la variable “x” a la estación índice. El método consiste en dibujar el diagrama de dispersión, ploteando los puntos de coordenadas “x” e “y”, y luego ajustando una recta al diagrama de dispersión obtenido. De esta forma la recta trazada, llamada “línea de regresión”, se utilizará para completar la información faltante en “y”.

El procedimiento anterior, puede realizarse de manera analítica seleccionando la estación índice que presente mejor coeficiente de correlación (r); el cual se define a continuación:

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{(n - 1)S_x S_y}$$

Ecuación 3.1

Dónde:

n= número de pares de datos conocidos (número de datos en “y”).

\bar{x} = media aritmética de los datos de “x” que forman parejas con los de “y”.

\bar{y} = media aritmética de todos los datos de “y”.

S_x = desviación estándar para todos los datos de “x” que formen parejas con los de “y”.

S_y = Desviación estándar para todos los datos de “y”.

El cálculo de la desviación estándar se realiza con las siguientes ecuaciones:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n-1}} \quad S_y = \sqrt{\frac{\sum(y - \bar{y})^2}{n-1}}$$

Ecuación 3.2

Los valores del coeficiente de correlación varían de (-1) a (+1), correspondiendo la siguiente definición (Chereque Morán, 1989):

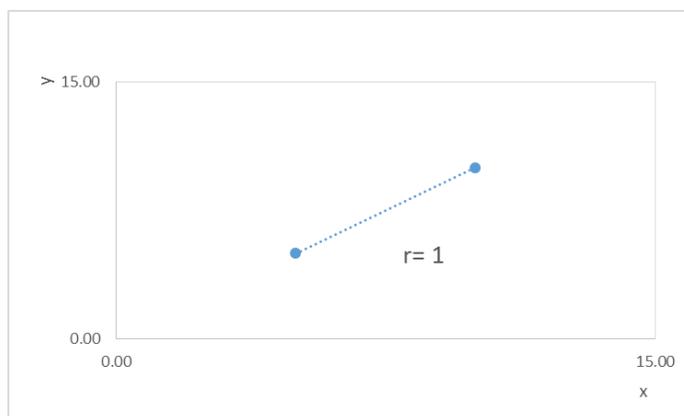
$r = 0$, significa que no existe ningún grado de asociación entre los valores de “x” y los valores de “y” (correlación nula, véase Gráfica 3.1).

$r = 1$, significa que los puntos del diagrama de dispersión se alinean en una recta de pendiente positiva (correlación directa óptima, véase Gráfica 3.2).

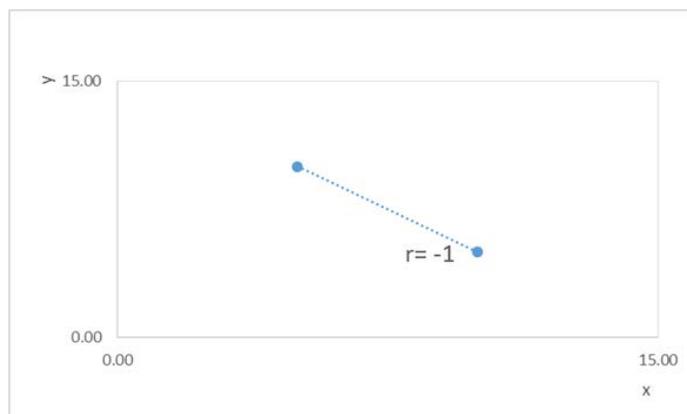
$r = -1$, significa que los puntos del diagrama de dispersión se alinean en una recta de pendiente negativa (correlación inversa óptima, véase Gráfica 3.3).



Gráfica 3.1 Coeficiente de correlación $r=0$, correlación nula.
Fuente: Elaboración propia con base en (Chereque Morán, 1989).



Gráfica 3.2 Coeficiente de correlación $r=1$, correlación directa óptima.
Fuente: Elaboración propia con base en (Chereque Morán, 1989).



Gráfica 3.3 Coeficiente de correlación $r=-1$, correlación inversa óptima.
Fuente: Elaboración propia con base en (Chereque Morán, 1989).

En el caso de precipitaciones anuales, la ecuación de la recta de regresión es:

$$y' = a + b(x - \bar{x}) \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Donde:

$$a = \bar{y} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

$$b = \frac{\sum(x - \bar{x})y}{\sum(x - \bar{x})^2} = \frac{\sum xy - n\bar{x}\bar{y}}{\sum x^2 - n\bar{x}^2} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Se demuestra también que:

$$b = r \frac{S_y}{S_x} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Siendo r , el coeficiente de correlación.

El procedimiento descrito se puede realizar de manera automatizada en hojas de cálculo, ordenando los datos según la Tabla 3.1, teniendo en cuenta que la variable “y” corresponderá a la estación incompleta.

Tabla 3.1 Orden de datos para la realización de la correlación.

FECHA	L04 ("x")	A21 ("y")
01/01/1971	0	0
02/01/1971	0	0
03/01/1971	0	0
04/01/1971	0	0
05/01/1971	0	0
06/01/1971	18.7	0
07/01/1971	0	0
27/12/2014	11.3	
28/12/2014	0	
29/12/2014	0	
30/12/2014	0	
31/12/2014	0	

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3 ELEMENTOS FUNDAMENTALES DEL ANÁLISIS DE TORMENTAS

INTENSIDAD

Es la cantidad de agua caída por unidad de tiempo, sin embargo, particularmente de cada tormenta es importante conocer la intensidad máxima. El cálculo de la intensidad se muestra en la Ecuación 3.7.

$$I_m = \frac{\Delta P}{\Delta t}$$

Ecuación 3.7

Donde:

I_m = Intensidad máxima, mm/hora.

ΔP = Precipitación en altura de agua, mm.

Δt = Tiempo, horas.

DURACIÓN

Corresponde al tiempo que transcurre entre el inicio y fin de la tormenta.

FRECUENCIA

Se refiere al número de veces que se repite una tormenta característica de intensidad y duración definidas, en un período de tiempo.

PERÍODO DE RETORNO

Es el período de tiempo promedio, en años, en que un determinado evento, es igualado o superado por lo menos una vez. Se define como el inverso de la probabilidad u ocurrencia:

$$T = \frac{1}{p}$$

Ecuación 3.8

Donde T es un valor entero, 25, 50, 300, de forma que p sea la probabilidad que una magnitud exceda un valor dado.

3.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PLATAFORMA CAPRA

CAPRA integra una serie de procesos para la evaluación probabilística de amenazas, caracterización de elementos expuestos, comportamiento y vulnerabilidad social y de infraestructura, evaluación de riesgo físico y humano.

Permite efectuar el cálculo de riesgo para diferentes tipos de amenazas naturales. Para el análisis de la amenaza, elementos expuestos y su

vulnerabilidad, se desarrollaron programas que ejecutan las evaluaciones preliminares al análisis de riesgo; generando resultados compatibles con el software CAPRA-GIS para realizar una íntegra evaluación probabilista del riesgo. Los resultados de riesgo generados por el software son presentados en términos de pérdidas probables, base para estudios de protección financiera, estudios de relación beneficio costo para validación financiera de medidas de mitigación, planes de ordenamiento territorial, sistemas de alerta temprana (Probabilistic Risk Assessment Program, Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-7: MÓDULOS DE SOFTWARE, 2011); permitiendo así dar apoyo a los entes responsables del manejo de emergencias, la planificación del territorio, la inversión pública y los mercados de transferencia de riesgo (Jaimes, y otros, 2011).

CAPRA es una plataforma que genera sucesos estocásticos, lo que en hidrología se refiere a series de tiempo que son parcialmente aleatorias.

3.4 DESCRIPCIÓN DE LOS PROGRAMAS QUE CONSTITUYEN LA PLATAFORMA CAPRA

Los programas que componen los módulos de la plataforma CAPRA (Amenaza, vulnerabilidad, exposición y riesgo) se resumen en la Tabla 3.2, así mismo se describe a brevedad el uso de cada uno.

Tabla 3.2 Componentes del Software CAPRA.

Módulo	Programa	Descripción
Amenaza	CRISIS 2007	Programa de cálculo de amenaza sísmica
	ERN-Huracán	Programa de cálculo de amenaza por huracán
	ERN-LluviaNH	Programa de cálculo de amenaza por lluvias no huracanadas
	ERN-Deslizamientos	Programa de cálculo de amenaza por deslizamientos
	ERN-Inundación	Programa de cálculo de amenaza por inundación
	ERN-Volcán	Programa de cálculo de amenaza volcánica
Vulnerabilidad	ERN-Vulnerabilidad	Programa de cálculo y edición de funciones de vulnerabilidad
Exposición	Web-CAPRA	Herramienta para el levantamiento de información de los elementos expuestos
	CAPRA-InfoPunt	Aplicación para captura de datos de exposición tipo punto
	CAPRA-InfoMovil	Aplicación para captura de datos de exposición tipo punto con equipos móviles
	CAPRA-InfoPolig	Aplicación para captura de datos de exposición tipo polígono
	CAPRA-InfoLinea	Aplicación para captura de datos de exposición tipo línea
	CAPRA-ZonaUrbana	Aplicación para captura de datos de exposición tipo polígono – Zonificación urbana
Riesgo	CAPRA-GIS	Sistema CAPRA de cálculo de riesgo y visualización

Fuente: (Probabilistic Risk Assessment Program, Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-7: MÓDULOS DE SOFTWARE, 2011)

En la Tabla 3.3 se presentan los diferentes formatos de datos que la plataforma CAPRA posee para el almacenamiento de la información correspondiente a cada uno de los módulos que la conforman.

Tabla 3.3 *Formato de archivos generados por los programas de la plataforma CAPRA.*

Módulo	Formato de Datos	Descripción	Formato de metadatos	Estándar
Amenaza	AME	Archivo ráster binario geo-referenciado de amenaza multiescenario	AME	Definido por ERN
Exposición	SHAPE	Archivo vectorial geo-referenciado de localización de activos expuestos y atributos	XML	Estándar FGDC
Vulnerabilidad	FVU	Archivo de texto con la definición de curvas de vulnerabilidad física y humana.	FVU	Definido por ERN
	DAT	Archivo de texto con el listado de curvas de vulnerabilidad asociadas a una base de exposición		
Riesgo	CPV	Proyecto CAPRA con toda la información asociada al proyecto de cálculo de riesgo	LOG	Definido por ERN
	SHAPE	Archivo vectorial geo-referenciado con resultados de riesgo por ubicación	XML	Estándar FGDC
	RES	Archivo de texto con la curva de excedencia de pérdidas del análisis de riesgo		

Fuente: (Probabilistic Risk Assessment Program, Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-7: MÓDULOS DE SOFTWARE, 2011).

3.5 GENERALIDADES DE LOS MÓDULOS DE LA PLATAFORMA CAPRA

Debido a que en muchas ocasiones se cuenta con escasa información concerniente a eventos catastróficos, y dado que existe la posibilidad de eventos futuros altamente calamitosos, son necesarios los modelos probabilistas para la estimación del riesgo, que permitan generar diferentes escenarios catastróficos

con base en la escasa información disponible; que anticipen eventos que pueden presentarse en el futuro.

La Figura 3.1 presenta el esquema general del modelo probabilista de evaluación del riesgo de la plataforma CAPRA, y algunas de las posibles aplicaciones directas en la gestión del riesgo:

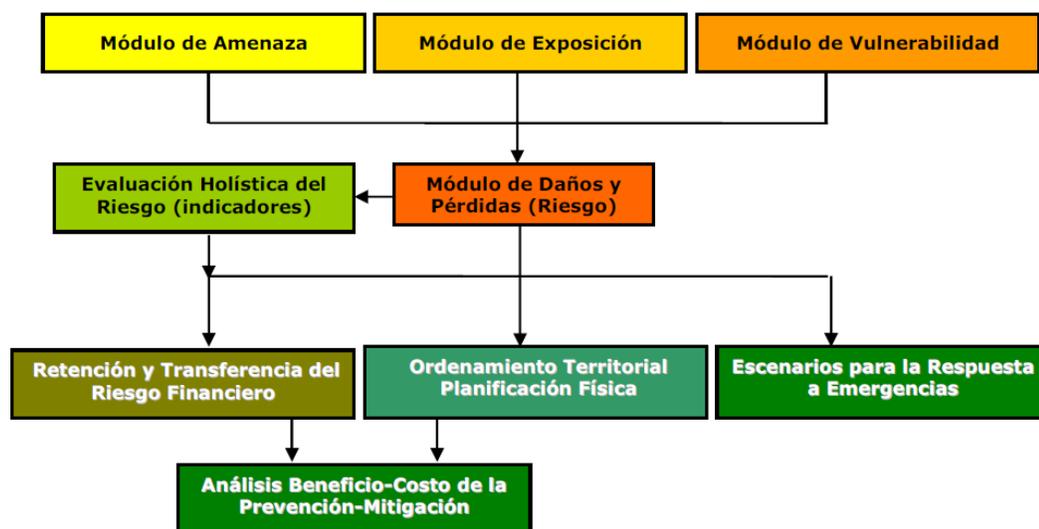


Figura 3.1 Modelo probabilista de riesgo y algunas aplicaciones.

Fuente: (Probabilistic Risk Assessment Program, Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-1: COMPONENTES PRINCIPALES DEL ANÁLISIS DE RIESGO, 2011).

3.5.1 MÓDULO DE AMENAZA

Es de suma importancia la identificación de las amenazas que pueden afectar una región, debido a que constituye un paso preliminar en cuanto al análisis de riesgo. El análisis de la amenaza está basado en la frecuencia histórica de eventos, por lo que el cálculo de la misma exige la generación de una serie de eventos estocásticos, cada uno con frecuencia definida de ocurrencia y en

diferentes ubicaciones geográficas; dichos eventos deben representar de manera adecuada las diferentes posibilidades de eventos de diferente intensidad. La Tabla 3.4 muestra las diferentes amenazas que pueden desencadenar situaciones de desastre.

Tabla 3.4 *Eventos de amenaza.*

Nº	Detonante	Evento de Amenaza
1	Sismo	Movimiento del terreno
2	Sismo	Tsunami
3	Huracán	Vientos fuertes
4	Huracán	Marea de tormenta
5	Huracán	Lluvias huracanadas
6	Precipitación	Tormenta de lluvias no huracanadas
7	Inundación	Inundación detonada por precipitación
8	Deslizamientos	Deslizamientos detonados por lluvias o sismos
9	Volcán	Caída de cenizas
10	Volcán	Flujo piroclástico
11	Volcán	Flujo de lavas

Fuente: (Probabilistic Risk Assessment Program, Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-1: COMPONENTES PRINCIPALES DEL ANÁLISIS DE RIESGO, 2011)

Para la realización de una adecuada caracterización de las amenazas que afectan a una región, es indispensable el análisis íntegro de la información histórica correspondiente a la ubicación, ocurrencia y magnitud de las amenazas; así como también el conocimiento de los efectos y pérdidas producidas por el evento, esto para calibración y validación de los modelos de análisis. Para el

análisis probabilista de amenazas se emplea un enfoque basado en el análisis multi-riesgos; que permite obtener de forma probabilista el rango completo de daños posibles atribuidos a un fenómeno de la naturaleza (véase Figura 3.2).

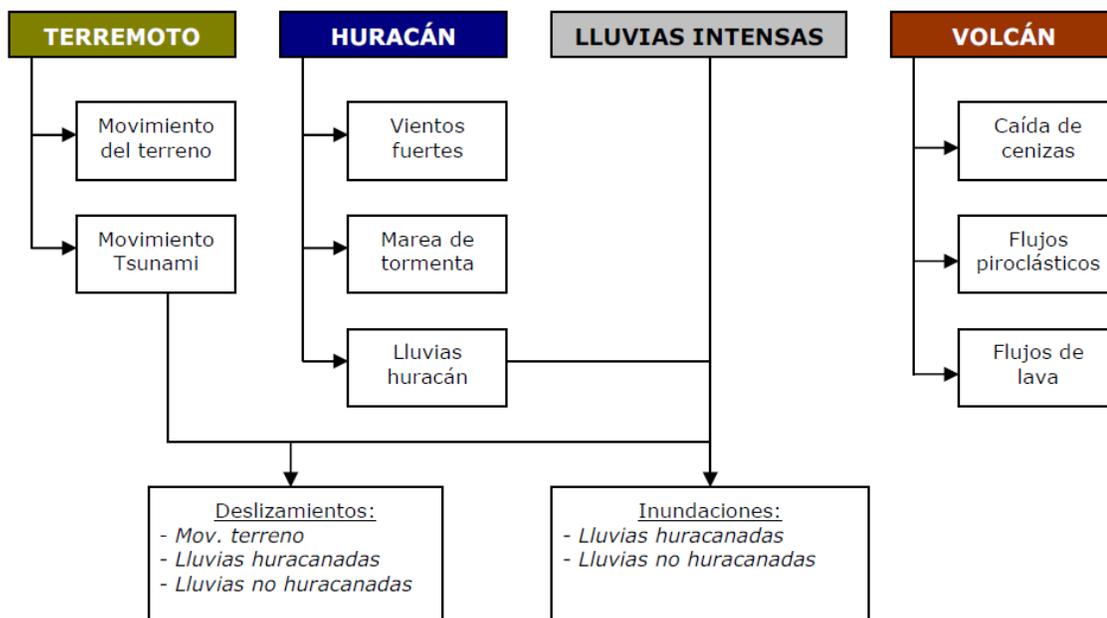


Figura 3.2 Relación entre fenómenos de la naturaleza y eventos de amenaza.

Fuente: (Probabilistic Risk Assessment Program, Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-1: COMPONENTES PRINCIPALES DEL ANÁLISIS DE RIESGO, 2011).

El resultado de la evaluación de la amenaza es una base de datos que contiene un conjunto de eventos estocásticos, con base en la información disponible más completa, característicos de la amenaza global, correspondientes a los posibles escenarios de amenaza que puedan presentarse en la zona de estudio.

El módulo de amenaza genera archivos AME que constituyen un conjunto de escenarios mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos. La primera característica se refiere a que dos escenarios que forman parte del conjunto no pueden ocurrir al mismo tiempo; y la segunda característica se refiere a que el

evento natural no puede ocurrir de ninguna manera diferente a la descrita en los escenarios.

En la Tabla 3.5 se presentan los parámetros de intensidad considerados en los análisis de amenaza los cuales poseen una distribución geográfica en un área de influencia determinada.

Tabla 3.5 *Parámetros de intensidad considerados para las diferentes amenazas.*

Amenaza	Efecto	Parámetro de Intensidad
Sismo	Movimiento del terreno	Aceleración, velocidad y desplazamiento máximos del terreno, y espectrales para diferentes periodos estructurales
Sismo	Tsunami	Profundidad y extensión del área de inundación
Huracán	Vientos huracanados	Distribución de velocidades de viento pico para ráfagas de 3 segundos
Huracán	Marea de tormenta	Profundidad y extensión del área de inundación
Huracán	Lluvia huracanada	Distribución de la profundidad de la precipitación
Lluvias no huracanadas	Lluvias no huracanadas	Distribución de la profundidad de la precipitación en tormentas
Inundación	Inundación	Profundidad y extensión del área de inundación
Deslizamientos	Deslizamientos	Distribución del Factor de Inseguridad o indicador de susceptibilidad al deslizamiento
Erupción volcánica	Caída de cenizas	Distribución de espesores de ceniza
Erupción volcánica	Flujos de lava	Distribución del área de afectación
Erupción volcánica	Flujos piroclásticos	Distribución del área de afectación

Fuente: (Probabilistic Risk Assessment Program, Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-1: COMPONENTES PRINCIPALES DEL ANÁLISIS DE RIESGO, 2011).

Los resultados del análisis de amenaza se almacenan en archivos de formato AME, que se emplean en fases subsecuentes del análisis, junto con la exposición y la vulnerabilidad para el cálculo de las pérdidas (Probabilistic Risk Assessment Program, Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-1: COMPONENTES PRINCIPALES DEL ANÁLISIS DE RIESGO, 2011)

Los archivos AME permiten que la severidad de un escenario quede definida con más de una medida de intensidad, y ellos describen dos características relevantes para el análisis probabilista de riesgo:

1. Su frecuencia anual de ocurrencia.
2. La distribución espacial de las intensidades producidas durante la ocurrencia del escenario.

3.5.1.1 MODELO DE EVALUACIÓN DE AMENAZAS NATURALES

3.5.1.1.1 AMENAZA POR LLUVIA INTENSAS NO HURACANADAS

El modelo de análisis propuesto para la generación de lluvias convectivas estocásticas lo constituyen dos fases principales:

- Conformación de la base de datos de eventos de precipitación.
- Análisis espacial de precipitaciones máximas.

Los resultados del modelo de amenaza por lluvias intensas no huracanadas (ya que el efecto del viento se considera despreciable) están basados en registros diarios de precipitación, debido a que permite una mejor distribución de lluvia en el tiempo, para caracterizar las condiciones de pluviosidad de las cuencas y definir escenarios de amenaza para la evaluación del riesgo de inundación.

Conformación de la base de datos de eventos de precipitación

Para conformar de manera adecuada la base de datos, es indispensable contar con la siguiente información:

1. Definición del área de estudio
2. Ubicación geográfica de las estaciones pluviométricas dentro del área de estudio, así como en su periferia y áreas adyacentes.
3. Registros históricos de las estaciones pluviométricas (se debe de considerar un período de tiempo que contenga registros de eventos históricos extremos para caracterizar de mejor manera la amenaza en la zona en estudio); estas deben contar con períodos comunes de información que deben corresponder a registros diarios de precipitación.
4. Juego de curvas PADF (Precipitación-Área-Duración-Frecuencia) que representen las características de las tormentas que históricamente se han presentado.

Procedimiento de análisis

El modelo utilizado para la evaluación de amenaza por lluvias intensas, esta resumido en la Figura 3.3, la cual muestra el diagrama de flujo de dicho modelo.

Los pasos principales para el desarrollo del modelo son los siguientes:

1. Caracterización de la cuenca de análisis: debe caracterizarse la cuenca mediante un juego de curvas PADF. El proceso de caracterización es previo a la aplicación del modelo; dicho proceso es descrito posteriormente.
2. Caracterización geográfica de la cuenca: el modelo propuesto debe trabajarse a nivel de cuenca, razón por la cual debe conocerse el límite o divisoria de aguas de la misma.

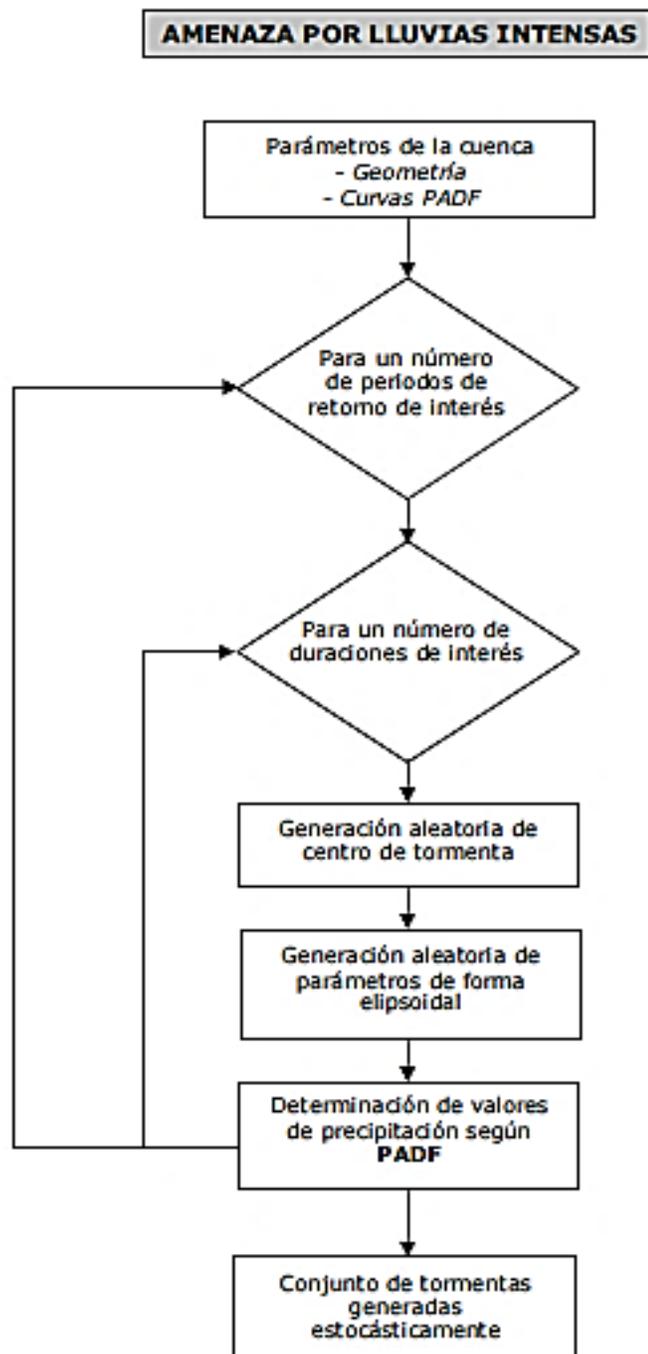


Figura 3.3 Diagrama de flujo del modelo de amenaza por lluvias intensas.

Fuente: (Probabilistic Risk Assessment Program, Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-3: Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales y Selección , 2011).

3. Conformación de malla de localización de centros de tormenta: debe asignarse una probabilidad a cada punto de la cuenca a partir de curvas isoyetas y así generar un conjunto de tormentas con valores de precipitación que cumplan la relación profundidad-área; el proceso para la generación de la malla de centros de tormenta se describe más adelante.
4. Generación de tormentas estocásticas: a partir de la información contenida en las curvas PADF, el límite de la cuenca y la malla de localización de centros de tormenta, se generan tormentas aleatorias de manera estocástica mediante valores de precipitación que cumplen la relación profundidad-área, para una duración y frecuencia de ocurrencia determinados.

Metodología para la determinación de curvas PAD y PADF

Las Curvas PAD (Precipitación – Área – Duración) representan la cantidad de lluvia registrada en el área en estudio en un período de tiempo, correspondiente a la duración de una tormenta; por otro lado, las curvas PADF (Precipitación – Área – Duración – Frecuencia) corresponden al análisis frecuencial por cada valor de área, para el conjunto de curvas PAD anuales.

Según el Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-3: Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales y Selección, para la construcción de las curvas PAD y PADF se debe seguir el procedimiento que se describe a continuación:

1. Para cada año se deben seleccionar los eventos intensos de precipitación con extensión espacial. Los pasos 2 a 16 corresponden al análisis de eventos de cada año con información disponible.
2. Para cada evento se deben elaborar mapas de isoyetas para una duración D utilizando herramientas computacionales (véase Figura 3.4). Deben involucrarse estaciones periféricas que no hayan registrado precipitación.

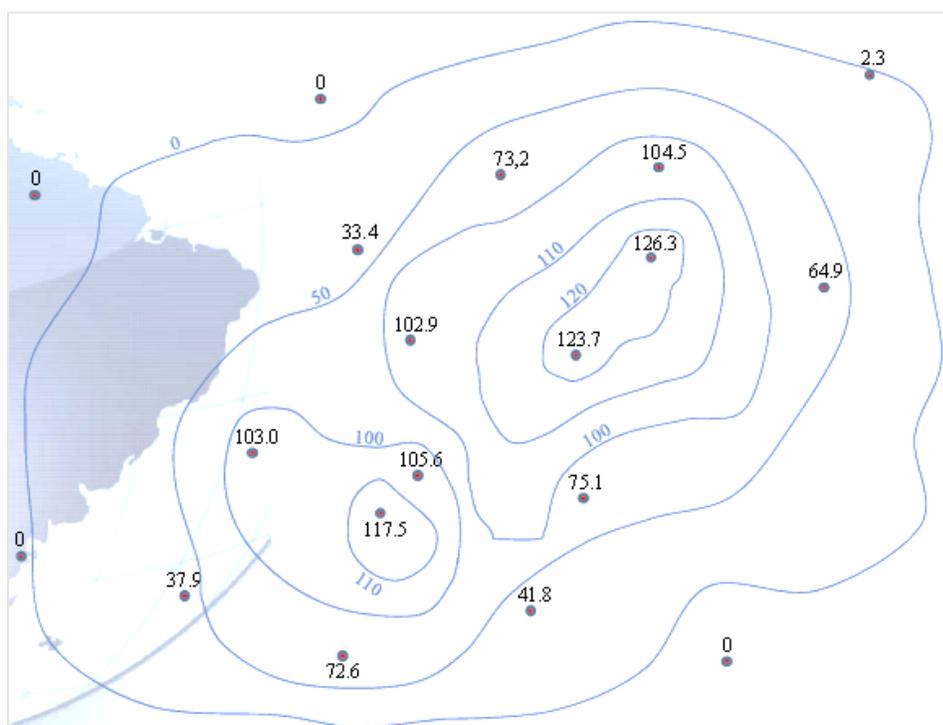


Figura 3.4 Ejemplo de Mapa de Isoyetas.

Fuente: (Velásquez, 2013)

3. Identificar las isoyetas de mayor valor. Sea este mayor valor de precipitación p_1 , y sea m_1 el número de isoyetas con valor p_1 .
4. Medir las áreas encerradas en las isoyetas con valor p_1 , y denotar estas áreas como a_1 , con i desde 1 hasta m_1 (Véase ejemplo de Tabla 3.6).

Tabla 3.6 Ejemplo de extracción de información de mapa de isoyetas.

Isoyeta (mm)	Valor Precip.	Área (km2)	Áreas	Pmáx (mm)
120	p1	4.6	a1	126.3
110	p2	23	a2	117.5
100	p3	50	a3	105.6
50	p4	101	a4	75.1
0	p5	203	a5	41.8

Fuente: (Velásquez, 2013)

- Calcular el valor promedio de precipitación en a_1 como $h_1 = p_1 + \frac{(p_{max}-p_1)}{3}$, donde p_{max} es el valor máximo puntual de precipitación dentro del área a_1 .
- Sumar las áreas a_1 . Es decir $A_1 = \sum_{i=1}^{m_1} a_i$
- Para el área agregada A_1 , calcular la profundidad de precipitación promedio como:

$$H_1 = \frac{\sum_{i=1}^{m_1} h_{1i} a_{1i}}{A_1}$$

Ecuación 3.9

- Identificar la(s) isoyeta(s) con valor inmediatamente inferior a p_1 , y sea este valor p_2 . Sea m_2 el número de isoyetas con valor p_2 .
- Medir cada una de las áreas internas a las isoyetas con valor p_2 . Sean estas áreas a_2 .
- Estimar el valor promedio de precipitación en a_2 como:

$$h_{2i} = \frac{h_{1i} a_{1i} + 0.5[p_2 + p_1][a_{2i} - a_{1i}]}{a_{2i}}$$

Ecuación 3.10

- Sumar las áreas a_2 . Es decir $A_2 = \sum_{i=1}^{m_2} a_i$
- Para el área agregada A_2 , calcular la profundidad de precipitación promedio como:

$$H_2 = \frac{\sum_{i=1}^{m_2} h_{2i} a_{2i}}{A_2}$$

Ecuación 3.11

13. Continuar con las curvas isoyetas subsiguientes mediante un procedimiento similar. Para la isoyeta n con un valor de precipitación p_n y con áreas encerradas a_n , estimar h_n como:

$$h_{2i} = \frac{h_{1i} a_{1i} + \sum_{j=2}^n 0.5 [p_j + p_{j-1}] [a_{ji} - a_{(j-1)i}]}{a_n}$$

Ecuación 3.12

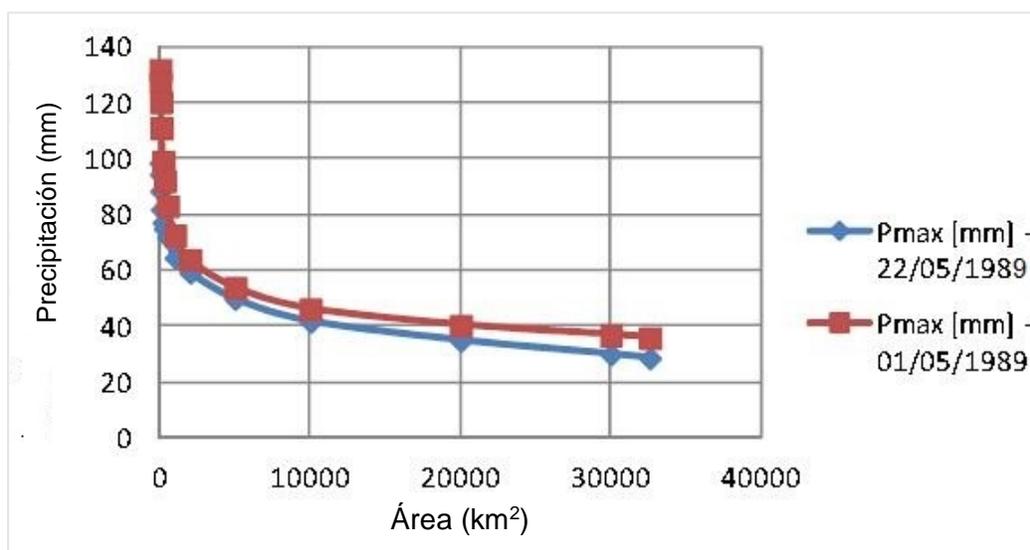
14. Sumar las áreas a_n . Es decir $A_n = \sum_{i=1}^{m_n} a_n$

15. Para el área agregada A_n , calcular la profundidad promedio como:

$$H_n = \frac{\sum_{i=1}^{m_n} h_{ni} a_{ni}}{A_n}$$

Ecuación 3.13

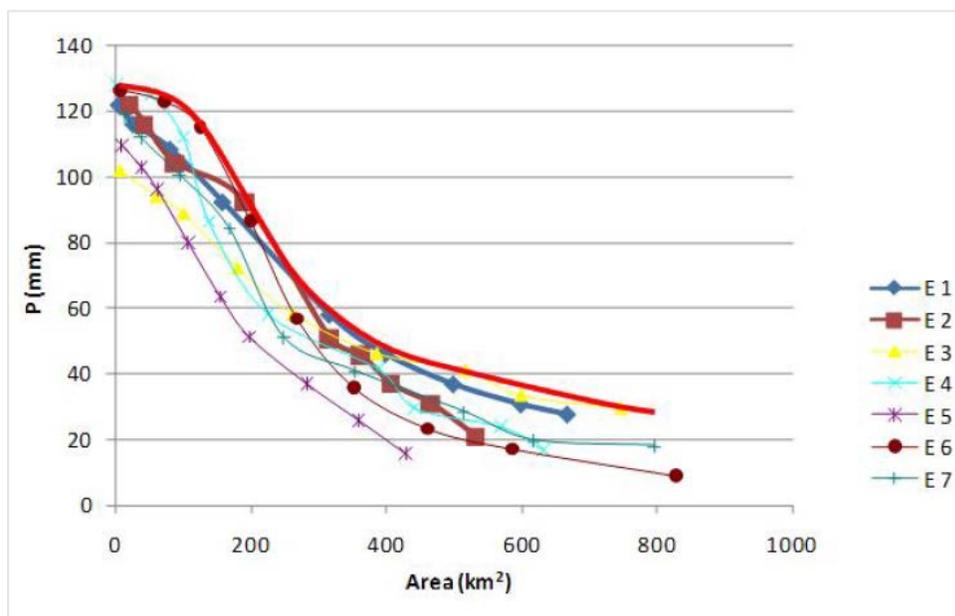
16. Graficar A_j vs. H_j (véase Gráfica 3.4).



Gráfica 3.4 Ejemplo de gráfica de Curvas PAD para diferentes eventos.

Fuente: (Velásquez, 2013)

17. Repetir el procedimiento descrito entre los pasos 2 a 16 para todos los eventos de precipitación de duración D disponibles en ese año.
18. Superponer las gráficas A_j vs. H_j del paso 16 para todos los eventos de ese año de duración D (véase Gráfica 3.5).



Gráfica 3.5 Ejemplo de envolvente de curvas PAD para diferentes eventos del mismo año.

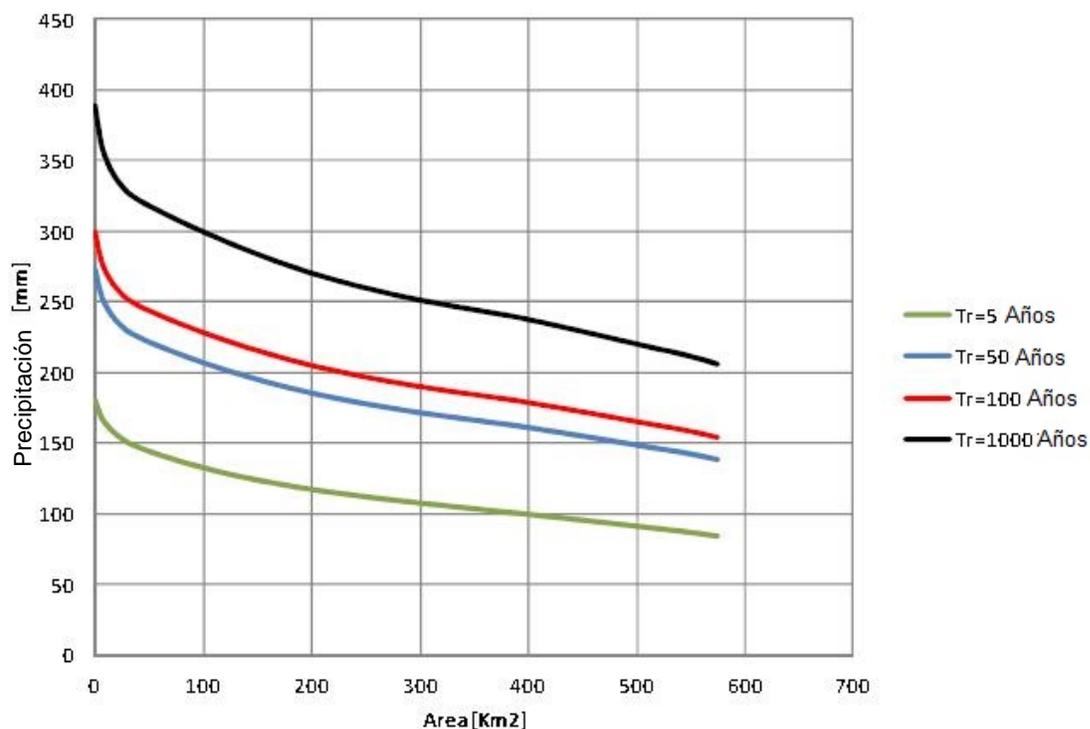
Fuente: (Velásquez, 2013)

19. Establecer la envolvente superior de precipitación para la superposición del paso anterior. Esta envolvente representa la relación entre la precipitación máxima y la extensión espacial para ese año y esa duración o curva PAD. En esta envolvente determinar los valores de precipitación máxima para valores predeterminados de área.
20. Repetir los pasos 2 a 19 para cada uno de los demás años disponibles.
21. Conformar las series anuales de precipitación máxima de duración D para cada una de las áreas predeterminadas del paso 19. Hacer análisis de

frecuencia con esta serie usando la misma distribución de probabilidad y mismo método de estimación de parámetros aplicados en los análisis puntuales.

22. Repetir pasos 2 a 21 para otras duraciones D.

23. Con los resultados de los análisis de frecuencia de los pasos 21 y 22 conformar las curvas PADF (véase Gráfica 3.6).



Gráfica 3.6 Ejemplo de gráfico de curvas PADF.

Fuente: (Velásquez, 2013)

Como resultado de los análisis anteriores se disponen de curvas PADF representativas de las zonas homogéneas correspondientes.

Metodología para la Conformación de la Malla de Localización Preferencial de Centros de Tormenta

La malla de centros de tormentas consiste en asignar la probabilidad de precipitación a cada punto de la cuenca, con base a los registros pluviométricos, para así poder generar de manera aleatoria la localización del centro de tormentas. Para la construcción de la malla de centros de tormenta se debe seguir el procedimiento que se describe a continuación (ITEC, Junio de 2013):

1. Se debe contar con la ubicación geográfica de cada estación utilizada en el análisis.
2. Para cada estación utilizada en el análisis de la zona en estudio, se debe calcular un dato de precipitación, el cual puede corresponder a:
 - a) El promedio multianual de precipitación en un determinado mes.
 - b) El promedio multianual de la suma de los meses más críticos.
 - c) La media anual multianual.
3. Se debe generar un archivo Shape de puntos, en el que cada punto represente una estación; siendo su coordenada z, el valor de precipitación resultante del paso anterior.
4. Se construye un mapa de isoyetas a partir del archivo Shape, realizando el siguiente procedimiento:
 - a) Abrir el menú ArcToolbox

- b) Dentro del menú ArcToolbox, desplegar el menú 3D Analyst Tools, seleccionar Raster Interpolation y finalmente seleccionar Spline with Barriers.
 - c) En la ventana de Spline with Barriers se solicita un archivo Shape el cual contenga la información a interpolar (correspondiente al archivo creado en el paso anterior); además se solicita especificar el campo que contenga los valores a interpolar, el archivo Shape que contenga la delimitación de la zona en estudio, especificar la resolución deseada y la ubicación en la cual se desea guardar el archivo a generar.
5. Se procede a la normalización de la información contenida en el raster, para poder asignar una probabilidad a cada punto de la cuenca a partir de las curvas isoyetas, mediante el uso de la herramienta de cálculo de raster:
- a) Abrir el menú ArcToolbox
 - b) Dentro del menú ArcToolbox, desplegar el menú Spatial Analyst Tools, seleccionar Map Algebra y finalmente seleccionar Raster Calculator.
 - c) En la ventana se debe especificar el archivo raster sobre el cual se realizará el cálculo (correspondiente al archivo creado en el paso anterior). Para poder asignar un valor de probabilidad al raster, se debe dividir el archivo por la máxima intensidad de precipitación encontrada en la cuenca. Finalmente, se solicita la ubicación en la cual se desea guardar el archivo a generar. El archivo generado poseerá

valores entre 0 y 1, permitiendo identificar la probabilidad de lluvia en cada punto de la zona en estudio.

6. Por último se debe transformar el archivo raster normalizado a un archivo de formato grid (.grd). A continuación se describen dos maneras de realizar dicha transformación:

a) Haciendo uso del programa Grid Exploit

- i. Dentro del programa de Información geográfica, se debe abrir el menú ArcToolbox.
- ii. Dentro del menú ArcToolbox, desplegar el menú Conversion Tools, seleccionar From Raster y finalmente seleccionar Raster to ASCII.
- iii. En la ventana se debe especificar el archivo raster al que se transformará de formato (correspondiente al archivo creado en el paso anterior) y la ubicación en la cual se desea guardar el archivo de texto tipo ASCII a generar.
- iv. Se procede a abrir el programa Grid Exploit.
- v. En la ventana se debe especificar el archivo de texto tipo ASCII generado anteriormente y el formato al cual se desea transformar (Surfer 6 Binary – Golden software); además de la ubicación en la cual se desea guardar el archivo a generar.
- vi. El archivo resultante es un archivo con formato .grd el cual se utilizará como dato de entrada en el software ERN-LluviaNH.

- b) Haciendo uso del programa Surfer
- i. Dentro del programa de Información geográfica, se debe abrir el menú ArcToolbox.
 - ii. Dentro del menú ArcToolbox, desplegar el menú Conversion Tools, seleccionar From Raster y finalmente seleccionar Raster to Float.
 - iii. En la ventana se debe especificar el archivo raster al que se transformará de formato (correspondiente al archivo creado en el paso anterior) y la ubicación en la cual se desea guardar el archivo de texto tipo Float a generar.
 - iv. Se procede a abrir el programa Surfer.
 - v. En la barra de herramientas se debe desplegar el menú Grid y seleccionar la herramienta Convert.
 - vi. En la ventana se debe especificar el archivo de texto tipo .flt generado anteriormente y el formato al cual se desea transformar (GRD Surfer 6 Binary Grid); además de la ubicación en la cual se desea guardar el archivo a generar.
 - vii. El archivo resultante es un archivo con formato .grd el cual se utilizará como dato de entrada en el software ERN-LluviaNH.

3.5.1.1.2 AMENAZA POR INUNDACIÓN

Según el Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-3: Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales y Selección, el enfoque de amenaza de inundación utiliza un procedimiento probabilístico que combina los siguientes componentes:

- Conjunto estocástico de eventos de precipitación
- Modelo de inundación

El primer componente define a un evento como la distribución espacial de intensidad y duración de lluvias; en cuanto al modelo de inundación, éste define la extensión espacial de las zonas inundables para diferentes niveles de intensidad de lluvias.

Con base en estos componentes, se definen dos modelos de amenaza por inundación con diferentes niveles de resolución en el análisis. El primero es un modelo simplificado, paramétrico, el cual permite estimar las zonas propensas a inundarse bajo el efecto de diferentes tormentas estocásticas (modelo a utilizar para la realización del presente Trabajo de Graduación). El segundo es un modelo detallado que permite determinar la extensión de la inundación alrededor de un cauce, a partir de la precipitación aportada por las tormentas generadas; dicho modelo requiere además del conocimiento de los eventos históricos, el conocimiento de modelos detallados de elevación del terreno, datos de caudales de descarga en las cuencas de los ríos principales y datos geométricos de un número determinado de secciones transversales a lo largo del cauce del río de la cuenca en estudio.

Procedimiento de análisis

La figura 3.5 resume en un diagrama de flujo el modelo de evaluación de amenaza por inundación. Los pasos principales para el desarrollo del modelo de amenaza de inundación son los siguientes:

1. Generación de un conjunto de eventos estocásticos: Se deben generar escenarios estocásticos de precipitación que deben ser consistentes con las características de ocurrencia de lluvia en la zona en estudio. Los eventos generados son utilizados como datos de entrada al modelo hidrológico con el fin de determinar el caudal medio de los ríos principales en la zona de estudio.
2. Determinación de parámetros de lluvia: La duración de lluvia y su intensidad deben determinarse a partir de los escenarios generados, con el fin de conocer la precipitación que puede escurrir y alcanzar los cauces y áreas inundables.
3. Modelo de inundación: Dependerá de la información disponible (Topografía, caudales, etc) y el alcance del análisis a realizar.
4. Integración de la amenaza: A partir de los escenarios de lluvia definidos se contruye un conjunto de escenarios estocásticos de inundación, representativos de la totalidad de eventos de inundación que pueden ocurrir en la zona de estudio.

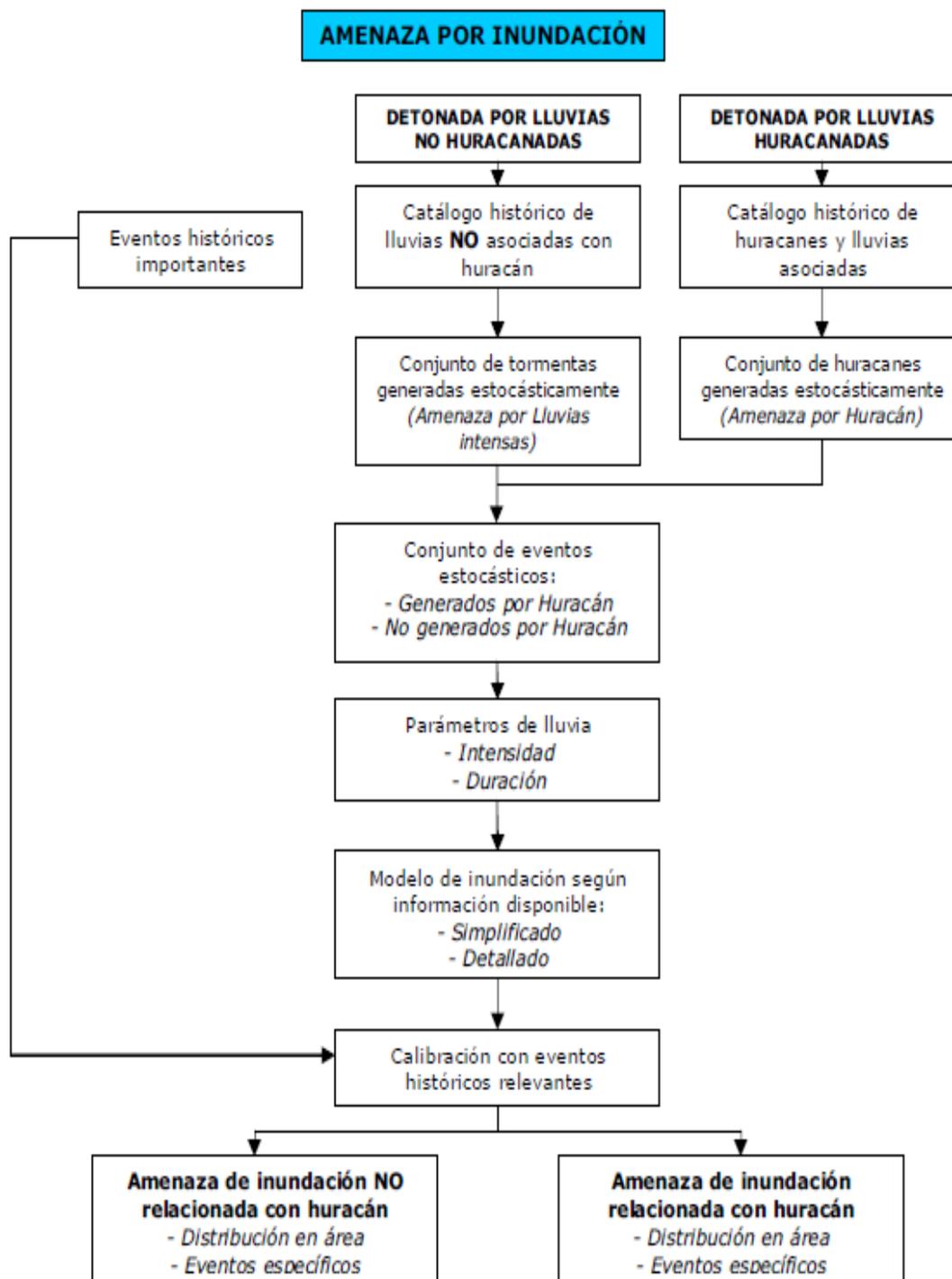


Figura 3.5 Diagrama de flujo del modelo de amenaza por inundación.

Fuente: (Probabilistic Risk Assessment Program, Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-3: Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales y Selección , 2011)

Análisis simplificado de inundación

La profundidad de precipitación efectiva corresponde a la precipitación que puede escurrir y alcanzar los cauces y áreas inundables, a partir de la misma, se obtiene la profundidad de inundación empleando factores de inundación, los cuales califican una zona en términos de que tan potencialmente inundable es, en función de su topografía y pendientes aledañas.

Estimación de la precipitación efectiva: La precipitación efectiva corresponde a la intensidad de lluvia remanente, después de que una porción de la profundidad total de precipitación aportada por la tormenta se ha gastado en procesos hidrológicos, tales como infiltración y evapotranspiración. La escorrentía se calcula en función del valor total de precipitación y el número de escurrimiento en determinado punto, empleando la expresión planteada por Chow (1994):

$$P_e = \frac{\left[P_m - \frac{508}{N} + 5.08 \right]^2}{P_m + \frac{2032}{N} - 20.32}$$

Ecuación 3.14

Donde:

Pe= Precipitación efectiva en cm

Pm= Precipitación de la tormenta en cm

N= Número de escurrimiento

El número de escurrimiento se obtiene en función del uso de la tierra, la cobertura vegetal y las condiciones de infiltración y transpiración del suelo superficial; por

tanto es un indicador de la cantidad de agua que será absorbida o transpirada por los suelos superficiales.

La ecuación 3.14 es válida para valores de $P_m > \frac{508}{N} + 5.08$, al no cumplirse la relación se considera que la precipitación efectiva es igual a cero. Se debe tener en cuenta que la precipitación efectiva no puede ser mayor que la precipitación de la tormenta.

Factores de Inundación: Los factores de inundación dependen principalmente de las condiciones topográficas del área de estudio y califican la probabilidad de un punto de ser inundado.

La profundidad de inundación se calcula a partir de la precipitación efectiva y de los factores de inundación. En la Figura 3.6 se visualizan los factores de inundación de una zona en particular.

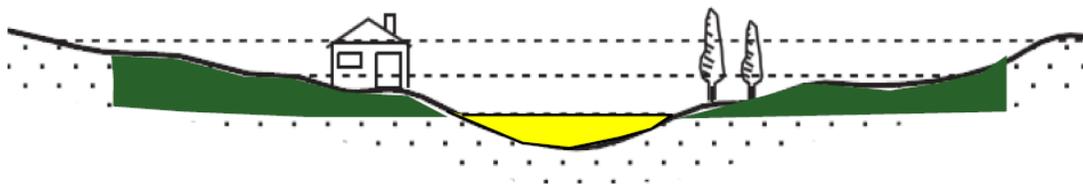


Figura 3.6 Regiones de ampliación en zonas bajas.

Fuente: (Probabilistic Risk Assessment Program, Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-3: Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales y Selección , 2011).

En la figura 3.6 se visualizan 4 zonas de interés:

1. Zonas bajas o rodeadas de montañas con mayor peligro de inundación que asemejan cauces del río. Dicha zona es representada en la figura 3.6

por un color amarillo. El tirante de inundación es igual a la precipitación efectiva más un 50%.

2. Lugares cercanos a zonas bajas identificadas como cauces. Dicha zona es representada en la figura 3.6 por un color verde. El tirante de inundación es igual a la precipitación efectiva más un 20%.
3. En lugares con pendiente topográfica baja o plana, se considera que el tirante de inundación es igual a la precipitación efectiva.
4. En lugares con pendiente topográfica alta, se considera que no presentan inundación.

Con base en la precipitación efectiva, los factores de inundación y considerando el tipo, uso de suelo y las condiciones topográficas de una zona, se puede estimar de manera aproximada el valor de la profundidad de inundación.

3.5.2 MÓDULO DE VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad puede definirse como el nivel de susceptibilidad de la infraestructura y la población ante el posible impacto de amenazas de origen natural o antrópicas. Ésta puede ser cuantificada en términos económicos y sociales, y depende en gran medida del grado de preparación que posee la población para enfrentar la situación y su capacidad para recuperarse en el menor tiempo posible.

CAPRA define la vulnerabilidad de la infraestructura mediante curvas que relacionan el valor esperado de daño y la desviación estándar del daño con la

intensidad de la amenaza. La estimación del daño es medida normalmente en términos de la relación media de daño, RMD (en inglés Mean Damage Ratio, MDR); definida como la relación entre el costo esperado de reparación del elemento afectado y el costo de reposición del mismo por lo que la curva de vulnerabilidad se define como la relación entre la RMD y el parámetro de intensidad seleccionado para el evento en consideración (véase Gráfica 3.7), más la curva equivalente para la varianza de los valores de pérdida para cada nivel de intensidad del evento.

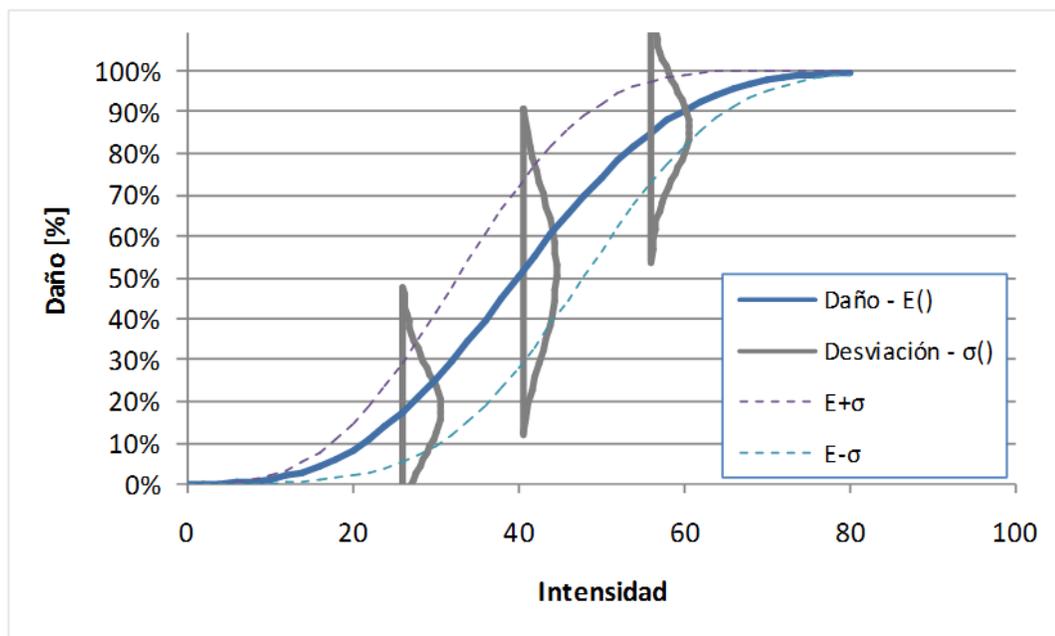
Las funciones de vulnerabilidad son asignadas a cada componente de la base de datos de exposición, es por ello que debe estimarse una función para cada tipología constructiva y para cada una de las amenazas a las cuales puede estar propenso.

Según el Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-1: COMPONENTES PRINCIPALES DEL ANÁLISIS DE RIESGO para el cálculo de las funciones de vulnerabilidad se deben de tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- Materiales que constituyen la estructura principal, la fachada, las divisiones internas y recubrimientos.
- Características geométricas.
- Tipo estructural principal.
- Fecha de construcción y norma de diseño utilizada.
- Defectos o debilidades específicas.
- Obras de reforzamiento previas.

- Comportamiento inelástico esperado.

La Gráfica 3.7 representa un gráfico de curva de vulnerabilidad, en el cual se define en el eje de las ordenadas la distribución de probabilidad de pérdida (en términos porcentuales) con la intensidad de la amenaza a evaluar en el eje horizontal. La intensidad para el caso de la amenaza de inundación puede definirse mediante la profundidad de inundación, velocidad de flujo, entre otros.



Gráfica 3.7 Formato de Curva de Vulnerabilidad.

Fuente: (ERN, 2010)

Las curvas de vulnerabilidad pueden ser generadas para evaluar la vulnerabilidad de cualquier tipo de elemento expuesto (infraestructura, cultivos, etc).

3.5.3 MÓDULO DE EXPOSICIÓN

La exposición se refiere a los elementos que pueden verse afectados ante una amenaza, infraestructura y población. Para cuantificar la exposición de una infraestructura es necesario identificar su ubicación geográfica, sus características geométricas, físicas e ingenieriles; así como también conocer su valoración económica y vulnerabilidad ante un evento amenazante. La base de datos de exposición puede ser construida de manera geo-referenciada, en la cual se incluya toda la información requerida por el análisis, tal como área, tipo constructivo y número de pisos.

La valoración debe incluir tanto el valor del bien, así como la valoración de contenidos susceptibles al daño (elementos estructurales y no estructurales). Para la estimación de la afectación humana se define la ocupación máxima y el porcentaje de ocupación a diferentes horas del día (se puede considerar una ocupación típica diurna, una nocturna u otra que se desee analizar) para cada uno de los elementos que conforman la base de datos de exposición.

3.5.3.1 HERRAMIENTA WEB CAPRA PARA EL LEVANTAMIENTO DE ELEMENTOS EXPUESTOS

La herramienta desarrollada para el levantamiento de información básica para la conformación de la base de datos de exposición, permite levantar la localización y geometría de la infraestructura expuesta, complementar la información con estadísticas económicas, censos de vivienda y población.

La presente herramienta es útil cuando la información de los elementos expuestos no está a disposición, lo que exige realizar un procedimiento aproximado para obtener estimados apropiados a partir de información básica. Mediante el uso de

El ingreso a la aplicación se puede realizar mediante la dirección web <http://itec-sas.com/CAPRA/TAP-ESV/>, en el navegador Mozilla. La ventana principal de la aplicación se muestra en la Figura 3.7.

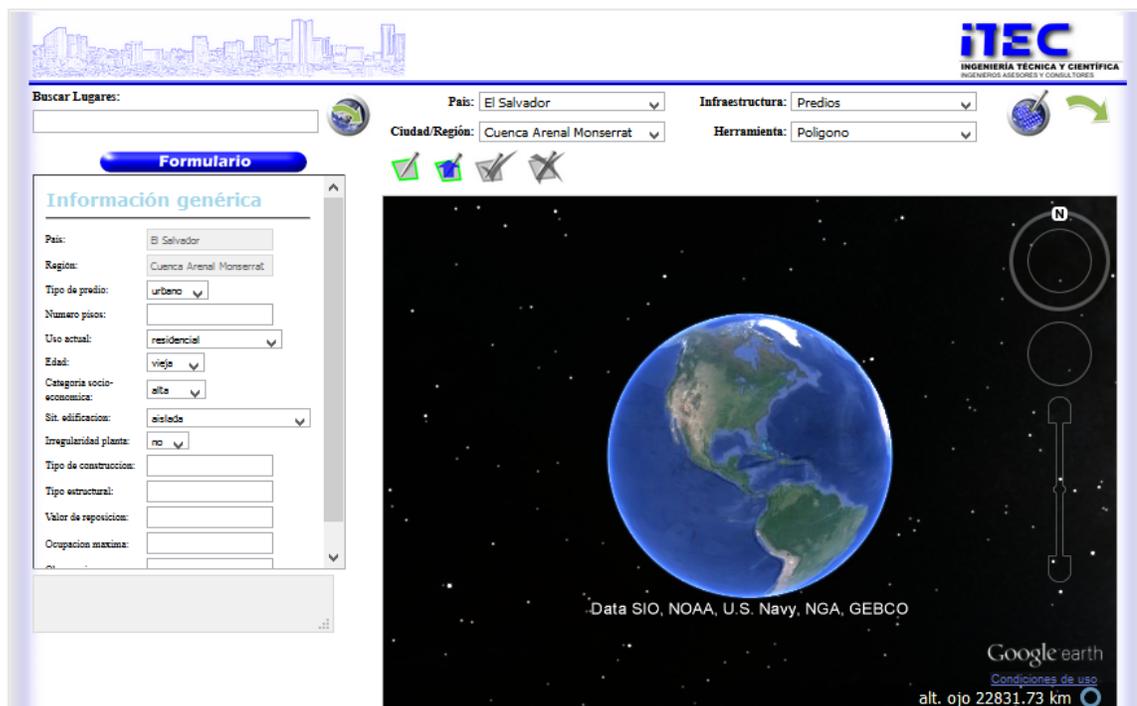


Figura 3.7 Ventana principal de la aplicación web.

Fuente: Elaboración propia, mediante la apertura de la aplicación web.

Características de la herramienta web CAPRA para el levantamiento de los elementos expuestos

1. Permite el levantamiento de exposición a nivel de polígonos.

2. Permite introducir información particular para cada elemento geográfico levantado.
3. El formato de campos es fijo y para su modificación debe realizarse mediante la modificación del software. Esto impide el levantamiento de infraestructura diferente a edificaciones, a menos que se realicen modificaciones en el código fuente.
4. La calidad de la información depende de la calidad de las imágenes utilizadas para el levantamiento de la información.

El levantamiento de la infraestructura expuesta se puede realizar mediante la utilización de puntos, polígonos, así como también líneas. A continuación se describe el procedimiento para el levantamiento predio a predio con la herramienta polígono planteada en el Tutorial “Modelación de los Elementos Expuestos”:

1. Selección de país y ciudad o región: En la página web proporcionada se establece como país predeterminado El Salvador y dos regiones del mismo, Cuenca Arenal de Monserrat y Cuenca Sensunapán (véase Figura 3.8), sin embargo dichos datos pueden ser modificados en el archivo resultante.
2. Selección del tipo de infraestructura y herramienta para el levantamiento: Se definen dos tipos de infraestructura a evaluar, Predio y cultivo. Debido al alcance propuesto, el levantamiento a realizar será de predios mediante el uso de polígonos (véase Figura 3.9).

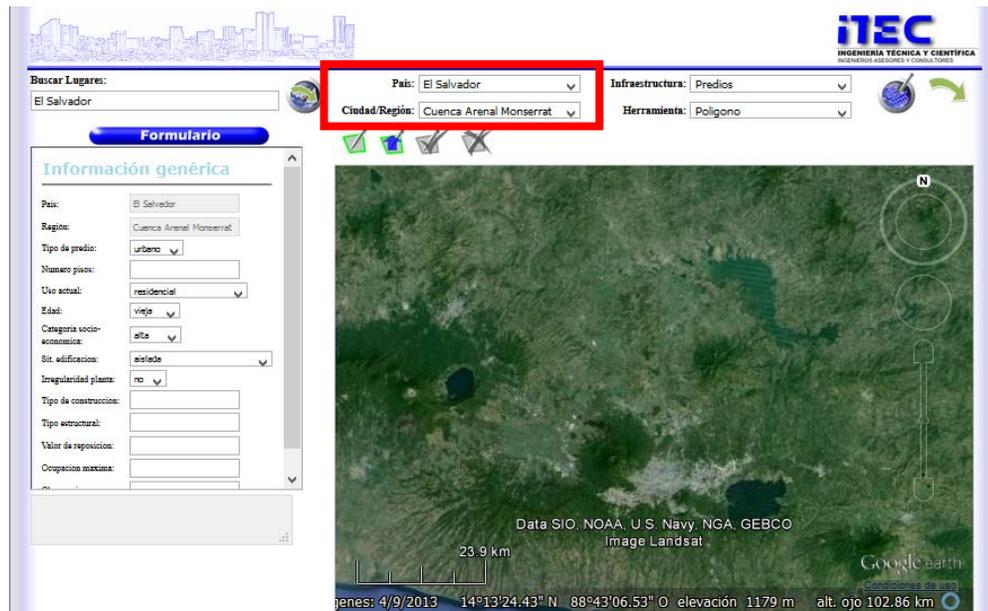


Figura 3.8 Selección de país y ciudad.

Fuente: Elaboración propia, mediante el uso de la aplicación web.

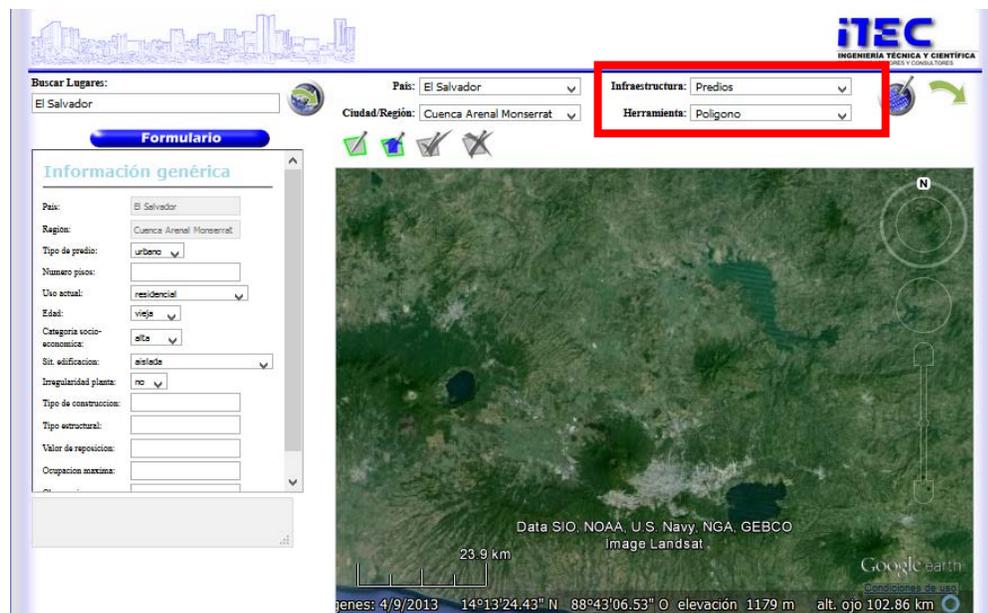


Figura 3.9 Selección del tipo de infraestructura y herramienta polígono para el levantamiento de información.

Fuente: Elaboración propia, mediante el uso de la aplicación web.

3. Actualización de elementos digitalizados en el visor: Previo a la creación de nuevos polígonos es recomendable actualizar la vista para verificar que no se han realizado levantamientos en la región. Para poder realizar la actualización se debe acercar a la zona de interés y hacer clic sobre el icono Actualizar Vista ubicado en la parte superior derecha de la ventana (véase Figura 3.10).

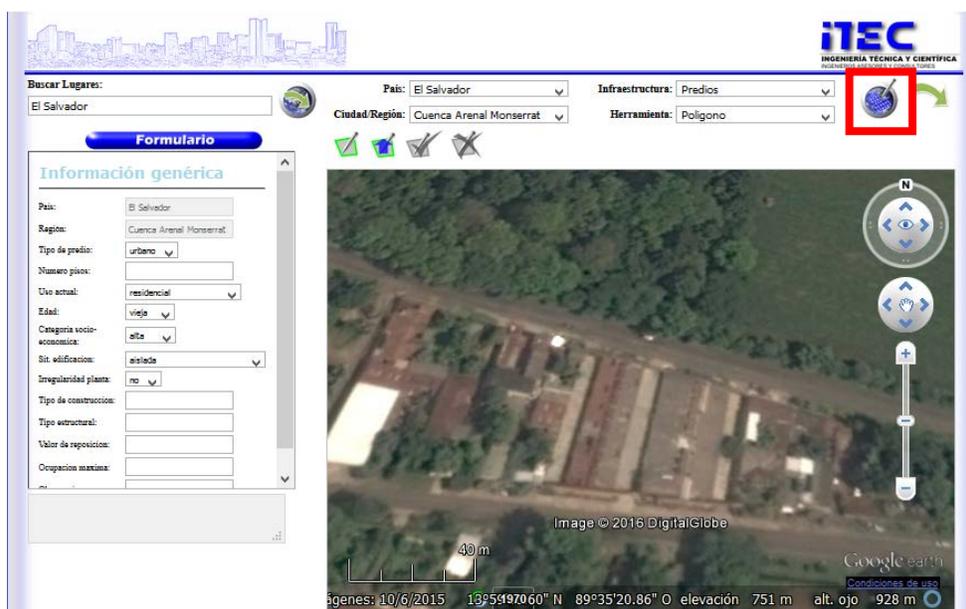


Figura 3.10 Botón actualizar vista.

Fuente: Elaboración propia, mediante el uso de la aplicación web.

Si en el visor no se realizó el acercamiento debido aparecerá un mensaje de error como el que se muestra en la Figura 3.11; sin embargo, si se tiene el acercamiento debido y no existe ningún levantamiento previo, el mensaje a observar será el que se muestra en la Figura 3.12.

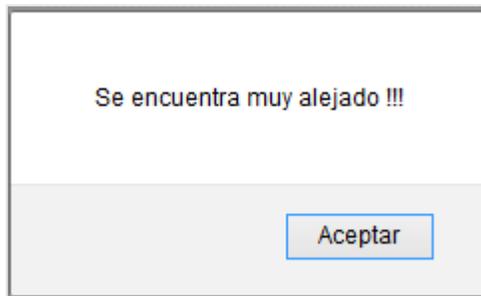


Figura 3.11 Mensaje de alerta sobre el nivel de zoom en el visor.
Fuente: Elaboración propia, mediante el uso de la aplicación web.

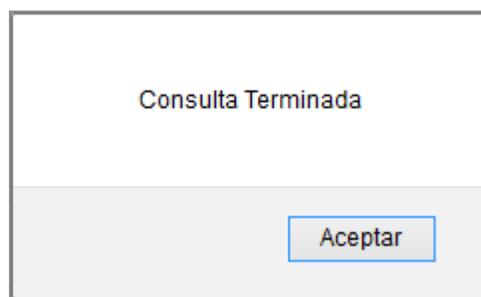


Figura 3.12 Consulta terminada de actualización de la vista.
Fuente: Elaboración propia, mediante el uso de la aplicación web.

4. Digitalización de un nuevo polígono: Para la digitalización de un nuevo polígono es necesario realizar un acercamiento al elemento expuesto, de manera que todos sus vértices se vean bien definidos; se debe dar clic en el ícono *Nueva Forma* (véase Figura 3.13) y el mismo cambiará a un color gris, de estado activo, señal para empezar a dibujar los vértices del predio y así definir su geometría (véase figura 3.14). Para cerrar el polígono se debe presionar al mismo tiempo la tecla *Ctrl* y el botón izquierdo del ratón.

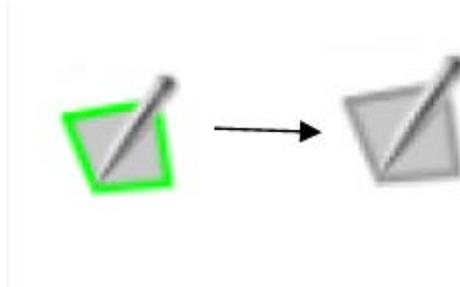


Figura 3.13 Icono Nueva Forma habilitado.

Fuente: Elaboración propia, mediante el uso de la aplicación web.

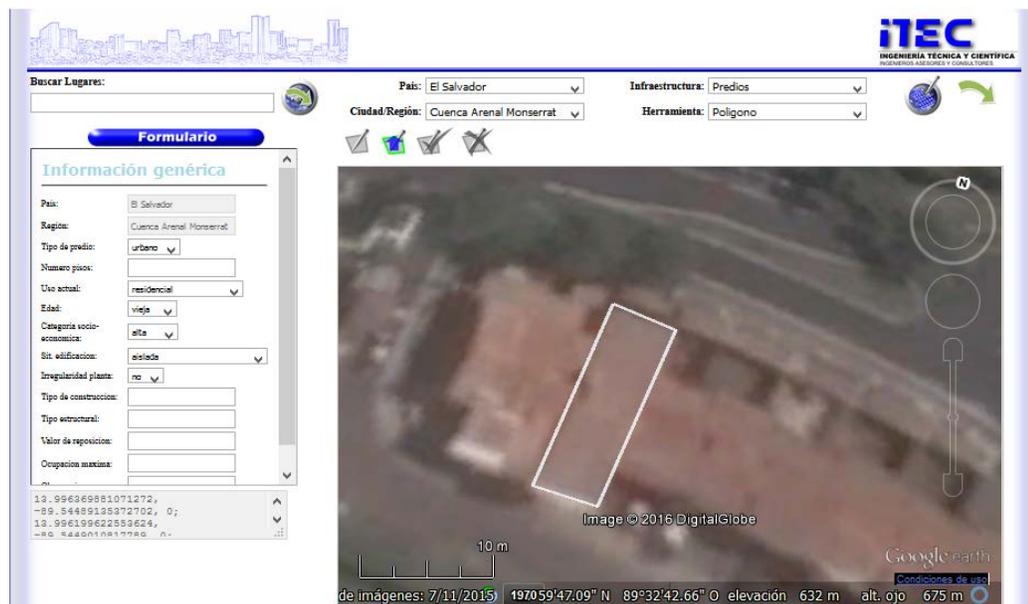


Figura 3.14 Creación de un nuevo polígono.

Fuente: Elaboración propia, mediante el uso de la aplicación web.

5. Modificación de los vértices del polígono: Si fuese necesaria la modificación de los vértices de un polígono, se debe presionar al mismo tiempo la tecla Alt y el botón izquierdo del ratón; borrando el último vértice definido (véase Figura 3.15). Al realizar la misma combinación cuantas veces sea necesaria, se borrarán los vértices digitalizados en el orden que fueron creados.

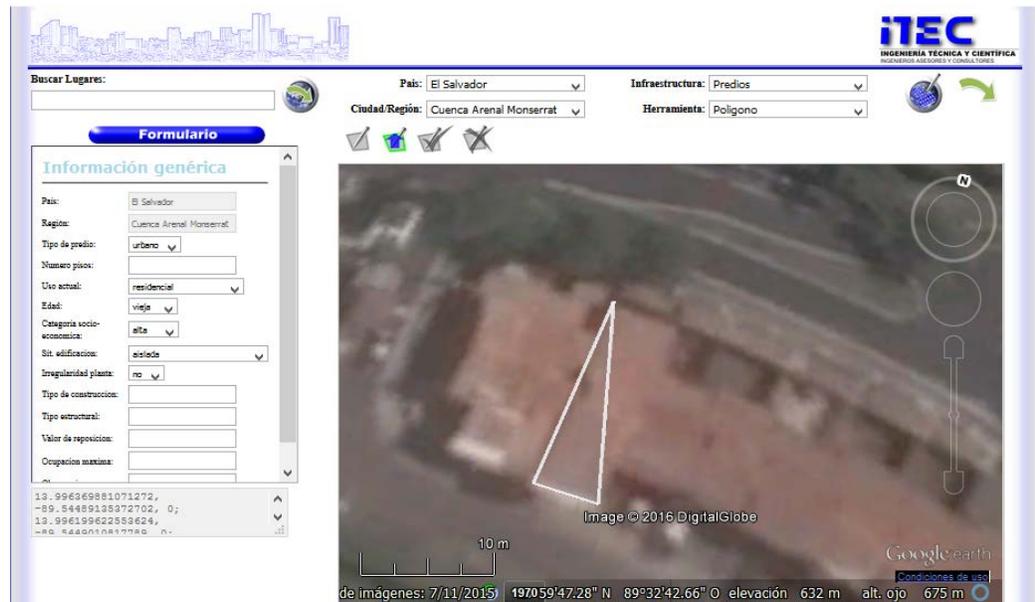


Figura 3.15 Modificación de los vértices de un polígono.

Fuente: Elaboración propia, mediante el uso de la aplicación web.

6. Eliminación de un polígono: Antes de proceder a eliminar un polígono, se debe verificar que el icono Nueva forma se encuentre deshabilitado. Se debe dar clic en el ícono Actualizar Vista y posteriormente se selecciona el polígono a eliminar haciendo clic en el mismo, se desplegará una etiqueta con el número de registro asignado al polígono en la base de datos, de esta forma se habilitará la opción Eliminar Registro (véase Figura 3.16) , posteriormente se deberá hacer clic en el ícono Eliminar registro y mostrará un cuadro de diálogo en el que se debe introducir el código mostrado (véase figura 3.17), finalmente el polígono habrá sido eliminado.



Figura 3.16 Ícono Eliminar Registro habilitado.

Fuente: Elaboración propia, mediante el uso de la aplicación web.

Figura 3.17 Cuadro de diálogo para la eliminación de polígonos.

Fuente: Elaboración propia, mediante el uso de la aplicación web.

7. Formulario: Al finalizar de definir los vértices de la infraestructura, se le deben asignar ciertas características básicas que solicita el formulario ubicado en el recuadro del lado izquierdo de la ventana (véase Figura 3.18), dichos campos del formulario se definen a continuación:
 - a) País: Dicha información es asignada por defecto en el formulario, una vez se haya seleccionado en el menú desplegable.
 - b) Región: Al igual que el país, la información de región aparece asignada por defecto luego de ser seleccionada en el menú desplegable.
 - c) Tipo de predio: En dicho campo se define si la infraestructura se encuentra en una zona rural o urbana.

- d) Número de pisos: Corresponde a un número entero mayor que uno (1), el cual es de suma importancia al momento de determinar el sistema estructural de la edificación.
- e) Uso actual: Clasifica al inmueble según su destino económico, existen opciones predefinidas (residencial, comercial, industrial, institucional, asentamiento legal, asentamiento ilegal, etc.).
- f) Edad: Permite asignar un modificador al comportamiento asignado a la infraestructura, debido a materiales, códigos, prácticas constructivas, etc.
- g) Categoría Socio-económica: El presente dato se toma en cuenta al asignar el valor económico del inmueble y la ocupación del mismo. Las categorías que por defecto posee la aplicación son: baja, media y alta.
- h) Situación de la edificación: Permite identificar si la respuesta esperada por el inmueble podría verse afectada al encontrarse con estructuras adyacentes, con las que pudiese producirse un golpeteo o torsión. Las opciones disponibles por defecto son: Encajonada lateralmente, en esquina y aislada.
- i) Irregularidad en planta: Las opciones que se despliegan son sí o no, debido a que si la infraestructura presenta irregularidad, se tendrá en cuenta para caracterizar su comportamiento.
- j) Tipo de construcción: Se refiere a la tipificación de edificaciones descritas al momento de elaborar las Curvas de Vulnerabilidad, ejemplo de ello pueden ser: Mixto y Precario.

- k) Tipo estructural: Se debe indicar el material del cual están conformadas las edificaciones.
- l) Valor de reposición: Se debe indicar el valor de reposición del inmueble.
- m) Ocupación máxima: Dicha información es con fines de estimar la población expuesta que puede verse afectada por un evento determinado.
- n) Observaciones: Si fuese necesario realizar una observación del inmueble, se puede realizar en este campo.

Figura 3.18 Formulario.

Fuente: Elaboración propia, mediante el uso de la aplicación web.

8. Añadir registró a la base de datos: Luego de haber definido la geometría de la infraestructura y haber completado la información del formulario, se deberá dar clic sobre el ícono Anadir Registro (véase Figura 3.19) para que dicha información sea almacenada en la base de datos. Al almacenar

el registro en la base de datos, el polígono de la infraestructura digitalizado cambiará su color blanco a un color definido según su destino económico(véase Figura 3.20):

- Azul: Residencial
- Amarillo: Comercial
- Verde: Industrial
- Naranja: Institucional



Figura 3.19 Icono añadir registro habilitado.

Fuente: Elaboración propia, mediante el uso de la aplicación web.

Figura 3.20 Definición de color del polígono digitalizado según su destino económico.

Fuente: Elaboración propia, mediante el uso de la aplicación web.

Si se desea observar la información asignada a un polígono, se recomienda realizar una actualización de elementos digitalizados en el visor (procedimiento indicado en el numeral 3) y posteriormente seleccionar el polígono y en el formulario aparecerán sus propiedades (véase Figura 3.21).

Si se seleccionara el ícono Añadir registro y no se posee ningún polígono definido, la aplicación mostrará un mensaje de error, al cual se le debe dar clic en Aceptar y posteriormente definir la geometría del elemento tal como se indica en el numeral 4.

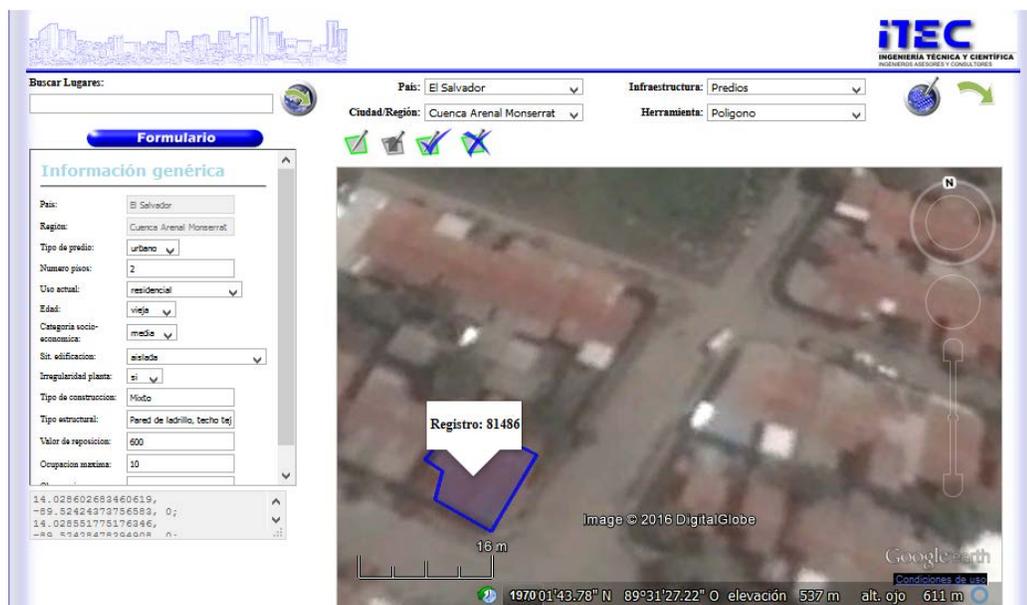


Figura 3.21 Visualización de la información asignada a un polígono.

Fuente: Elaboración propia, mediante el uso de la aplicación web.

9. Modificación de la información del formulario: Para poder modificar la información del formulario correspondiente a un polígono, se debe verificar que el ícono Nueva Forma se encuentre inhabilitado para poder dar clic sobre el polígono y modificar el formulario; automáticamente el ícono

Actualizar Registro se habilitará, cuando se haya finalizado la modificación se deberá dar clic en el ícono Actualizar Registro, posteriormente aparecerá una ventana de diálogo que genera un código, el cual se deberá digitar y dar clic en la opción aceptar (véase Figura 3.22), finalizando de esta manera la modificación (véase Figura 3.23).

Figura 3.22 Solicitud de código para la modificación de información de un elemento.

Fuente: Elaboración propia, mediante el uso de la aplicación web.

Figura 3.23 Modificación de la información de un polígono.

Fuente: Elaboración propia, mediante el uso de la aplicación web.

10. Descargar registros: Para descargar la información de los predios digitalizados, se debe hacer clic sobre el ícono *Descargar Registros*, apareciendo inmediatamente un cuadro de diálogo indicando las opciones de abrir y guardar el archivo (véase Figura 3.24). La información será descargada en formato *.csv, compatible con Microsoft Excel y puede ser utilizado como base de datos en un sistema georeferencial. Los campos registrados en archivo corresponden a los ingresados en el formulario descrito en el numeral 7.

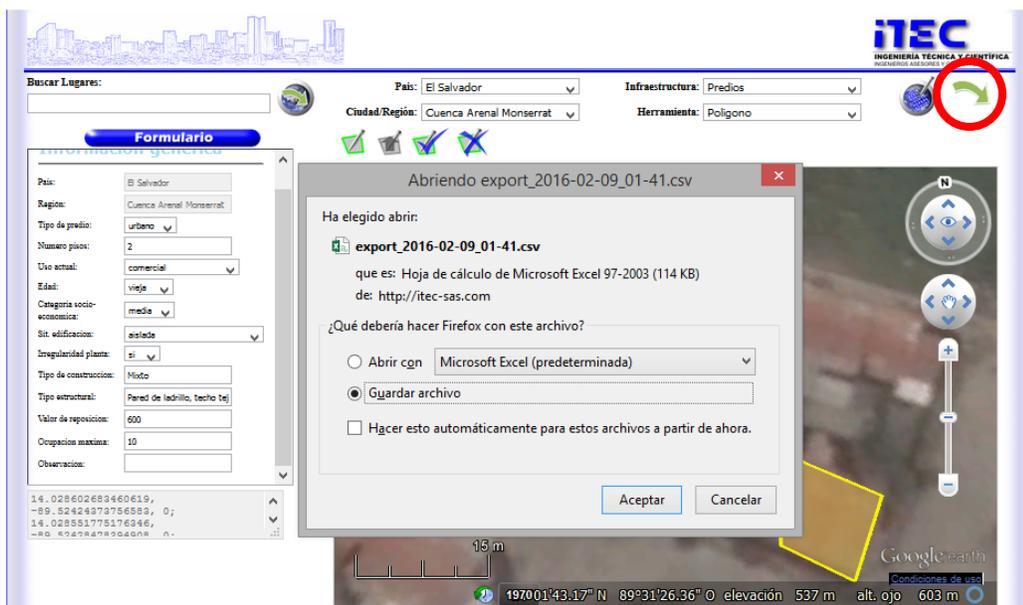


Figura 3.24 Descarga de registros de la base de datos.

Fuente: Elaboración propia, mediante el uso de la aplicación web.

3.5.4 MÓDULO DE DAÑOS Y PÉRDIDAS

El análisis de riesgo probabilista se desarrolla con base en los eventos de amenaza generados estocásticamente y el inventario de elementos expuestos con sus funciones de vulnerabilidad correspondientes.

El programa CAPRA-GIS está orientado al cálculo de riesgos por amenazas naturales, por lo que permite la visualización de información correspondiente a archivos de amenaza y exposición, y ejecuta con base a dicha información el análisis de riesgo. Su objetivo fundamental es el de determinar las distribuciones de probabilidad de pérdidas que pueden sufrir los elementos expuestos a consecuencia de diferentes escenarios de amenaza. La Figura 3.25 muestra el entorno del software CAPRA-GIS.

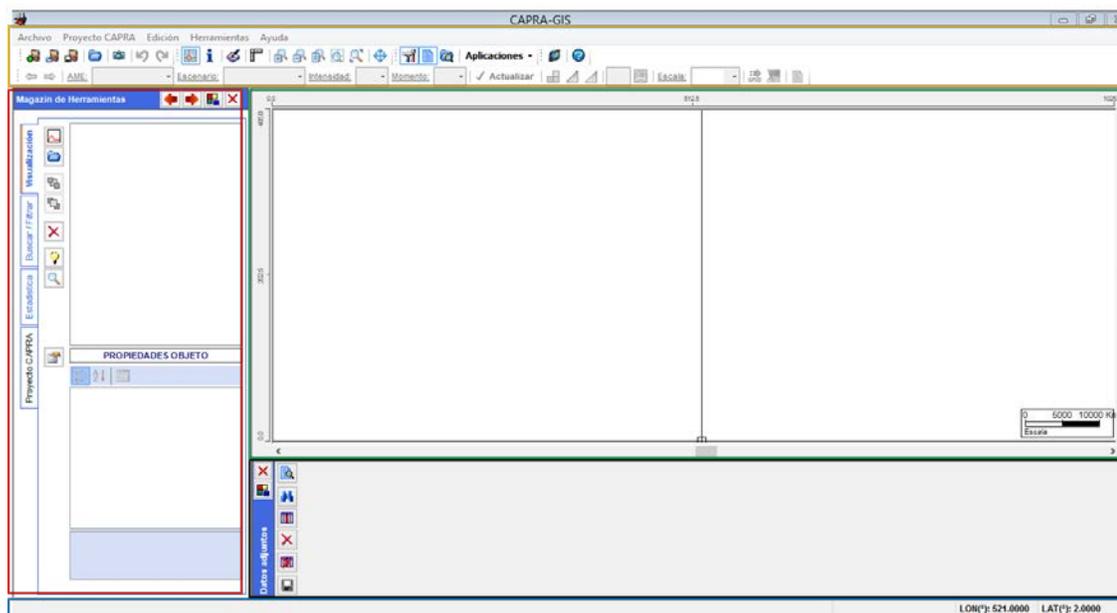


Figura 3.25 Vista General del Programa CAPRA-GIS.

Fuente: Elaboración propia, mediante el uso de la aplicación web.

La pantalla principal del software CAPRA-GIS está compuesta por cinco áreas:

1. Área de herramientas y menús.
2. Área de presentación geográfica.
3. Área de selección, control de visualización y cálculo.
4. Área de presentación de datos georeferenciados y
5. Área de barra de estado y mensajes de procesamiento.

Características del Programa CAPRA-GIS

1. Permite la visualización geográfica vectorial y ráster de archivos correspondientes al análisis de riesgo en formato Shape, AME y GRD.
2. Vincula los archivos de amenaza, exposición y vulnerabilidad.
3. Permite la edición de las propiedades gráficas de la información visualizada.
4. Se excluye la edición de los archivos tipo AME o GRD y de los componentes geográficos de los archivos tipo Shape.

Para el análisis de pérdidas asociado a un evento determinado, la pérdida económica se obtiene de multiplicar el porcentaje de daño obtenido del módulo de vulnerabilidad por el valor de reposición del bien en riesgo; dicha operación debe repetirse para cada tipo de activo, en cada localización, para posteriormente integrar las pérdidas.

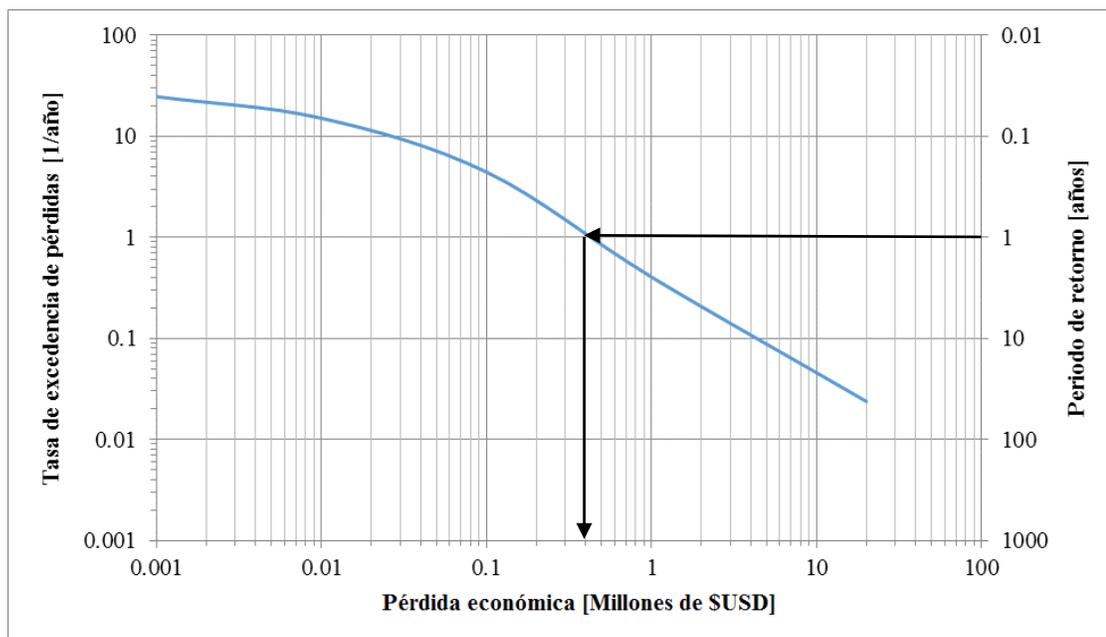
Según el Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-1: COMPONENTES PRINCIPALES DEL ANÁLISIS DE RIESGO las principales medidas del riesgo en términos económicos se definen de la siguiente manera:

Pérdida Anual Esperada: la PAE se calcula como la suma del producto entre las pérdidas esperadas para determinado evento, y la probabilidad de ocurrencia de dicho evento en un periodo de un año, para todos los eventos estocásticos considerados. En términos probabilistas, la PAE es la esperanza matemática de la pérdida anual.

Prima Pura de Riesgo: la PPR corresponde al valor de la PAE dividido por el valor de reposición del activo. Indica el costo que debe ser pagado anualmente para cubrir las pérdidas esperadas en un evento futuro. Se expresa en porcentaje o milésimas del valor de reposición.

Curva de Excedencia de Pérdida (CEP): La CEP representa la frecuencia anual promedio con que determinada pérdida económica se verá excedida (véase Gráfica 3.8). Es la medida más importante en el manejo del riesgo, dado que brinda información básica para la planeación y destinación de recursos necesarios para cumplir con los objetivos de gestión particulares. La CEP se puede calcular a partir del mayor evento probable en un año, o de manera uniforme para todos los eventos posibles, en función de su periodo de retorno. Generalmente se prefiere el segundo enfoque, dado que permite considerar más de un evento catastrófico al año.

Por ejemplo, se puede observar que para un período de retorno de 1 año para el evento mostrado en la Gráfica 3.8, el valor de pérdida anual que se puede obtener es de USD\$ 0.4 millones de dólares aproximadamente.



Gráfica 3.8 Ejemplo de Curva de excedencia de pérdidas.

Fuente: (BID, 2014)

Pérdida Máxima Probable (Probable Maximum Loss): la PML representa el valor de pérdida global en el portafolio para una tasa de excedencia dada. Dependiendo de la capacidad de la entidad para manejar el riesgo, se puede optar por gestionar pérdidas hasta determinado periodo de retorno.

CAPÍTULO 4:

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO CAPRA

A LA CUENCA DEL RÍO SUCIO

4.1 INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas se ha incrementado la vulnerabilidad en nuestro país; por lo que el desarrollo de nuevos proyectos de infraestructura ha hecho que incremente el número de activos expuestos; y siendo El Salvador un país afectado por una gran diversidad de fenómenos naturales, desastres recientes han resultado en pérdidas significativas. Por ejemplo en Octubre de 2011, la Depresión Tropical 12E dejó pérdidas económicas de 840,4 millones de dólares. Debido a la necesidad que surge de la cuantificación de riesgo de desastre en los procesos de planificación; se han incluido en los presupuestos algunas partidas para la atención a emergencias; así como también para la planificación referida a la mitigación de riesgo; sin embargo, en muchos de ellos no se contabilizan las pérdidas probabilísticas potenciales por fenómenos naturales; por lo que se carece de la información necesaria para considerar y evaluar alternativas para reducir o financiar dichas pérdidas. Consecuencia de ello, las políticas encaminadas hacia la reducción de riesgo no reciben realmente la atención que requieren (Probabilistic Risk Assessment Program, Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-1: COMPONENTES PRINCIPALES DEL ANÁLISIS DE RIESGO, 2011).

Es por ello que el Ministerio de Medio ambiente y Recursos Naturales, como parte de los esfuerzos desarrollados en el análisis de la problemática de inundaciones, optó por trabajar con el sistema de Evaluación Probabilista de Riesgo, dando

inicio a la aplicación del software con la Modelación Probabilística en la cuenca del río Jiboa, Sensunapán y Arenal de Monserrat (Jaimes, y otros, 2011).

En el presente capítulo se realizará la aplicación de los módulos de amenaza, vulnerabilidad y exposición de la Plataforma CAPRA para la evaluación de la cuenca del río Sucio. Se espera que la presente evaluación sea base para el Análisis Probabilista de Riesgo de inundación de la cuenca.

4.2 APLICACIÓN DEL MÓDULO DE AMENAZA A LA CUENCA DEL RÍO SUCIO

En la cuenca del río Sucio, según los datos históricos de la base de datos (DesInventar, 2011) la mayor causa de pérdidas tanto humanas como materiales ha sido ocasionada por lluvias intensas, las cuales han generado inundaciones y deslizamientos en los municipios que la conforman. Los daños ocasionados por las lluvias intensas afectaron viviendas, terrenos agrícolas y vías terrestres. Además la cuenca ha sido afectada por vientos huracanados y vendavales, ocasionando el desprendimiento de techos, dañando cultivos y vegetación en general, así como la suspensión del servicio de energía eléctrica en la zona. Aunque con menor frecuencia, los sismos han afectado la zona en estudio, siendo éstos de origen volcánico como los sismos precursores de la erupción del volcán de San Salvador en el año 1917, o sismos de subducción que afectan a todo el país como el terremoto de enero del 2001. Los terremotos han causado el colapso de edificaciones, así como deslizamiento de suelos en zonas con

pendientes pronunciadas. Debido a su proximidad a algunos de los volcanes activos del país, durante el siglo pasado se registraron al menos dos erupciones (San Salvador 1917 e Izalco 1966), las cuales han afectado a las zonas aledañas de los mismos con la caída de cenizas y flujos volcánicos.

El presente apartado está orientado a la generación de la amenaza de lluvias en la cuenca del río sucio, tomando como referencia los datos de lluvia de los años 1971 a 2014 registrados por ocho estaciones pluviométricas ubicadas dentro de la cuenca.

4.2.1 ANÁLISIS DE DATOS DE LLUVIA

Para realizar el análisis y relleno de datos de lluvia se ha utilizado el método de la recta de regresión, mediante el cual se han calculado los coeficientes de correlación entre estaciones con altitud similar y que se encuentran relativamente cerca. Se ha seleccionado como estación índice aquella que poseía la mayor cantidad de datos completos; ésta fue tomada como base para realizar el relleno de datos de las estaciones con las cuales poseía un índice de correlación más alto entre sí. El procedimiento se repite hasta realizar el relleno de datos de todas las estaciones en estudio.

En la Figura 4.1 se presenta la ubicación de las estaciones pluviométricas utilizadas para el análisis de la cuenca del río Sucio y en la Tabla 4.1 se presenta su ubicación geográfica y la elevación de cada una de ellas.

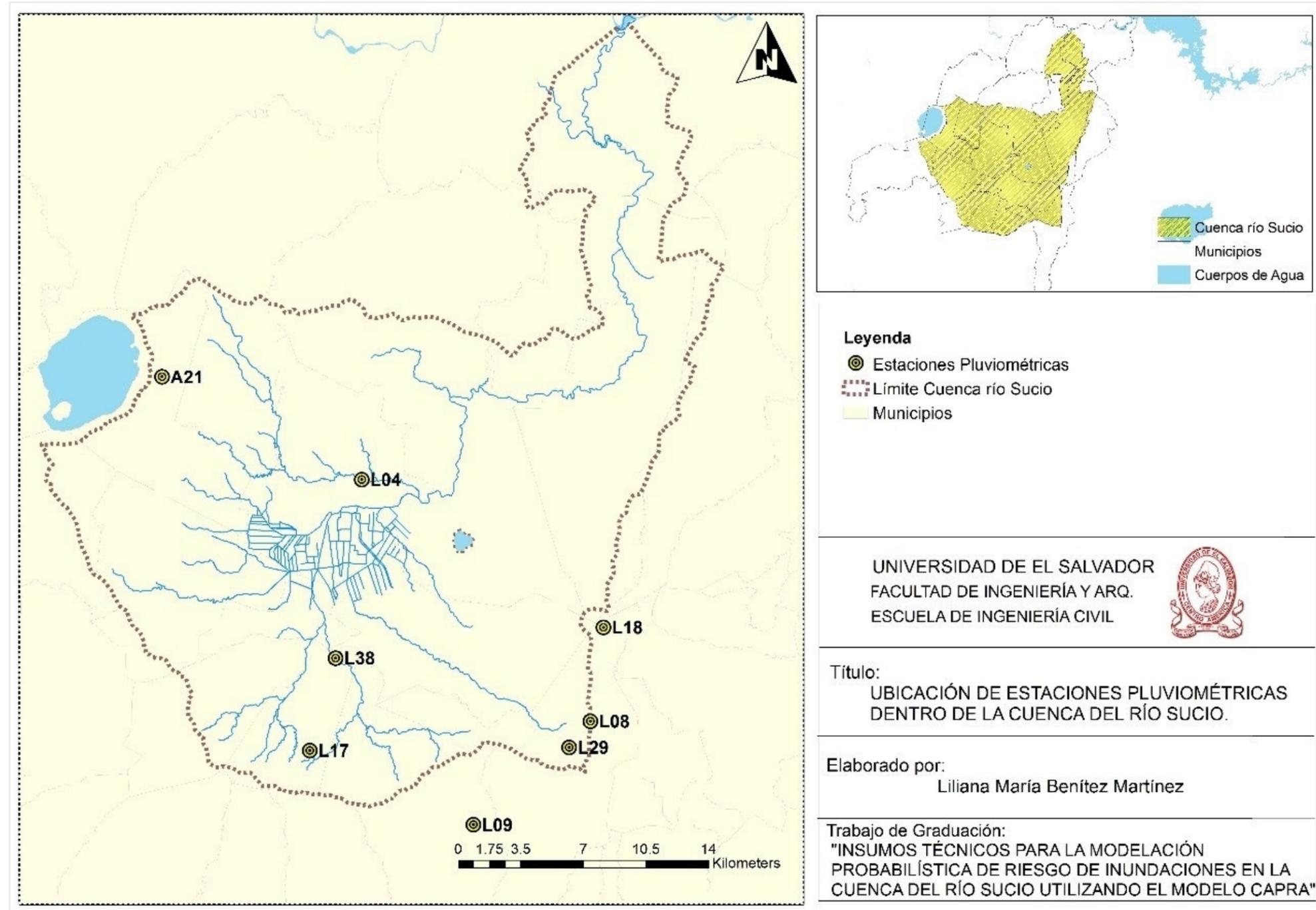


Figura 4.1 Ubicación de las estaciones pluviométricas dentro de la cuenca del río Sucio.
 Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.1 Ubicación geográfica de las estaciones pluviométricas utilizadas en el estudio de la cuenca del río Sucio.

Código	Long	Lat	Elevación	Nombre de Estación	País
A21	444871.00	304349.00	880.00	Finca San José Monterrey	El Salvador
L04	456031.00	298612.00	460.00	San Andrés	El Salvador
L08	468809.00	285134.00	965.00	Santa Tecla	El Salvador
L09	462266.80	279362.11	1033.00	Comasagua, Fca.El Rosario	El Salvador
L17	453120.00	283498.00	920.00	Jayaque,Bfcio.El Paraíso	El Salvador
L18	469535.04	290372.86	1800.00	Boquerón	El Salvador
L29	467628.00	283675.00	820.00	Finca Los Cedros	El Salvador
L38	454572.00	288658.00	500.00	Finca San Agustín	El Salvador

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se describe brevemente el procedimiento utilizado para el relleno de datos tomando como referencia los datos de lluvia de 7 meses registrados en las estaciones previamente descritas:

1. Dentro de los datos de lluvia, se deben identificar las estaciones con mayor cantidad de datos completos, ya que una de ellas puede ser utilizada como estación índice para realizar el relleno de datos de una estación con datos incompletos. Nótese en la Tabla 4.2 que casi todas las estaciones poseen datos completos, a excepción de la columna que corresponde al registro de la estación L18, la cual carece de datos en los meses de mayo y septiembre.
2. Para la selección de la estación índice se deben descartar las estaciones que no posean elevación similar a la estación con datos incompletos, así como también aquellas que se encuentren demasiado alejadas de ésta.

3. Para las estaciones seleccionadas por su cercanía a la estación con datos incompletos, se deberá calcular el coeficiente de correlación tal como se indicó en la ecuación 3.1. Según la Tabla 4.1 las estaciones que poseen mejor relación en cuanto ubicación y altitud respecto a la estación L18, son las estaciones L08, L09 y L29; por lo tanto, se procedió a calcular el coeficiente de correlación para cada una de ellas. En la última fila de la Tabla 4.2 se presentan los resultados del coeficiente de correlación de las estaciones L08, L09 y L29 respecto a la estación L18.

Tabla 4.2 Datos de lluvia resgistrados por los pluviómetros ubicados dentro de la cuenca del río Sucio.

FECHA\EST.	A21	L04	L08	L09	L17	L18	L29	L38
01/04/1971	0	0	5.1	0	0	0.9	0	0
02/04/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
03/04/1971	0	0	0	0	0	0	1	0
04/04/1971	0	0.2	0	3.8	0	2	1	0
05/04/1971	0	0	0	0.2	0	0	2	35
06/04/1971	5	8.8	2.3	0	0	19	0	0
07/04/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
08/04/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
09/04/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
10/04/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
11/04/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
12/04/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
13/04/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
14/04/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
15/04/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
16/04/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
17/04/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
18/04/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
19/04/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
20/04/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
21/04/1971	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia con base en los datos de lluvia proporcionados por la DGOA.

FECHA\EST.	A21	L04	L08	L09	L17	L18	L29	L38
22/04/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
23/04/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
24/04/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
25/04/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
26/04/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
27/04/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
28/04/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
29/04/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
30/04/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
01/05/1971	0	0	0	0	0		0	0
02/05/1971	0	0	0	0	0		0	0
03/05/1971	3	0	0	0	0		0	8
04/05/1971	28	3.7	0	0	0.6		0	2
05/05/1971	0	28.2	0	0	0		0	0
06/05/1971	0	0	0	0	0		0	0
07/05/1971	0	0	0	0	5		0	0
08/05/1971	0	2	0	0	0		7	18
09/05/1971	6	39.5	16.5	9.5	15		0	0
10/05/1971	0	0	0.5	0	0		0	0
11/05/1971	0	0	0	0	0		5	0
12/05/1971	0	0	0	0	0		19	65.5
13/05/1971	33	29.2	30.2	9.3	30.6		27	11.5
14/05/1971	0	0	1	0	16.6		3	1
15/05/1971	0	0	0	0	28.4		16	15
16/05/1971	0	24	13.2	2.4	7		0	0
17/05/1971	0	0	2	1	1.3		18	29
18/05/1971	45	37	11.5	13	33		0	3
19/05/1971	0	24	0	0	4.1		0	0
20/05/1971	11	0	0	0	0		0	0
21/05/1971	0	0	0	0	0		0	1
22/05/1971	8	0	0	0	1.1		0	0
23/05/1971	0	0	0	0	0		0	0
24/05/1971	0	0	1	0	0		1	0
25/05/1971	0	0.9	23.9	0	3.8		6	65
26/05/1971	37	26.5	9.6	2.2	12.3		8	1
27/05/1971	0	0	40.7	31	3.1		0	0
28/05/1971	0	0	0	0	0		25	45
29/05/1971	34	2.3	36.6	76	17		4	0
30/05/1971	2.5	1	0	0	0		0	0

Continuación de Tabla 4.2

FECHA\EST.	A21	L04	L08	L09	L17	L18	L29	L38
31/05/1971	0.2	0	2.5	0	0.4		0	1
01/06/1971	3	0.7	2.5	0	2.5	2	30	33
02/06/1971	10.9	43.1	9.2	8.1	28.8	12	3	4
03/06/1971	0	3.5	4	1.2	3.2	2	8	24
04/06/1971	5	18.1	28.7	14.4	23.3	22	4	34
05/06/1971	0	9.5	0.5	0	2.7	4.2	5	15
06/06/1971	4	19.4	10.4	6.4	22	0	4	0
07/06/1971	4	3.1	11.2	2.3	0.3	6.5	0	0
08/06/1971	8	7	0.2	0	0	0	12	11
09/06/1971	12	14	10.6	14.5	13.2	12.6	1	3
10/06/1971	7	14.3	1.8	0.5	3.3	0	0	0
11/06/1971	1	0.5	0	0	0	2	22	44
12/06/1971	22	51.9	49.5	25.1	37	28	12	21
13/06/1971	50	18	3.6	8	23	5	53	32
14/06/1971	26	11.4	20.8	81.7	45	26	11	8
15/06/1971	10	6.7	13.4	9.5	9.5	9	7	4
16/06/1971	7	6.5	3.3	4.5	6.1	0	15	20
17/06/1971	2	2.5	6.9	13.9	23.5	8	5	0
18/06/1971	19	1.2	4.3	12	17.6	4	0	0
19/06/1971	3	0	0	0	0	0	6	5
20/06/1971	18	10.6	10.9	5	5.1	10.2	0	0
21/06/1971	0.1	0	0	0	0	0	1	0
22/06/1971	0.7	1	1.3	0	2.4	7.2	0	3
23/06/1971	22	9.5	0	0	0	0	12	2
24/06/1971	1	8	0	2.2	12.5	0	8	3
25/06/1971	16	21.9	4.6	1.5	3.8	9	9	2
26/06/1971	31	6.2	10.4	8	3	8	3	0
27/06/1971	0.6	3	0	0	0	0	0	25
28/06/1971	51	13	0.2	0	9.9	0	27	39
29/06/1971	25	18.2	19.7	17.7	20	16	14	30
30/06/1971	2	21	19	15	13.1	29	5	1
01/07/1971	6.1	1	2	34	2.9	4.7	0	0
02/07/1971	11.2	16	0	0	0	0	5	23
03/07/1971	12.3	3.8	22	7	3.6	4.5	8	0
04/07/1971	2.2	0	0.8	0	0.1	0	0	20
05/07/1971	13	12.5	14.5	3.1	14.6	29.3	1	0
06/07/1971	0	0	7.4	4.5	9	1.5	0	0
07/07/1971	0	0	0	0	0	1.7	0	0
08/07/1971	0	0	4.3	1	0	2	9	13

Continuación de Tabla 4.2

FECHA\EST.	A21	L04	L08	L09	L17	L18	L29	L38
09/07/1971	26.7	26	17.3	11.2	11.7	20	31	9
10/07/1971	18.7	43.5	31.8	31	12.5	19	12	11
11/07/1971	21.8	61.3	30.7	20	6.3	43	0	6
12/07/1971	34.6	20	4.8	2	4.5	8	8	20
13/07/1971	6.2	5	15	7.4	9.6	14	36	52
14/07/1971	32.5	28	26.9	44.6	26.5	40	8	3
15/07/1971	0	0	12.7	3.2	8.4	19	19	60
16/07/1971	0	0	16	48	18.3	2.8	31	9
17/07/1971	4.6	12	21.6	93.8	19.7	5.2	12	6
18/07/1971	0.8	4.7	3.8	4	8.3	7.8	0	0
19/07/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
20/07/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
21/07/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
22/07/1971	0	0	0	0	0	0	0	0
23/07/1971	0	0	0	0	0	0	45	31
24/07/1971	43.8	39.5	35.3	34	94.4	39	22	26
25/07/1971	11.7	11.7	55.1	17.9	20	16	0	13
26/07/1971	3.9	3	2.1	2	30	1.2	0	0
27/07/1971	0	2.5	0.8	1.7	5.3	0	0	0
28/07/1971	0	0	0	0	0	0	21	28
29/07/1971	23.9	18	23.1	20	19.5	19	30	0
30/07/1971	0	1	0.8	0	18.8	0.5	20	11
31/07/1971	28.7	11	15.3	9.7	7	12.8	55	25
01/08/1971	42	8.4	13.2	7.5	21.8	14.1	0	21
02/08/1971	1.7	8	14.4	15	36.6	8.8	25	35
03/08/1971	28.2	20	33.1	18.2	22.2	39	5	4
04/08/1971	8.2	8.5	8.4	3.5	3.5	8.5	25	20
05/08/1971	8.2	11.8	5.3	19	16	0.4	0	0
06/08/1971	0	0	0	1	1.9	0	21	6
07/08/1971	8	5.8	0.5	25.6	22.5	1.3	29	14
08/08/1971	20	10.5	20.8	44.2	29.5	17.6	0	5
09/08/1971	14	21.5	7.3	5.5	3.6	10.3	0	0
10/08/1971	0.1	0	0	0	0	0	0	5
11/08/1971	1.3	13	3.6	0.5	0	1.9	0	0
12/08/1971	0	0	0	0	0	0	12	11
13/08/1971	2.7	7.6	24.1	13.3	13.4	30.6	7	45
14/08/1971	1	8.8	28.8	22.8	4.4	0.6	12	4
15/08/1971	3.3	2	6.1	12.7	5.4	9.5	0	2
16/08/1971	0	3.2	3.8	3.2	1	3.2	6	3

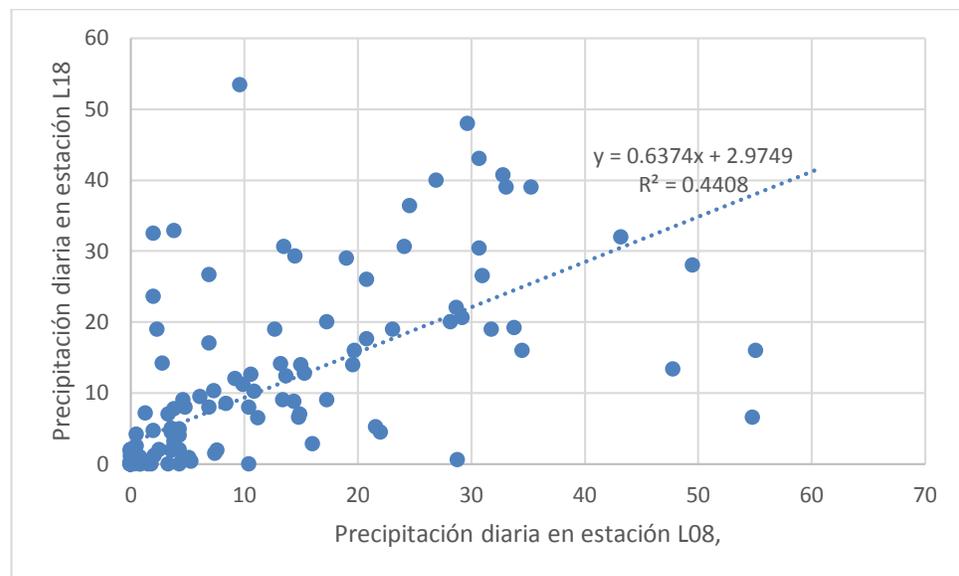
Continuación de Tabla 4.2

FECHA\EST.	A21	L04	L08	L09	L17	L18	L29	L38
17/08/1971	0.1	2.5	3.6	11.2	3.7	4.5	0	2
18/08/1971	0.4	10	2	8	1.1	23.6	26	33
19/08/1971	27.6	47.5	32.8	17	41.7	40.7	10	26
20/08/1971	58	34	7.6	9.2	9	1.9	10	15
21/08/1971	6.9	29.8	17.3	10.2	13.7	9	61	40
22/08/1971	40.8	44	29.7	46.9	39.6	48	0	0
23/08/1971	3.1	33	14.9	0	3	7	22	3
24/08/1971	8.1	0.8	19.6	25.3	7.5	14	0	20
25/08/1971	22.3	50.8	28.2	17.3	17.6	20	22	12
26/08/1971	1.7	9.8	0	0	0.4	0	5	2
27/08/1971	1.2	2.2	4.3	16.6	9.7	0	0	0
28/08/1971	1.8	0.8	0.5	0	2.5	2.5	30	40
29/08/1971	10.3	30	47.8	33.6	25.8	13.4	0	5
30/08/1971	25.1	13.5	4.3	1.8	12.4	4.9	39	29
31/08/1971	0	0	54.8	1	97.3	6.6	3	3
01/09/1971	4.6	1.6	3.3	2.8	7.8		4	0
02/09/1971	0.7	1	5.1	8.7	5		10	13
03/09/1971	11.7	19.5	12.7	8.8	8.6		13	15
04/09/1971	21	10.8	18.6	21.9	15.2		10	3
05/09/1971	0	0.4	1	36	20		21	0
06/09/1971	8.2	0	0	14	17.3		30	19
07/09/1971	5.2	12	7.1	38	43		42	15
08/09/1971	10.8	15.4	24.4	36.7	37.7		6	2
09/09/1971	0	0	1.3	15.9	0.3		0	0
10/09/1971	0.9	0	0	0	0		8	0
11/09/1971	10.1	5.3	9.9	19.4	7.8		32	29
12/09/1971	29.1	21	42.2	51.2	22		0	0
13/09/1971	0	1.1	0.5	0.5	0.4		0	0
14/09/1971	0.8	0	0	0	0.5		0	0
15/09/1971	0	0	0	0	0.2		7	5
16/09/1971	0	2	2.3	10	2.4		0	0
17/09/1971	0	0	0	0	0.2		15	5
18/09/1971	14.8	23.9	16.4	9.5	8		12	20
19/09/1971	0	2	22.9	15	20.7		0	0
20/09/1971	0	0	0.2	0	0		46	30
21/09/1971	38.8	28	34.8	21	41		34	65
22/09/1971	49	37.6	60.5	54.7	61.7		0	7
23/09/1971	0	0	0.8	0	0.6		0	0
24/09/1971	0	0	0	0	0.1		22	27

Continuación de Tabla 4.2

FECHA\EST.	A21	L04	L08	L09	L17	L18	L29	L38
25/09/1971	10.7	25	4	26.1	9		5	3
26/09/1971	0	6	0	0	0		0	0
27/09/1971	14.2	18.7	1.6	7.5	8.8		17	31
28/09/1971	18	19	20.3	25.2	27.7		0	0
29/09/1971	30.1	2	1	5	0.3		0	10
30/09/1971	20.9	1.8	0	16	0.4		45	20
01/10/1971	61.6	26	29.2	25	88.1	20.6	0	9
02/10/1971	0	4.6	3.8	3.9	0	32.9	26	0
03/10/1971	33.3	10.4	6.9	18	8.5	26.7	0	20
04/10/1971	3.9	13.5	13.5	20	0.9	30.6	36	6
05/10/1971	10.5	9.2	2	0	14.2	32.5	35	75
06/10/1971	18.5	6.6	43.2	27	4.5	32	53	25
07/10/1971	12.9	20	33.8	40	43.7	19.2	2	5
08/10/1971	0.5	0	1.5	0.5	57.5	0	8	12
09/10/1971	25	7	3.3	5.5	1.4	7	0	8
10/10/1971	0	0	0	0	6.9	0	0	0
11/10/1971	10.9	16.5	30.7	10	0	30.4	8	2
12/10/1971	0	0	2.8	13.2	11.7	14.2	2	0
13/10/1971	1.3	12	0.5	4.6	3.7	1.5	12	2
14/10/1971	5.1	7.8	9.9	2.2	5.9	11.2	8	5
15/10/1971	4.5	10	24.6	17	27.9	36.4	15	14
16/10/1971	37	30	13.7	2	6.3	12.4	50	0
17/10/1971	0.4	1.8		2.6	17.8	3	0	7
18/10/1971	15.2	14	14.8	63.6	2	6.6	7	10
19/10/1971	24.8	9.8	34.5	12.8	38	16	26	10
20/10/1971	6	12.3	31	21.3	6.4	26.5	10	11
21/10/1971	13.1	1.2	9.6	4.6	15.7	53.4	0	0
22/10/1971	0	1	0	3.8	13.8	1.1	0	0
23/10/1971	0	0	0	0	0.8	0	0	0
24/10/1971	0	0	0	0	0	0.3	0	0
25/10/1971	0	0	0	0	0	0.4	0	0
26/10/1971	0	0	0	0	0	0	0	5
27/10/1971	0	0.5	0	0	0	0	0	4
28/10/1971	24.4	9.2	0.8	0	0.6	1	6	0
29/10/1971	0	0	6.9	1.3	0.8	17	0	0
30/10/1971	0	6	0	23.4	0	0	0	0
31/10/1971	0	0	0.8	0	0	0	0	0
Coef. De Correlación			0.663	0.447			0.209	
<i>Continuación de Tabla 4.2</i>								

4. El relleno de datos se realiza utilizando como estación índice aquella en la que se obtiene el mayor coeficiente de correlación. La estación que presentó un mayor índice de correlación respecto a la estación incompleta fue la estación L08, por lo que se creó un gráfico con base a los datos de ambas estaciones y se generó una línea de tendencia que mejor se ajustara a los datos ploteados (véase Gráfica 4.1). Posteriormente se generó la ecuación que define la línea de tendencia, con la cual se procedió a realizar el relleno de datos.



Gráfica 4.1 Gráfico de correlación de datos de lluvia.

Fuente: Elaboración propia.

5. En la Tabla 4.3 y Tabla 4.4 se presenta el relleno de datos realizado mediante el uso de la ecuación de la recta de regresión, para los meses de mayo y septiembre de la estación L18. Es de suma importancia mencionar que se generó una condicionante para el relleno de datos, la

cual consistió en que para cada día de la estación índice con precipitación nula, a la estación en estudio le correspondería un valor de precipitación igual a cero.

Tabla 4.3 *Relleno de datos del mes de Mayo.*

FECHA	L08	L18
01/05/1971	0	0
02/05/1971	0	0
03/05/1971	0	0
04/05/1971	0	0
05/05/1971	0	0
06/05/1971	0	0
07/05/1971	0	0
08/05/1971	0	0
09/05/1971	16.5	13.492
10/05/1971	0.5	3.2936
11/05/1971	0	0
12/05/1971	0	0
13/05/1971	30.2	22.22438
14/05/1971	1	3.6123
15/05/1971	0	0
16/05/1971	13.2	11.38858
17/05/1971	2	4.2497
18/05/1971	11.5	10.305
19/05/1971	0	0
20/05/1971	0	0
21/05/1971	0	0
22/05/1971	0	0
23/05/1971	0	0
24/05/1971	1	3.6123
25/05/1971	23.9	18.20876
26/05/1971	9.6	9.09394
27/05/1971	40.7	28.91708
28/05/1971	0	0
29/05/1971	36.6	26.30374
30/05/1971	0	0
31/05/1971	2.5	4.5684

Fuente: Elaboración propia mediante el uso de la ecuación de la recta de regresión.

Tabla 4.4 *Relleno de datos del mes de Septiembre.*

FECHA	L08	L18
01/09/1971	3.3	5.07832
02/09/1971	5.1	6.22564
03/09/1971	12.7	11.06988
04/09/1971	18.6	14.83054
05/09/1971	1	3.6123
06/09/1971	0	0
07/09/1971	7.1	7.50044
08/09/1971	24.4	18.52746
09/09/1971	1.3	3.80352
10/09/1971	0	0
11/09/1971	9.9	9.28516
12/09/1971	42.2	29.87318
13/09/1971	0.5	3.2936
14/09/1971	0	0
15/09/1971	0	0
16/09/1971	2.3	4.44092
17/09/1971	0	0
18/09/1971	16.4	13.42826
19/09/1971	22.9	17.57136
20/09/1971	0.2	3.10238
21/09/1971	34.8	25.15642
22/09/1971	60.5	41.5376
23/09/1971	0.8	3.48482
24/09/1971	0	0
25/09/1971	4	5.5245
26/09/1971	0	0
27/09/1971	1.6	3.99474
28/09/1971	20.3	15.91412
29/09/1971	1	3.6123
30/09/1971	0	0

Fuente: Elaboración propia mediante el uso de la ecuación de la recta de regresión.

El procedimiento anterior fue aplicado a los datos de lluvia registrados en 43 años en cada una de las 8 estaciones de la zona en estudio. Los datos obtenidos se han utilizado en pasos posteriores para la generación de las amenazas estocásticas.

4.2.2 GENERACIÓN DE CURVAS PADF MEDIANTE EL USO DEL PROGRAMA ERN-AL. Curvas PADF

El programa de la plataforma CAPRA (véase Figura 4.2), genera curvas PADF utilizando como datos de entrada para un procesamiento inicial un archivo de registro de lluvia en formato xls que contenga los datos geográficos de las estaciones que se encuentran en la zona en estudio, así como también los registros de lluvia clasificados por año (véase Figura 4.3 y 4.4); además, solicita un archivo en formato shp que contenga los límites de la zona en estudio en coordenadas geográficas WGS84.

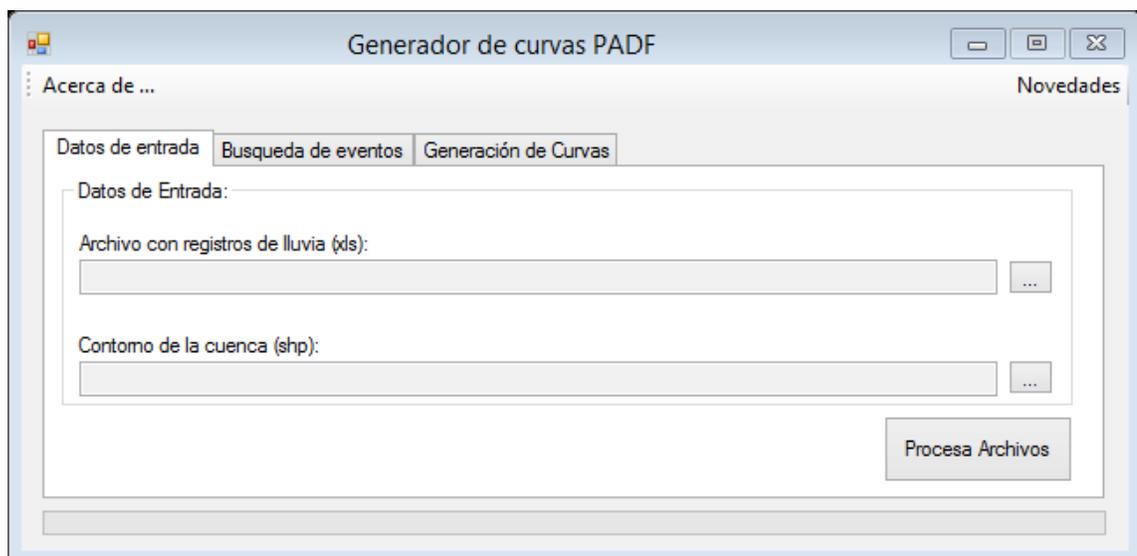


Figura 4.2 Ventana de inicio del programa ERN-AL Curvas PADF.

Fuente: Elaboración propia, mediante la apertura del programa.

	A	B	C	D	E	F
1	USAF-WBAN_ID	LONGITUDE	LATITUDE	STATION NAME	COUNTRY	ELEVACION
2	StationA	-80	5	A		
3	StationB	-80	5.1	B		
4	StationC	-80	5.2	C		
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						

Estaciones 1970 1971 1972 +

Figura 4.3 Formato correcto para la conformación de la base de datos de lluvia.

Fuente: Extraído de la ventana “Nueva versión de las herramientas para la evaluación de la amenaza por lluvia estacional” del sitio web www.ecapra.org.

	A	B	C	D	E	F	G
1	FECHA	StationB	StationC	StationA			
2	01/01/1970	0	0	0			
3	02/01/1970	0	0	0			
4	03/01/1970	0	0	0			
5	04/01/1970	0	0	0			
363	28/12/1970	0	0	0			
364	29/12/1970	0	0	0			
365	30/12/1970	0	0	0			
366	31/12/1970	0	0	0			

Estaciones 1970 1971 1972 +

Figura 4.4 Formato correcto para la conformación de la base de datos de lluvia.

Fuente: Extraído de la ventana “Nueva versión de las herramientas para la evaluación de la amenaza por lluvia estacional” del sitio web www.ecapra.org.

Para el correcto funcionamiento del programa, se requiere que la columna de las fechas (Columna A de la Figura 4.4) posea formato de FECHA, para evitar errores con la configuración regional.

El programa generador de curvas PADF en su pestaña “Búsqueda de Eventos”, solicita las características de los eventos que se desean buscar en el archivo de

entrada (véase Figura 4.5), es por ello que se debe condicionar al programa para la búsqueda de eventos que posean un rango de precipitación y duración; si el programa no encuentra valores dentro del registro de lluvia que cumplan el rango condicionante, arrojará un error y deberá modificarse el rango de precipitación promedio requerido o la duración del evento. A continuación se describe cada una de las opciones de la pestaña “Búsqueda de eventos” del programa Generador de curvas PADF:

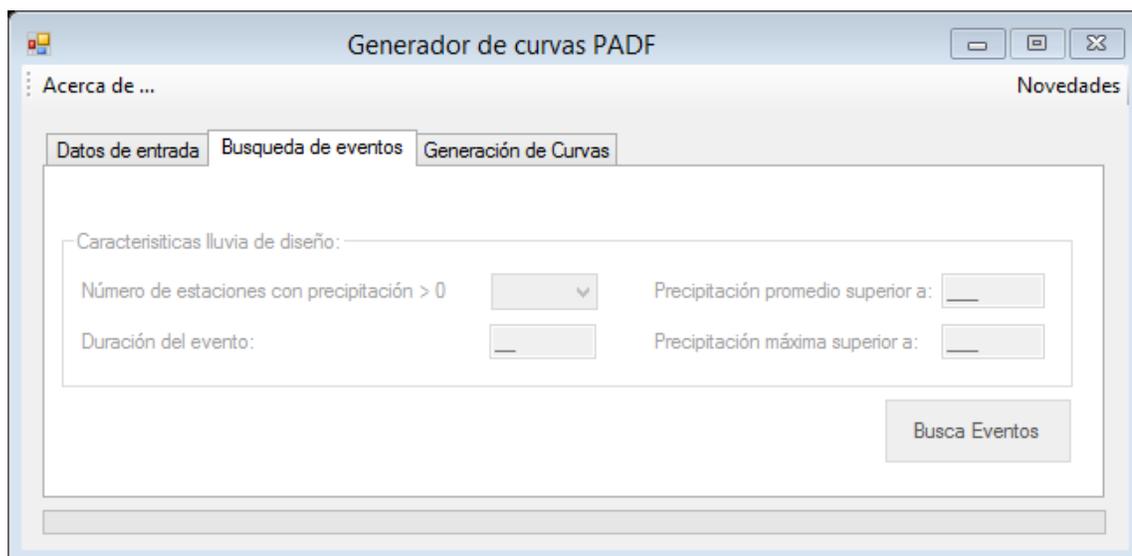


Figura 4.5 Condicionantes para la búsqueda de eventos de lluvia.

Fuente: Elaboración propia, mediante la apertura del programa.

- Número de estaciones con precipitación mayor a cero: En la presente opción se debe especificar el número de estaciones que poseen mayor influencia dentro de la zona en estudio; para esto se recomienda crear un mapa de polígonos de thiesen para visualizar el número de estaciones que generan mayor incidencia en la cuenca.

- Precipitación promedio superior a: Para definir el presente parámetro se debe calcular el promedio diario del total de estaciones que conforman la cuenca; posteriormente se debe buscar el evento que se desea utilizar como base y verificar los valores de lluvia promedio diarios registrados en su duración.
- Precipitación máxima superior a: Para definir el presente parámetro se debe calcular la máxima precipitación diaria del total de estaciones que conforman la cuenca; posteriormente se debe buscar el evento que se desea utilizar como base y verificar los valores de lluvia máximos diarios registrados en su duración.
- Duración del evento: Corresponde a la duración del evento que se desea buscar, que cumpla los rangos definidos tanto en la opción “Precipitación promedio superior a” y “Precipitación máxima superior a” descritas previamente.

Por ejemplo, en el caso de la cuenca del río Sucio, durante la Depresión Tropical 12 E, los pluviómetros registraron los niveles de lluvia mostrados en la Tabla 4.5. La columna encabezada como “PROMEDIO” indica el promedio diario de precipitación de todas las estaciones en la cuenca. La columna encabezada como “MÁXIMO” indica la precipitación máxima diaria de cualquiera de las estaciones de la cuenca.

Como puede observarse desde el día 15 al 17 de octubre se conformó un evento de precipitación con tres días de duración, el cual registró un promedio de

precipitación superior a 70 mm de lluvia y una precipitación máxima superior a 190 mm de lluvia.

Tabla 4.5 Lluvia registrada durante la Depresión Tropical 12 E.

FECHA	A21	L04	L08	L09	L17	L18	L29	L38	PROMEDIO	MÁXIMO
11/10/2011	6.0	3.1	23.5	36.0	21.0	21.0	200.0	37.4	43.5	200.0
12/10/2011	91.0	90.9	147.0	240.0	250.5	122.5	60.0	0.0	125.2	250.5
13/10/2011	4.5	70.4	68.9	111.0	119.7	58.3	22.0	0.0	56.8	119.7
14/10/2011	6.5	5.9	23.5	36.0	38.5	21.0	94.0	0.0	28.2	94.0
15/10/2011	20.0	17.2	83.4	135.0	65.7	70.2	198.0	0.0	73.7	198.0
16/10/2011	130.0	210.0	163.9	268.0	350.0	136.4	104.0	0.0	170.3	350.0
17/10/2011	80.0	87.0	105.8	172.0	203.0	88.6	36.0	0.0	96.6	203.0
18/10/2011	15.0	16.1	64.0	103.0	88.0	54.3	38.0	0.0	47.3	103.0
19/10/2011	24.0	34.5	13.8	20.0	15.0	13.0	33.0	0.0	19.2	34.5
20/10/2011	35.0	72.2	0.0	0.0	59.1	0.0	0.0	0.0	20.8	72.2

Fuente: Elaboración propia con base en los datos de precipitación proporcionados por la DGOA.

Para que el software busque un evento que cumpla con los requisitos de tener una duración de tres días y que las precipitaciones promedios y máximas sean superiores a los valores indicados anteriormente, estos deberán colocarse tal como se muestran en la Figura 4.6. Los posibles errores que pueden generarse en el programa obedecen a que no existan eventos en los registros pluviométricos con la duración solicitada que cumplan las condiciones de precipitación promedio y máxima (por ejemplo solicitar, lluvias con una duración de 15 días con precipitación promedio diario superior a 100mm y precipitación máxima diaria superior a 250mm generará un error indicando que no existen eventos que cumplan dichas condiciones).

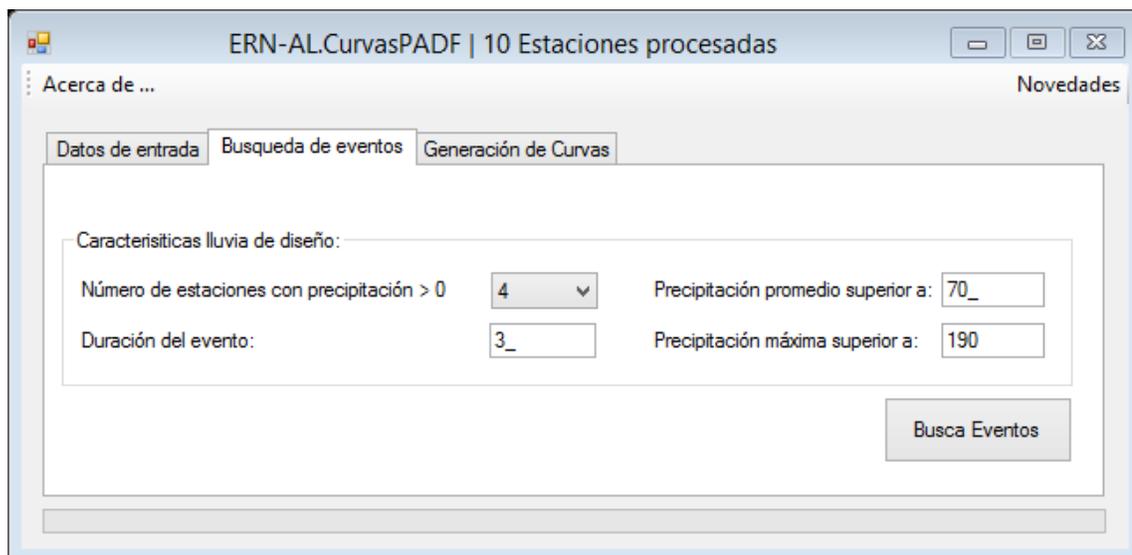


Figura 4.6 Ejemplo de búsqueda de eventos de precipitación.

Fuente: Elaboración propia, mediante la apertura del programa.

Finalmente el programa ERN_AL Curvas PADF solicita el número de períodos de retorno para los cuales se desea generar las curvas PADF y el mapa de precipitación promedio multianual (véase Figura 4.7); así como también la ubicación de los archivos a generar.

El archivo resultante es un archivo con formato .dat el cual se utilizará como dato de entrada en el software ERN-LluviaNH.

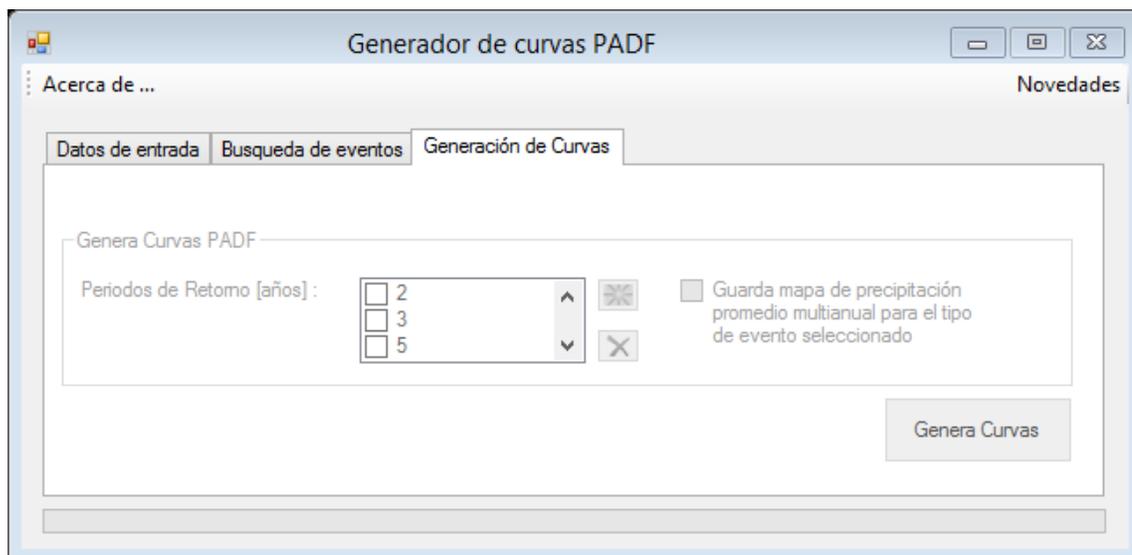


Figura 4.7 *Condicionantes para la generación de curvas PADF.*

Fuente: Elaboración propia, mediante la apertura del programa.

4.2.3 GENERACIÓN DE LA MALLA DE CENTROS DE TORMENTA EN LA CUENCA DEL RÍO SUCIO.

Tal como se definió en el Módulo de Amenaza de la Plataforma CAPRA, para la generación de la malla de centros de tormenta es necesario calcular un dato de precipitación para cada estación en estudio, el cual se utilizará como base para asignar una probabilidad de lluvia a cada punto de la cuenca.

En el análisis de la cuenca del río Sucio se optó por calcular el promedio anual de precipitación tomando como referencia los meses más críticos de lluvia en nuestro país (Mayo-Octubre). Posteriormente tomando como base los promedios anuales obtenidos, se calculó el promedio multianual para cada una de las estaciones en el período de estudio; obteniendo como resultado un único promedio de lluvia para cada estación, mostrado al final de la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Promedio anual de precipitación del período lluvioso (Mayo-Octubre).

FECHA ESTACIÓN	A21	L04	L08	L09	L17	L18	L29	L38
1971	9.93	9.80	10.05	10.61	11.26	9.58	10.01	10.59
1972	8.29	7.44	7.10	6.91	7.59	6.90	7.77	7.76
1973	9.48	9.04	8.08	11.15	10.81	8.32	10.94	9.38
1974	8.23	8.89	10.31	11.29	10.79	11.72	10.85	9.18
1975	7.52	9.04	8.62	8.73	7.90	11.12	8.24	7.35
1976	7.45	6.34	7.94	8.05	8.24	11.14	10.51	7.29
1977	8.05	8.70	8.38	8.50	8.67	9.50	9.64	8.50
1978	7.85	8.68	10.24	10.09	9.70	12.77	10.90	10.53
1979	8.39	8.39	9.93	11.25	10.57	11.25	9.88	8.75
1980	9.42	9.94	10.33	10.97	11.10	11.44	7.39	4.45
1981	9.70	7.26	8.96	9.91	9.10	11.15	8.62	7.03
1982	8.85	9.22	10.85	11.29	11.45	12.25	8.63	7.30
1983	6.09	5.77	7.36	10.46	8.52	8.42	9.42	5.20
1984	8.90	9.72	9.22	10.32	9.99	9.71	11.46	7.52
1985	8.08	8.44	8.41	8.11	8.20	9.32	5.77	7.68
1986	7.86	7.24	12.85	10.15	10.89	11.43	6.70	3.97
1987	8.43	5.73	7.79	9.87	9.06	9.22	6.41	3.73
1988	5.29	7.36	10.32	12.90	12.05	11.56	8.13	4.58
1989	9.82	9.62	11.22	11.39	8.84	13.55	7.46	4.37
1990	6.68	8.95	11.16	9.32	8.07	12.72	6.49	4.03
1991	6.54	7.84	7.92	9.50	5.77	9.79	6.35	3.80
1992	7.76	9.60	6.64	9.57	8.14	8.02	6.65	4.12
1993	8.40	10.54	10.72	9.95	10.48	10.35	8.76	4.99
1994	7.18	8.23	9.68	6.84	7.99	9.01	7.74	4.21
1995	6.97	8.33	10.86	12.89	9.71	10.11	11.68	9.45
1996	7.47	9.51	10.97	14.11	10.88	10.29	14.96	10.54
1997	7.47	7.11	7.46	11.14	9.38	7.09	9.24	6.30
1998	8.96	7.55	9.76	11.20	8.81	9.03	10.22	6.45
1999	8.12	6.81	7.59	10.75	9.14	7.25	10.19	6.87
2000	7.55	6.00	8.29	12.30	9.21	7.82	9.86	6.26
2001	8.36	6.34	6.37	8.58	7.72	6.10	7.62	4.70
2002	10.20	7.82	8.83	10.44	9.65	8.18	9.56	5.22
2003	8.20	8.07	7.52	8.43	7.96	7.20	8.47	5.98
2004	12.33	8.56	6.65	9.54	9.81	6.34	8.22	8.51
2005	13.45	9.64	11.40	17.18	11.61	10.36	13.54	9.65

Fuente: Elaboración propia con base en los datos de lluvia proporcionados por la DGOA.

FECHA/ESTACIÓN	A21	L04	L08	L09	L17	L18	L29	L38
2006	12.98	9.15	8.43	12.37	9.58	8.01	10.41	7.52
2007	8.75	7.74	6.37	9.23	6.49	6.02	6.04	3.50
2008	6.35	8.00	2.55	3.87	12.11	2.31	8.48	8.96
2009	8.26	8.01	3.06	4.26	4.16	2.99	9.36	0.41
2010	14.63	10.13	9.99	14.91	13.18	9.17	11.87	6.31
2011	9.26	10.90	10.12	15.23	13.67	9.22	12.72	5.66
2012	9.82	7.47	5.53	7.77	7.49	5.38	6.32	7.35
2013	9.02	8.33	7.49	11.00	10.95	6.98	10.33	8.37
2014	7.80	9.74	8.41	12.27	10.99	7.90	10.33	8.00
Promedio Multianual	8.64	8.34	8.68	10.33	9.49	9.05	9.18	6.64

Continuación de Tabla 4.6

El valor promedio obtenido para cada estación junto al mapa de la zona en estudio, se utilizó para generar un mapa de isoyetas, el cual asignó a cada punto de la cuenca un valor de precipitación (véase Figura 4.8). A partir de éste mapa, se procedió a asignar una probabilidad de lluvia a cada punto de la cuenca mediante el procedimiento descrito en la sección 3.5.1.1.1 (véase Figura 4.9). El archivo final de malla de centros de tormenta se convirtió a formato grd, para ser utilizado en la generación de lluvias estocásticas.

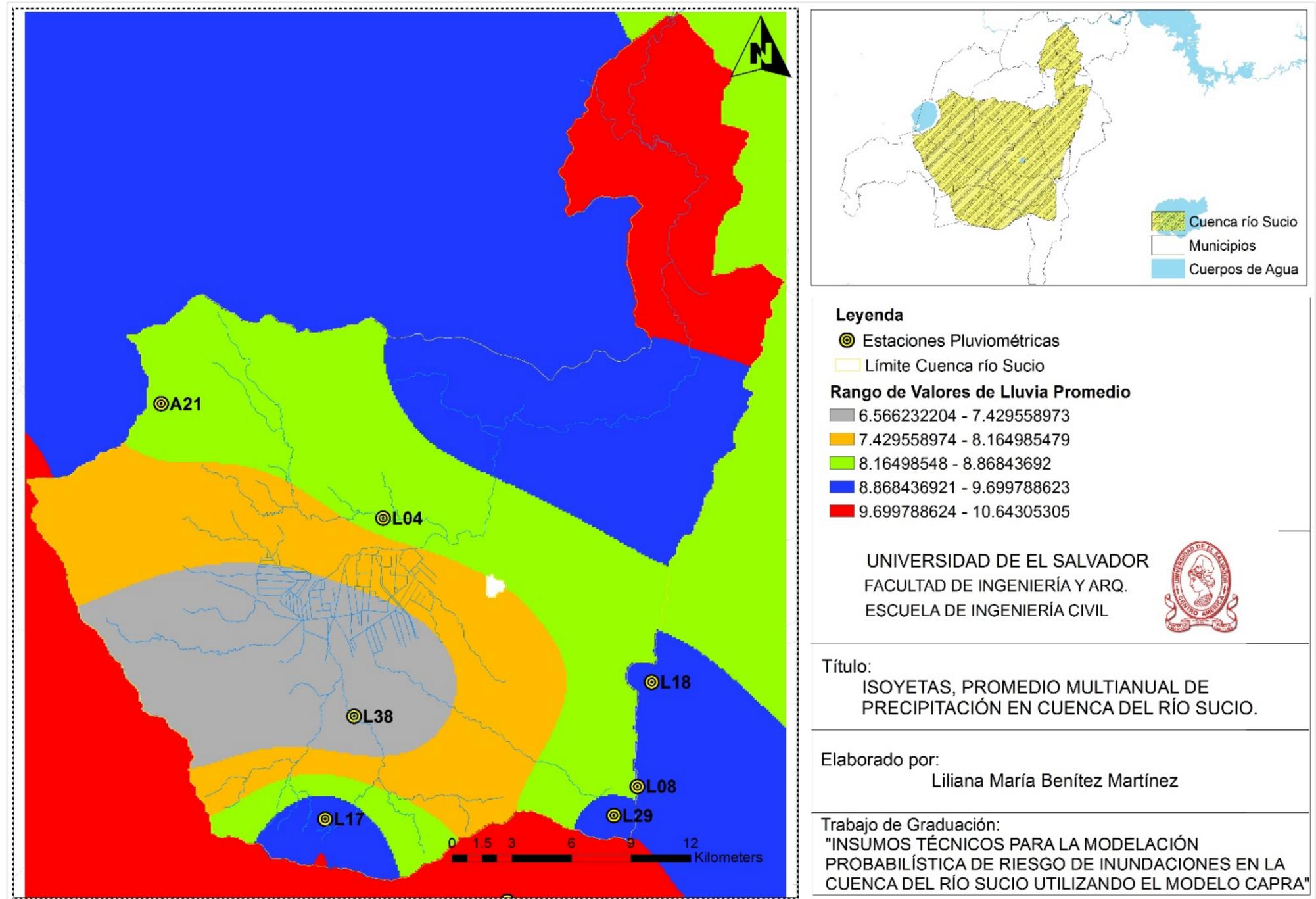


Figura 4.8 Mapa de Isoyetas del promedio multianual de datos de precipitación.

Fuente: Elaboración propia.

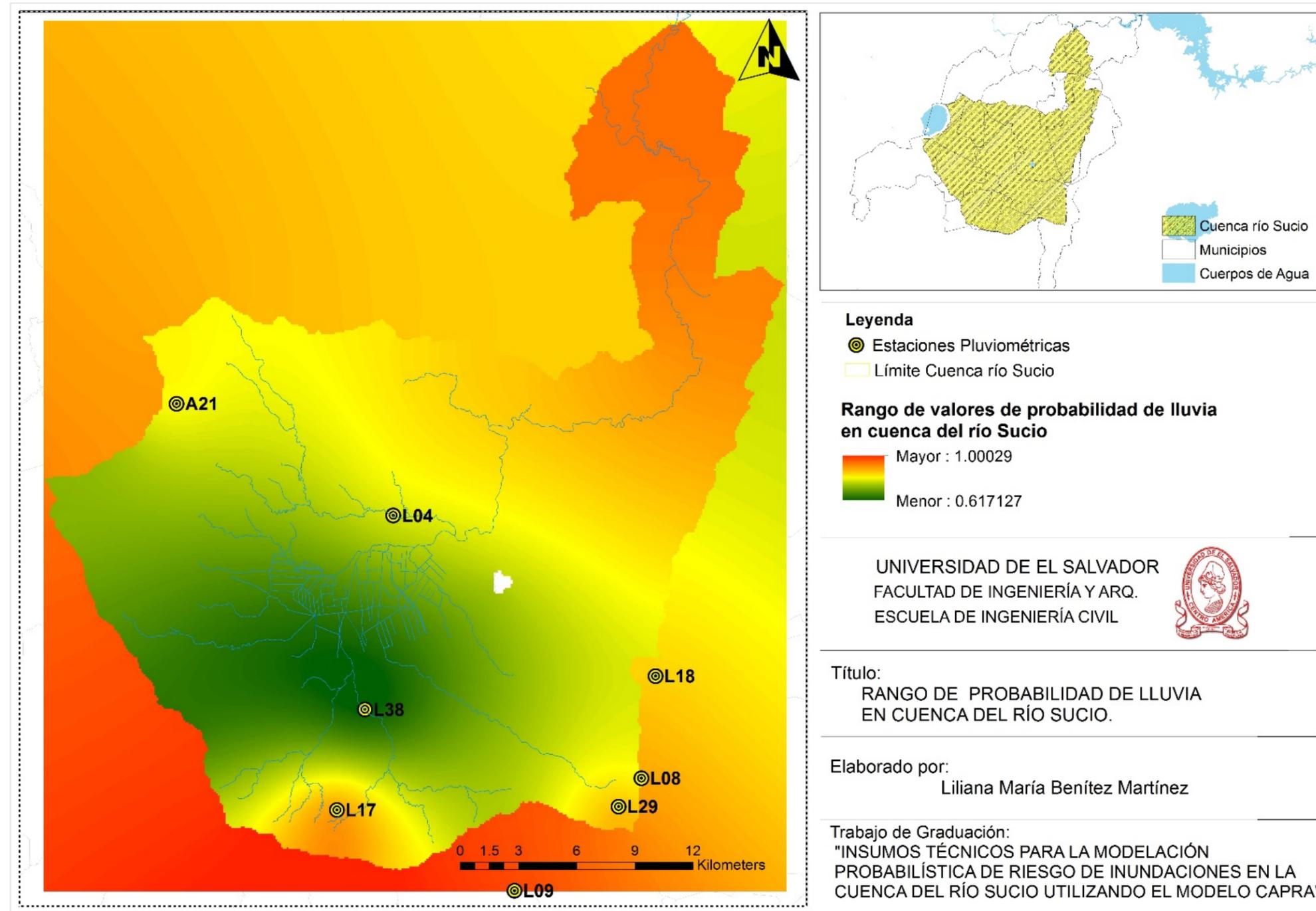


Figura 4.9 Mapa de probabilidad de lluvia en la cuenca del río Sucio.

Fuente: Elaboración propia.

4.2.4 GENERACIÓN DE AMENAZA DE LLUVIA NO HURACANADA MEDIANTE EL USO DEL PROGRAMA ERN-LLUVIA NH

Para la generación de tormentas estocásticas (las tormentas a generar están definidas como “No Huracanadas” debido a que no se considera el efecto de la amenaza de viento) mediante el empleo del programa ERN-Lluvia NH se requiere como datos de entrada un archivo con formato dat correspondiente al juego de curvas PADF, un archivo con formato shape que contenga la delimitación de la zona en estudio y el archivo con formato grd correspondiente a la malla de localización preferencial de centros de tormenta (véase Figura 4.10).

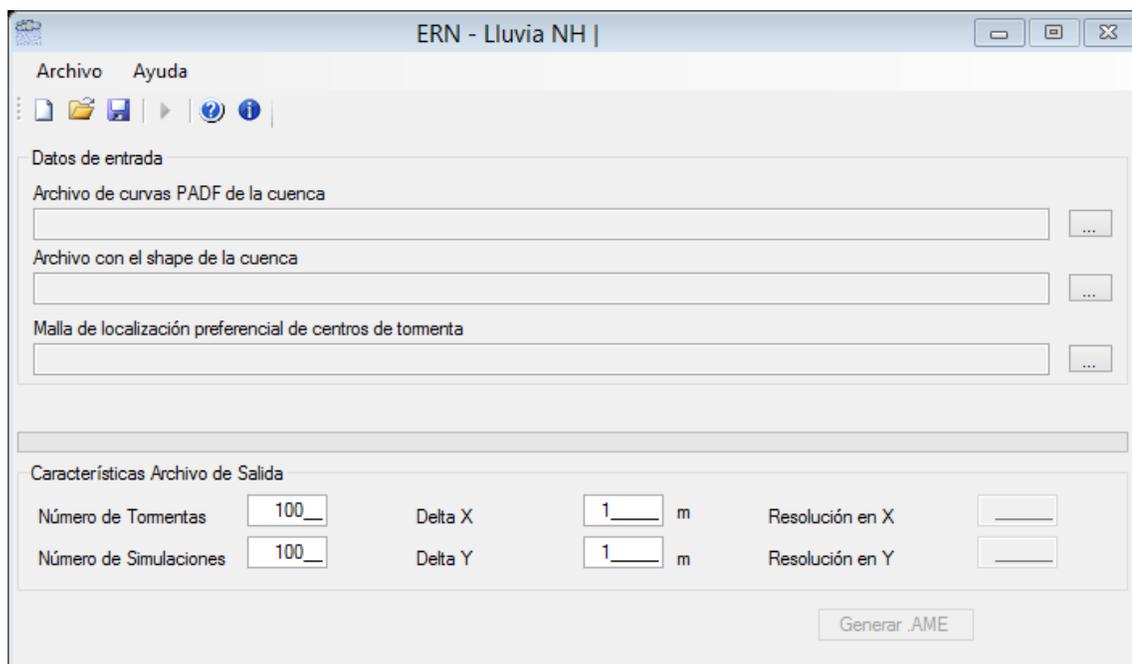


Figura 4.10 Ventana de inicio del programa ERN-Lluvia NH.

Fuente: Elaboración propia, mediante la apertura del programa.

Las características de los datos de salida pueden ser modificadas por el usuario, dichas características se definen a continuación:

- Número de tormentas: Se refiere al número de escenarios que se desean generar para cada curva PADF.
- Número de simulaciones: Corresponde al número de veces que se analizara una misma tormenta, para poder obtener un valor medio de precipitación y disminuir la incertidumbre en cada punto de análisis.
- Delta en X y Delta en Y: Se refiere al espaciamiento entre puntos de análisis en los sentidos X y Y, respectivamente.
- Resolución en X y Resolución en Y: Se refiere a las divisiones que tendrá la zona en estudio, sobre las cuales se iterara la precipitación y la incertidumbre; dicha resolución se calcula automáticamente al variar los Delta.

El procedimiento anterior deberá ejecutarse las veces necesarias según el número de juegos de Curvas PADF que se hayan generado; el archivo resultante es un archivo con formato AME el cual se utilizará como dato de entrada en el software ERN-Inundación.

Características del programa ERN-Lluvia

1. Permite la modelación a partir de las curvas PADF
2. Genera un número de tormentas deseado que representan las características de las tormentas de la zona en estudio en términos de precipitación, área de cubrimiento, duración y frecuencia de ocurrencia.

3. El análisis se realiza únicamente a nivel del área en estudio.

Resolución en la modelación de amenaza de lluvia

La modelación espacial se realiza mediante una grilla de cálculo que puede ser tan fina como el usuario desee, sin embargo, esto no garantiza necesariamente una mejora en los resultados. La resolución debe ser acorde al tamaño de la cuenca y corresponde al tamaño de la grilla empleada.

4.2.5 GENERACIÓN DE AMENAZA DE INUNDACIÓN MEDIANTE EL USO DEL PROGRAMA ERN-INUNDACIÓN

El programa ERN-Inundación posee dos métodos de evaluación de la amenaza de inundación, de las cuales debido al alcance del presente Trabajo de Graduación, en el documento solamente se desarrollará el análisis simplificado. Dicho programa permite identificar la profundidad de inundación de la zona en estudio. El software solicita como datos de entrada los escenarios de lluvia generados por el programa ERN-Lluvia No Huracanada en formato AME, el mapa de factores de escurrimiento en formato grn, mapa de los factores de exposición en formato dat y el mapa de referencia de la zona en estudio en formato shape y coordenadas geográficas WGS84 (véase figura 4.11).

Para el análisis de la amenaza de inundación de cuenca del río Sucio se utilizó el mapa de número de curva en la condición más desfavorable, la cual consiste en evaluar el efecto de la amenaza de lluvia en la cuenca cuando el suelo de la misma se encuentra en condición saturada, es decir, los valores de N son

cercanos a 100, indicando que la mayor parte de lluvia escurrirá (véase Figura 4.12), lo que significa una disminución de la capacidad de infiltración del suelo. Un valor bajo de número de curva (1), indica que toda la lluvia se infiltra. El mapa de número de curva, deberá convertirse a formato grn para poder ser utilizado en el programa ERN-Inundación.

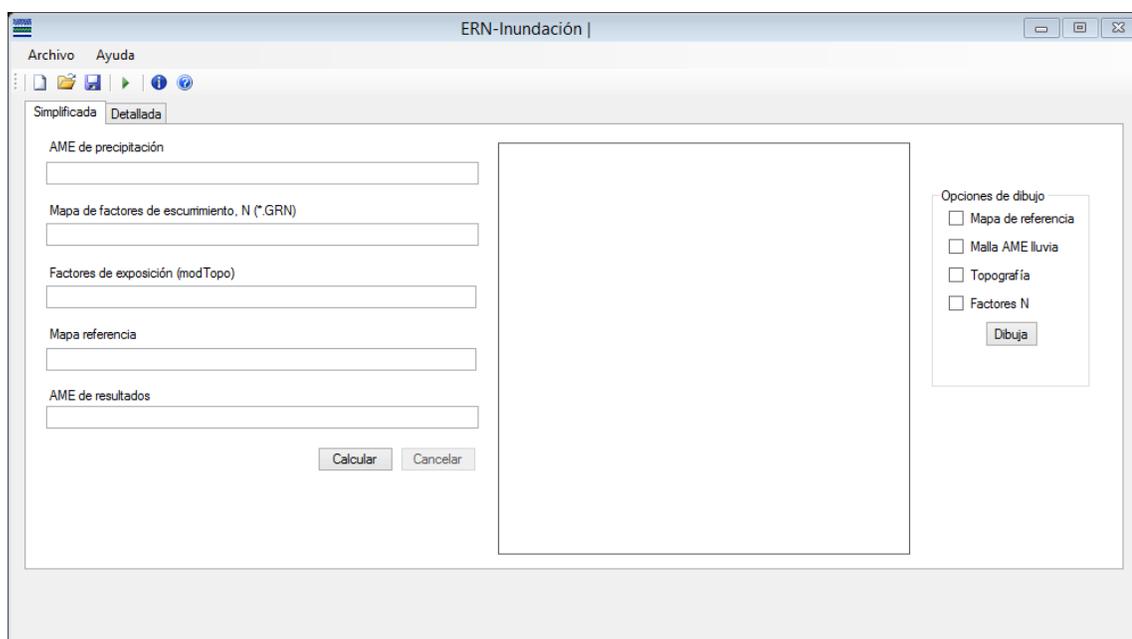


Figura 4.11 Plataforma del programa ERN-Inundación.

Fuente: Elaboración propia, mediante la apertura del programa.

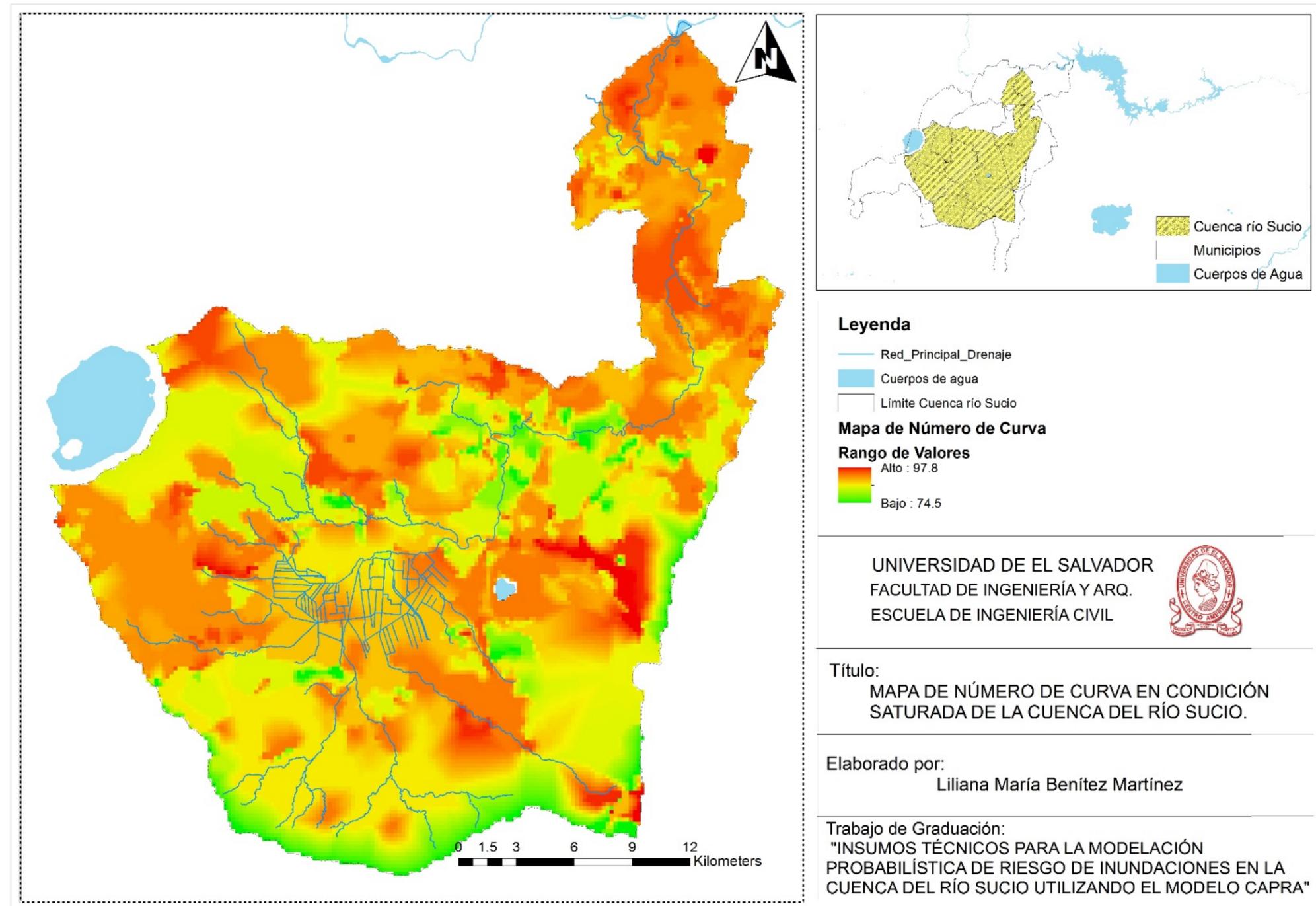


Figura 4.12 Mapa de Número de Curva en condición saturada de la cuenca del río Sucio.

Fuente: Elaboración propia con base en los datos proporcionados por el personal de la DGOA.

El mapa de factores de exposición se obtiene mediante el uso del programa “Factores de exposición al viento e inundación” (véase la interfaz del programa en la Figura 4.13). El programa solicita como dato de entrada un archivo en formato grd correspondiente al mapa de curvas de nivel del área en estudio; para asignar a cada punto de la cuenca valores correspondientes a la exposición según la zona topográfica.

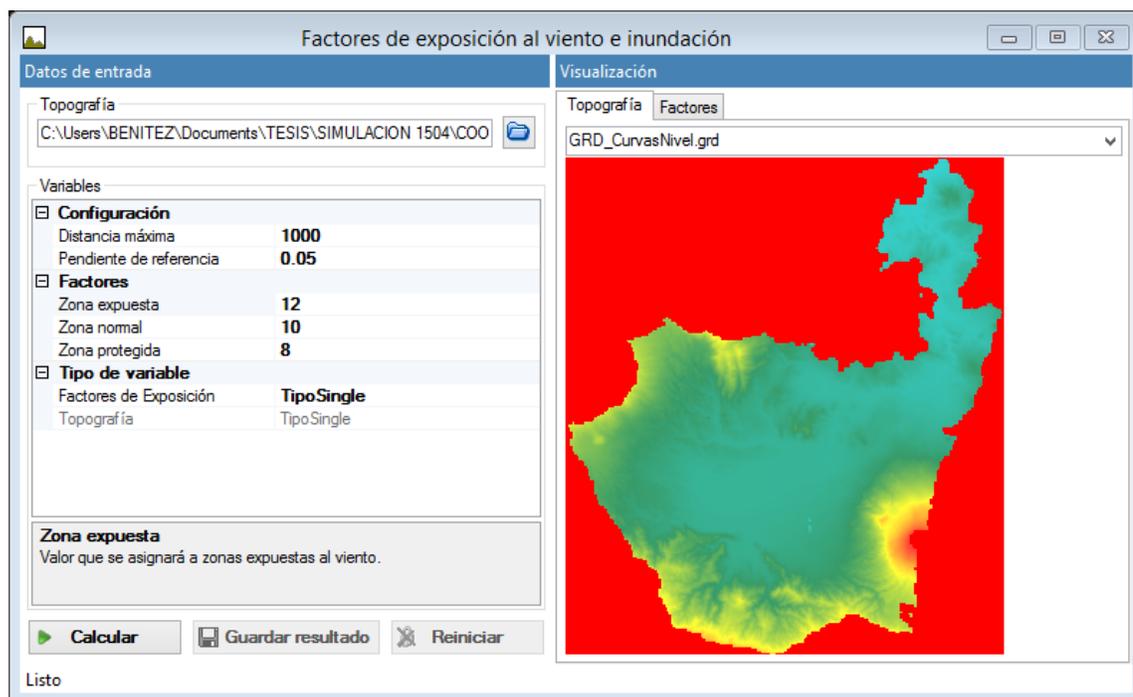


Figura 4.13 Interfaz de programa "Factores de exposición al viento e inundación".

Fuente: Elaboración propia mediante la apertura y uso del programa.

El archivo obtenido mediante el programa deberá convertirse a formato grn para su utilización en el análisis de inundaciones dentro del programa ERN-Inundación.

Características del programa ERN-Inundación

1. En función de los datos disponibles es posible utilizar el método simplificado o el método detallado.
2. El método simplificado analiza una zona acotada por el tamaño de grilla de precipitación y proporciona zonas potenciales a inundarse, considerando de manera general la topografía y el uso de suelo en cada punto analizado.
3. El modelo simplificado considera que las zonas con potencial de inundación son aquellas donde se tenga una precipitación considerable y su topografía permite que la precipitación se acumule. Debido a que las estimaciones se realizan utilizando ciertos factores (descritos en la sección 3.5.1.1.2 del presente documento), los resultados son sólo para fines de estimación a gran escala del fenómeno.
4. Se debe proporcionar el factor de escurrimiento en formato dat; teniendo en cuenta de que estos factores pueden cambiar con el tiempo.
5. Los resultados de inundación son fuertemente influenciados por la topografía, por lo que se debe tener cuidado en que ésta represente de manera adecuada la zona en estudio.

4.3 APLICACIÓN DEL MÓDULO DE VULNERABILIDAD A LA CUENCA DEL RÍO SUCIO

Para definir las funciones de vulnerabilidad de las construcciones existentes en la cuenca del río Sucio se utilizó la base de datos proporcionada por el personal de la DGOA.

El inventario proporcionado consta de 5 formularios en el cual se tipifica el nivel de vulnerabilidad en función de las características de las construcciones ante un fenómeno de inundación.

La tipificación de las edificaciones se divide en:

1. Mixto Alto (MA): Dentro de la presente tipificación se incluyen las viviendas construidas con paredes de concreto y que poseen techo de teja o lámina metálica.



Figura 4.14 Vivienda tipo Mixto Alto (MA).

Fuente: Formatos de tipificación proporcionados por el personal de la DGOA.

2. Mixto Medio (MM): Integra las viviendas construidas con paredes de concreto y/o lámina metálica que poseen techo de teja o lámina metálica.



Figura 4.15 Vivienda tipo Mixto Medio (MM).

Fuente: Formatos de tipificación proporcionados por el personal de la DGOA.

3. Mixto Bajo (MB): Se incluyen las viviendas construidas con paredes de ladrillo y que poseen techo de teja o lámina metálica.



Figura 4.16 Vivienda tipo Mixto Bajo (MB).

Fuente: Formatos de tipificación proporcionados por el personal de la DGOA.

4. Precario Medio (PM): Incluye viviendas construidas con paredes de lámina metálica que poseen techo de lámina metálica o teja.



Figura 4.17 Vivienda tipo Precario Medio (PM).

Fuente: Formatos de tipificación proporcionados por el personal de la DGOA.

5. Precario Bajo (PB): Constituye todas aquellas viviendas construidas con paredes de paja, desecho, madera, palma y otro vegetal que posean techos de paja, desecho, lámina metálica, palma u oro vegetal.



Figura 4.18 Vivienda Tipo Precario Bajo (PB).

Fuente: Formatos de tipificación proporcionados por el personal de la DGOA.

Como se mencionó en la sección 3.5.2 la vulnerabilidad para una edificación está definida mediante curvas que relacionan el valor esperado de daño y su desviación estándar con la intensidad de la amenaza.

En la Figura 4.19 se presentan las curvas de vulnerabilidad correspondientes a cada una de las tipificaciones descritas. Puede observarse en cada una de ellas que el eje “x” representa la intensidad de la amenaza de inundación (descrita por la profundidad de agua), y el eje vertical representa en el lado izquierdo la relación media de daño y en el lado derecho la varianza, ambas medidas en términos porcentuales.

Por ejemplo para las edificaciones tipo Mixta Baja (véase Figura 4.19 c), para una profundidad de agua de 0.20m se obtiene de la curva MDR una relación media de daño del 25%, y una variación de la curva Var. de aproximadamente 15%. Esto indicaría que la edificación al sufrir una inundación de 20 cm, su costo de reparación representaría un 25% del costo requerido para su reposición completa variando esta posibilidad hasta en un 15%.

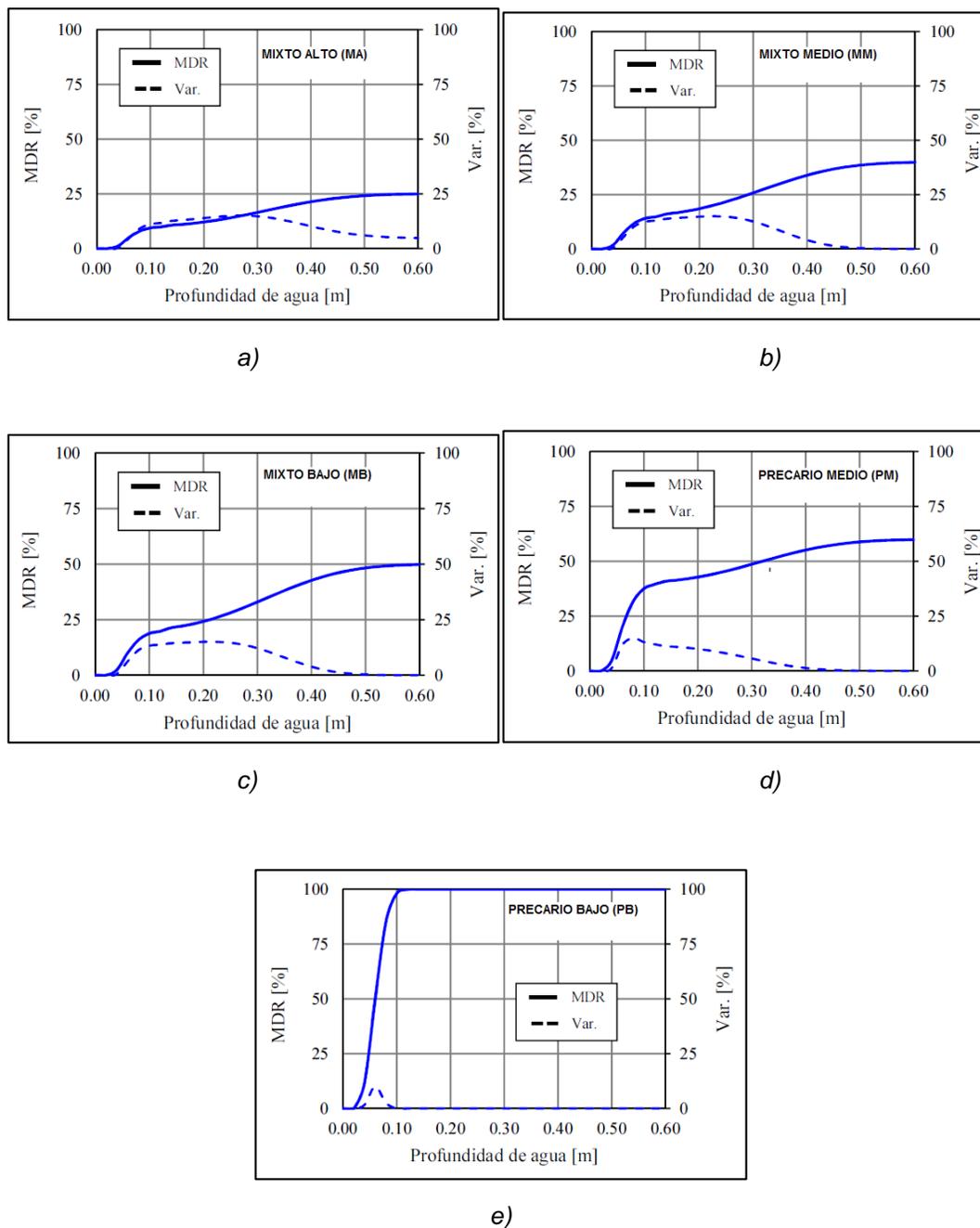


Figura 4.19 Curvas de Vulnerabilidad para tipificaciones de edificaciones: a) Mixto Alto, b) Mixto Medio, c) Mixto Bajo, d) Precario Medio y e) Precario Bajo.

4.4 APLICACIÓN DEL MÓDULO DE EXPOSICIÓN A LA CUENCA DEL RÍO SUCIO

Para estimar la exposición de la zona de estudio y asignar los niveles de vulnerabilidad a las edificaciones existentes, se realizó la delimitación de los municipios identificando las zonas propensas a inundación indicadas por las alcaldías de los municipios visitados. La ubicación de las zonas propensas a inundación se realizó mediante el uso de un sistema de información geográfica con una base de datos que contenía la división político administrativa de los municipios. El levantamiento de infraestructura y población se realizó utilizando la herramienta Web CAPRA descrita en la sección 3.5.3.1.

4.4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS MUNICIPIOS QUE CONFORMAN LA CUENCA

Se presenta a continuación una breve descripción de los municipios que conforman la Cuenca del río Sucio, realizando la identificación de zonas registradas como inundables históricamente o propensas a inundación, con base en la información recopilada en cada una de las 17 alcaldías contenidas dentro de la Cuenca del río Sucio. La información obtenida procede de registros históricos que poseen las alcaldías y estudios realizados por organismos de gobierno u organizaciones no gubernamentales (En el Anexo 4.1 se muestra los mapas de inundación proporcionados por algunos de los municipios). Cabe mencionar que la calidad de la información difiere de municipio en municipio

debido al enfoque dado a dichos estudios. La ubicación de las zonas de inundación de toda la cuenca se muestra en el Anexo 4.2, de igual forma en el Anexo 4.3 se pueden visualizar los elementos expuestos en una vista general de la cuenca del río Sucio.

4.4.1.1 MUNICIPIO DE ARMENIA, DEPARTAMENTO DE SONSONATE

El municipio de Armenia posee una extensión territorial de 65.64 km², de los cuales un área aproximada de 63.64 km² corresponde al área rural y 2 km² al área urbana. Colinda con los municipios de El Congo, Ciudad Arce, Sacacoyo, Tepecoyo e Izalco.

En la Tabla 4.7 se detalla la población urbana y rural del municipio. Para marzo de 2015 la UCSFI de Armenia reporta una población de 38,435 personas, de las cuales el 51 % habita en el área urbana y un 49 % en el área rural (Mancia Guzmán, y otros, 2015).

En la Tabla 4.7 también se lista el número de viviendas registradas hasta el año 2007. En el área urbana predomina la construcción de viviendas de sistema mixto, y a medida las viviendas se encuentran cerca de ríos, predominan las viviendas de adobe, bahareque y lámina.

Tabla 4.7 *Población urbana y rural, y viviendas del municipio de Armenia.*

Urbana			Rural			Número de viviendas		
Mujeres	Hombres	Total	Mujeres	Hombres	Total	Área Urbana	Área Rural	Total
12,650	11,344	23,994	5,464	5,454	10,918	6,394	2,755	9,149

Fuente: Censo de Población y Vivienda 2007, DIGESTYC.

En la Figura 4.20 se presenta la división político administrativa del municipio. En la Figura 4.21 se ubican geográficamente los sitios con amenaza de inundación registrados por la alcaldía del municipio (Mancia Guzmán, y otros, 2015) y la Tabla 4.8 lista las comunidades que han resultado históricamente afectadas por inundaciones.

Mediante la aplicación Web CAPRA se realizó el levantamiento de las edificaciones propensas a inundación que se encuentran cercanas a las coordenadas geográficas de la Figura 4.21. Dicha información se muestra en la Figura 4.22.

Tabla 4.8 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de Armenia.

Identificación	Ubicación
I. 01	Colonia San Damián
I. 02	Col. El Coco
I. 03	Col. Santa Marta 1
I. 04	Col. Santa Marta 2
I. 05	Buena vista
I. 06	Urb. Guadalupe
I. 07	Col. Las Arquitas
I. 08	Col. Santa Teresa Sur
I. 09	Lot. Cafetales de Tutulnico
I. 10	Col. Las Colinas
I. 11	Col. Las Flores
I. 12	Col. Santa Beatriz
I. 13	Lot. La Cantarera
I. 14	Lot. Las Mercedes y Lot. El Edén
I. 15	Col. San Jerónimo
I. 16	Col. El Espino
I. 17	Crío. El Guaje
I. 18	Urb. Fraternidad
I. 19	Lot. Azacualpa

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la municipalidad.

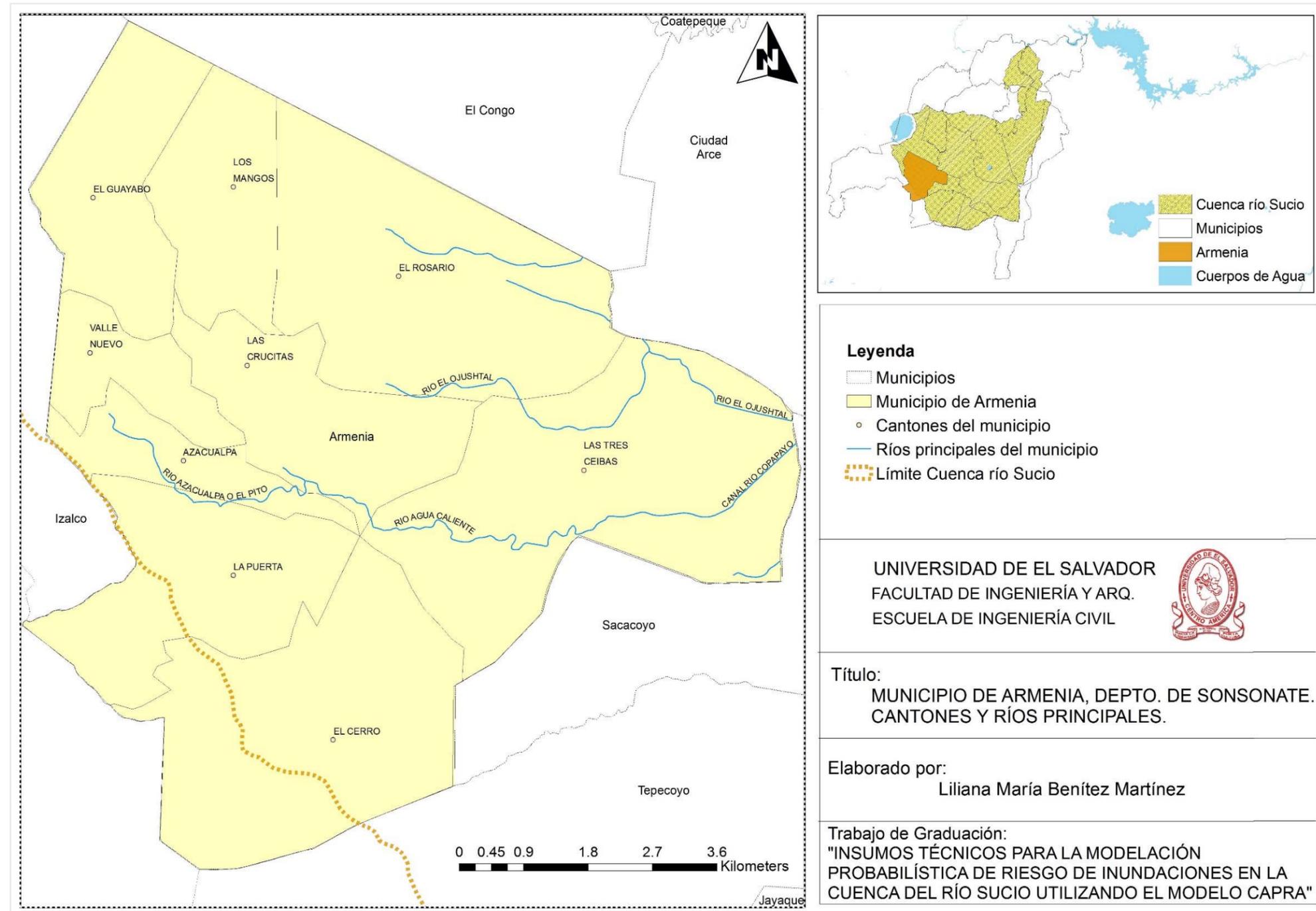


Figura 4.20 División político administrativa del municipio de Armenia, Sonsonate.

Fuente: Elaboración propia.

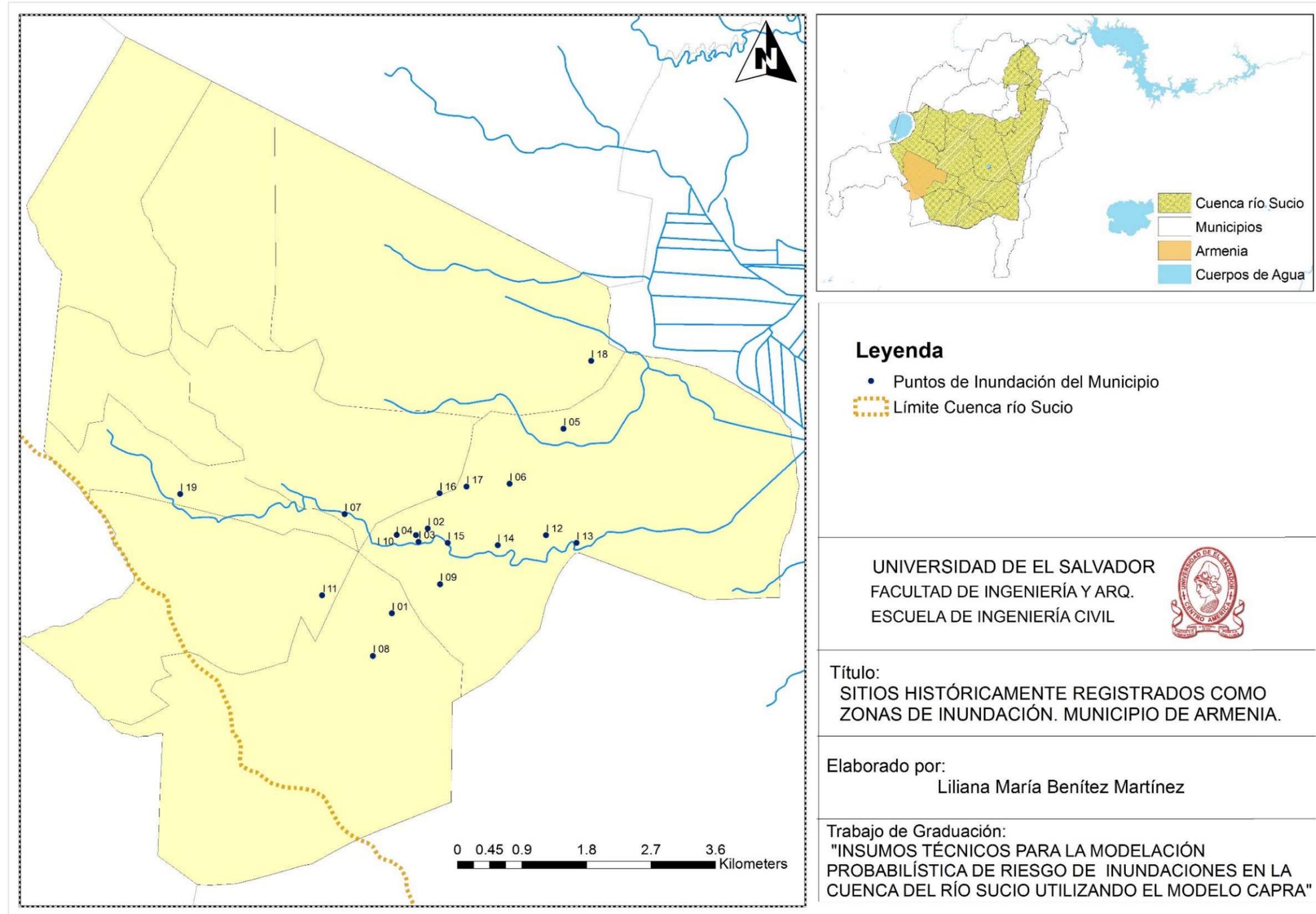


Figura 4.21 Ubicación geográfica de los sitios registrados históricamente como zona de inundación del municipio de Armenia.

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la municipalidad.

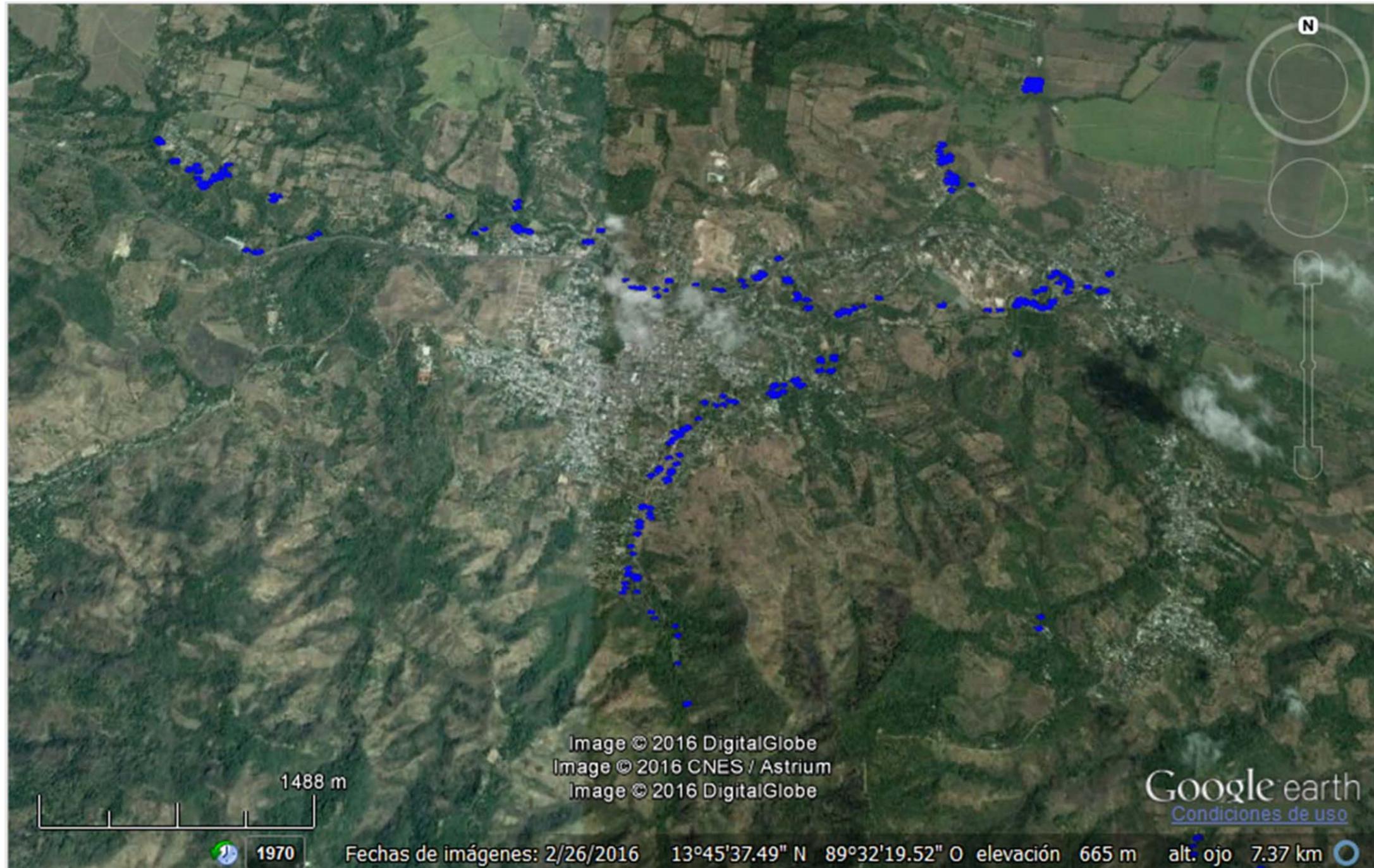


Figura 4.22 Levantamiento de infraestructura expuesta a la amenaza de inundación del municipio de Armenia.

Fuente: Elaboración propia mediante el uso de la herramienta Web CAPRA

4.4.1.2 MUNICIPIO DE CIUDAD ARCE, DEPARTAMENTO DE LA LIBERTAD

El municipio de Ciudad Arce posee una extensión territorial de 86.76 km², de los cuales un área aproximada de 0.40 km² corresponde al área urbana. Colinda con los municipios de San Juan Opico, Armenia, Sacacoyo, Colón, Coatepeque y El Congo.

En la Tabla 4.9 se detalla la población urbana y rural del municipio, así como también el número de viviendas registradas hasta el año 2007. Se puede destacar que la mayoría de viviendas de la población que habita en la zona rural se encuentran construidas de adobe, con pisos de tierra y techos de lámina; en la zona urbana se encuentra variedad de materiales utilizados en la construcción, como casas de sistema mixto, bahareque y lámina, con techo de tejas o duralita.

Tabla 4.9 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de Ciudad Arce.

Urbana			Rural			Número de viviendas		
Mujeres	Hombres	Total	Mujeres	Hombres	Total	Área Urbana	Área Rural	Total
21,664	19,819	41,483	9,577	9,254	18,831	12,331	5,223	17,554

Fuente: Censo de Población y Vivienda 2007, DIGESTYC.

En la Figura 4.23 se presenta la división política administrativa del municipio. En la Figura 4.24 se ubican geográficamente los sitios con amenaza de inundación registrados por la alcaldía del municipio (Abrego Navas, 2014) y la Tabla 4.10 lista las comunidades que han resultado históricamente afectadas por inundaciones.

Mediante la aplicación Web CAPRA se realizó el levantamiento de las edificaciones propensas a inundación que se encuentran cercanas a las coordenadas geográficas de la Figura 4.24. Dicha información se muestra en la Figura 4.25.

Tabla 4.10 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de Ciudad Arce.

Identificación	Ubicación
001-INUN	Colonia Pequeña Inglaterra
002-INUN	Colonia Pequeña Inglaterra qda. De Invierno
003-INUN	Colonia Pequeña Inglaterra río Agua Fría
004-INUN	Callejas, Río Agua Fría
005-INUN	San Andrés, Km. 35 Carretera a Santa Ana
006-INUN	Santa Lucía, Comunidad Margaritas
007-INUN	Santa Lucía , Km. 38 Carretera a santa Ana
008-INUN	La Joyita, Segunda Zona
009-INUN	Col. San Carlos II, Río La Joya
010-INUN	Cantón La Reforma, qda. Gumaro Casa Blanca
011-INUN	Cantón San Antonio Abad, Río Agua Caliente
012-INUN	San Antonio Abad, Colonia la Fifi
013-INUN	Cantón Flor Amarilla, Límite Ateos y Colón, Puente río colón
014-INUN	Cantón Flor Amarilla, Río los Patos, cerca de nacimiento
015-INUN	Flor Amarilla, puente en construcción
016-INUN	San Antonio Abad, Nueva Esperanza, río sucio
017-INUN	Las Vegas, colonia Las Brisas
018-INUN	Las Vegas, El potrero, río Limón
019-INUN	La Reforma, puente que conecta la Reforma con Ciudad Arce

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la municipalidad.

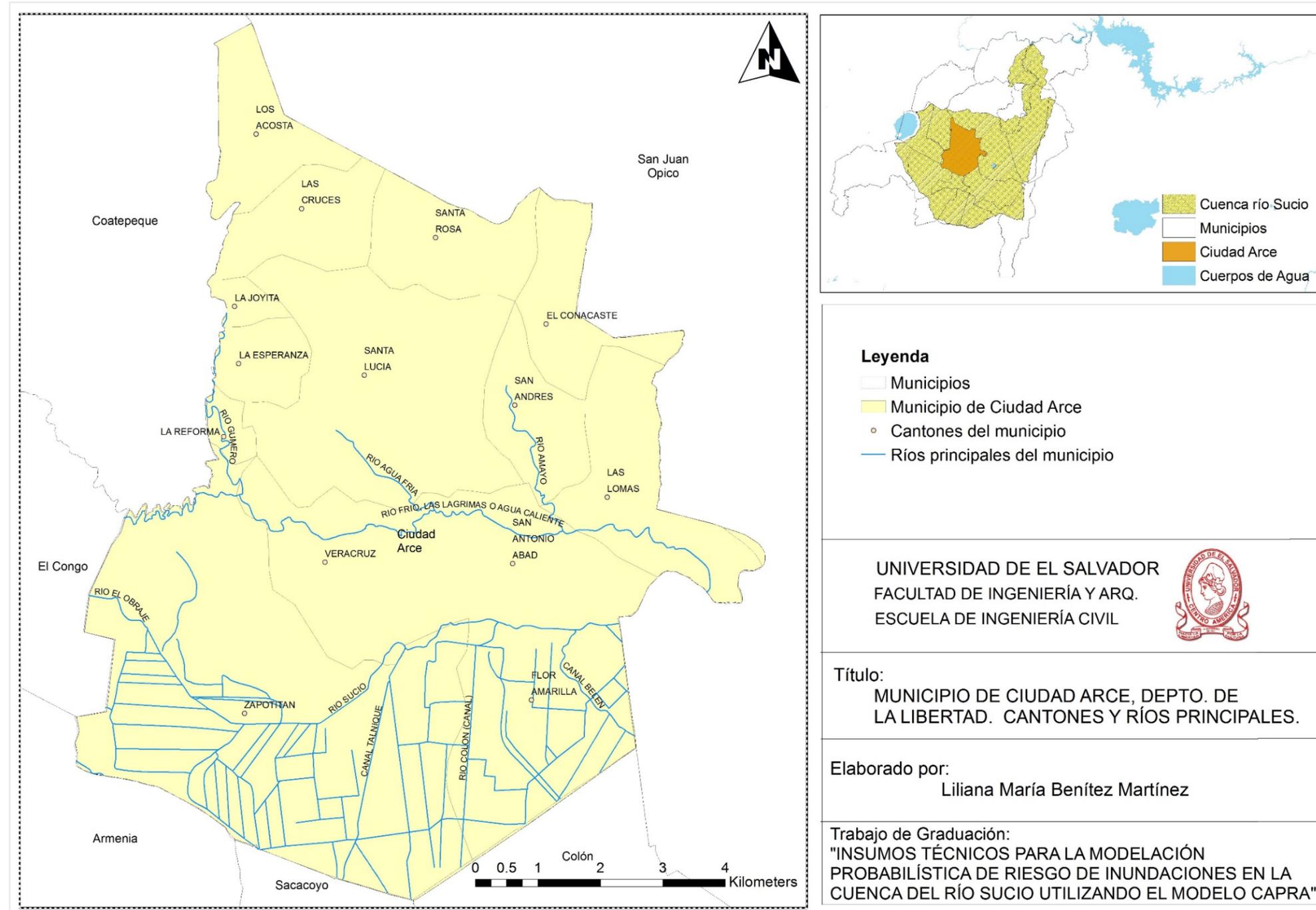


Figura 4.23 División político administrativa del municipio de Ciudad Arce, La Libertad.

Fuente: Elaboración propia.

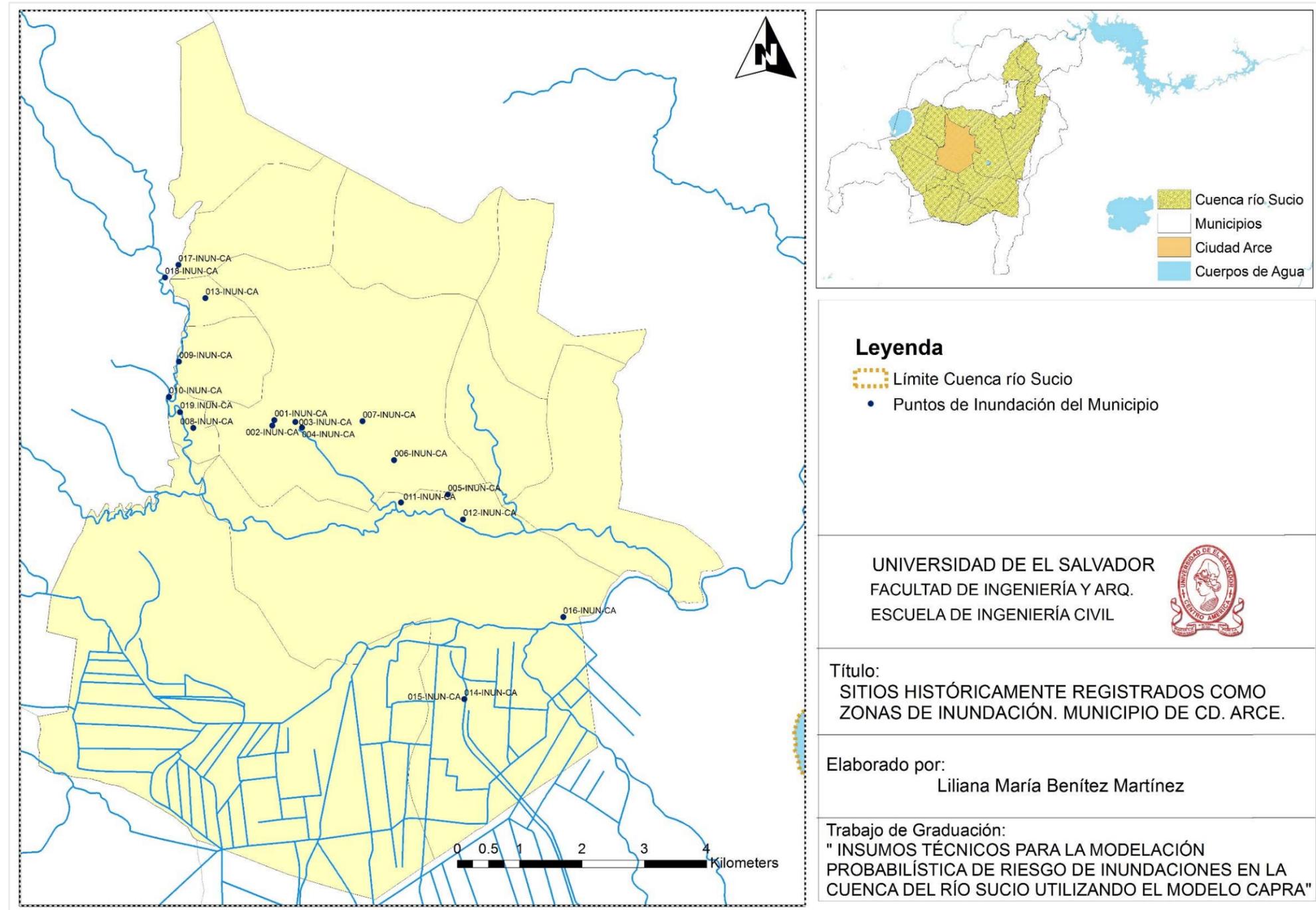


Figura 4.24 Ubicación geográfica de los sitios registrados históricamente como zona de inundación del municipio de Ciudad Arce.

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la municipalidad.

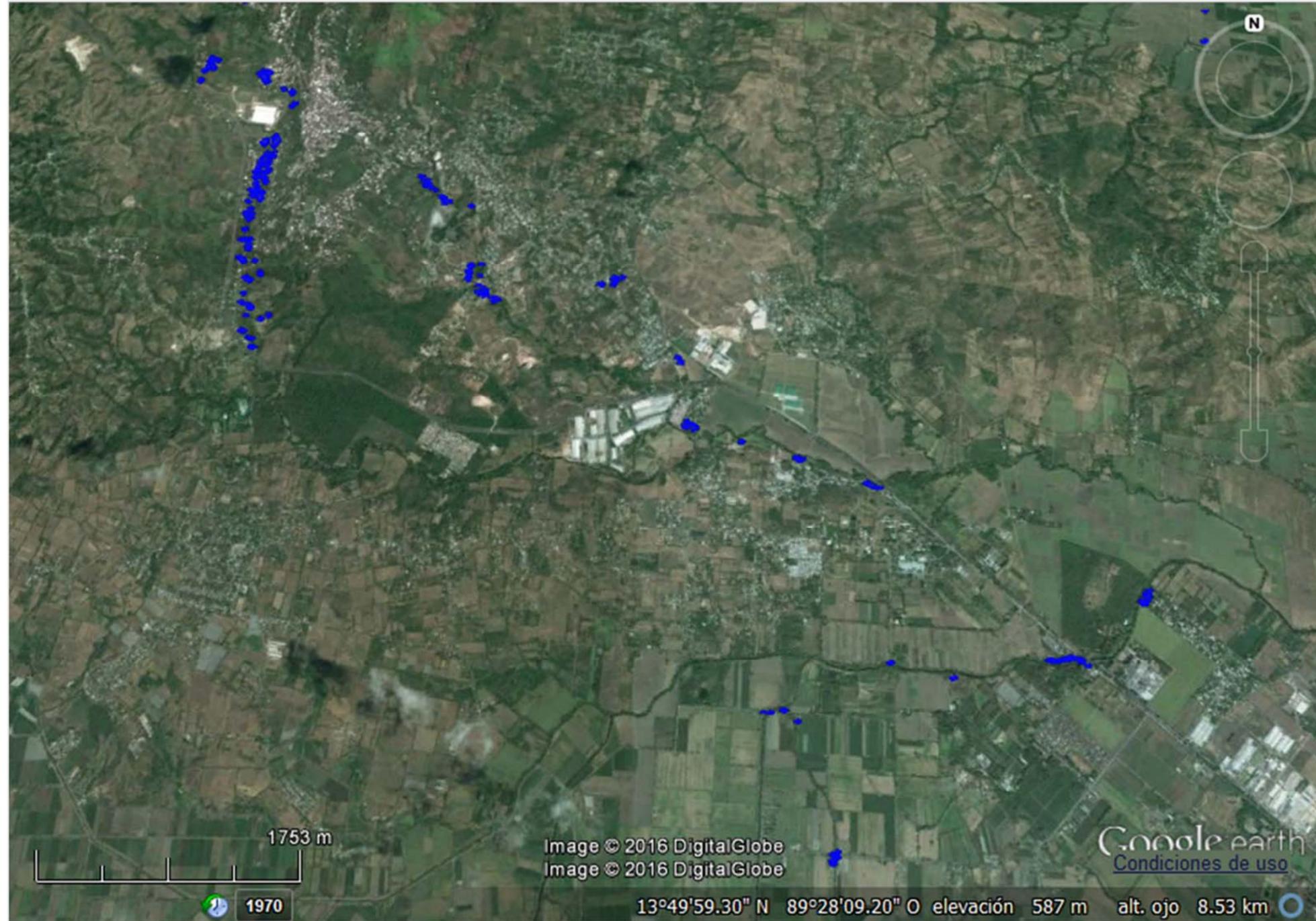


Figura 4.25 Levantamiento de infraestructura expuesta a la amenaza de inundación del municipio de Ciudad Arce.

Fuente: Elaboración propia mediante el uso de la herramienta Web CAPRA.

4.4.1.3 MUNICIPIO DE COATEPEQUE, DEPARTAMENTO DE SANTA ANA

El municipio de Coatepeque posee una extensión territorial de 145.89 km². Colinda con los municipios de Santa Ana, San Pablo Tacachico, San Juan Opico, Ciudad Arce y el Congo.

En la Tabla 4.11 se detalla la población urbana y rural del municipio, así como también el número de viviendas registradas hasta el año 2007.

Tabla 4.11 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de Coatepeque.

Urbana			Rural			Número de viviendas		
Mujeres	Hombres	Total	Mujeres	Hombres	Total	Área Urbana	Área Rural	Total
6,960	6,380	13,340	11,871	11,557	23,428	3,483	6,251	9,734

Fuente: Censo de Población y Vivienda 2007, DIGESTYC.

En la Figura 4.26 se presenta la división político administrativa del municipio. En la Figura 4.27 se ubican geográficamente los sitios con amenaza de inundación registrados por la alcaldía del municipio (Brizuela, Toledo, & de Aguirre, 2014) y la Tabla 4.12 lista las comunidades que han resultado históricamente afectadas por inundaciones.

Mediante la aplicación Web CAPRA se realizó el levantamiento de las edificaciones propensas a inundación que se encuentran cercanas a las coordenadas geográficas de la Figura 4.27. Dicha información se muestra en la Figura 4.28.

Tabla 4.12 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de Coatepeque.

Identificación	Ubicación
I 01	Colonia Italia
I 02	Colonia Las Lupitas 1, 2 y 3
I 03	Colonia Can Carlos I

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la municipalidad.

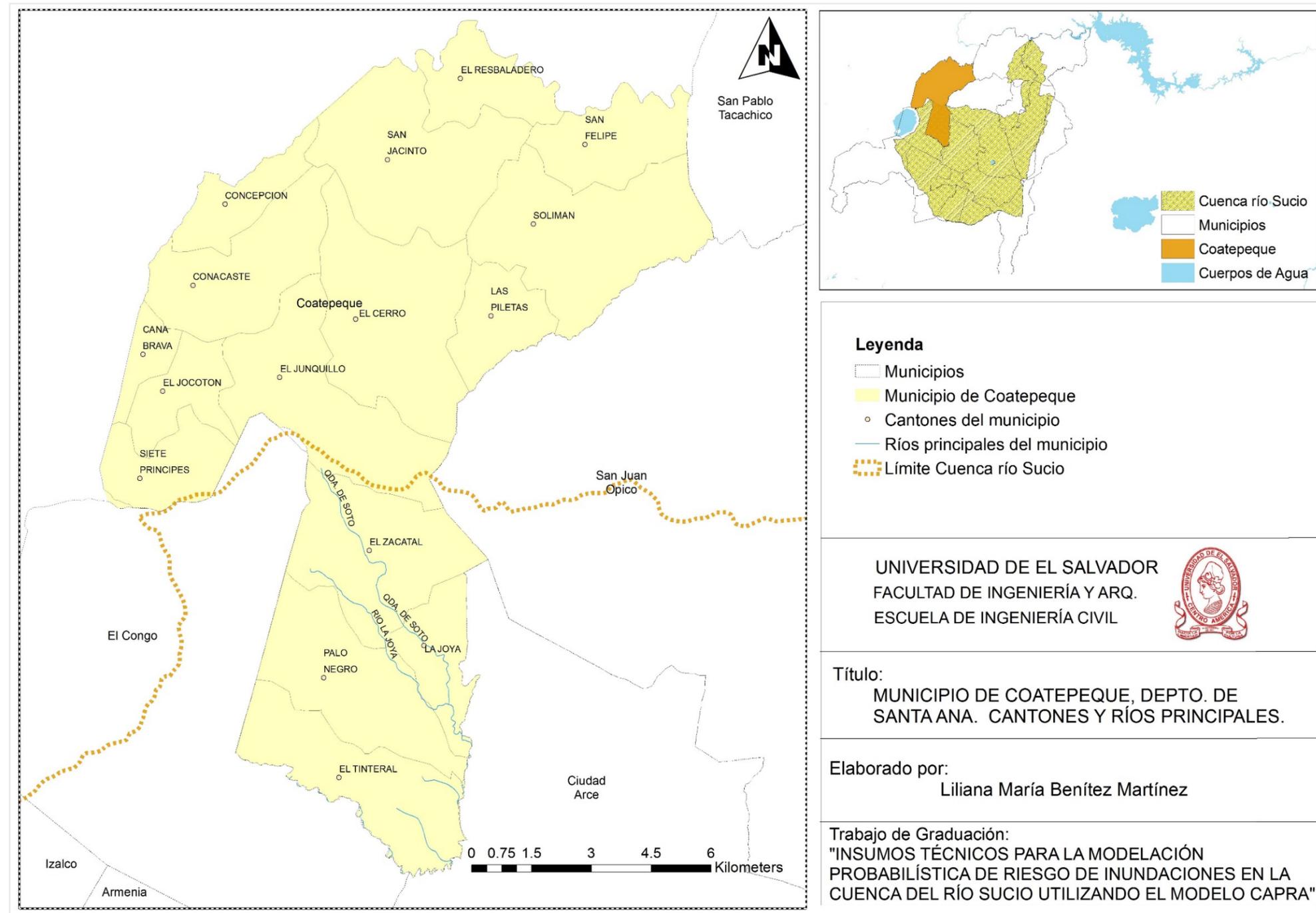


Figura 4.26 División político administrativa del municipio de Coatepeque, Santa Ana.

Fuente: Elaboración propia.

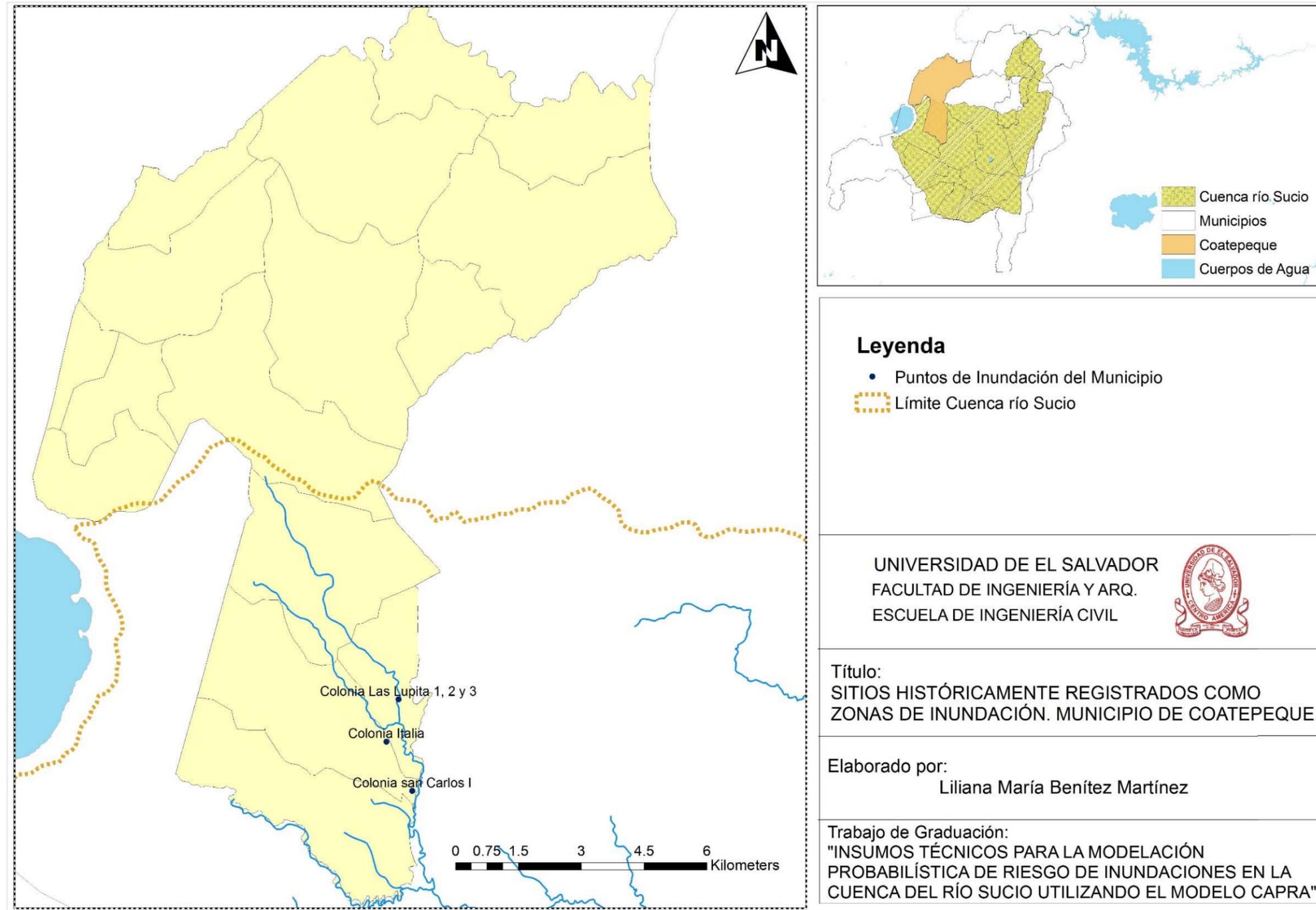


Figura 4.27 Ubicación geográfica de los sitios registrados históricamente como zona de inundación del municipio de Coatepeque.

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la municipalidad.

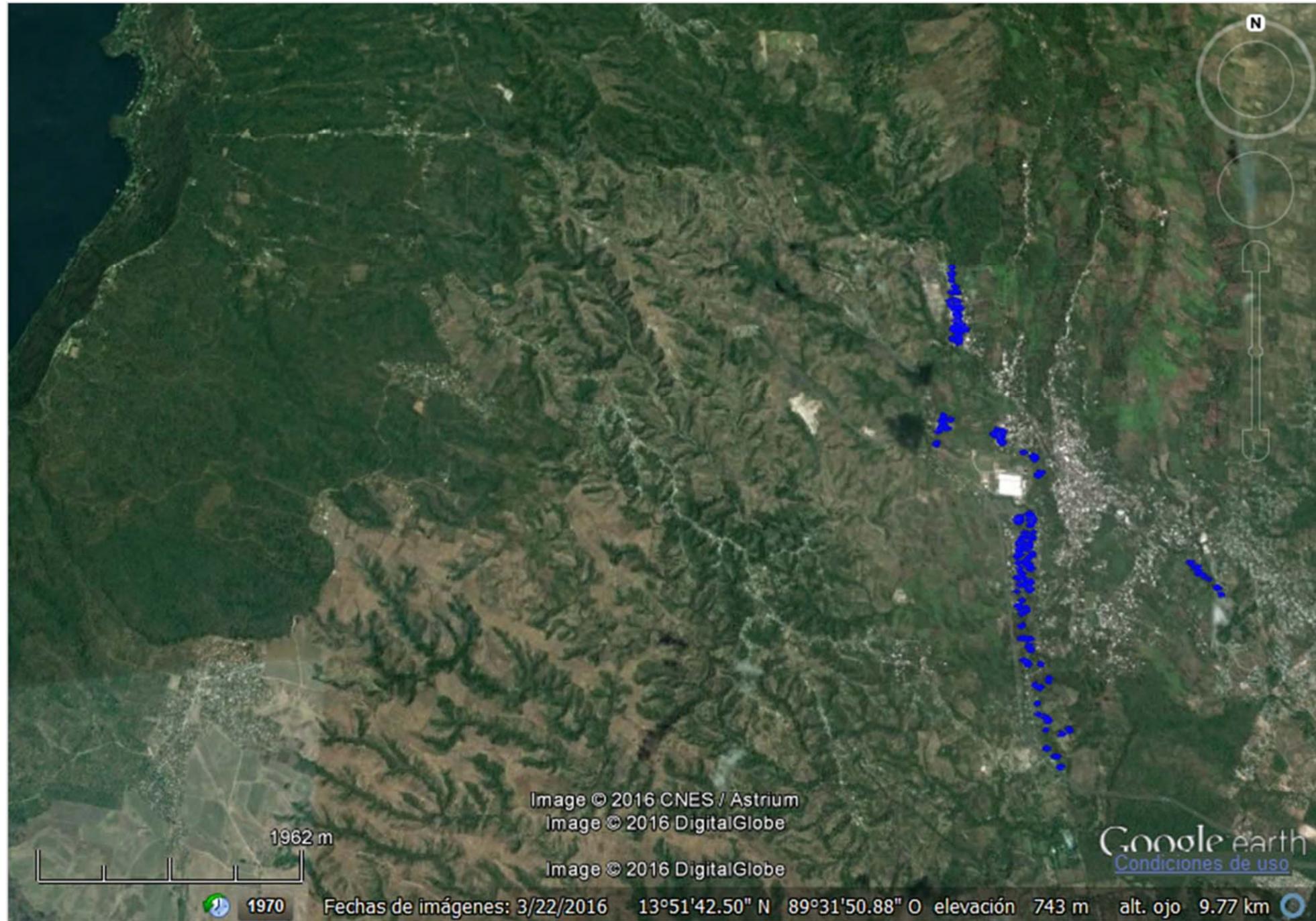


Figura 4.28 Levantamiento de infraestructura expuesta a la amenaza de inundación del municipio de Coatepeque.

Fuente: Elaboración propia mediante el uso de la herramienta Web CAPRA.

4.4.1.4 MUNICIPIO DE COLÓN, DEPARTAMENTO DE LA LIBERTAD

El municipio de Colón posee una extensión territorial de 76.86 km². Colinda con los municipios de Santa Tecla, San Juan Opico, Ciudad arce, Sacacoyo y Talnique.

En la Tabla 4.13 se detalla la población urbana y rural del municipio, así como también se lista el número de viviendas registradas hasta el año 2007.

Tabla 4.13 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de Colón.

Urbana			Rural			Número de viviendas		
Mujeres	Hombres	Total	Mujeres	Hombres	Total	Área Urbana	Área Rural	Total
48,297	42,915	91,212	2,911	2,886	5,777	28,760	1,550	30,310

Fuente: Censo de Población y Vivienda 2007, DIGESTYC.

En la Figura 4.29 se presenta la división político administrativa del municipio. En la Figura 4.30 se ubican geográficamente los sitios con amenaza de inundación registrados por organismos no gubernamentales en cooperación de la alcaldía municipal (Geólogos del Mundo, Plan por la niñez, Ayuda Humanitaria y Protección Civil, & Asdi, 2015) y la Tabla 4.14 lista las comunidades que han resultado históricamente afectadas por inundaciones.

Mediante la aplicación Web CAPRA se realizó el levantamiento de las edificaciones propensas a inundación que se encuentran cercanas a las coordenadas geográficas de la Figura 4.30. Dicha información se muestra en la Figura 4.31.

Tabla 4.14 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de Colón.

Identificación	Ubicación
001-INUN	C. El Capulín, colonia Rancho Hondo
002-INUN	C. El Capulín, Jardines de Colón
003-INUN	C. El Capulín, Km. 21 Colonia el Primo
004-INUN	C. El Capulín, Col. San José del río
005-INUN	C. Cayagualo, Col. San José 1
006-INUN	C. Hacienda N., Crío. El Rodeo
007-INUN	C. Entre ríos, Crío. Las Seiscientas
008-INUN	C. El Botoncillal, Lot. La Ceiba
009-INUN	C. El Botoncillal, Crío. El Botoncillal
010-INUN	C. Entre ríos, Crío El Edén
011-INUN	C. Entre ríos, col. Girón
012-INUN	C. Entre ríos, Crío El Chapernal
013-INUN	C. El Capulín, Comunidad Milagro de Dios
014-INUN	C. El Capulín, Comunidad Milagro de Dios

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la municipalidad y (Geólogos del Mundo, Plan por la niñez, Ayuda Humanitaria y Protección Civil, & Asdi, 2015).

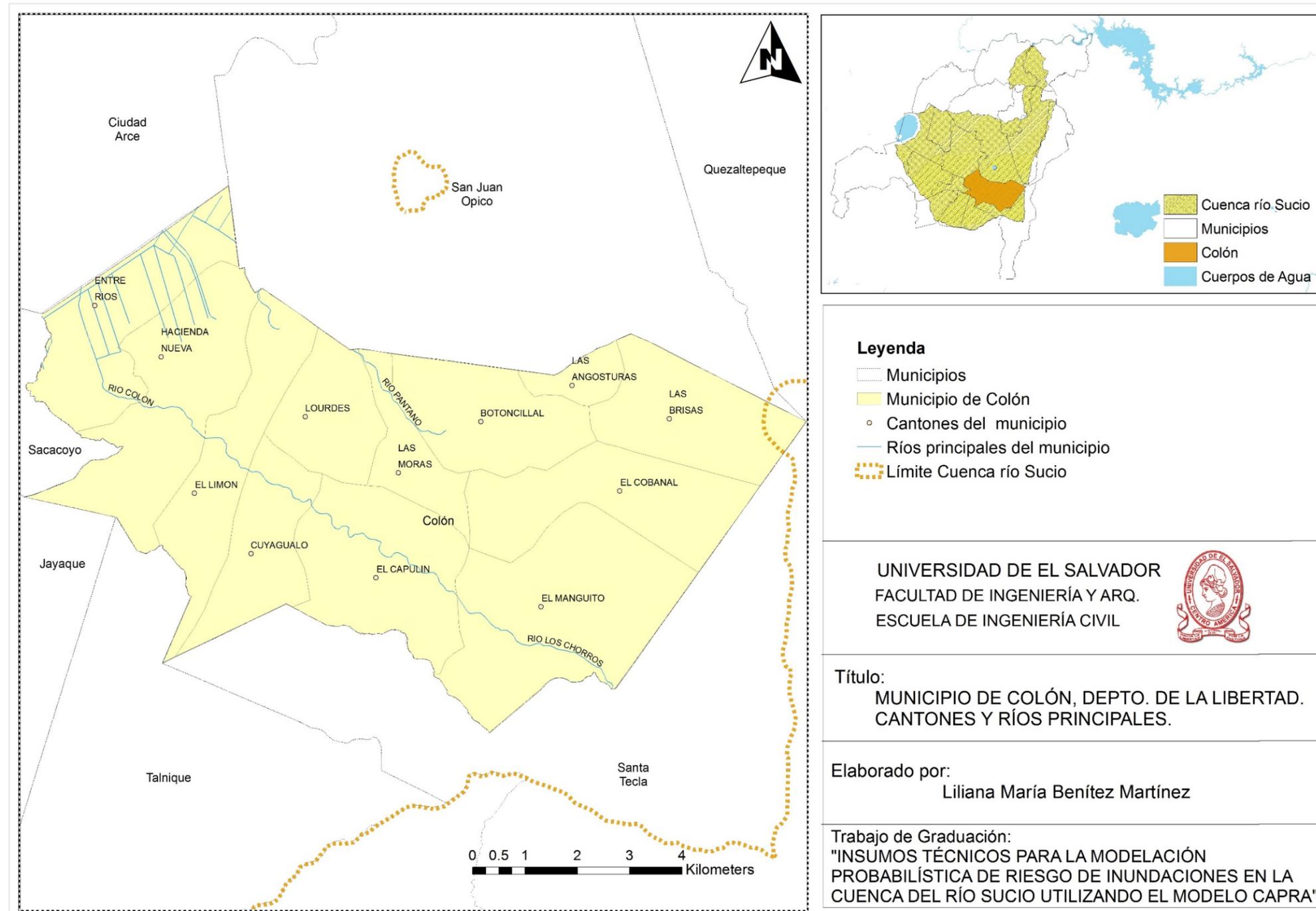


Figura 4.29 División político administrativa del municipio de Colón, La Libertad.

Fuente: Elaboración propia.

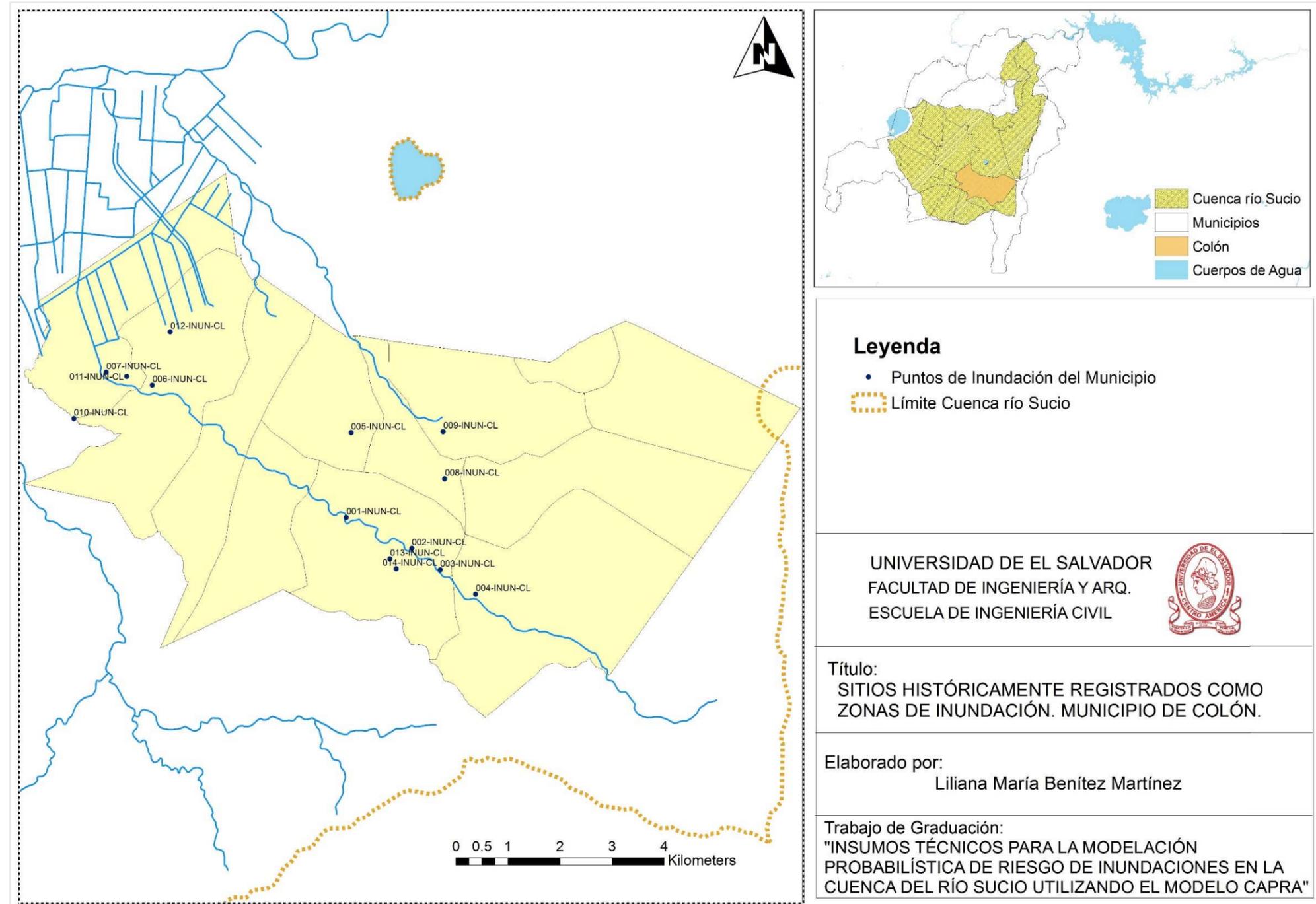


Figura 4.30 Ubicación geográfica de los sitios registrados históricamente como zona de inundación del municipio de Colón.

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la municipalidad y (Geólogos del Mundo, Plan por la niñez, Ayuda Humanitaria y Protección Civil, & Asdi, 2015).

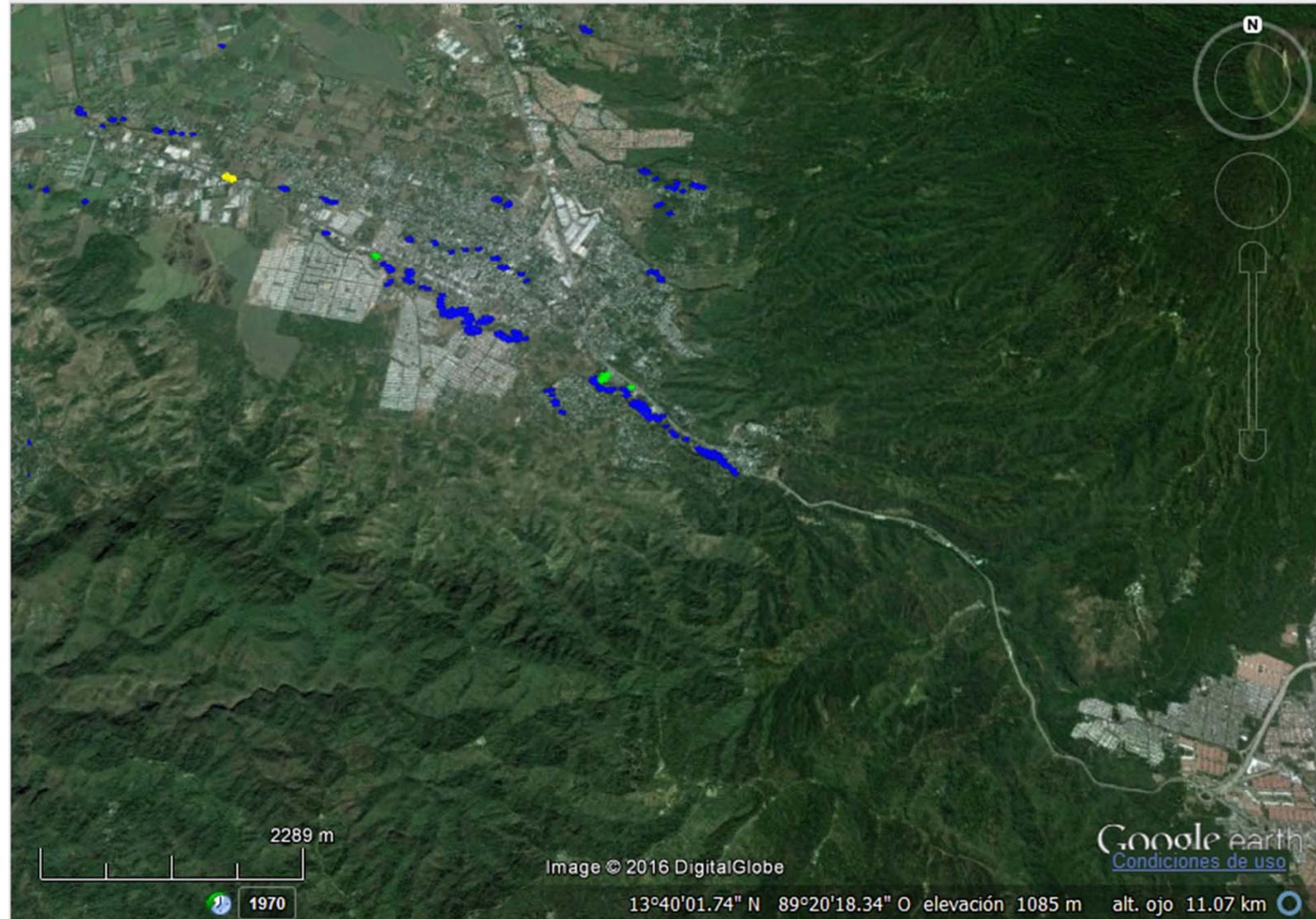


Figura 4.31 Levantamiento de infraestructura expuesta a la amenaza de inundación del municipio de Colón.

Fuente: Elaboración propia mediante el uso de la herramienta Web CAPRA.

4.4.1.5 MUNICIPIO DE EL CONGO, DEPARTAMENTO DE SANTA ANA

El municipio de El Congo posee una extensión territorial de 91.43 km². Colinda con los municipios de Coatepeque, Izalco, Armenia y Santa Ana.

En la Tabla 4.15 se detalla la población urbana y rural del municipio, así como también se lista el número de viviendas registradas hasta el año 2007.

Tabla 4.15 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de El Congo.

Urbana			Rural			Número de viviendas		
Mujeres	Hombres	Total	Mujeres	Hombres	Total	Área Urbana	Área Rural	Total
7,823	6,771	14,594	4,908	4,717	9,625	4,073	2,408	6,481

Fuente: Censo de Población y Vivienda 2007, DIGESTYC.

En la Figura 4.32 se presenta la división político administrativa del municipio. En la Figura 4.33 se ubican geográficamente los sitios con amenaza de inundación registrados por de Protección Civil del municipio y la Tabla 4.16 lista las comunidades que han resultado históricamente afectadas por inundaciones.

Mediante la aplicación Web CAPRA se realizó el levantamiento de las edificaciones propensas a inundación que se encuentran cercanas a las coordenadas geográficas de la Figura 4.33. Dicha información se muestra en la Figura 4.34.

Tabla 4.16 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de El Congo.

Identificación	Ubicación
001-INUN	Caserío La Palomera

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la municipalidad.

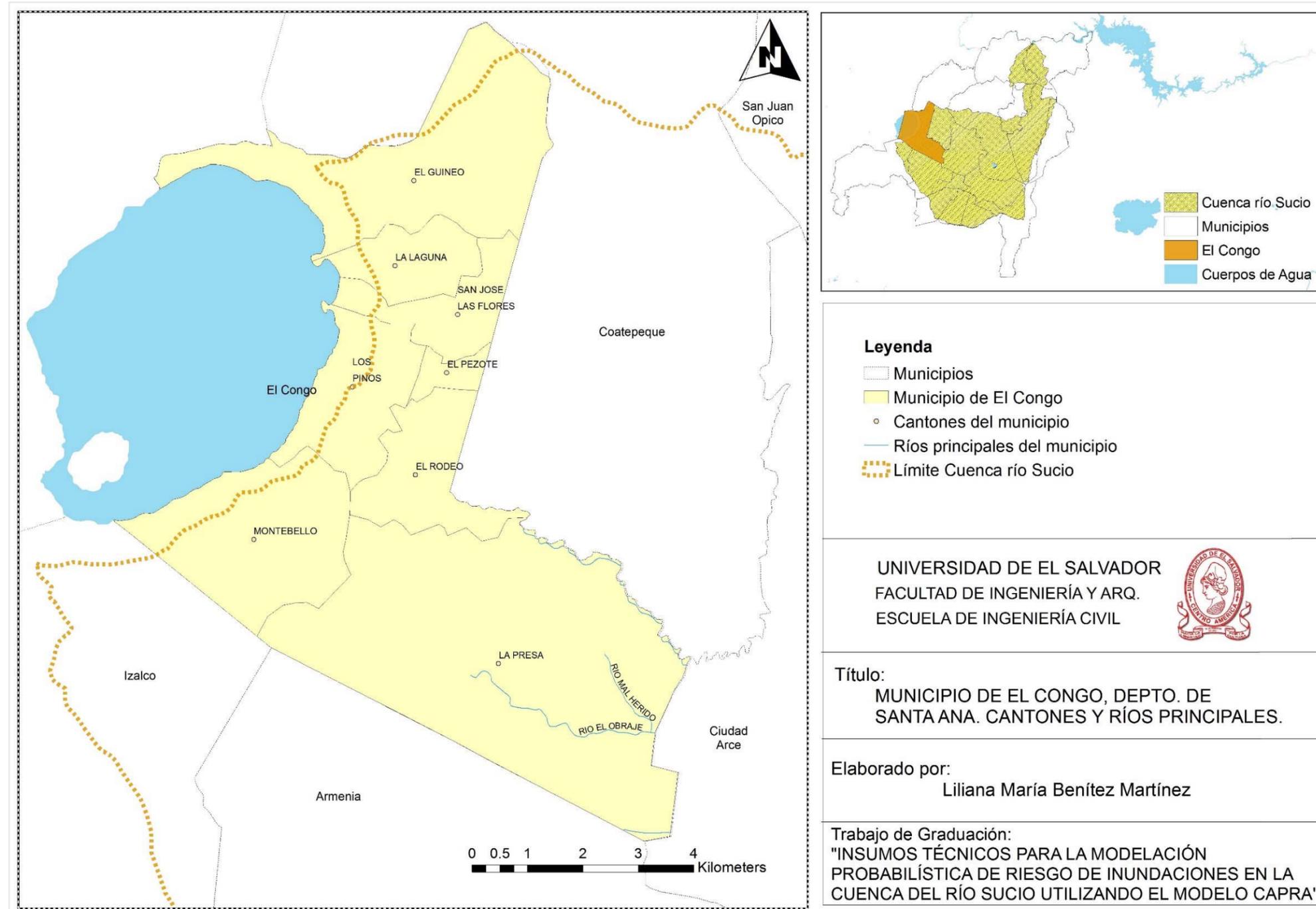


Figura 4.32 División político administrativa del municipio de El Congo, Santa Ana.

Fuente: Elaboración propia.

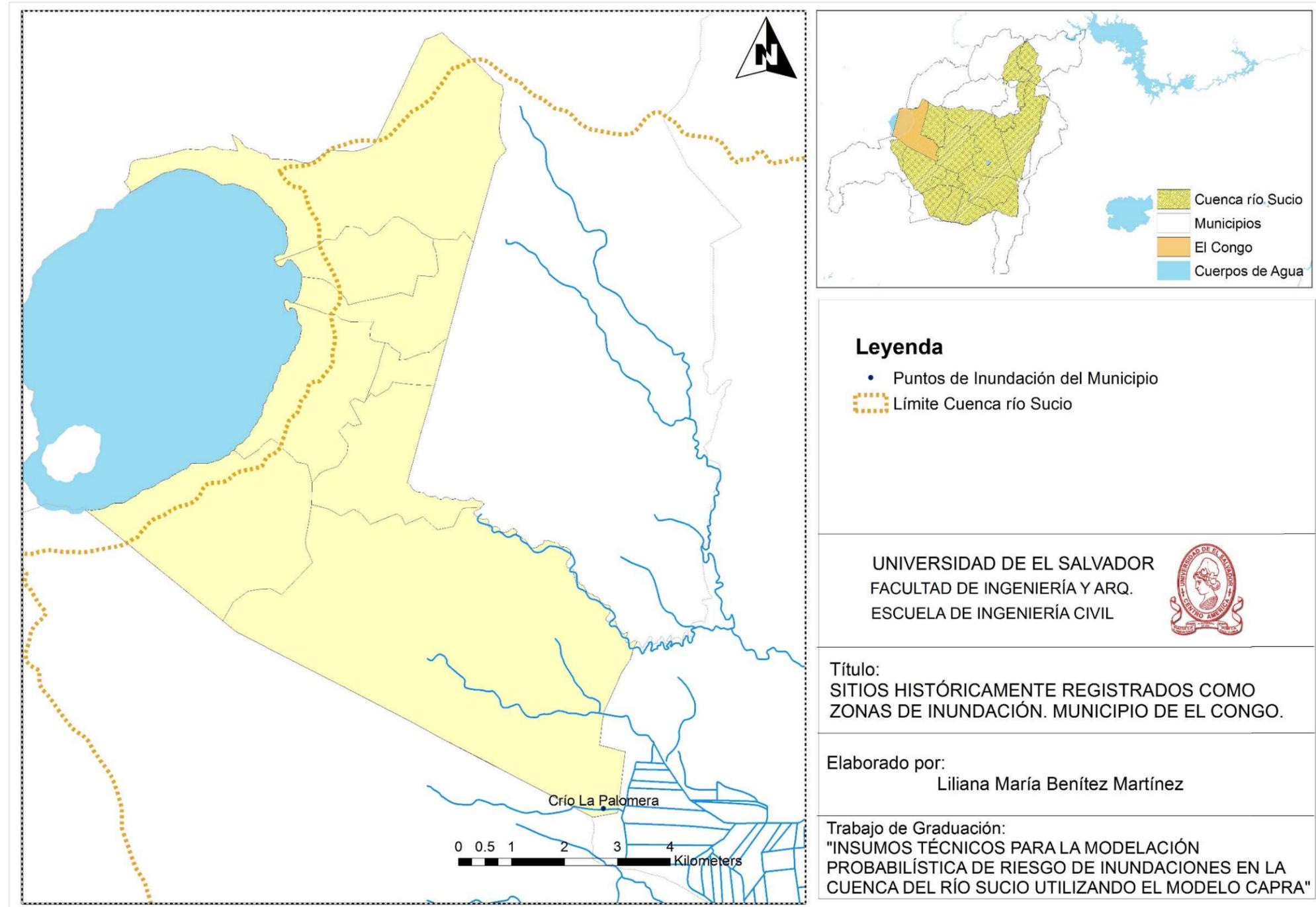


Figura 4.33 Ubicación geográfica del sitio registrado históricamente como zona de inundación del municipio de El Congo.

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la municipalidad.

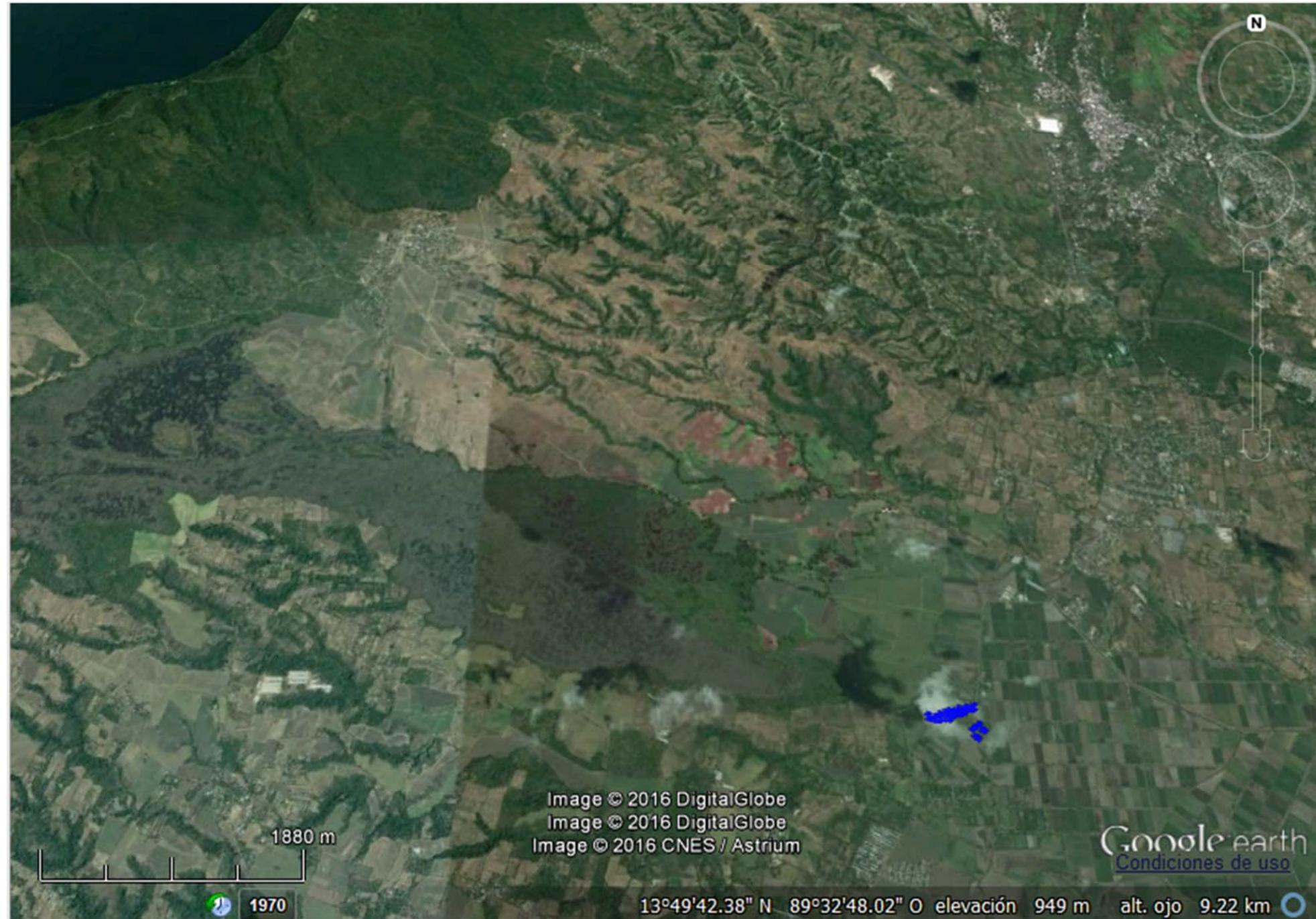


Figura 4.34 Levantamiento de infraestructura expuesta a la amenaza de inundación del municipio de El Congo.

Fuente: Elaboración propia mediante el uso de la herramienta Web CAPRA.

4.4.1.6 MUNICIPIO DE EL PAISNAL, DEPARTAMENTO DE SAN SALVADOR

El municipio de El Paisnal posee una extensión territorial de 127.18 km², de los cuales un área aproximada de 125.25 km² corresponde al área rural y 1.93 km² al área urbana. Colinda con los municipios de Nueva Concepción, Suchitoto, San Pablo Tacachico, Aguilares, Quezaltepeque y San Matías.

En la Tabla 4.17 se detalla la población urbana y rural del municipio; también se lista el número de viviendas registradas hasta el año 2007. Los materiales predominantes en la construcción de viviendas son: adobe, ladrillo de barro y bloque de concreto; con techo de lámina o teja.

Tabla 4.17 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de El Paisnal.

Urbana			Rural			Número de viviendas		
Mujeres	Hombres	Total	Mujeres	Hombres	Total	Área Urbana	Área Rural	Total
3,496	3,227	6,723	3,971	3,857	7,828	1,737	2,123	3,860

Fuente: Censo de Población y Vivienda 2007, DIGESTYC.

En la Figura 4.35 se presenta la división político administrativa del municipio. En la Figura 4.36 se ubican geográficamente los sitios con amenaza de inundación registrados por la alcaldía del municipio (Aquino, ISDEM, PFGL, FISDL, & Alcaldía Municipal, 2014) y la Tabla 4.18 lista las comunidades que han resultado históricamente afectadas por inundaciones.

Mediante la aplicación Web CAPRA se realizó el levantamiento de las edificaciones propensas a inundación que se encuentran cercanas a las

coordenadas geográficas de la Figura 4.36. Dicha información se muestra en la Figura 4.37.

Tabla 4.18 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de El Paisnal.

Identificación	Ubicación
I. 01	C. Natividad, Crío central, comunidad Natividad
I. 02	C. Natividad, Comunidad Santiago Torres.
I. 03	C. El Jicarón, crío. La Calzada
I. 04	C. El Tronador, crío. La Joya
I. 05	C. Natividad, Zona baja del ctón. San Fco. Los dos Cerros.

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la municipalidad.

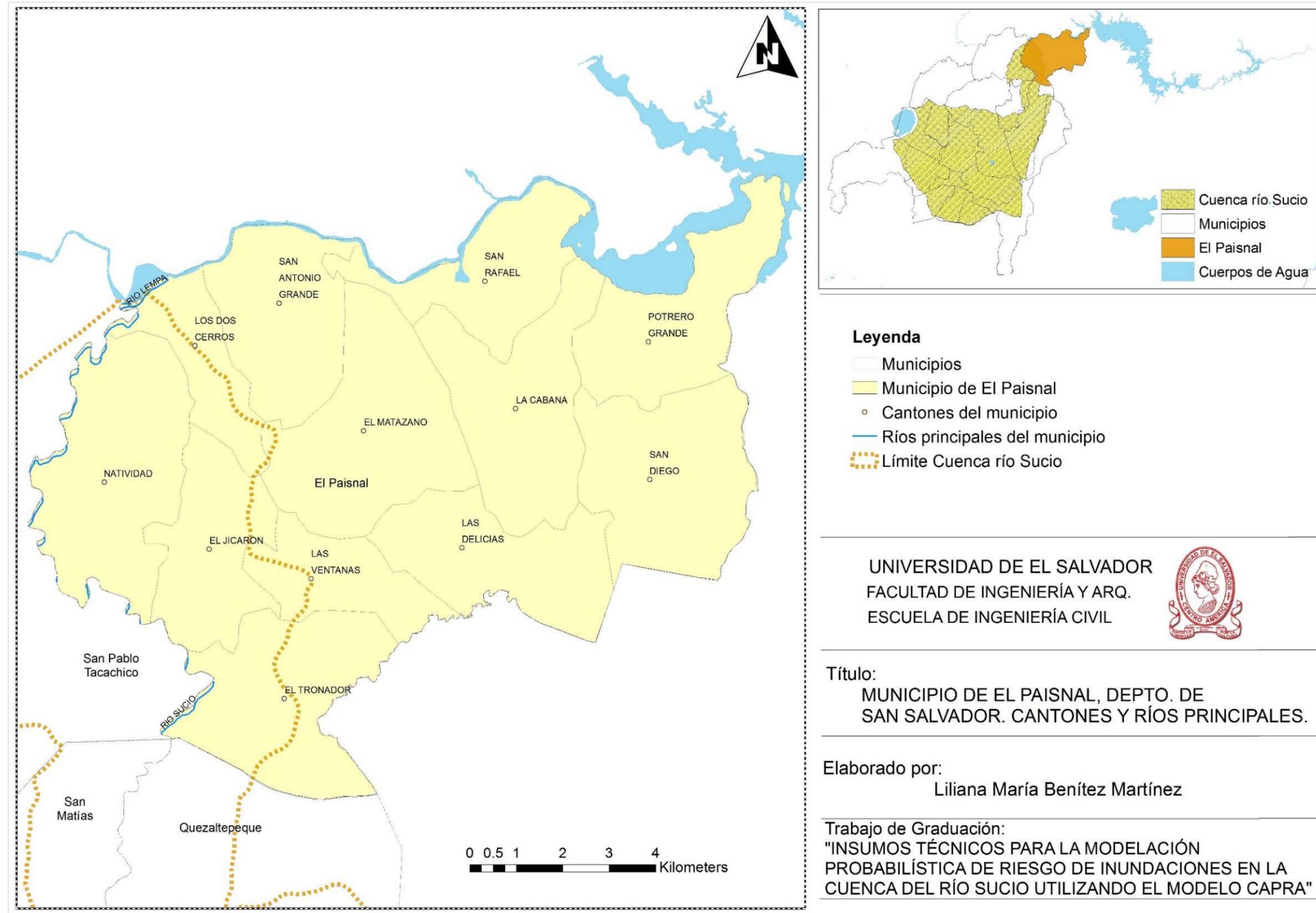


Figura 4.35 División político administrativa del municipio de El Paisnal, San Salvador.

Fuente: Elaboración propia.

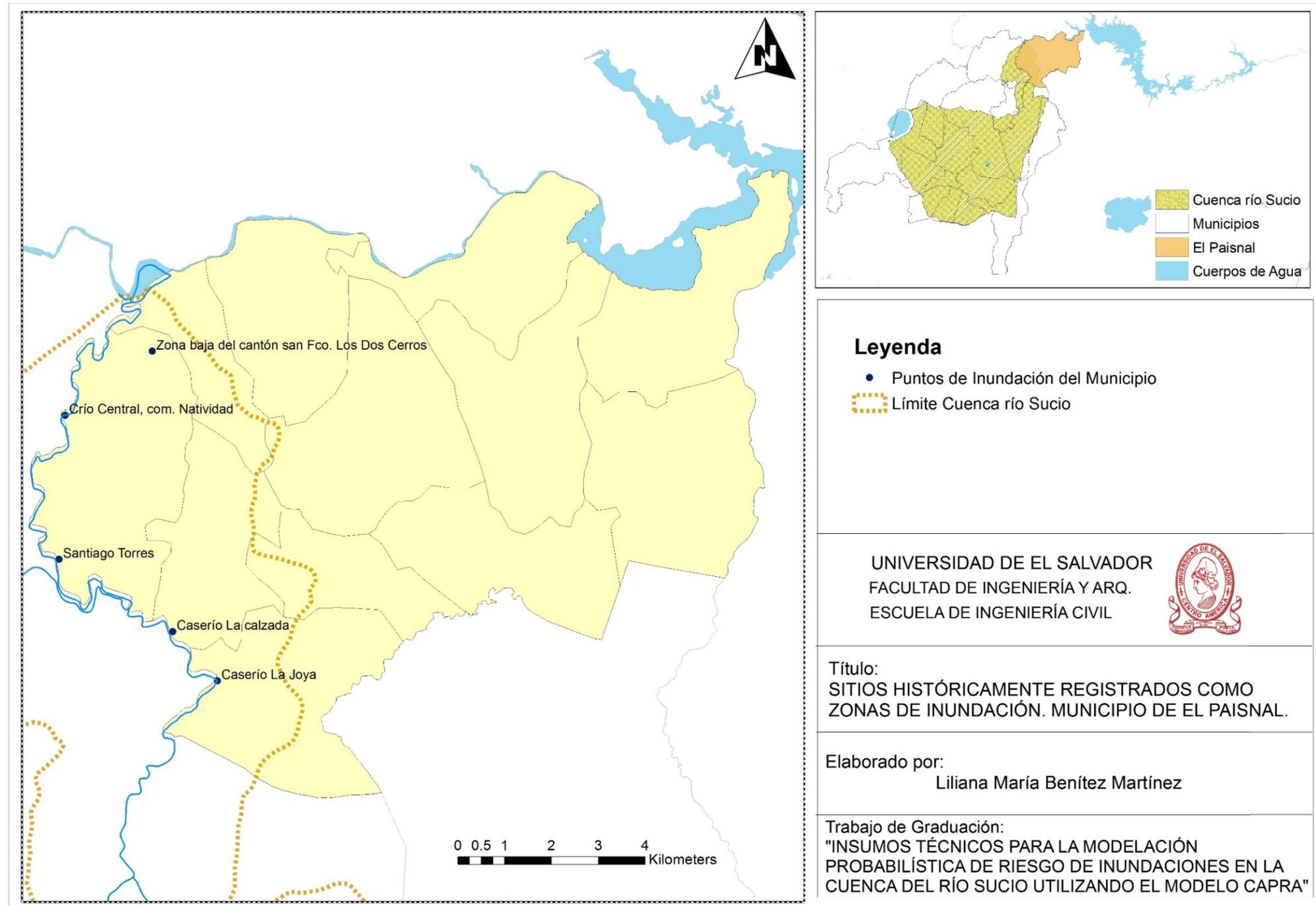


Figura 4.36 Ubicación geográfica del sitio registrado históricamente como zona de inundación del municipio de El Paisnal.

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la municipalidad.

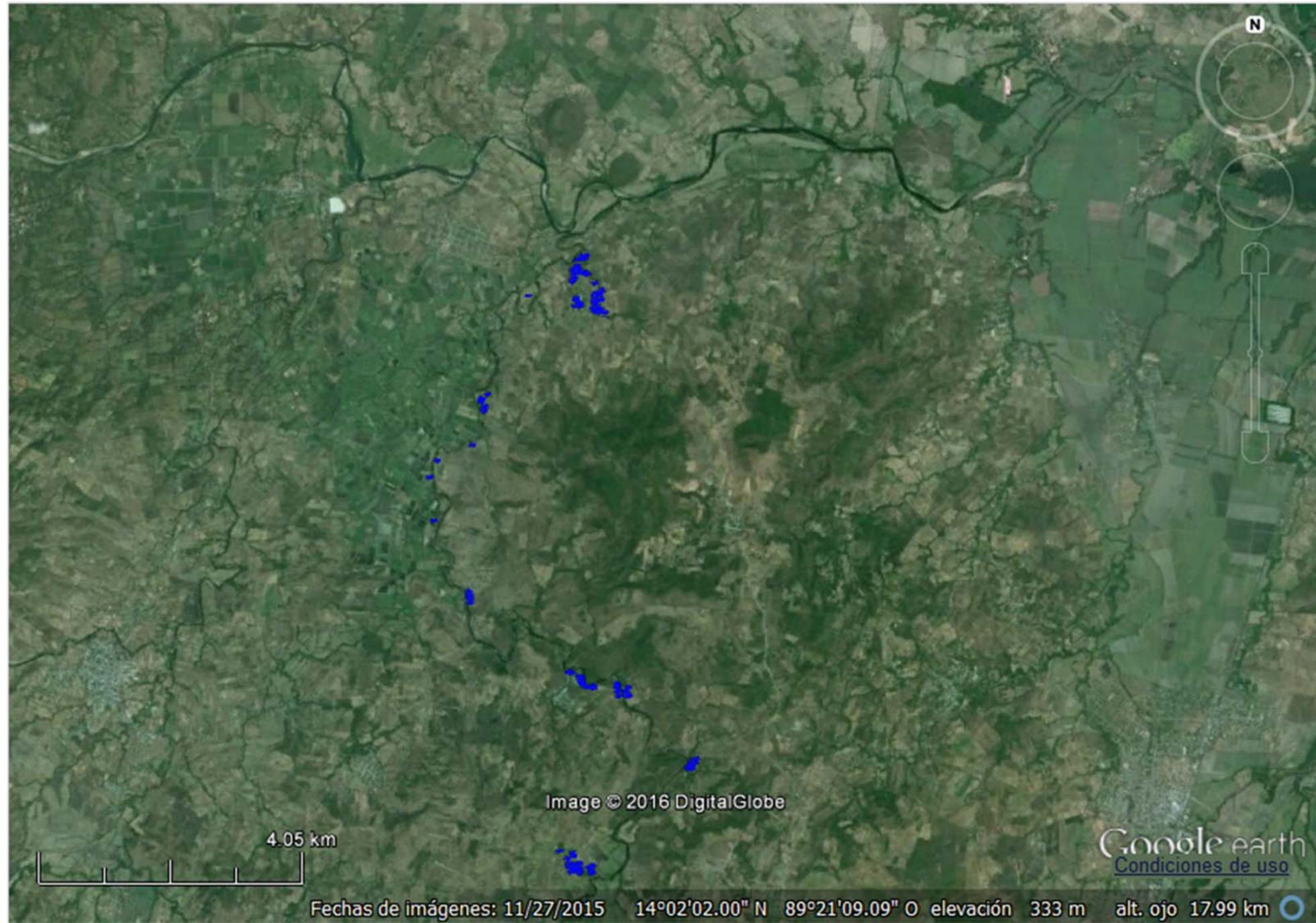


Figura 4.37 Levantamiento de infraestructura expuesta a la amenaza de inundación del municipio de El Paisnal.

Fuente: Elaboración propia mediante el uso de la herramienta Web CAPRA.

4.4.1.7 MUNICIPIO DE IZALCO, DEPARTAMENTO DE SONSONATE

El municipio de Izalco posee una extensión territorial de 169.92 km². Colinda con los municipios de El Congo, Nahulingo, Santa Ana, armenia, San Julián, Caluco, Sonsonate, Sonzacate y Nahuizalco.

En la Tabla 4.19 se detalla la población urbana y rural del municipio; también se lista el número de viviendas registradas hasta el año 2007.

Tabla 4.19 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de Izalco

Urbana			Rural			Número de viviendas		
Mujeres	Hombres	Total	Mujeres	Hombres	Total	Área Urbana	Área Rural	Total
20,748	19,038	39,786	15,791	15,382	31,173	10,414	7,609	18,023

Fuente: Censo de Población y Vivienda 2007, DIGESTYC.

En la Figura 4.38 se presenta la división político administrativa del municipio.

Éste municipio no registra inundaciones ocasionadas por los ríos que conforman la cuenca del río Sucio; debido a que el área del municipio que se encuentra dentro de la cuenca, se ubica en la parte alta de la misma.

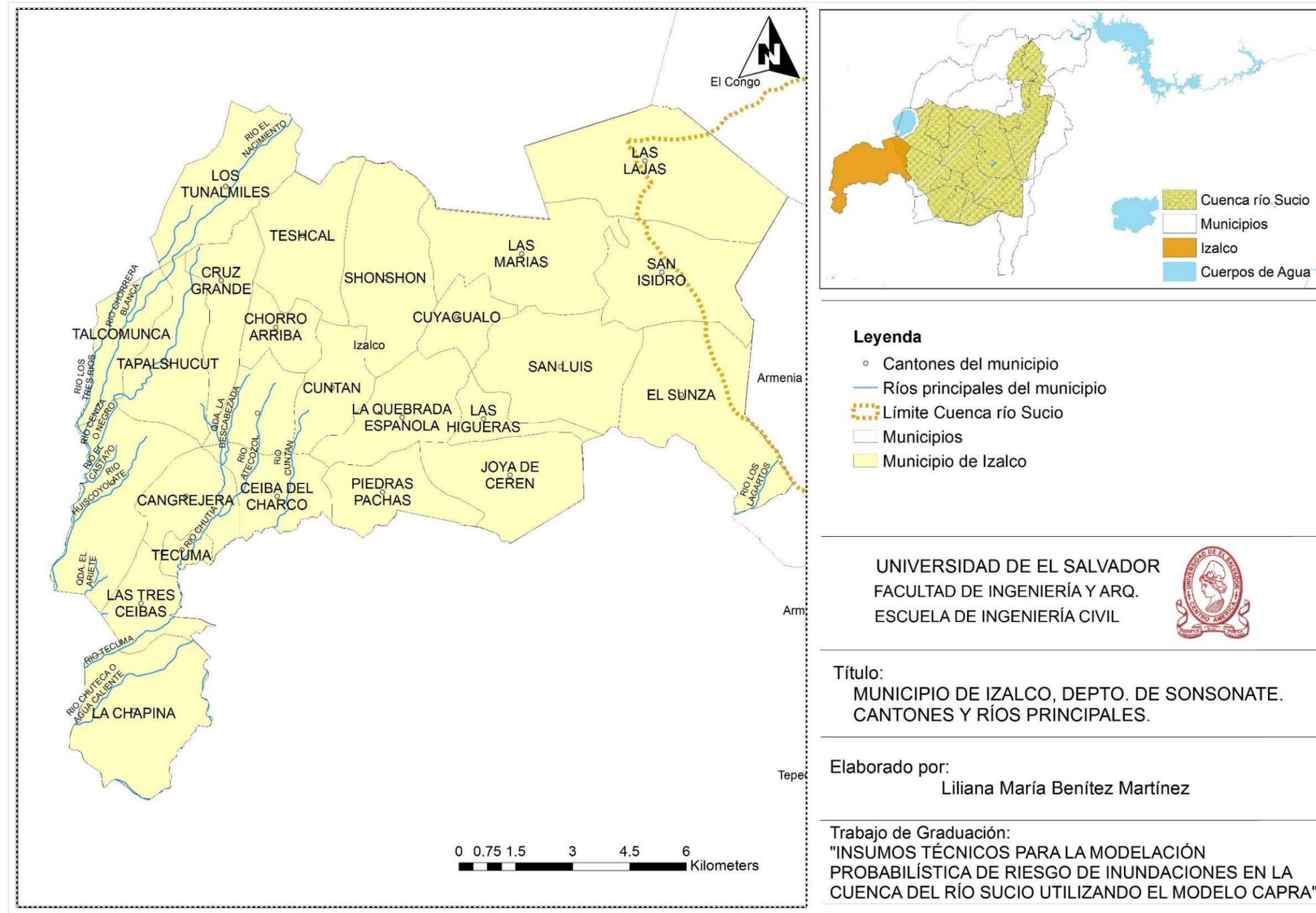


Figura 4.38 División político administrativa del municipio de Izalco, Sonsonate.

Fuente: Elaboración propia.

4.4.1.8 MUNICIPIO DE JAYAQUE, DEPARTAMENTO DE LA LIBERTAD

El municipio de Jayaque posee una extensión territorial de 65.64 km², de los cuales un área aproximada de 4.06 km² corresponde al área urbana. Colinda con los municipios Sacacoyo, Colón, Tamanique, Chiltiupan, Teotepeque, Talnique y Tepecoyo.

En la Tabla 4.20 se detalla la población urbana y rural del municipio, también se lista el número de viviendas registradas hasta el año 2007, que a nivel municipal, el 58% de las viviendas está construido de bahareque, el 18% de sistemas mixtos y un 24% de otro tipo, en su mayoría lámina (Sub Secretaria de Desarrollo Territorial y Descentralización, 2013).

Tabla 4.20 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de Jayaque.

Urbana			Rural			Número de viviendas		
Mujeres	Hombres	Total	Mujeres	Hombres	Total	Área Urbana	Área Rural	Total
3,569	3,325	6,894	2,080	2,084	4,164	1,894	1,076	2,970

Fuente: Censo de Población y Vivienda 2007, DIGESTYC.

En la Figura 4.39 se presenta la división político administrativa del municipio. En la Figura 4.40 se ubican geográficamente los sitios con amenaza de inundación registrados por la alcaldía del municipio (PFGL, ISDEM, & Alcaldía Municipal de Jayaque, Plan Municipal de Gestión de Riesgos de Desastres de Jayaque, Departamento de La Libertad, El Salvador. Período 2013-2018., 2013) y la Tabla

4.21 lista las comunidades que han resultado históricamente afectadas por inundaciones.

Mediante la aplicación Web CAPRA se realizó el levantamiento de las edificaciones propensas a inundación que se encuentran cercanas a las coordenadas geográficas de la Figura 4.40. Dicha información se muestra en la Figura 4.41.

Tabla 4.21 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de Jayaque.

Identificación	Ubicación
I. 01	Cantón Las Flores, Asentamiento El Refugio
I. 02	Cantón Las Minas, Caserío Las Graditas
I. 03	Cantón Curacao, Colonia Nueva Esperanza
I. 04	Cantón Curacao, Caserío San José La Cumbrita
I. 05	Cantón Curacao, Colonia Las Arboledas
I. 06	Cantón La Labor, Colonia Llano Verde I
I. 07	Cantón La Labor, colonia Llano Verde II
I. 08	Cantón La Labor, Colonia 2 de mayo
I. 09	Cantón La Labor, Colonia Independencia

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la municipalidad.

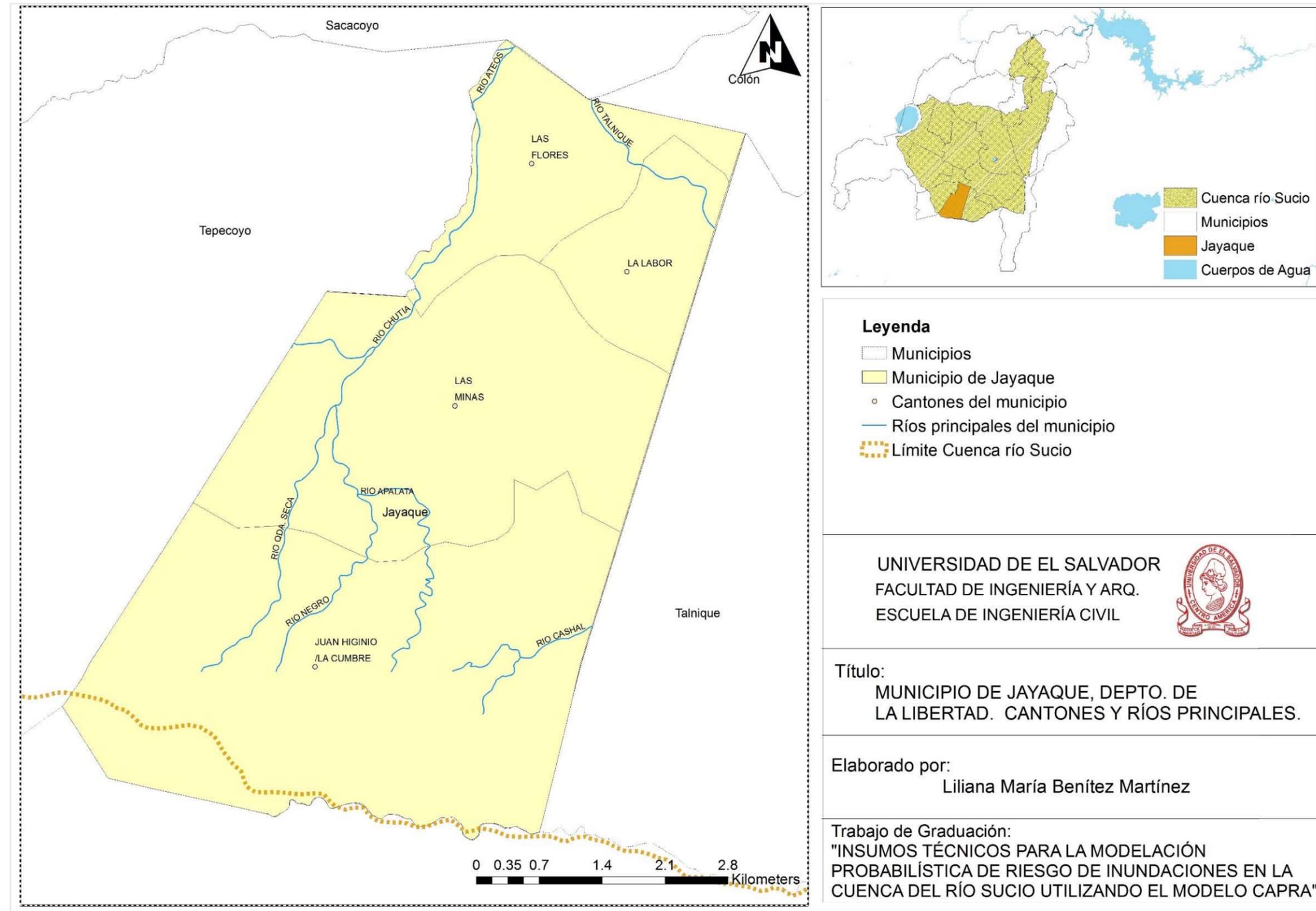


Figura 4.39 División político administrativa del municipio de Jayaque, La Libertad.

Fuente: Elaboración propia.

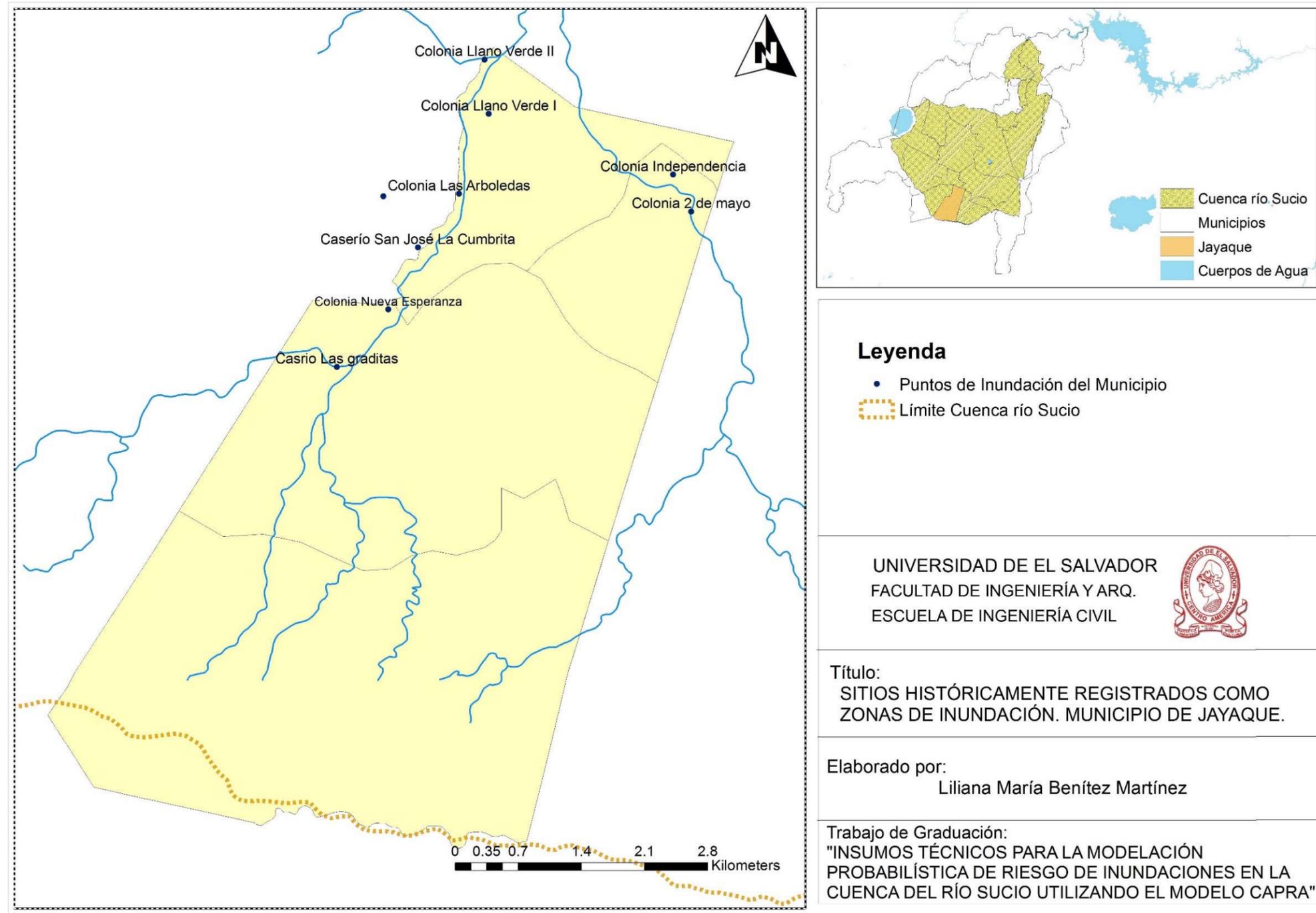


Figura 4.40 Ubicación geográfica del sitio registrado históricamente como zona de inundación del municipio de Jayaque.

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la municipalidad.

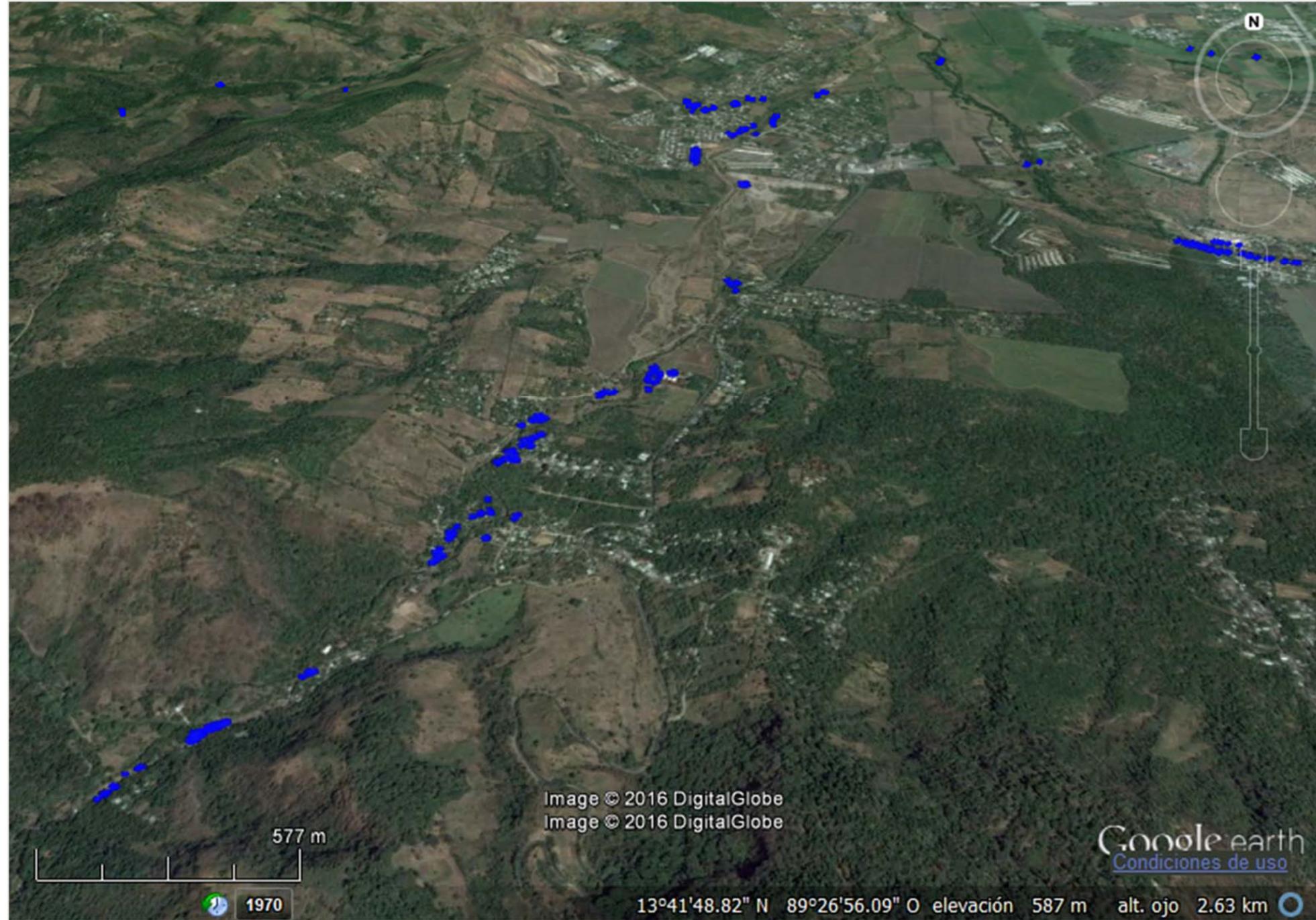


Figura 4.41 Levantamiento de infraestructura expuesta a la amenaza de inundación del municipio de Jayaque.

Fuente: Elaboración propia mediante el uso de la herramienta Web CAPRA.

4.4.1.9 MUNICIPIO DE NEJAPA, DEPARTAMENTO DE SAN SALVADOR

El municipio de Nejapa posee una extensión territorial de 81.39 km². Colinda con los municipios de Quezaltepeque, Guazapa, Aguilares, Apopa, Mejicanos, Santa Tecla y San Salvador.

En la Tabla 4.22 se detalla la población urbana y rural del municipio; también se lista el número de viviendas registradas hasta el año 2007.

Tabla 4.22 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de Nejapa.

Urbana			Rural			Número de viviendas		
Mujeres	Hombres	Total	Mujeres	Hombres	Total	Área Urbana	Área Rural	Total
8,658	7,872	16,530	6,510	6,418	12,928	5,025	3,434	8,459

Fuente: Censo de Población y Vivienda 2007, DIGESTYC.

En la Figura 4.42 se presenta la división político administrativa del municipio.

Éste municipio no registra inundaciones ocasionadas por los ríos que conforman la cuenca del río Sucio, sin embargo es afectado por el río San Antonio (Aguilar, PFGL, ISDEM, FISDL, & Alcaldía Municipal de Nejapa).

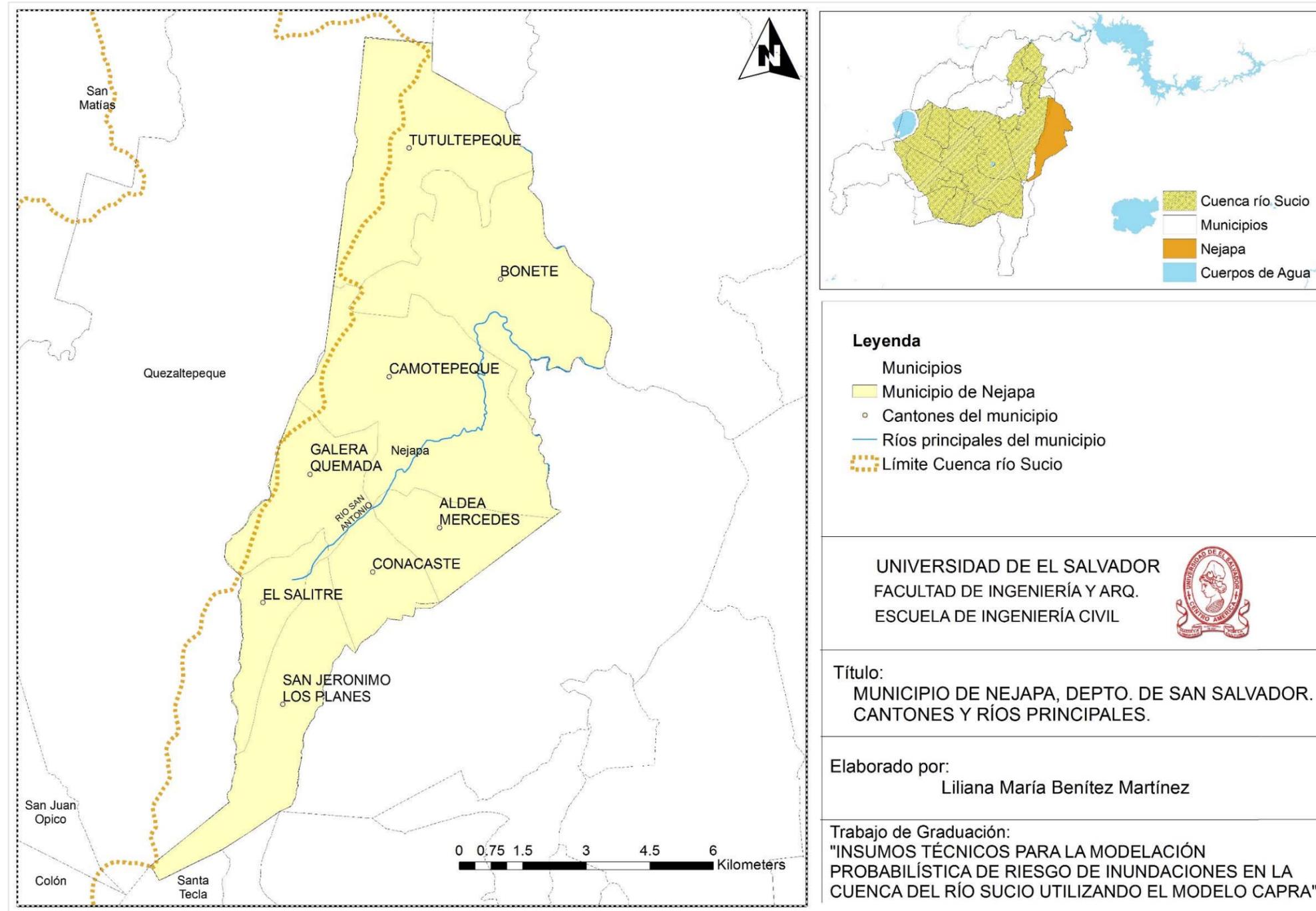


Figura 4.42 División político administrativa del municipio de Nejapa, San Salvador.

Fuente: Elaboración propia.

**4.4.1.10 MUNICIPIO DE QUEZALTEPEQUE, DEPARTAMENTO DE LA
LIBERTAD**

El municipio de Quezaltepeque posee una extensión territorial de 125.91 km². Colinda con los municipios de El Congo, Ciudad Arce, Sacacoyo, Tepecoyo e Izalco.

En la Tabla 4.23 se detalla la población urbana y rural del municipio, también se lista el número de viviendas registradas hasta el año 2007.

Tabla 4.23 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de Quezaltepeque.

Urbana			Rural			Número de viviendas		
Mujeres	Hombres	Total	Mujeres	Hombres	Total	Área Urbana	Área Rural	Total
19,376	16,786	36,162	8,352	8,129	16,481	11,501	4,350	15,851

Fuente: Censo de Población y Vivienda 2007, DIGESTYC.

En la Figura 4.43 se presenta la división político administrativa del municipio. En la Figura 4.44 se ubican geográficamente los sitios con amenaza de inundación registrados por la alcaldía del municipio (ISDEM, PFGL, & Alcaldía Municipal de Quezaltepeque, 2014) y la Tabla 4.24 lista las comunidades que han resultado históricamente afectadas por inundaciones.

Mediante la aplicación Web CAPRA se realizó el levantamiento de las edificaciones propensas a inundación que se encuentran cercanas a las coordenadas geográficas de la Figura 4.44. Dicha información se muestra en la Figura 4.45.

Tabla 4.24 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de Quezaltepeque.

Identificación	Ubicación
I. 01	Cantón El Puente, col. Santa María 1
I. 02	Cantón El Puente, quebrada Puluncuilo
I. 03	Cantón El Puente, Comunidad San Rafael 1
I. 04	Cantón El Puente, Comunidad San Rafael 2
I. 05	Cantón Santa Rosa, calle antigua Nejapa, quebrada Aguacayo
I. 06	Casco Urbano, final 7ª calle y col. Santa Emilia
I. 07	Casco Urbano, calle a cantón Girón, quebrada El Chaguite
I. 08	Crío. El Cerrito
I. 09	Casco urbano, calle La Arenera
I. 10	Quebrada, Caserío Los Gonzalez
I. 11	Ctón Primavera Abajo, Caserío Los Barahona
I. 12	Crío. Cañal viejo, La Quebradona
I. 13	Crío. El aguacate
I. 14	Crío. El aguacate
I. 15	Crío Valle Nuevo
I. 16	Crío Cañal viejo, quebrada el panteón
I. 17	Crío El Mecate, en el inicio de calle principal concreteada de calle principal
I. 18	Paso quebrada Honda, Hacienda Tacachico, quebrada Los Caragos. Entrada al caserío de sur a norte
I. 19	Crío. Las Marías, entrada a Cooperativa Las Marías
I.20	Crío San Ramón, contiguo al paso de Cooperativa cantón Tacachico
I.21	Crío. Agua Fría
I.22	Crío. Las Lomas, quebrada el Copinol
I.23	Crío. Agua Fría, Las Trancas, entrada a Hacienda San Antonio
I.24	Sitio de Los Nejapa abajo.
I.25	Quebrada Agua Caliente
I.26	Colonia Las Cañas, puente hacia Agua Caliente
I.27	Quebrada El Manantial, crío. Agua Caliente
I.28	Quebrada el Tempisque
I.29	Cantón Girón, Centro Escolar, Quebrada el Puente
I. 30	Cantón El Puente, quebrada El Puluncuilo, calle a San Matías

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la municipalidad.

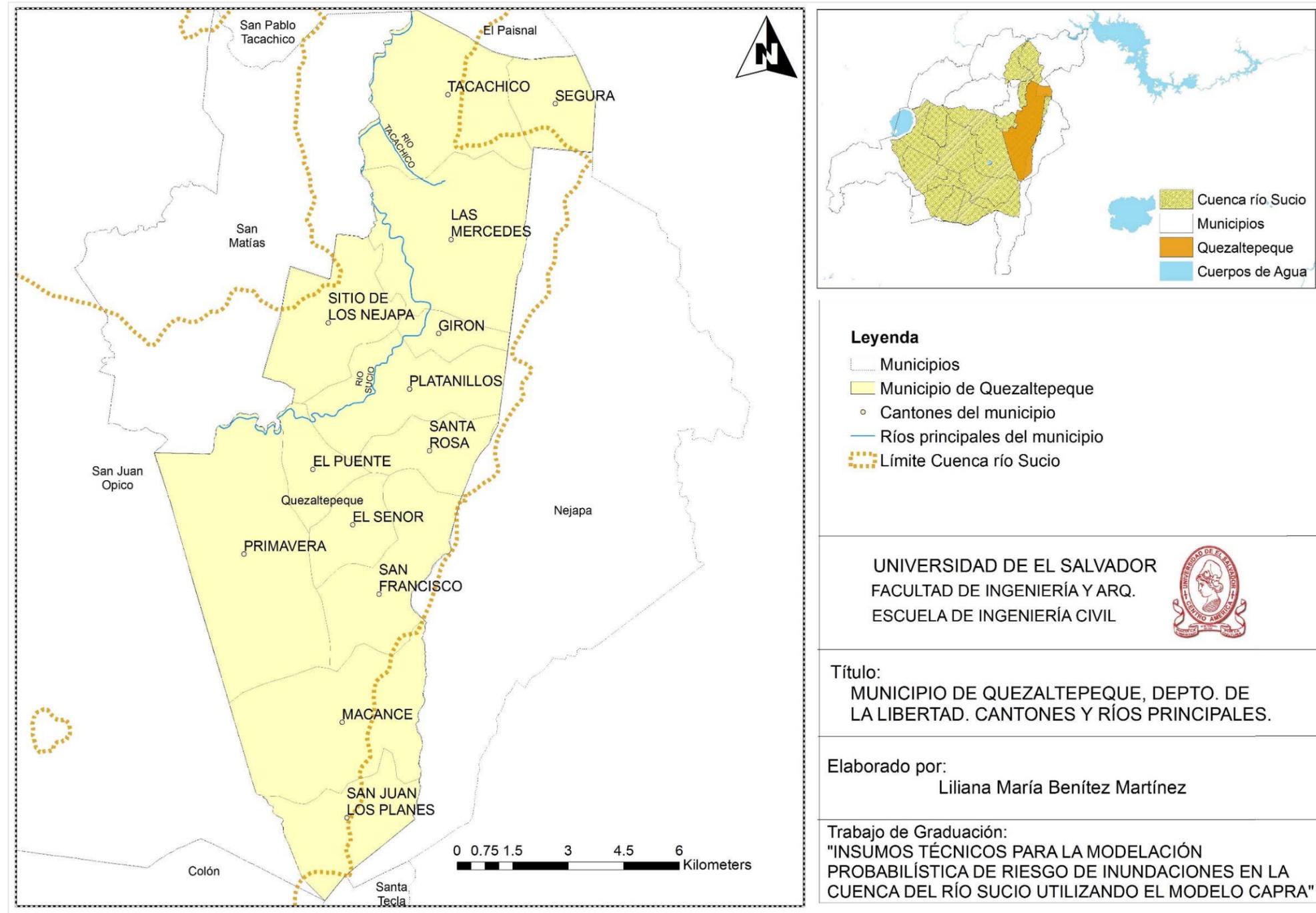
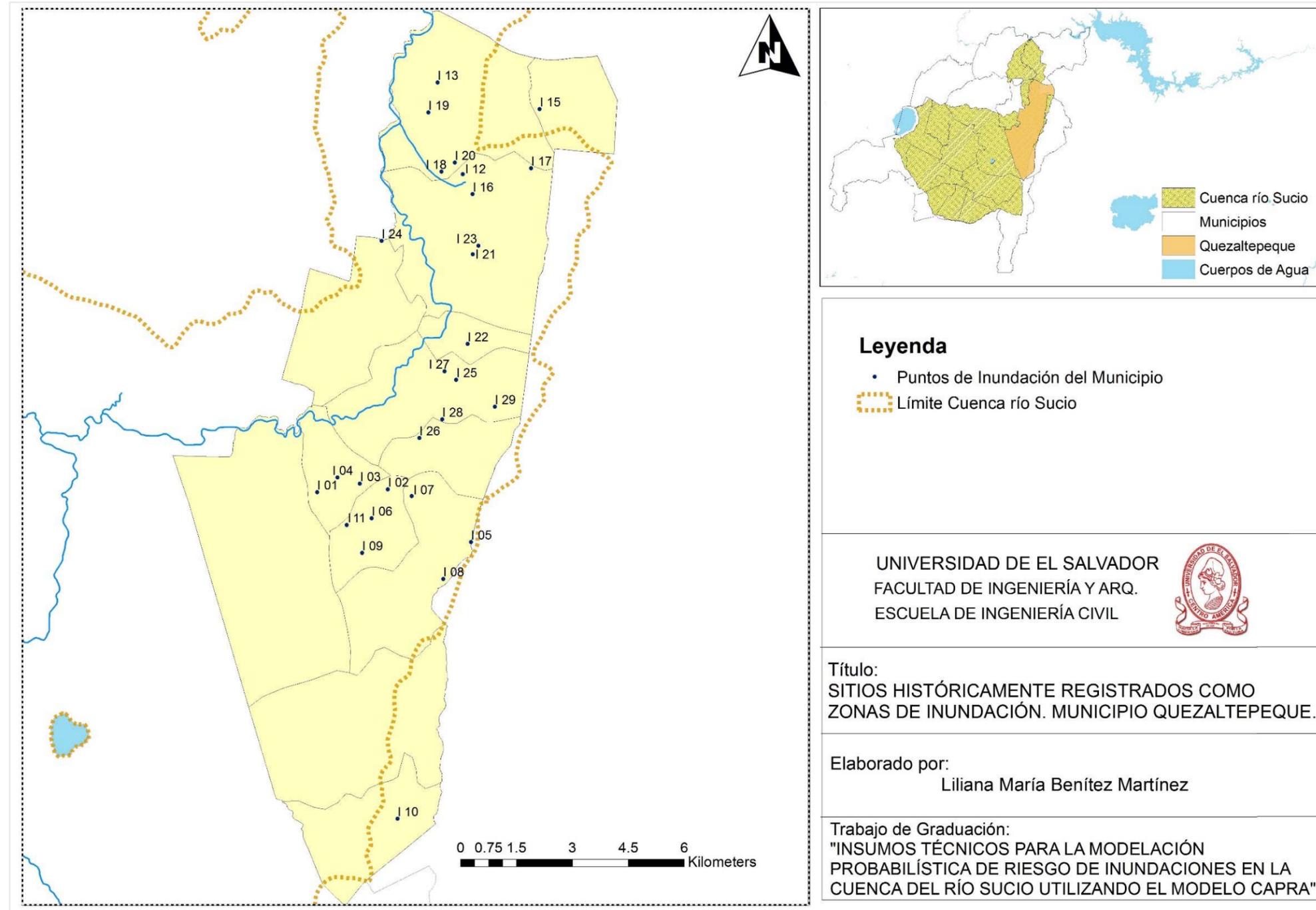


Figura 4.43 División político administrativa del municipio de Quezaltepeque, La Libertad.

Fuente: Elaboración propia.



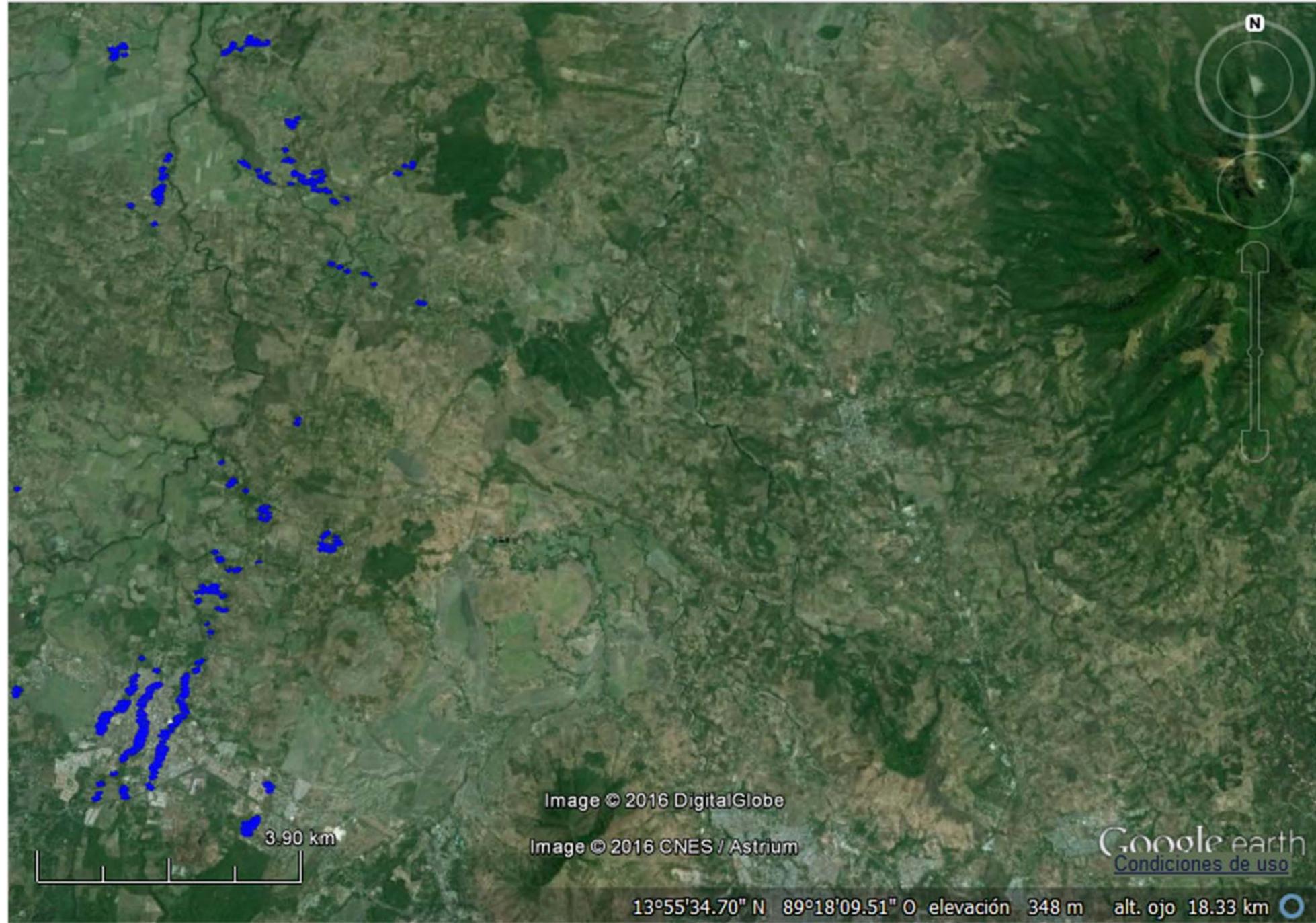


Figura 4.45 Ubicación geográfica del sitio registrado históricamente como zona de inundación del municipio de Quezaltepeque.

Fuente: Elaboración propia mediante el uso de la herramienta Web CAPRA.

4.4.1.11 MUNICIPIO DE SACACOYO, DEPARTAMENTO DE LA LIBERTAD

El municipio de Sacacoyo posee una extensión territorial de 25.22 km², de los cuales un área aproximada de 25.14 km² corresponde al área rural y 0.08 km² al área urbana. Colinda con los municipios de Ciudad Arce, Jayaque, Tepecoyo Colón y Armenia.

En la Tabla 4.25 se detalla la población urbana y rural del municipio, también se lista el número de viviendas registradas hasta el año 2007.

Tabla 4.25 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de Sacacoyo.

Urbana			Rural			Número de viviendas		
Mujeres	Hombres	Total	Mujeres	Hombres	Total	Área Urbana	Área Rural	Total
5,119	4,753	9,872	1,206	1,221	2,427	2,885	643	3,528

Fuente: Censo de Población y Vivienda 2007, DIGESTYC.

En la Figura 4.46 se presenta la división político administrativa del municipio. En la Figura 4.47 se ubican geográficamente los sitios con amenaza de inundación registrados por la alcaldía del municipio (PFGL & Alcaldía Municipal de Sacacoyo, Plan Municipal de Gestión de Riesgo de Desastres, Sacacoyo, Departamento de La Libertad, 2013) y la Tabla 4.26 lista las comunidades que han resultado históricamente afectadas por inundaciones.

Mediante la aplicación Web CAPRA se realizó el levantamiento de las edificaciones propensas a inundación que se encuentran cercanas a las

coordenadas geográficas de la Figura 4.47. Dicha información se muestra en la Figura 4.48.

Tabla 4.26 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de Sacacoyo.

Identificación	Ubicación
I. 01	Salida el Chacuto, Col. Palmera, ctón Buena Vista. Descarga agua servida
I. 02	Cento San Gerónimo Emiliani, Col. Palmera, ctón Buena Vista. Descarga agua lluvia
I. 03	Palmera 1 y2, Sta. Elena y La Ceiba, Col. Palmera, ctón Buena Vista. Descarga agua servida
I. 04	Iglesia Dios Viviente, Col. Palmera, ctón Buena Vista. Descarga aguas negras
I. 05	Iglesia Dios Viviente, Col. Palmera, ctón Buena Vista. Descarga aguas negras
I. 06	Cantón La Montañita. Tanque de almacenamiento de agua el Zapote
I. 07	Puente quebrada Los Encuentros, ctón. Ateos
I. 08	Puente TTzu-Chi, ctón. Ateos
I. 09	Comunidad El Tigre, ctón. Ateos
I. 10	Colonia el Carmen, ctón. Ateos
I. 11	Lot. Valle Dorado, ctón. Ateos
I. 12	Lot. El Milagro y Col. Coto, ctón. Ateos
I. 13	Parcelación Monte María, ctón. Ateos

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la municipalidad.

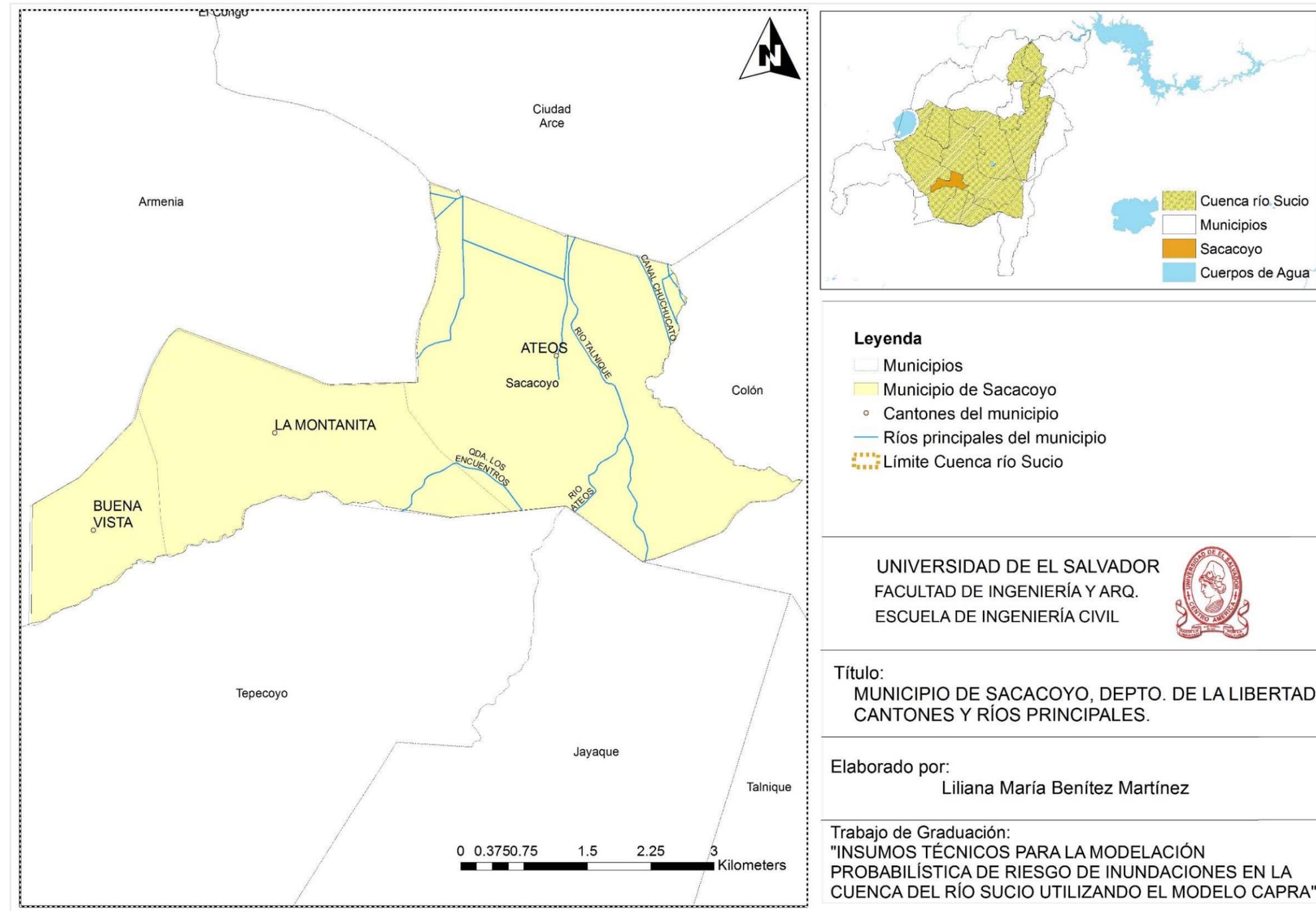


Figura 4.46 División político administrativa del municipio de Sacacoyo, La Libertad.

Fuente: Elaboración propia.

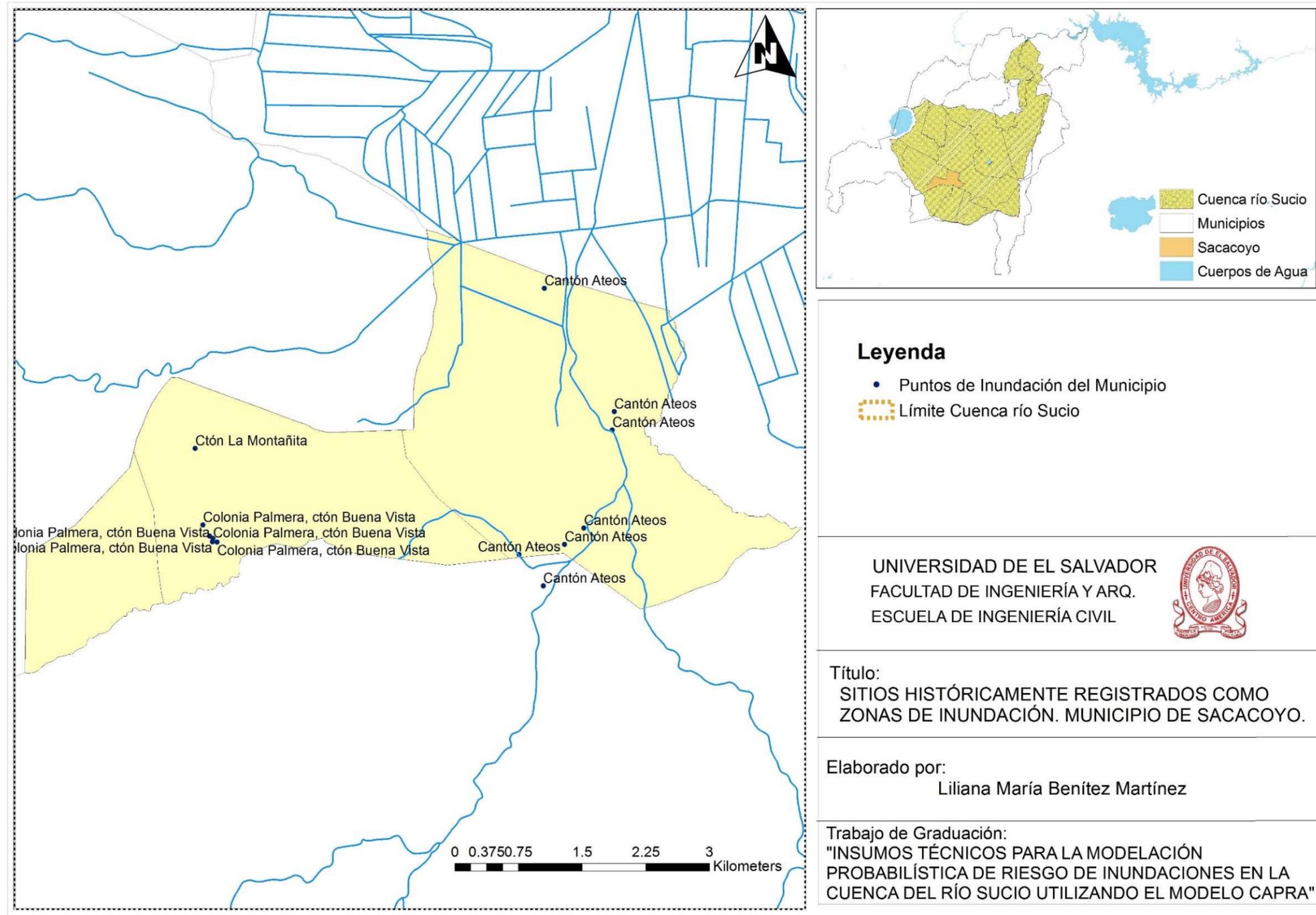


Figura 4.47 Ubicación geográfica de sitios registrados históricamente como zonas de inundación del municipio de Sacacoyo.

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la municipalidad.

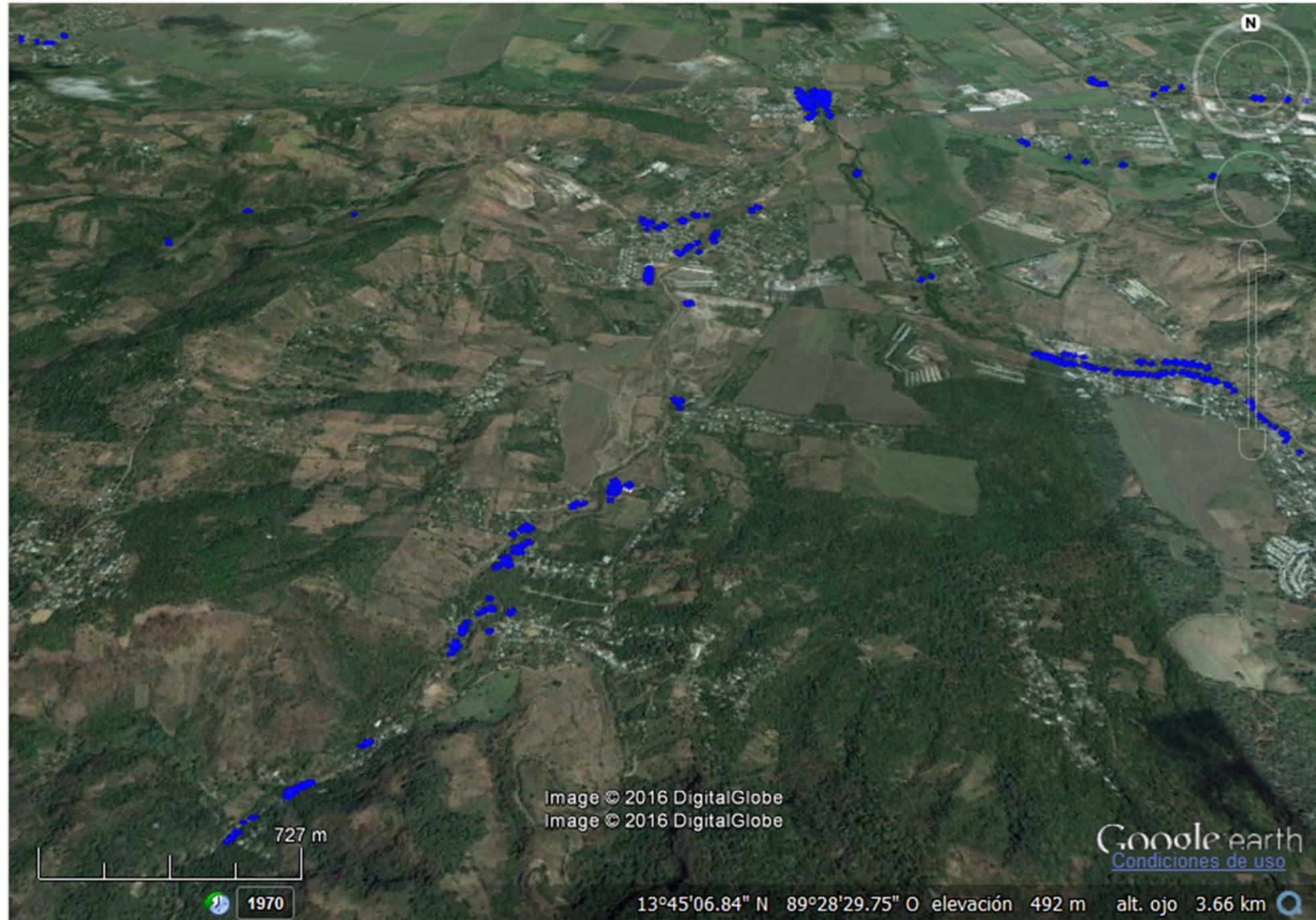


Figura 4.48 Ubicación geográfica del sitio registrado históricamente como zona de inundación del municipio de Sacacoyo.

Fuente: Elaboración propia mediante el uso de la herramienta Web CAPRA.

4.4.1.12 MUNICIPIO DE SAN JUAN ÓPICO, DEPARTAMENTO DE LA LIBERTAD

El municipio de San Juan Opico posee una extensión territorial de 224.37 km². Colinda con los municipios de San Pablo Tacachico, San Matías, Quezaltepeque, Ciudad Arce, Colón y Coatepeque.

En la Tabla 4.27 se detalla la población urbana y rural del municipio, así como también el número de viviendas registradas hasta el año 2007.

Tabla 4.27 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de San Juan Opico.

Urbana			Rural			Número de viviendas		
Mujeres	Hombres	Total	Mujeres	Hombres	Total	Área Urbana	Área Rural	Total
23,873	21,113	44,986	14,857	14,437	29,294	17,293	8,219	25,512

Fuente: Censo de Población y Vivienda 2007, DIGESTYC.

En la Figura 4.49 se presenta la división político administrativa del municipio. En la Figura 4.50 se ubican geográficamente los sitios con amenaza de inundación registrados por organismos no gubernamentales en cooperación con la alcaldía Municipal (Geólogos del Mundo, Ayuda Humanitaria y Protección Civil, Asdi, & Plan por la niñez, 2015) y la Tabla 4.28 lista las comunidades que han resultado históricamente afectadas por inundaciones.

Mediante la aplicación Web CAPRA se realizó el levantamiento de las edificaciones propensas a inundación que se encuentran cercanas a las

coordenadas geográficas de la Figura 4.50. Dicha información se muestra en la Figura 4.51.

Tabla 4.28 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de San Juan Opico.

Identificación	Ubicación
001-INUN	Ctón San Nicolás Los Encuentros, Caserío Palio, por puente
002-INUN	Ctón San Nicolás Los Encuentros, frente a Centro Escolar
003-INUN	Ctón Agua Escondida, Caserío La Nueva Argentina
004-INUN	Ctón Las Delicias, Caserío Arenera, La Tubera
005-INUN	Ctón Sitio del Niño, Sol. Oscar Osorio
006-INUN	Ctón Chanmico, autopista a Quezaltepeque
007-INUN	Ctón Chanmico, calle a Sitio Grande
008-INUN	Ctón Sitio del Niño, Parcelación El Castaño

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la municipalidad y (Geólogos del Mundo, Ayuda Humanitaria y Protección Civil, Asdi, & Plan por la niñez, 2015).

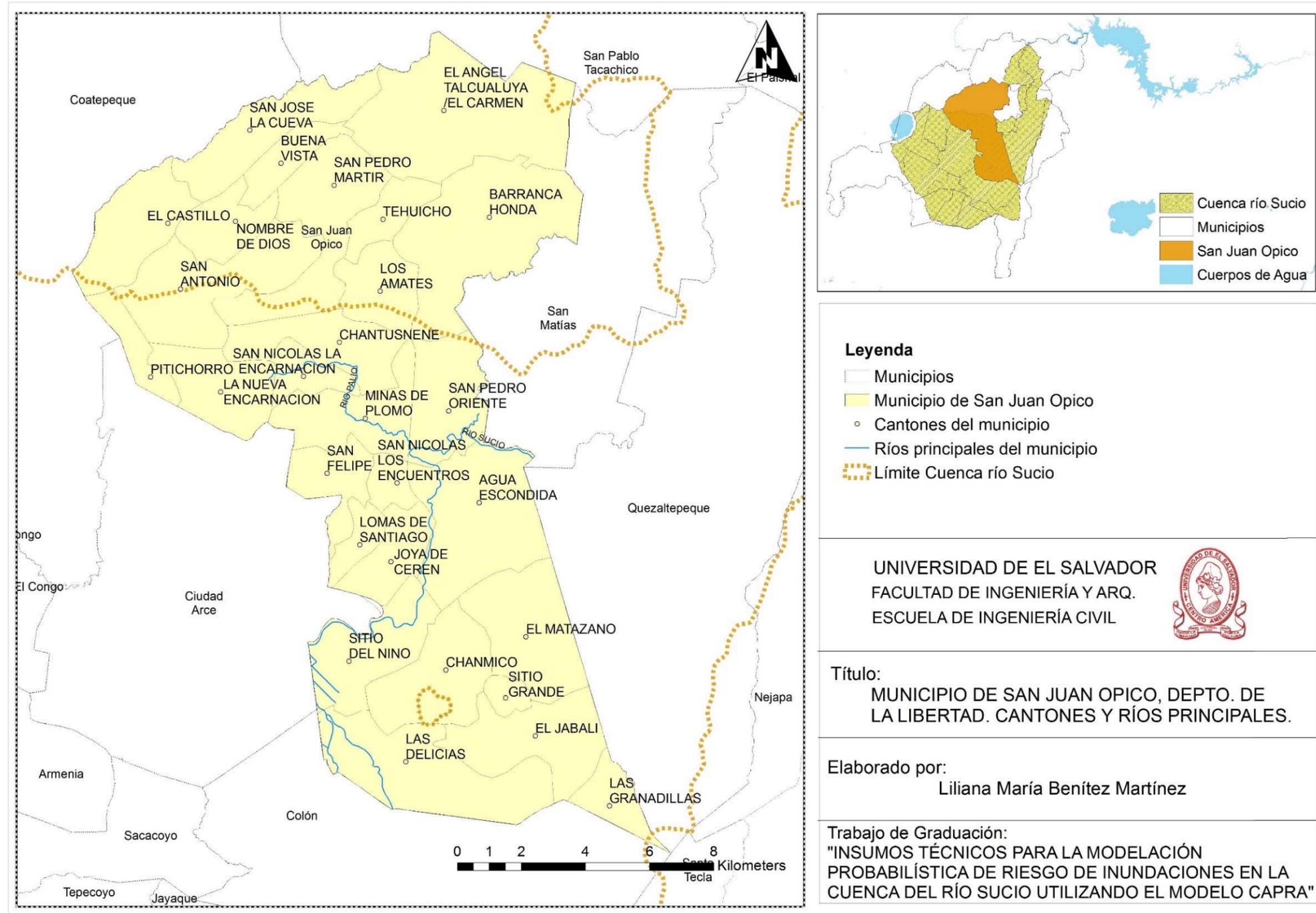


Figura 4.49 División político administrativa del municipio de San Juan Opico, La Libertad.

Fuente: Elaboración propia.

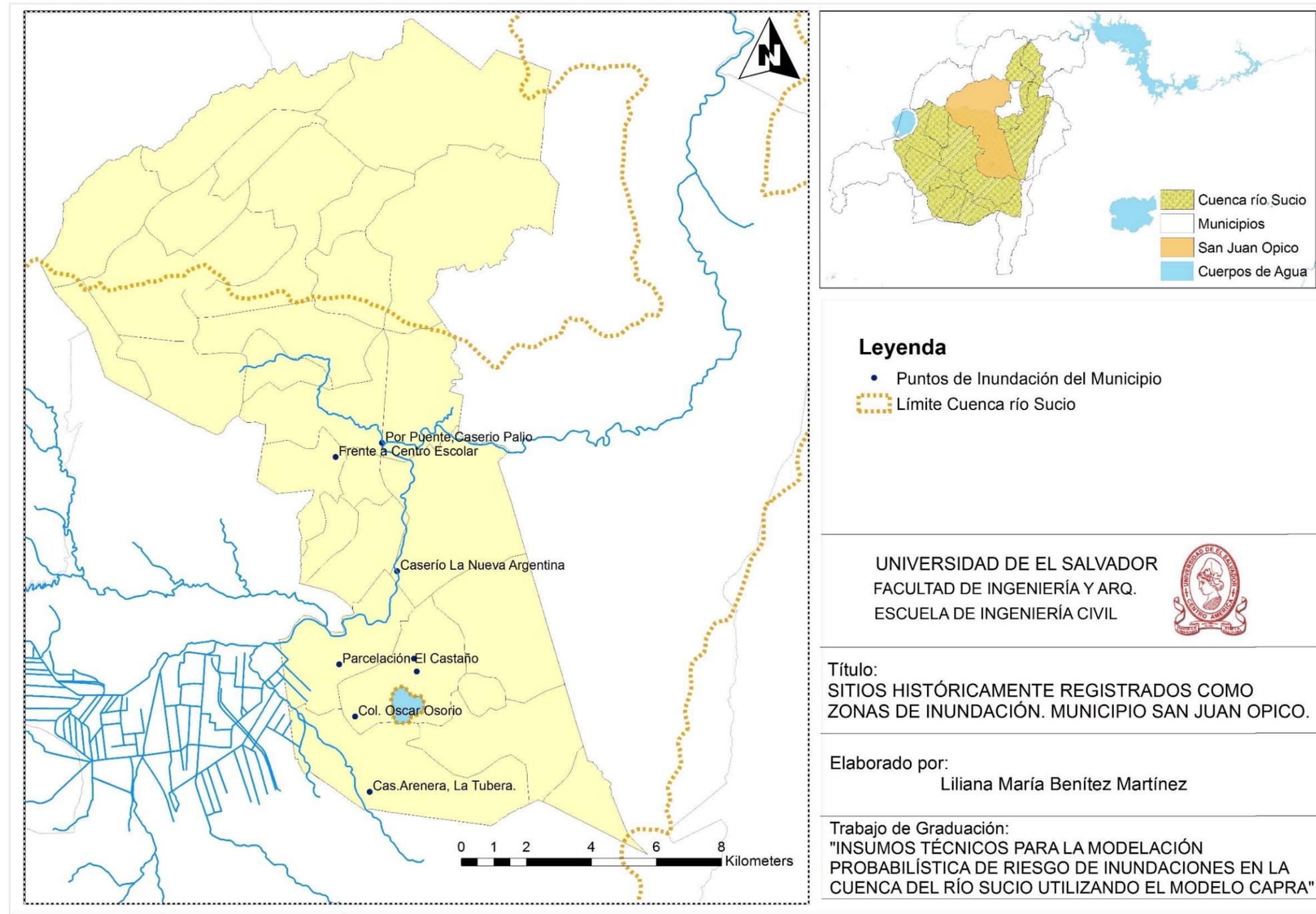


Figura 4.50 Ubicación geográfica de sitios registrados históricamente como zonas de inundación del municipio de San Juan Opico.

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la municipalidad y (Geólogos del Mundo, Ayuda Humanitaria y Protección Civil, Asdi, & Plan por la niñez, 2015).



Figura 4.51 Ubicación geográfica del sitio registrado históricamente como zona de inundación del municipio de San Juan Opico.

Fuente: Elaboración propia mediante el uso de la herramienta Web CAPRA.

4.4.1.13 MUNICIPIO DE SAN MATÍAS, DEPARTAMENTO DE LA LIBERTAD

El municipio de San Matías posee una extensión territorial de 52.47 km². Colinda con los municipios de San Pablo Tacachico, El Paisnal, Quezaltepeque y San Juan Opico.

En la Tabla 4.29 se detalla la población urbana y rural del municipio, también se lista el número de viviendas registradas hasta el año 2007.

Tabla 4.29 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de San Matías.

Urbana			Rural			Número de viviendas		
Mujeres	Hombres	Total	Mujeres	Hombres	Total	Área Urbana	Área Rural	Total
620	547	1,167	3,125	3,022	6,147	372	1,646	2,018

Fuente: Censo de Población y Vivienda 2007, DIGESTYC.

En la Figura 4.52 se presenta la división político administrativa del municipio. En la Figura 4.53 se ubican geográficamente los sitios con amenaza de inundación registrados por la alcaldía del municipio (Montoya de Reyna, FISDL, PFGL, ISDEM, & Alcaldía Municipal de San Matías, 2013) y la Tabla 4.30 lista las comunidades que han resultado históricamente afectadas por inundaciones.

Mediante la aplicación Web CAPRA se realizó el levantamiento de las edificaciones propensas a inundación que se encuentran cercanas a las coordenadas geográficas de la Figura 4.53. Dicha información se muestra en la Figura 4.54.

Tabla 4.30 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de San Matías.

Identificación	Ubicación
I. 01	Cantón El Jocote
I. 02	Cantón San Pedro Las Flores
I. 03	Cantón Santa Teresa
I. 04	Cantón Santa Rosa, La Hacienda
I. 05	Cantón el Jicaro
I. 06	Cantón san Lorenzo
I. 07	Cantón La Puebla, Crío Los Lotes
I. 08	Cantón La Puebla, Crío Los Lotes
I. 09	Caserío Las Minas
I. 10	Centro escolar cantón El Jocote
I. 11	Sector el Jocote, Río Sucio
I. 12	Cantón La Puebla, centro
I. 13	Cantón el Jícaro, presa Hacienda San Lorenzo
I. 14	Cantón El Jícaro, Hacienda San Lorenzo
I. 15	Cantón El Jícaro, Hacienda San Lorenzo
I. 16	Cantón El Jícaro, Caserío La Pedrera
I. 17	Cantón San Pedro Las Flores, Caserío El Rancho
I. 18	Cantón San Pedro Las Flores, Caserío El Rancho
I. 19	Cantón San Pedro Las Flores, Centro

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la municipalidad.

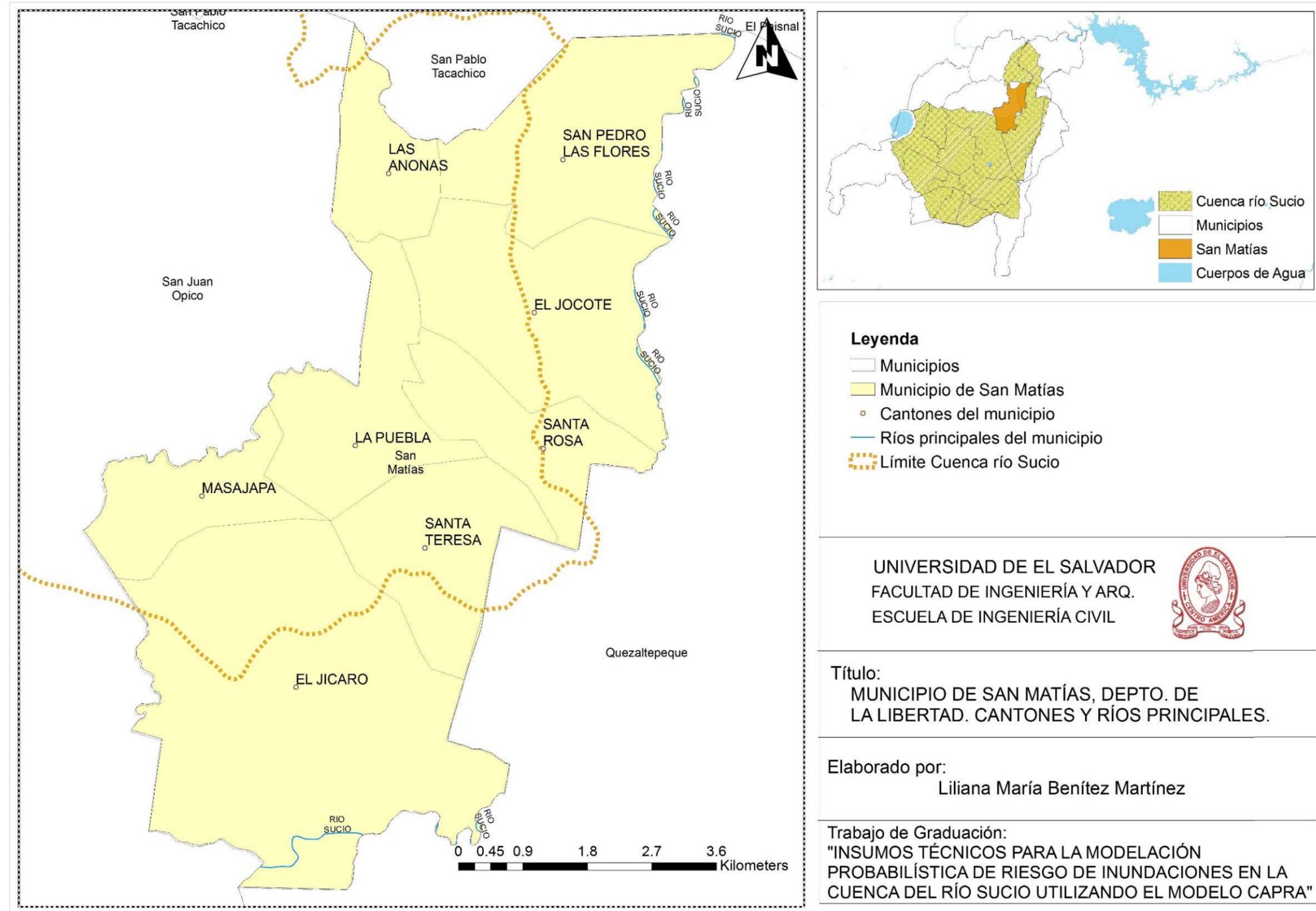


Figura 4.52 División político administrativa del municipio de San Matías, La Libertad.

Fuente: Elaboración propia.

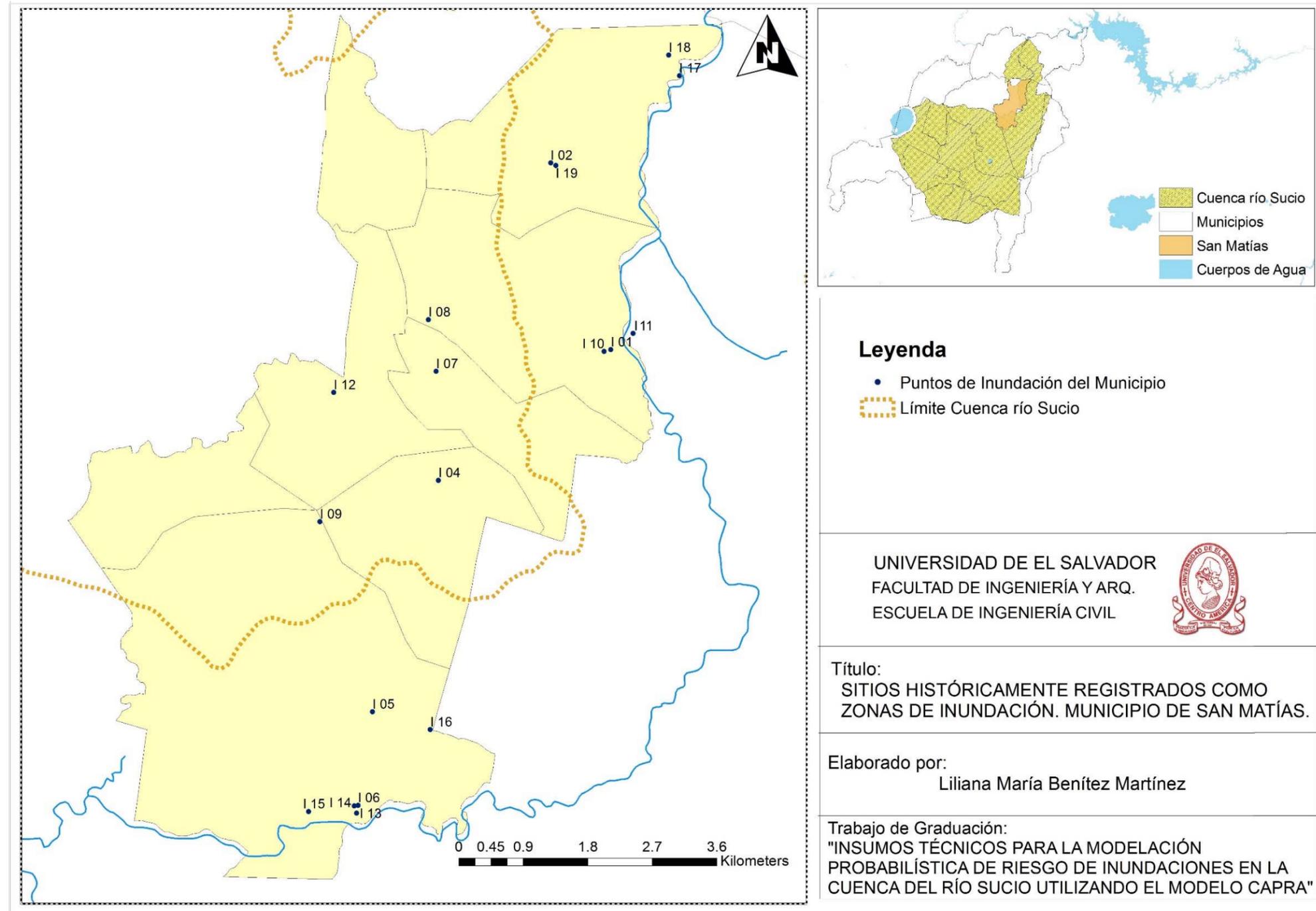


Figura 4.53 Ubicación geográfica de sitios registrados históricamente como zonas de inundación del municipio de San Matías.

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la municipalidad.

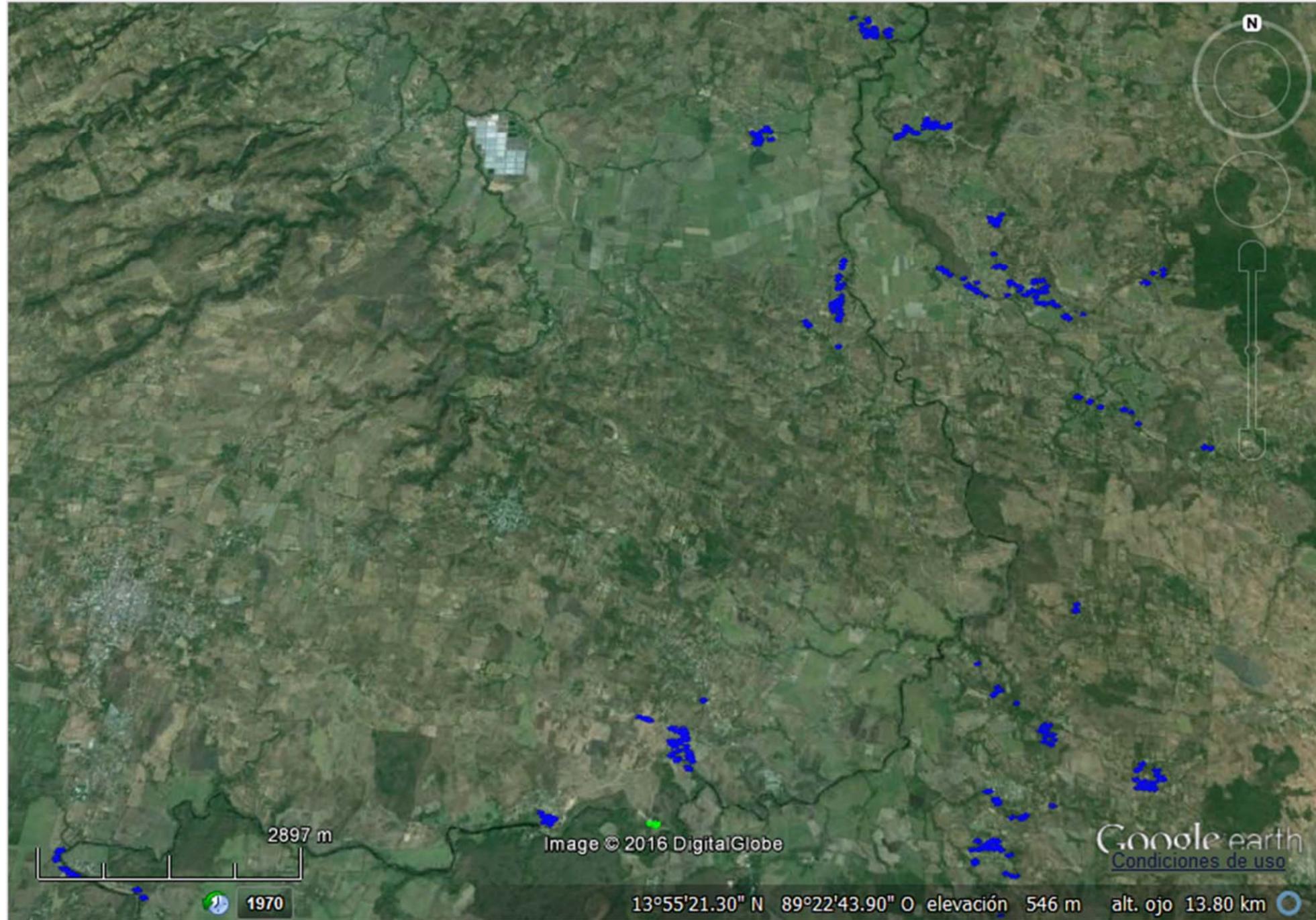


Figura 4.54 Ubicación geográfica del sitio registrado históricamente como zona de inundación del municipio de San Matías.

Fuente: Elaboración propia mediante el uso de la herramienta Web CAPRA.

4.4.1.14 MUNICIPIO DE SAN PABLO TACACHICO, DEPARTAMENTO DE LA LIBERTAD

El municipio de San Pablo Tacachico posee una extensión territorial de 128.15 km². Colinda con los municipios de Nueva Concepción, El Paisnal, San Matías, San Juan Opico y Coatepeque.

En la Tabla 4.31 se detalla la población urbana y rural del municipio, también se lista el número de viviendas registradas hasta el año 2007.

Tabla 4.31 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de San Pablo Tacachico.

Urbana			Rural			Número de viviendas		
Mujeres	Hombres	Total	Mujeres	Hombres	Total	Área Urbana	Área Rural	Total
2,934	2,685	5,619	7,504	7,243	14,747	1,661	3,764	5,425

Fuente: Censo de Población y Vivienda 2007, DIGESTYC.

En la Figura 4.55 se presenta la división político administrativa del municipio. En la Figura 4.56 se ubican geográficamente los sitios con amenaza de inundación registrados por la alcaldía del municipio y la Tabla 4.32 lista las comunidades que han resultado históricamente afectadas por inundaciones.

Mediante la aplicación Web CAPRA se realizó el levantamiento de las edificaciones propensas a inundación que se encuentran cercanas a las coordenadas geográficas de la Figura 4.56. Dicha información se muestra en la Figura 4.57.

Tabla 4.32 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de San Pablo Tacachico.

Identificación	Ubicación
I. 01	Ctón Atiocoyo, La Vega Pérdida
I. 02	Cantón Atiocoyo
I. 03	Cantón Atiocoyo
I. 04	Ctón Obraje Nuevo, Huisisilapa
I. 05	Ctón Obraje Nuevo, Huisisilapa

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la municipalidad.

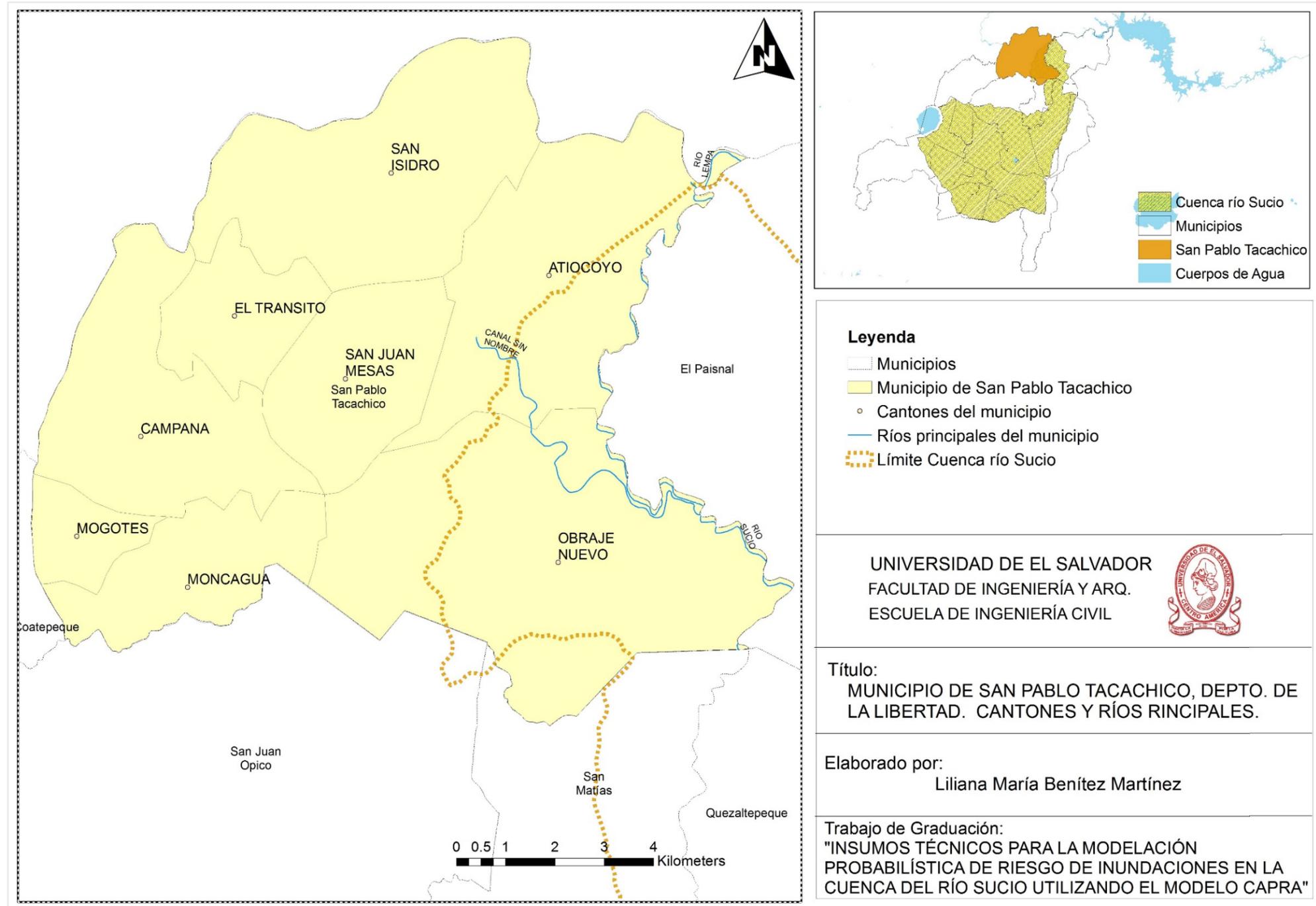


Figura 4.55 División político administrativa del municipio de San Pablo Tacachico, La Libertad.

Fuente: Elaboración propia.

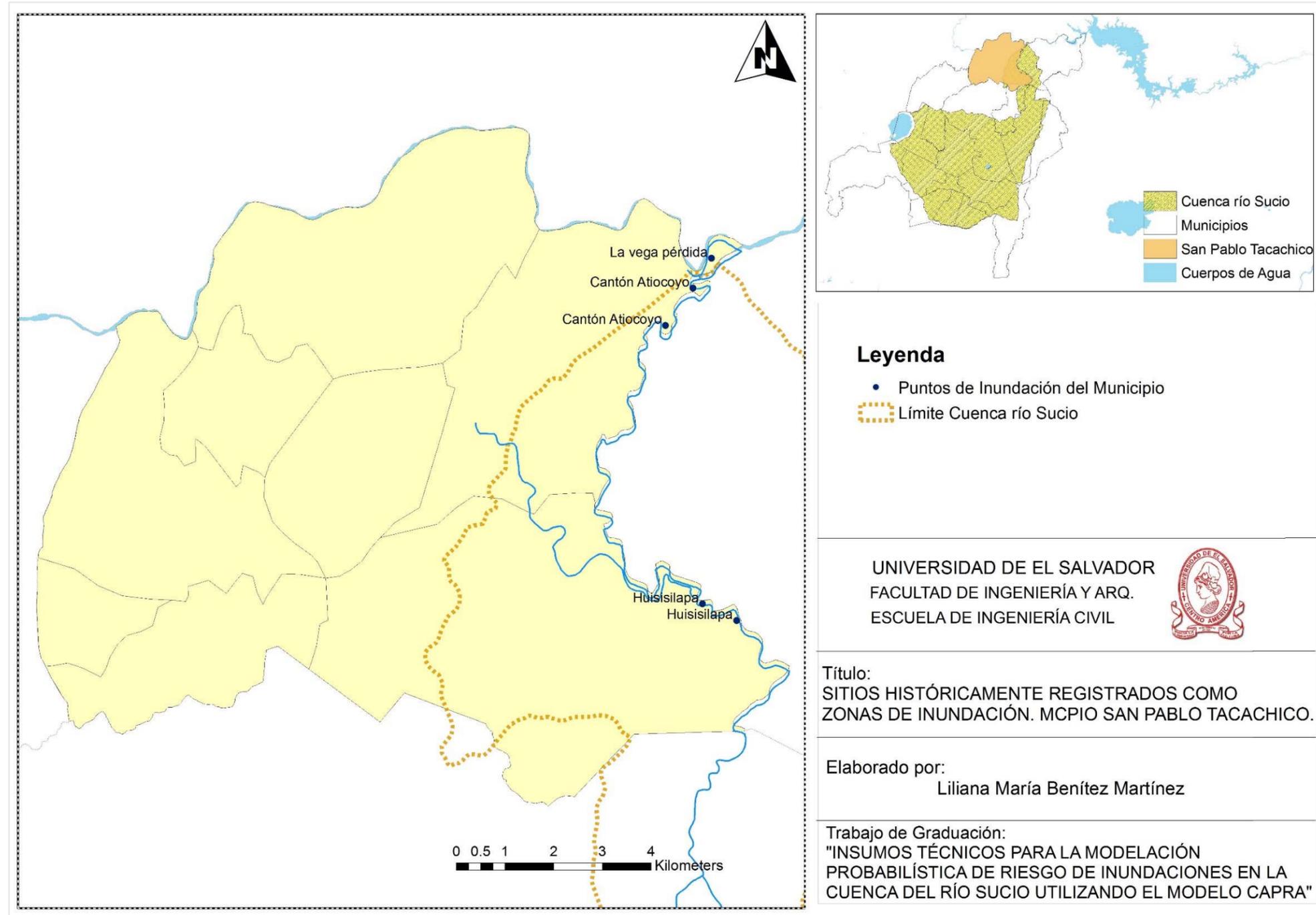


Figura 4.56 Ubicación geográfica de sitios registrados históricamente como zonas de inundación del municipio de San Pablo Tacachico.

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la municipalidad.

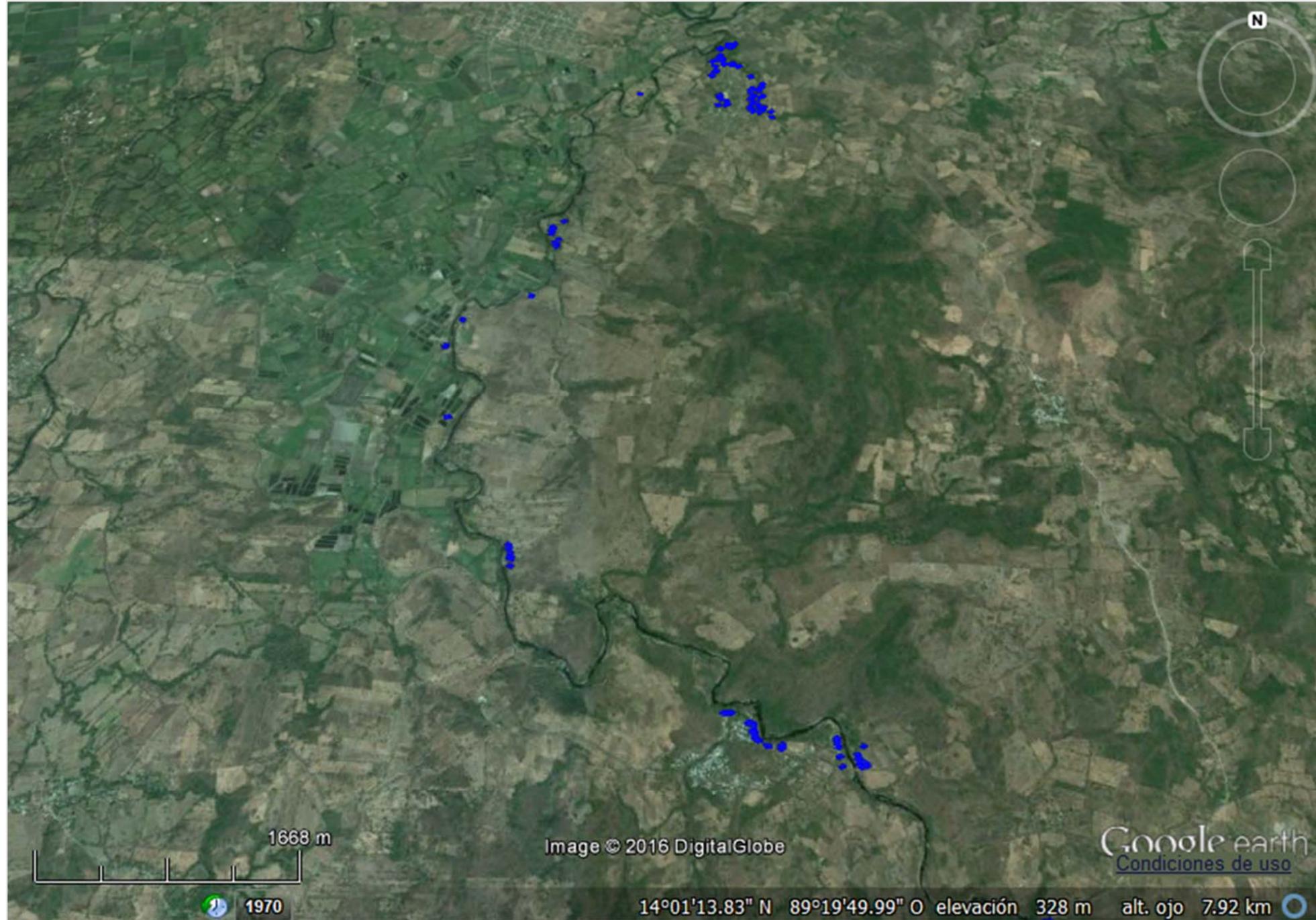


Figura 4.57 Ubicación geográfica del sitio registrado históricamente como zona de inundación del municipio de San Pablo Tacachico.

Fuente: Elaboración propia mediante el uso de la herramienta Web CAPRA.

4.4.1.15 MUNICIPIO DE SANTA TECLA, DEPARTAMENTO DE LA LIBERTAD

El municipio de Santa Tecla posee una extensión territorial de 115.4 km². Colinda con los municipios de Nejapa, Quezaltepeque, San Juan Opico, Colón, Talnique, Antiguo Cuscatlán, Nuevo Cuscatlán, San José Villanueva, Comasagua, Zaragoza y La Libertad.

En la Tabla 4.33 se detalla la población urbana y rural del municipio; también se lista el número de viviendas registradas hasta el año 2007.

Tabla 4.33 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de Santa Tecla.

Urbana			Rural			Número de viviendas		
Mujeres	Hombres	Total	Mujeres	Hombres	Total	Área Urbana	Área Rural	Total
59,525	49,315	108,840	6,603	6,465	13,068	32,682	3,323	36,005

Fuente: Censo de Población y Vivienda 2007, DIGESTYC.

En la Figura 4.58 se presenta la división político administrativa del municipio.

Éste municipio no registra inundaciones ocasionadas por los ríos que conforman la cuenca del río Sucio; debido a que el área del municipio que se encuentra dentro de la cuenca se ubica en la parte alta de la misma.

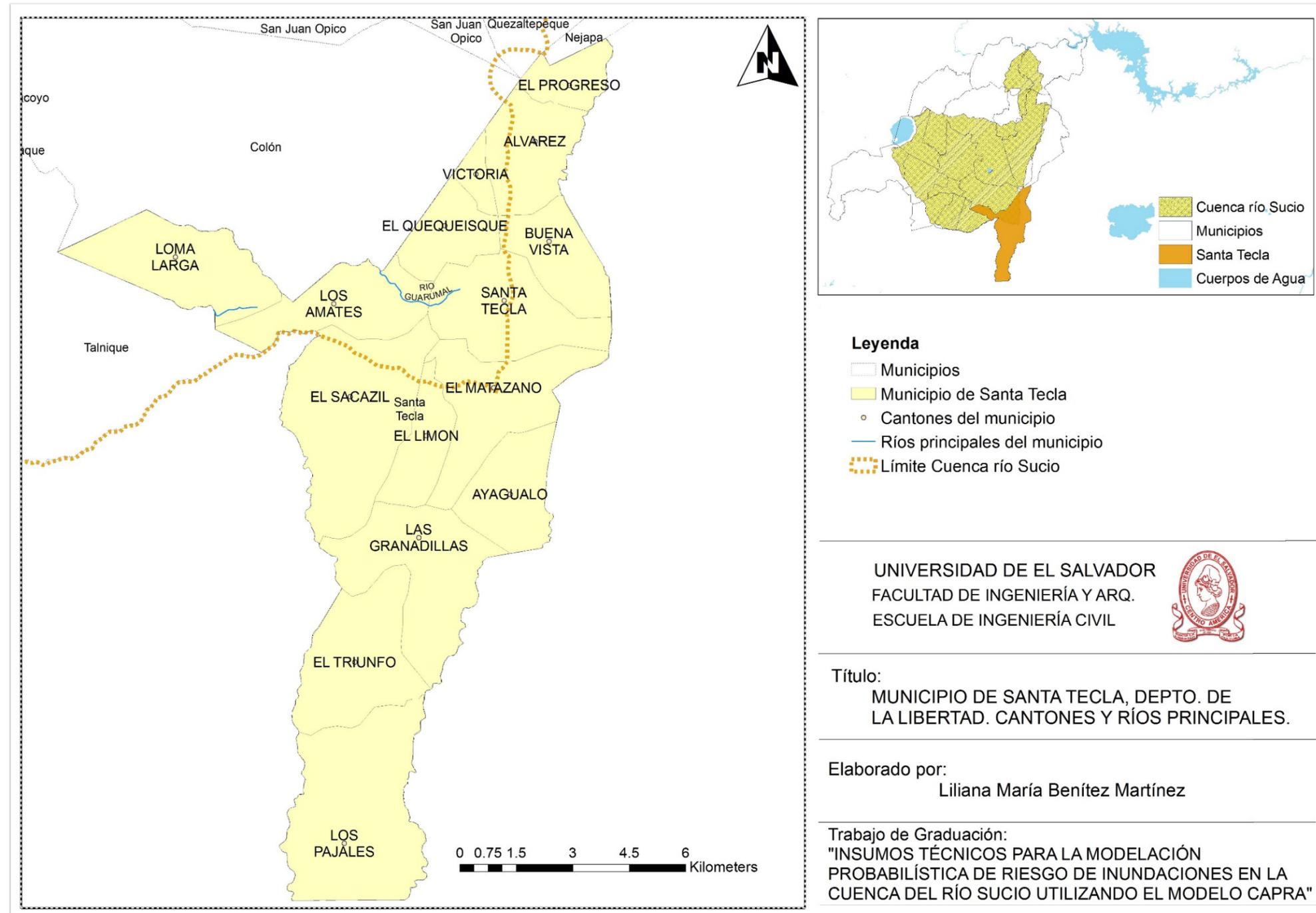


Figura 4.58 División político administrativa del municipio de Santa Tecla, La Libertad.

Fuente: Elaboración propia.

4.4.1.16 MUNICIPIO DE TALNIQUE, DEPARTAMENTO DE LA LIBERTAD

El municipio de Talnique posee una extensión territorial de 32.36 km². Colinda con los municipios de Jayaque, Colón, Santa Tecla, Comasagua y Tamanique.

En la Tabla 4.34 se detalla la población urbana y rural del municipio, también se lista el número de viviendas registradas hasta el año 2007.

Tabla 4.34 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de Talnique.

Urbana			Rural			Número de viviendas		
Mujeres	Hombres	Total	Mujeres	Hombres	Total	Área Urbana	Área Rural	Total
2,503	2,386	4,889	1,683	1,682	3,365	1,290	881	2,171

Fuente: Censo de Población y Vivienda 2007, DIGESTYC.

En la Figura 4.59 se presenta la división político administrativa del municipio. En la Figura 4.60 se ubican geográficamente los sitios con amenaza de inundación registrados por la alcaldía del municipio (COEM, 2003) y la Tabla 4.35 lista las comunidades que han resultado históricamente afectadas por inundaciones.

Mediante la aplicación Web CAPRA se realizó el levantamiento de las edificaciones propensas a inundación que se encuentran cercanas a las coordenadas geográficas de la Figura 4.60. Dicha información se muestra en la Figura 4.61.

Tabla 4.35 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de Talnique.

Identificación	Ubicación
I. 01	Ctón San José Los Sitios, Col. 2 de Mayo
I. 02	Ctón San José Los Sitios, Caserío Molina
I. 03	Ctón San José Los Sitios, Pol. 29, Río bajo
I. 04	Ctón San José Los Sitios, Col. La Vega
I. 05	Ctón San José Los Sitios, Col. Santa Isabel
I. 06	Col. Bendición de Dios

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la municipalidad.

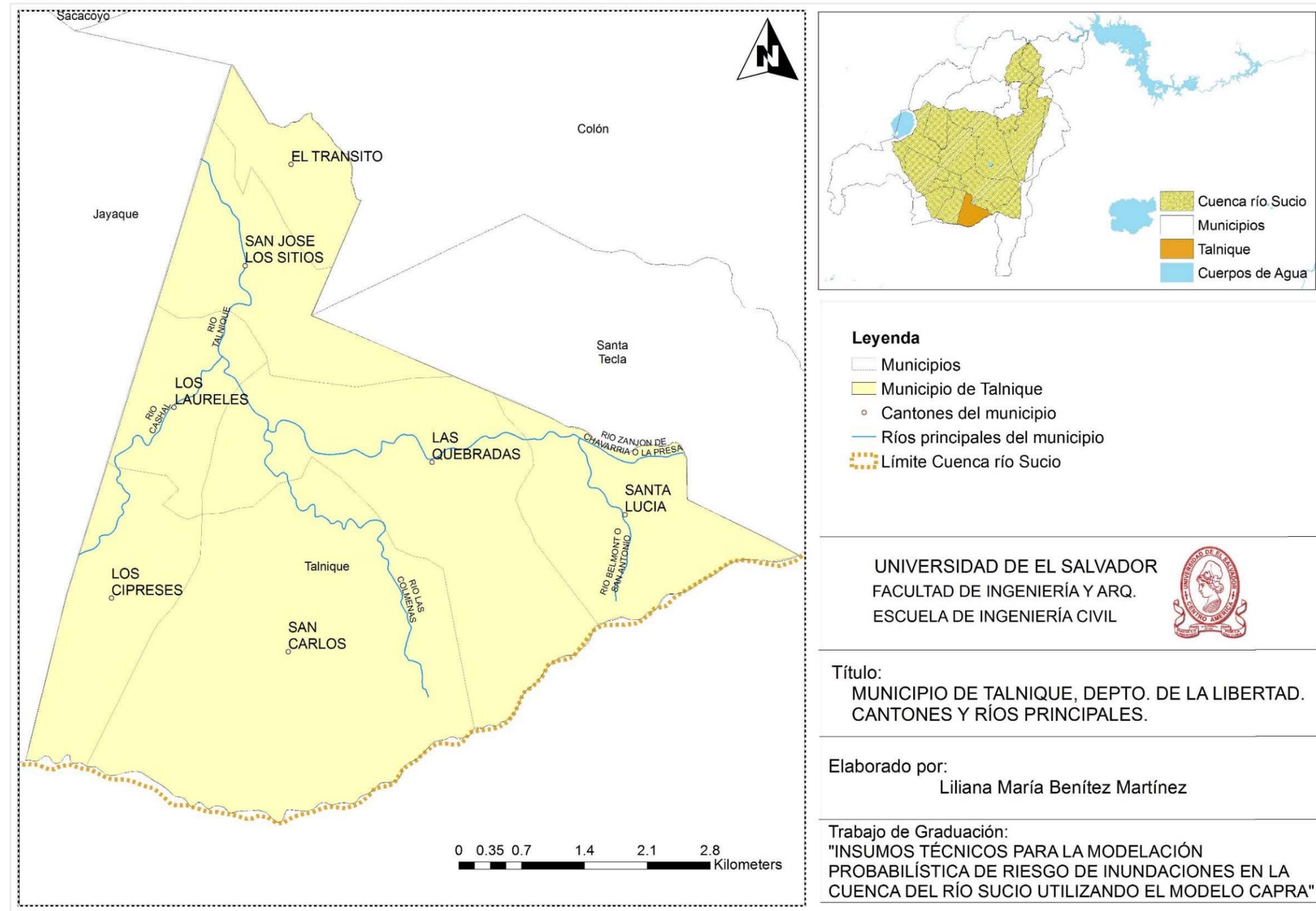


Figura 4.59 División político administrativa del municipio de Talnique, La Libertad.

Fuente: Elaboración propia.

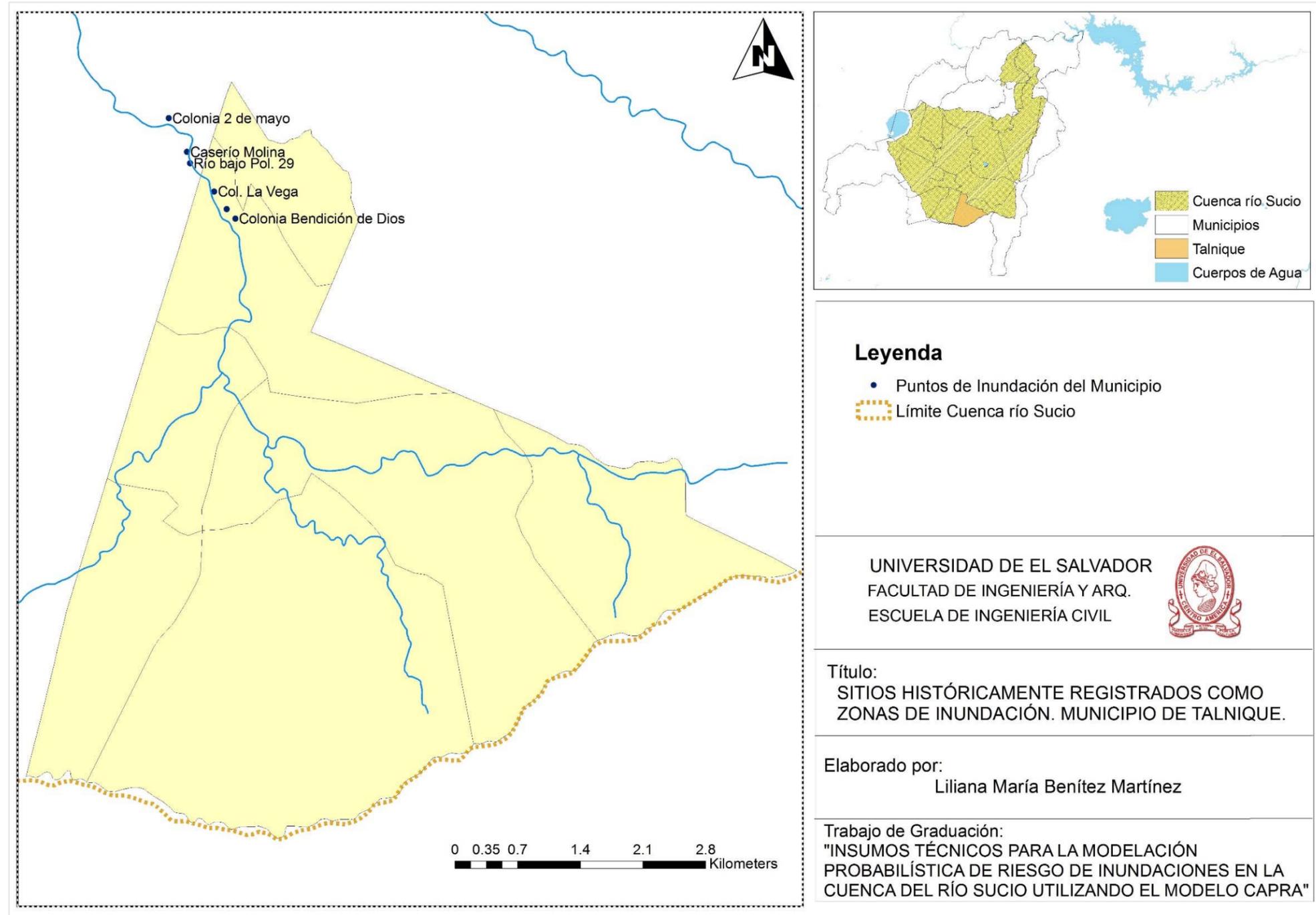


Figura 4.60 Ubicación geográfica de sitios registrados históricamente como zonas de inundación del municipio de Talnique.

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la municipalidad.

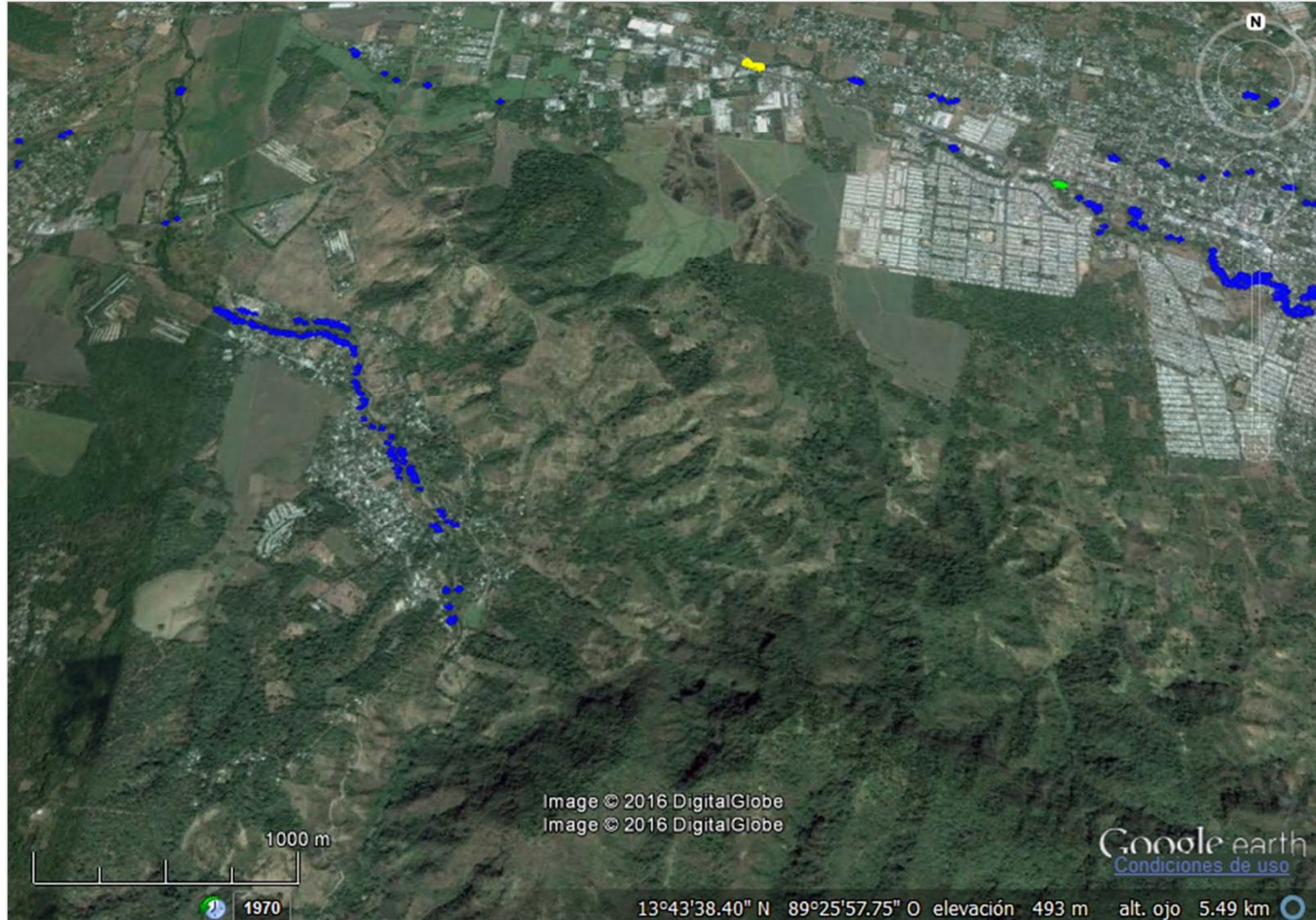


Figura 4.61 Ubicación geográfica del sitio registrado históricamente como zona de inundación del municipio de Talnique.

Fuente: Elaboración propia mediante el uso de la herramienta Web CAPRA.

4.4.1.17 MUNICIPIO DE TEPECOYO, DEPARTAMENTO DE LA LIBERTAD

El municipio de Tepecoyo posee una extensión territorial de 51.75 km². Colinda con los municipios de Sacacoyo, Armenia, Jayaque, Teotepeque, Santa Isabel Ishuatán y San Julián.

En la Tabla 4.36 se detalla la población urbana y rural del municipio, también se lista el número de viviendas registradas hasta el año 2007.

Tabla 4.36 Población urbana y rural, y viviendas del municipio de Tepecoyo.

Urbana			Rural			Número de viviendas		
Mujeres	Hombres	Total	Mujeres	Hombres	Total	Área Urbana	Área Rural	Total
2,503	2,386	4,889	1,683	1,682	3,365	1,290	881	2,171

Fuente: Censo de Población y Vivienda 2007, DIGESTYC.

En la Figura 4.62 se presenta la división político administrativa del municipio. En la Figura 4.63 se ubican geográficamente los sitios con amenaza de inundación registrados por la alcaldía del municipio (Martínez Quijano, 2014) y la Tabla 4.37 lista las comunidades que han resultado históricamente afectadas por inundaciones.

Mediante la aplicación Web CAPRA se realizó el levantamiento de las edificaciones propensas a inundación que se encuentran cercanas a las coordenadas geográficas de la Figura 4.63. Dicha información se muestra en la Figura 4.64.

Tabla 4.37 Localización de sitios registrados con riesgo de inundación del municipio de Tepecoyo

Identificación	Ubicación
I. 01	Ctón el Carrizo, Zona 1
I. 02 - I. 03	Ctón La Javia, Zona 2
I. 04 - I.06	Ctón Tierra Colorada, Comunidad El Tambanco
I. 07	Ctón Tierra Colorada, Cerca de Escuela
I. 08 – I. 11	Ctón Tierra Colorada, Comunidad La Cruz
I. 12 – I. 15	Ctón el Mojón, Comunidad Las Tablas, zona 2
I. 16 – I. 17	Ctón Los Laureles, Comunidad los Laureles
I. 18 – I.19	Ctón Los Laureles, Crío. Primavera
I. 20 – I.21	Ctón San Antonio, Comunidad Los Pérez
I. 22 – I. 23	Ctón San Antonio, Comunidad Los Sixco
I. 24 – I. 26	Ctón San Antonio, Comunidad El Reventón
I. 27 – I. 28	Ctón San Antonio, Comunidad El Bálsamo
I. 29 – I. 32	Ctón San Antonio, Zona 1
I. 33	Ctón Las Flores, Comunidad El Gramal
I. 34 – I. 35	Ctón Los Alpes, Comunidad El Refugio
I. 36	Ctón Los Alpes, Comunidad Casas Blancas
I. 37	Ctón Los Alpes, Comunidad El Pino
I. 38 – I. 42	Ctón Los Alpes, Comunidad La Cumbrita
I. 43 – I.44	Ctón Los Alpes, Comunidad El Cangrejo
I. 45	Ctón Los Alpes, Comunidad El Zope
I. 46 – I. 49	Casco Urbano, Comunidad El Diamante
I. 50 – I. 51	Casco Urbano, Comunidad El Platanal
I. 52	Casco Urbano, Comunidad Santa Teresa
I. 53 – I. 58	Casco Urbano, Comunidad San Antonio

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la municipalidad.

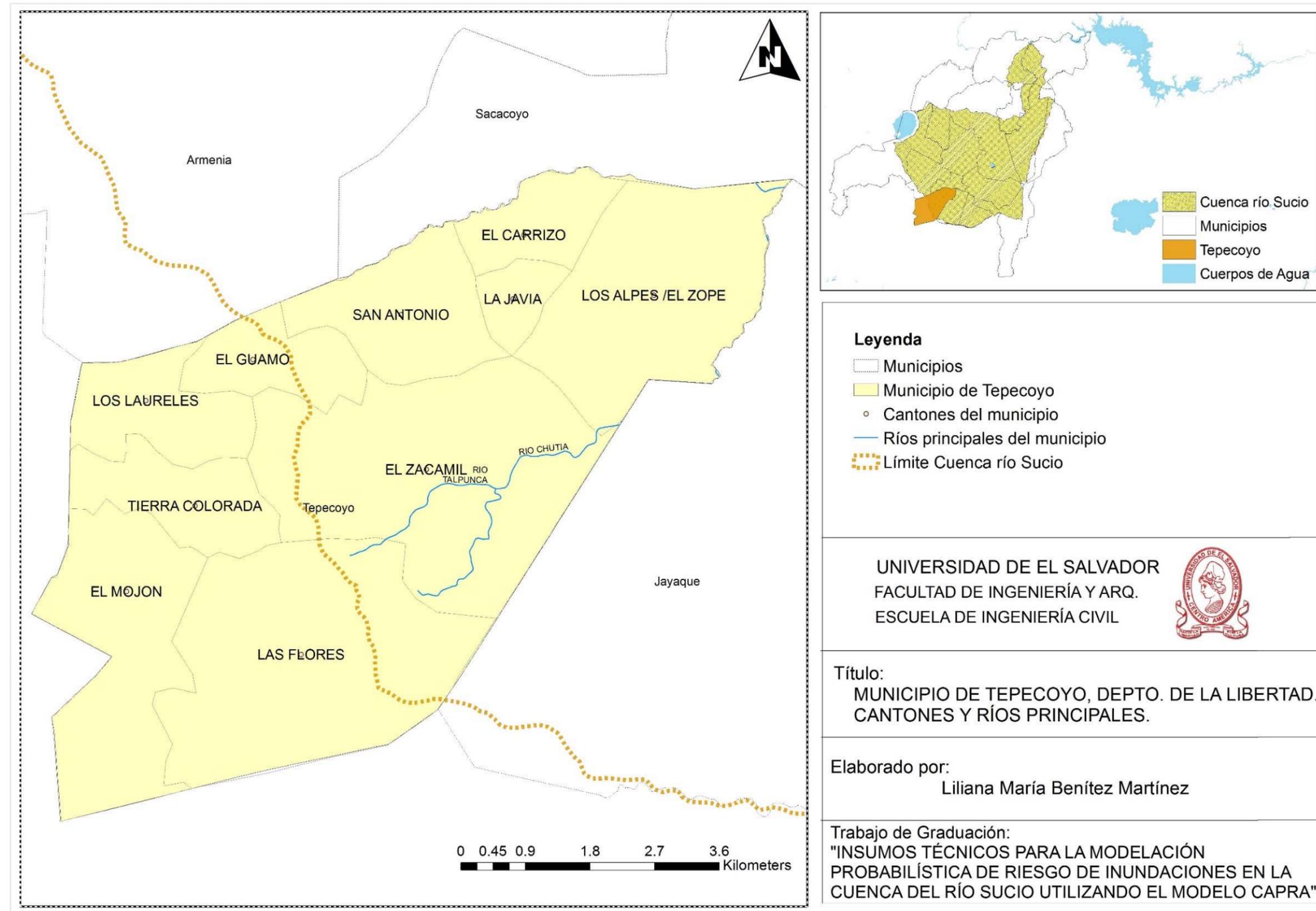


Figura 4.62 División político administrativa del municipio de Tepecoyo, La Libertad.

Fuente: Elaboración propia.

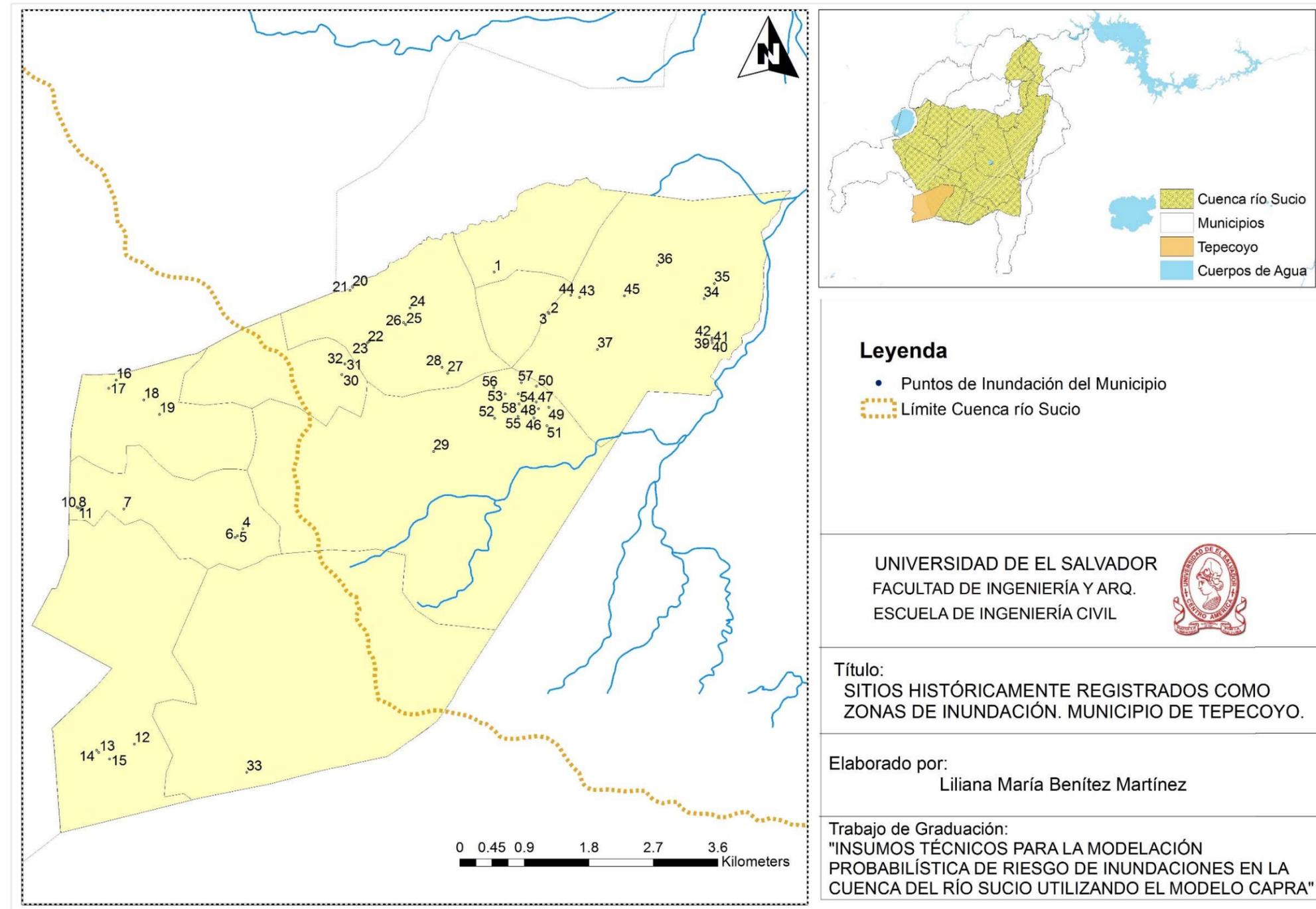


Figura 4.63 Ubicación geográfica de sitios registrados históricamente como zonas de inundación del municipio de Tepecoyo.

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la municipalidad.

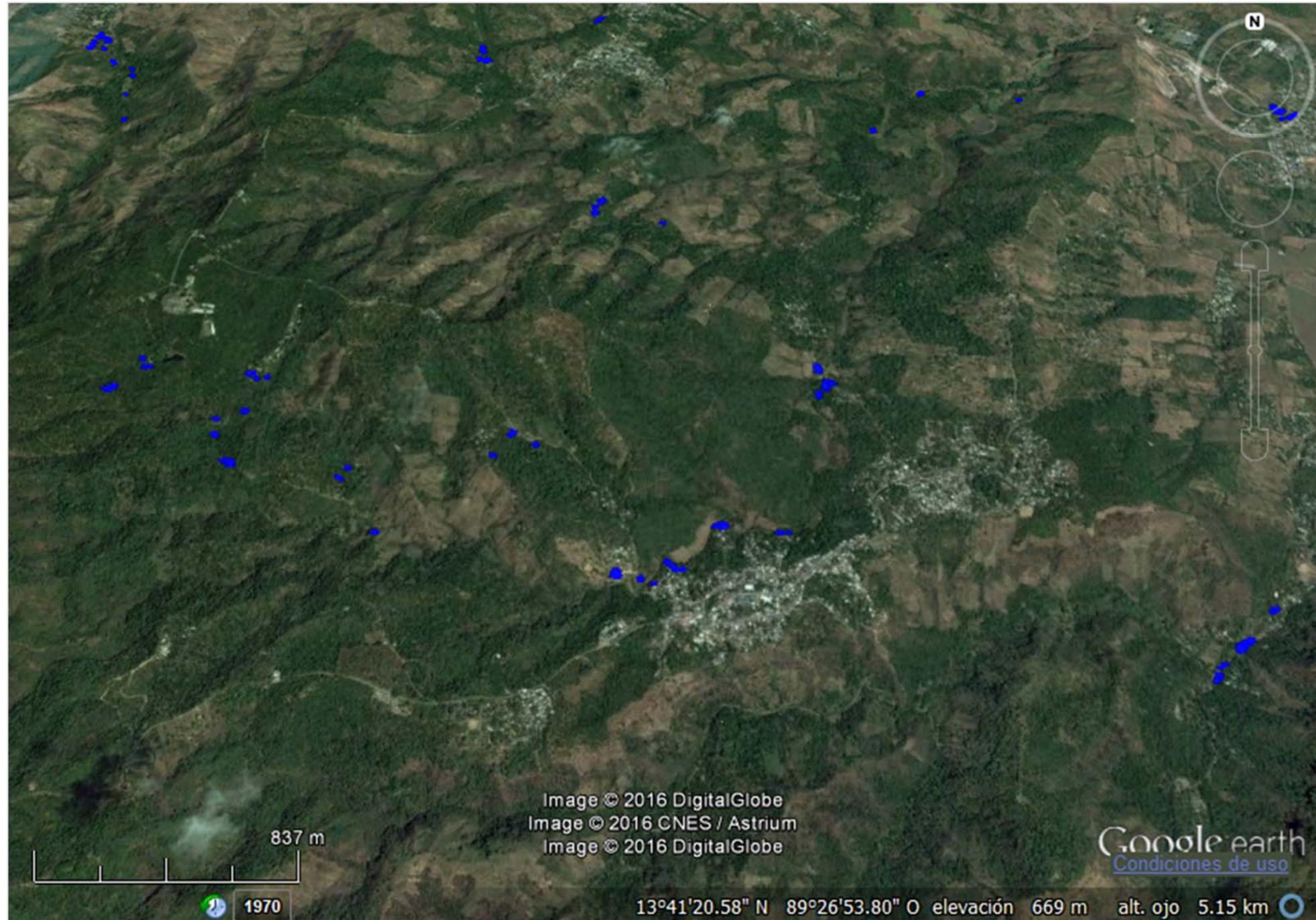


Figura 4.64 Ubicación geográfica del sitio registrado históricamente como zona de inundación del municipio de Tepecoyo.

Fuente: Elaboración propia mediante el uso de la herramienta Web CAPRA

CAPÍTULO 5:

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

En el presente Trabajo de Graduación se ha realizado una investigación de campo y de oficina para establecer los insumos necesarios para la modelación probabilista de riesgo de inundaciones. De la información descrita en este documento puede concluirse lo siguiente:

- La Plataforma CAPRA busca fomentar la comprensión del riesgo de desastres dentro de la región Centroamericana desarrollando una metodología para su evaluación y cuantificación; por lo que permite generar escenarios futuros probables ante diferentes amenazas naturales, anticipando los efectos que ocasionarían en las regiones con mayor vulnerabilidad. A través de los resultados de la plataforma CAPRA se pretende sensibilizar a los tomadores de decisión del potencial de los desastres ocasionados por fenómenos naturales.
- Tanto la calidad y el período de registro de los datos pluviométricos y su procesamiento a través de métodos probabilísticos, es esencial para la correcta caracterización del nivel de precipitación esperado en la zona en estudio. El correcto análisis de la información es indispensable para la generación de la base de datos a procesar por los programas que conforman la Plataforma CAPRA.
- CAPRA permite realizar dos tipos de modelos de evaluación de la amenaza por inundación con base en la información disponible del área

de estudio. El primero consiste en un modelo simplificado, en el cual si se cuenta con la información de precipitación de la zona, topografía a gran escala de la cuenca, vulnerabilidad y exposición de la infraestructura y de la población, se puede realizar a gran escala una estimación de las zonas inundables y de los daños que podrían ocasionar las amenazas de lluvia generadas de manera estocástica. En el segundo modelo, si se posee información detallada de la topografía de los cauces de ríos que componen la zona en estudio se puede realizar un estudio más preciso, en el cual se efectúan análisis hidrológicos, hidráulicos y de inundación de llanuras para la obtención de valores de inundación máxima en cada evento de inundación generado.

- La plataforma CAPRA considera dentro de su análisis las características del terreno a través del mapa de número de curva, el cual varía con el tipo y uso del suelo, cobertura vegetal, así como de su condición y estado previo de humedad. Los mapas de número de curva pueden generarse realizando la superposición de los mapas individuales de la información descrita usando sistemas de información geográfica.
- Para definir las zonas propensas a inundación es indispensable realizar un trabajo de campo que permita reconocer la ubicación de los elementos expuestos y las zonas históricamente registradas como inundables. Ésta información puede ser solicitada en las alcaldías de cada municipio para

luego ser registrada en sistemas de información geográfica que posee la Plataforma CAPRA.

- Para la definición de la vulnerabilidad de los elementos expuestos, la plataforma CAPRA considera necesario que para cada tipología constructiva se defina el porcentaje de daño esperado en función de la intensidad de la amenaza. El porcentaje de daño esperado representa la relación entre el costo esperado de reparación y el costo de reposición del elemento afectado.
- En el presente trabajo de graduación se describe una guía para el manejo de los diferentes componentes de la plataforma CAPRA, específicamente para la generación de inundaciones. Los insumos definidos para la cuenca del río Sucio han sido obtenidos con base en la información pluviométrica de la cuenca y visitas realizadas a cada una de las municipalidades que la conforman.

5.2 RECOMENDACIONES

En base a las experiencias obtenidas en el presente trabajo de graduación y con la finalidad de que se puede dar un seguimiento al mismo, se recomienda lo siguiente:

- Con los insumos descritos en el presente Trabajo de Graduación se puede proceder a la realización de un estudio de riesgo que tome en consideración diferentes escenarios de inundación en la cuenca del río Sucio (Generados por eventos de lluvia con diferente duración, intensidad y frecuencia).
- En base a que los municipios que conforman la cuenca poseen una alta vocación agrícola se recomienda realizar un estudio de riesgo en el cual se consideren las pérdidas que se podrían originar debido a las inundaciones de zonas cultivables.
- Para una mejor definición de la profundidad de inundación se recomienda utilizar el método detallado, para el cual es necesario un levantamiento detallado de la topografía del terreno.
- Se recomienda realizar visitas con el personal de las alcaldías a los lugares identificados como zonas inundables, para una mejor definición de la exposición y vulnerabilidad de la zona en estudio.

- Se propone revisar y en el caso de ser necesario ajustar las curvas de vulnerabilidad disponibles para considerar otras posibles tipologías de construcción ubicadas en zonas propensas a inundaciones.
- Debe tenerse en cuenta que la información generada por CAPRA puede ser utilizada como una herramienta para la prevención de desastres; sin embargo, no debe olvidarse que los resultados de las simulaciones tienen como base un análisis probabilístico de la información, por lo que deben de ser utilizados con cautela.

BIBLIOGRAFÍA

- Abrego Navas, J. A. (2014). Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres de ciudad Arce, La Libertad. ISDEM, PFGL, FISDL, Alcaldía Municipal de Ciudad Arce, Ciudad Arce.
- Aguilar, N. A., PFGL, ISDEM, FISDL, & Alcaldía Municipal de Nejapa. (s.f.). Etapa 2: Diagnóstico de riesgo de desastre en el ámbito municipal. Formulación del "Plan Municipal de Gestión de Riesgos de Desastres del Municipio de Nejapa, Departamento de San Salvador". Nejapa.
- Aparicio Mijares, F. J. (1992). Fundamentos de Hidrología de Superficie (Primera ed.). México: LIMUSA, S.A. de C.V.,.
- Aquino, D., ISDEM, PFGL, FISDL, & Alcaldía Municipal. (2014). Plan Municipal de Gestión de Riesgo de Desastres del Municipio el Paisnal. San Salvador. El Pasinal.
- BID, B.-A. (Noviembre de 2014). Análisis de riesgo por inundación en cuencas prioritarias y perfil de riesgo por inundaciones . Desarrollo del perfil de riesgo de desastres a nivel nacional Venezuela, Perú y El Salvador. Perfil de riesgo de desastre por inundaciones para El Salvador. Washington D.C.
- Brizuela, O. E., Toledo, M., & de Aguirre, A. L. (2014). Plan Municipal de Gestión de Riesgo de Desastres. . Alcaldía Municipal de Coatepeque, Santa Ana, Coatepeque.
- Campos , A. (1992). Proceso del Ciclo Hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.
- Campos Aranda, D. (1987). Procesos del Ciclo Hidrológico. México.
- Carías Juárez, B. E., Chacón Novoa, E. T., & Martínez Márquez, M. Á. (2004). Validación de metodologías para el cálculo de caudales máximos en El Salvador. Tesis, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, San Salvador. Recuperado el 15 de Junio de 2015, de

<http://portafolio.snet.gob.sv/digitalizacion/pdf/spa/doc00245/doc00245.htm>

CEPAL. (Octubre de 2011). Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado el 17 de Abril de 2015, de http://www.marn.gob.sv/phocadownload/informe_depresion_tropical_12E.pdf

Chereque Morán, W. (1989). Hidrología para Estudiantes de Ingeniería Civil. Lima, Perú: CONCYTEC.

COEM, C. (2003). Plan de Emergencia Municipal, Talnique. USAID/ES, Cruz Roja Salvadoreña, Cruz Roja Americana, Grupo de Recursos Internacionales.

Comisión Europea et al. (2013). EUSOILS-European Soil Portal Home Page. doi:10.2788/37334

Delgadillo, A., & Paez, G. (2008). Aspectos hidrológicos, subcuencas susceptibles a crecidas, escenarios de riesgo por crecidas. Plan de desarrollo urbano del municipio Antonio Pinto Salinas bajo el enfoque de gestión de riesgo. Caracterización de la cuenca del Valle de Mocotíes. Mérida. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) - Fundación para la Prevención de los Riesgos del Estado Mérida (FUNDAPRIS). Ferrer, C. y Dugarte, M.

DesInventar. (Octubre de 2011). Recuperado el 13 de Abril de 2015, de <http://online.desinventar.org/>

ERN, E.-A. (27-28 de Abril de 2010). Evaluación Probabilista de Riesgos en Centro América, Vulnerabilidad. San salvador, El Salvador.

Fernández Novales, P. (2015). Proyecto: "Enfoque participativo e inclusivo para comunidades resilientes en el departamento de La Libertad, El Salvador. DIPECHO 2014-2015". Geólogos del Mundo. Recuperado el Mayo de 2015

- Geólogos del Mundo, Ayuda Humanitaria y Protección Civil, Asdi, & Plan por la niñez. (2015). Georeferenciación de las Amenazas en el municipio de San Juan Opico.
- Geólogos del Mundo, Plan por la niñez, Ayuda Humanitaria y Protección Civil, & Asdi. (2015). Caracterización de Amenaza por Inundación y Cálculo de Umbrales de Alerta en las Comunidades Veracruz, el Primo Los Naranjos, Jardines de Colón y Rancho Hondo, Municipio de Colón, para el Establecimiento de Sistema de Alerta Temprana.
- González, M. A. (2004). Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas.
- Henao. (1998).
- Ibañez Asensio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. (20 de Abril de 2011). Repositorio Institucional de la Universitat Politècnica de València. Recuperado el 08 de Mayo de 2015, de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10782/Morfolog%C3%ADa%20de%20una%20cuenca.pdf?sequence=1>
- Ibañez Asensio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. (20 de Abril de 2011). Repositorio Institucional de la Universitat Politècnica de València. Recuperado el 20 de Mayo de 2015, de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10779/Tiempo%20de%20concentraci%C3%B3n.pdf?sequence=1>
- ISDEM, PFGL, & Alcaldía Municipal de Quezaltepeque. (2014). Plan Municipal de Gestión de Riesgo de Desastres, Quezaltepeque.
- ITEC, I. I. (Junio de 2013). Conformación de la Malla de Localización Preferencial de Centros de Tormenta. Bogotá D.C., Colombia.
- Jaimes, A., Magaña, I., Puente, A., Chinchilla, I., Castaneda, I., & Cerón, I. (2011). Modelación Probabilística del riesgo por Inundación en la cuenca del Río Jiboa.

- Lauer, W. (s.f.). Las formas de la vegetación de El Salvador: con un mapa. Instituto Geográfico de la Universidad de Kiel. Recuperado el junio de 2016, de <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/1364>
- León Delgado, V., Montoya López, A., & Rivera Galdámez, A. (2013). Caracterización Hidrogeológica de la Zona Sur del Municipio de Chalatenango, Limítrofe con el Embalse Cerrón Grande. Tesis, Universidad de El Salvador, Escuela de Ingeniería Civil, Ciudad Universitaria. Recuperado el 19 de Mayo de 2015
- Linsley, R., Kohler, M., & Paulus, J. (1997). Hidrología para Ingenieros (Segunda ed.). Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Latinoamericana, S.A.
- Mancia Guzmán, J. B., Montes Carias, J., Meneses, T. E., Ramírez Navas, D. M., Menéndez Rivas, L. A., & Zepeda Andrade, J. G. (2015). Plan de Reducción de Desastres del Municipio de Armenia. Trabajo Final presentado como requisito para aprobar el Diplomado en Gestión del Riesgo de Desastres y Desarrollo Municipal", Sonsonate, Armenia.
- MARN. (30 de Octubre de 2011). Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado el 17 de Abril de 2015, de http://www.marn.gob.sv/phocadownload/DT12_DescripcionTecnica_30oct.pdf
- MARN. (23 de Octubre de 2014). Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales: MARN. Recuperado el 16 de Abril de 2015, de http://www.marn.gob.sv/index.php?option=com_content&view=article&id=2855:presentan-mapa-de-riesgo-por-inundaciones-para-cuencas-hidrograficas-de-rios-arenal-de-monserrat-y-sensunapan&catid=1:noticias-ciudadano&Itemid=227
- MARN, SNET. (2009). Sistema de Referencia Territorial para la Gestión Integral del Riesgo de Desastres. Recuperado el 5 de Mayo de 2015, de <http://srt.snet.gob.sv/>

- Martínez Marín, E. (2005). Hidrología Práctica. España: COLEGIO DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS.
- Martínez Quijano, E. d. (2014). Plan Municipal de Riesgo de Desastres del Municipio de Tepecoyo. ISDEM, Alcaldía Municipal de Tepecoyo, PFGL.
- Monsalve Sáenz, G. (1999). Hidrología en la Ingeniería (Segunda ed.). México, D.F.: ALFAOMEGA GRUPO EDITOR, S.A. de C.V.
- Montoya de Reyna, L. A., FISDL, PFGL, ISDEM, & Alcaldía Municipal de San Matías. (2013). Plan Municipal de Gestión de Riesgo de Desastres.
- Paredes Escalante, D. C. (2014). Mapa Hidrogeológico de la cuenca Coata (Región Puno) en base a la actualización Cartográfica, Geológica, Litológica y estructuración de la columna estratigráfica. Informe Final de Prácticas Pre-Profesionales, UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA, DEPARTAMENTO ACADEMICO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, Tingo María - Perú. Recuperado el 04 de Junio de 2015, de http://www.unas.edu.pe/web/sites/default/files/web/archivos/actividades_academicas/INFORME%20FINAL%20davis%20paredes%20MODIFICANDO.pdf
- Pérez, J. (1979). Fundamentos del Ciclo Hidrológico. Universidad Central de Venezuela, Departamento de Meteorología e Hidrología, Caracas, Venezuela.
- PFGL, & Alcaldía Municipal de Sacacoyo. (2013). Plan Municipal de Gestión de Riesgo de Desastres, Sacacoyo, Departamento de La Libertad.
- PFGL, ISDEM, & Alcaldía Municipal de Jayaque. (2013). Plan Municipal de Gestión de Riesgos de Desastres de Jayaque, Departamento de La Libertad, El Salvador. Período 2013-2018.
- Probabilistic Risk Assessment Program, C. (21 de Noviembre de 2011). Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-1: COMPONENTES PRINCIPALES DEL ANÁLISIS DE RIESGO. Obtenido de

<http://www.ecapra.org/es/metodolog%C3%ADa-de-evaluaci%C3%B3n-probabilista-de-riesgos-naturales>

- Probabilistic Risk Assessment Program, C. (2011). Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-3: Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales y Selección.
- Probabilistic Risk Assessment Program, C. (2011). Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-7: MÓDULOS DE SOFTWARE.
- Reyes Carrasco, D. V. (1992). Hidrología Básica (Primera ed.). Lima, Perú: CONCYTEC.
- Santamarina, J., & Narsilio, G. (s.f.). CLASIFICACIÓN DE SUELOS: FUNDAMENTO FÍSICO, PRÁCTICAS ACTUALES Y RECOMENDACIONES. Publicación Técnica, Georgia Institute of Technology, Georgia. Recuperado el 23 de Mayo de 2015, de <http://materias.fi.uba.ar/6408/santamarina.pdf>
- Schumn, S. (1956). The Fluvial System. New York: A wiley-Interscience Publication. John Wiley & Sons.
- Silva, G. (1999). "Análisis hidrográfico e hipsométrico de la cuenca alta y media del río Chama, Estado Mérida". Revista Geográfica Venezolana, 40(1).
- Sub Secretaria de Desarrollo Territorial y Descentralización, P. d.-S. (2013). Plan Municipal de Gestión de Riesgos de Desastres de Jayaque, Departamento de La Libertad, El Salvador Período. 2013-2018. Jayaque.
- Velásquez, C. (4 de Octubre de 2013). CAPRA, AMENAZA POR INUNDACIÓN. San Salvador, El Salvador: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería & Ingeniar LTDA.
- Villón. (2002). Hidrología (Segunda ed.). Lima, Perú: Editorial Villón.
- VIRAMONTES-OLIVAS, O. A., ESCOBOZA-GARCÍA, L. F., PINEDO-ÁLVAREZ, C., PINEDO-ÁLVAREZ, A., REYES-GÓMEZ, V., ROMÁN-CALLEROS, J., & PÉREZ-MÁRQUEZ, A. (Septiembre-Diciembre de 2007). Morfometría de la cuenca del río San Pedro, conchos, Chihuahua. Medio Ambiente y

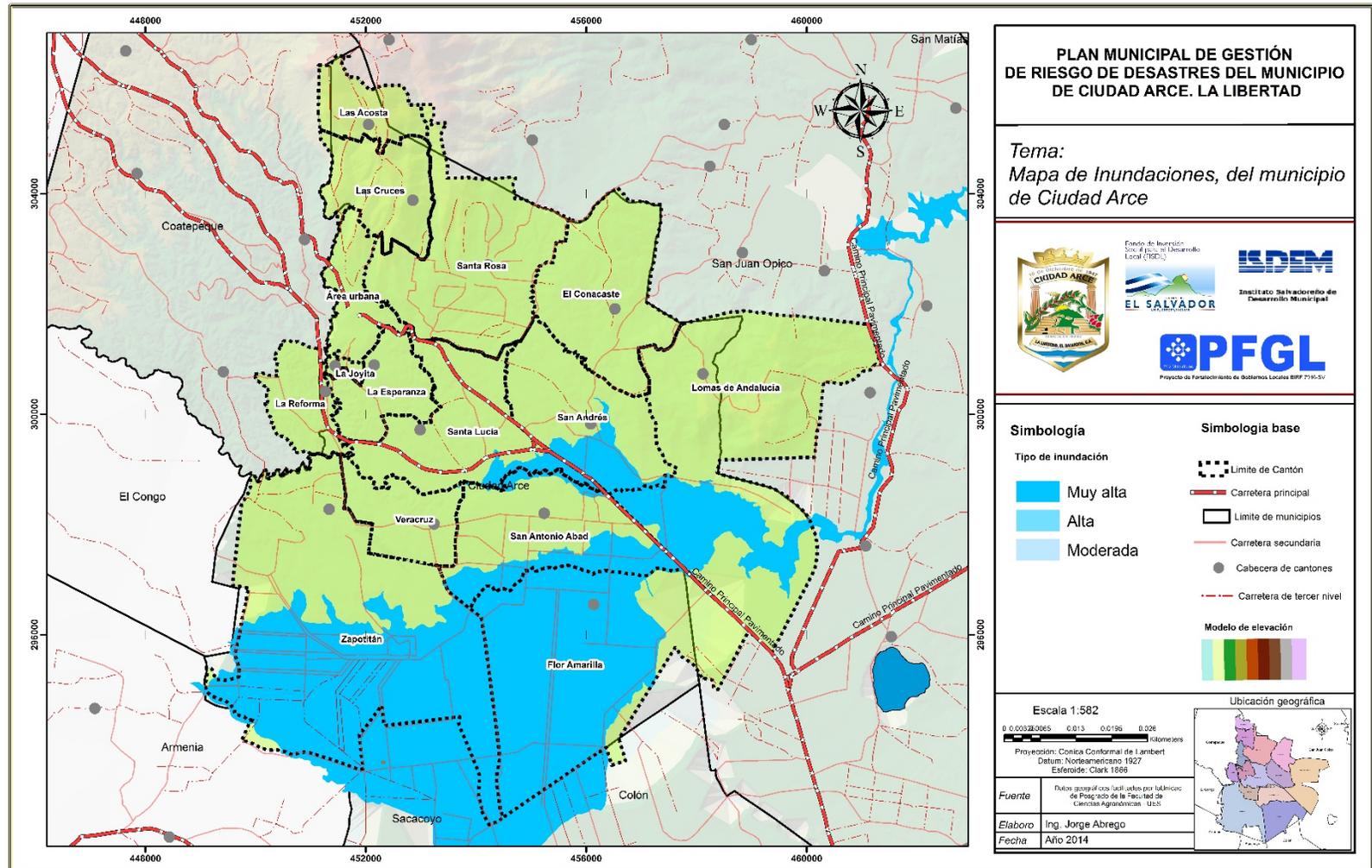
Desarrollo Sustentable, I. Recuperado el 13 de Junio de 2015, de <http://tecnociencia.uach.mx/numeros/v1n3/data/5-morfometria-de-la-cuenca.pdf>

Yugar Morales, W., & Cahuana Andia, A. (2009). Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología CIV-233. Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba. Recuperado el 2015

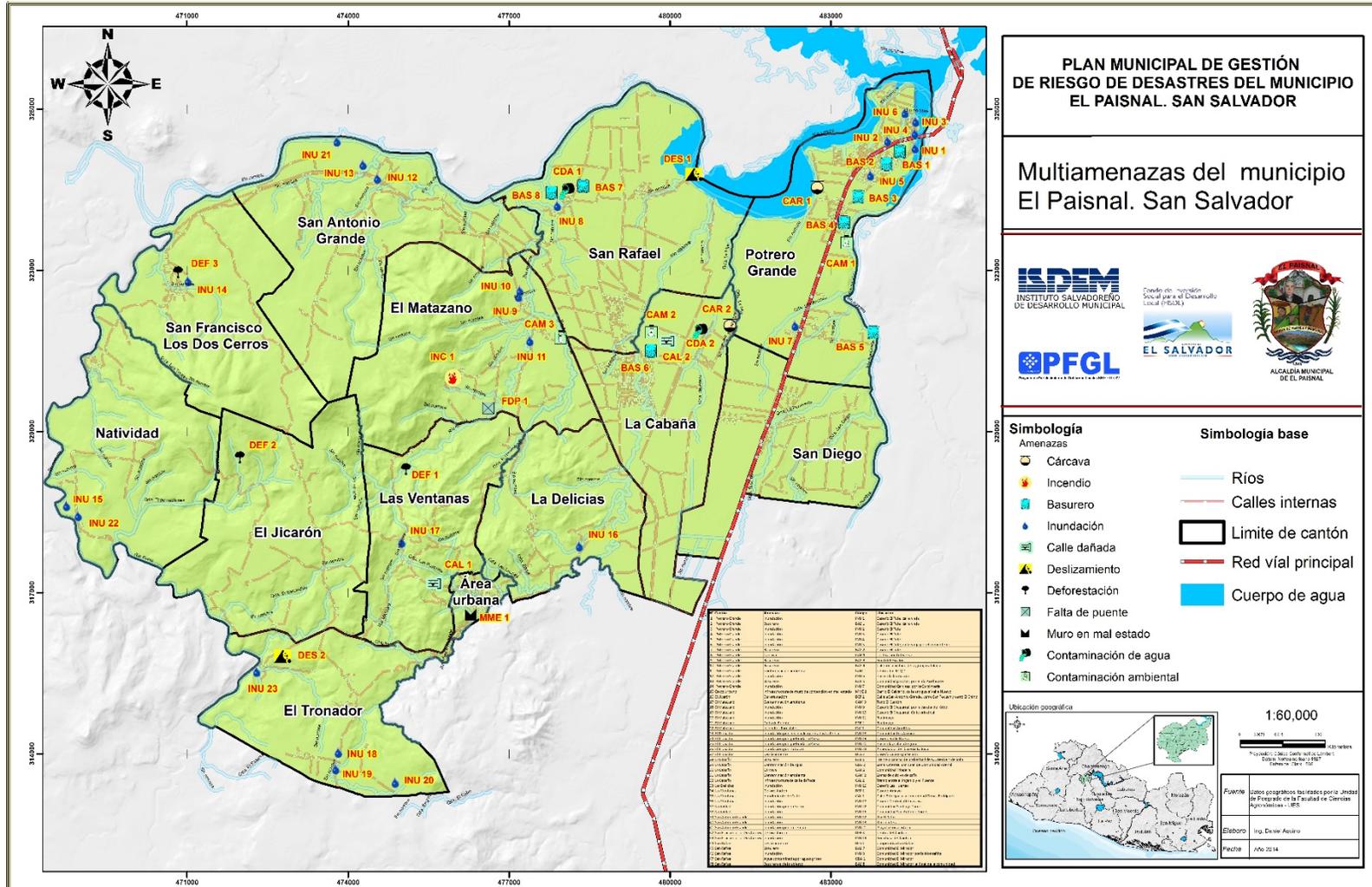
ANEXOS

ANEXO 4.1

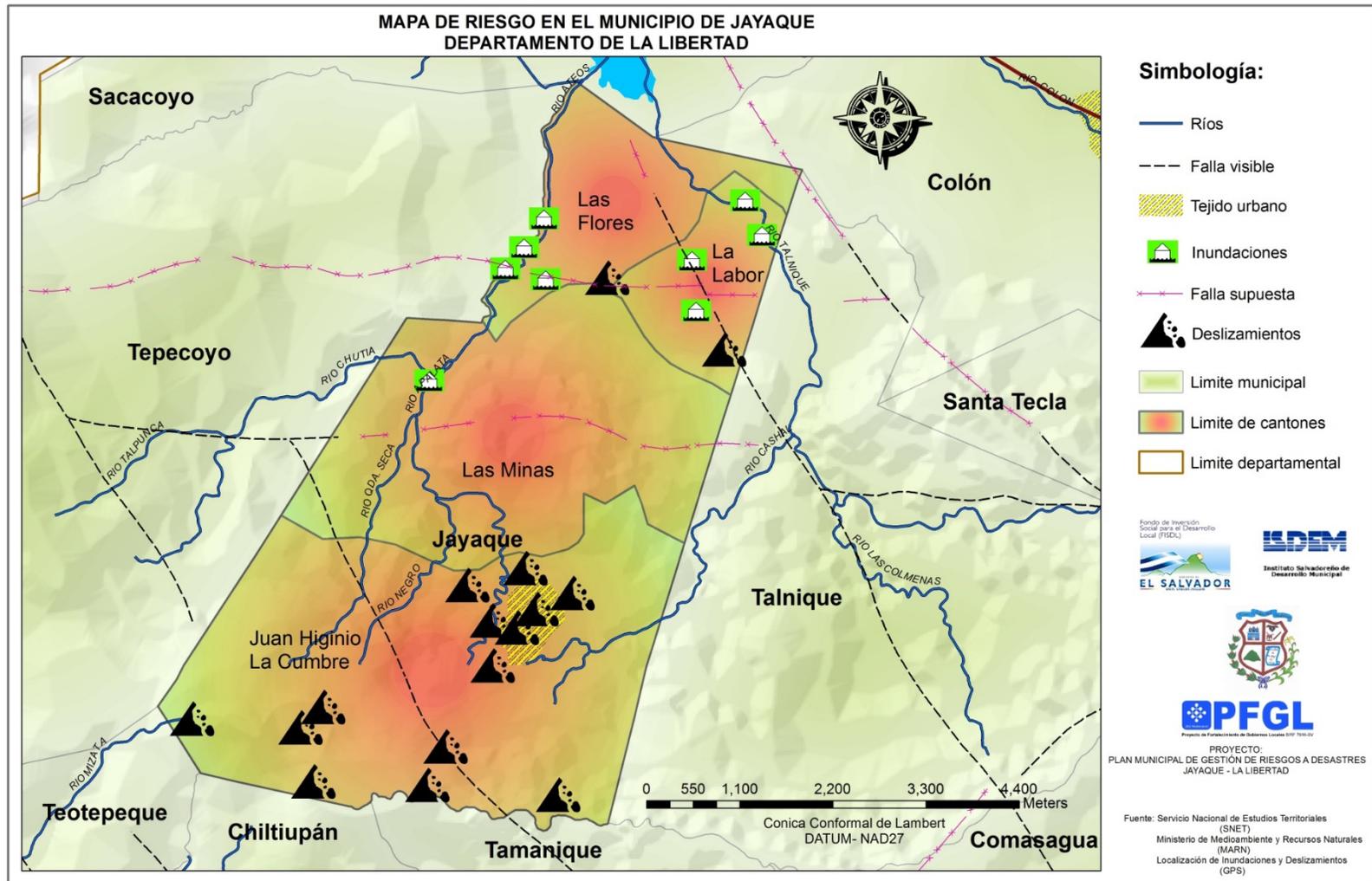
Mapas de Ubicación Zonas de Inundación



Anexo 4-1 Mapa de Inundaciones del municipio de Ciudad Arce.
Fuente: (Abrego Navas, 2014).

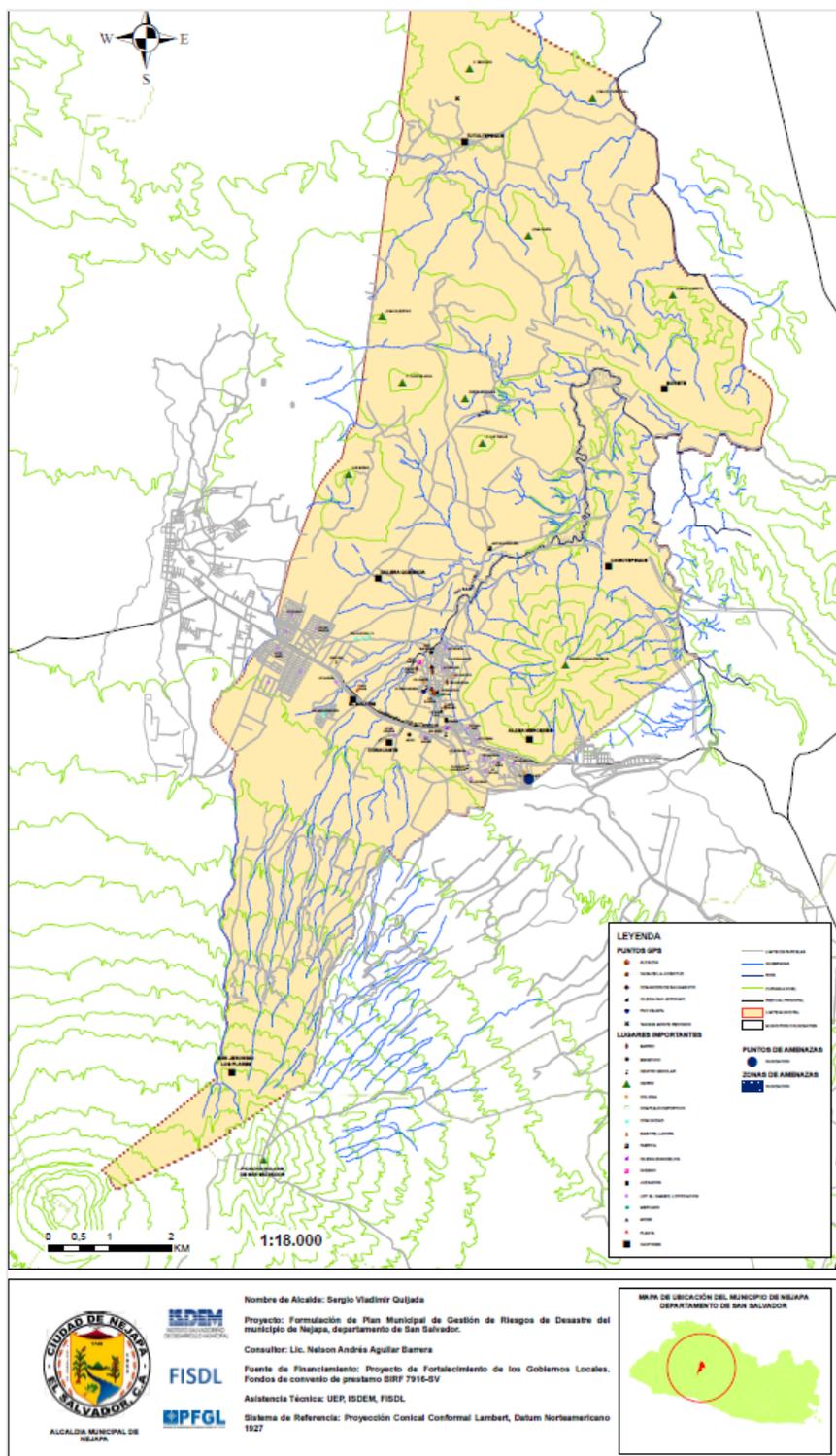


Anexo 4-3 Mapa multiamenaza del municipio de El Paisnal, San Salvador.
 Fuente: (Aquino, ISDEM, PFGL, FISDL, & Alcaldía Municipal, 2014).

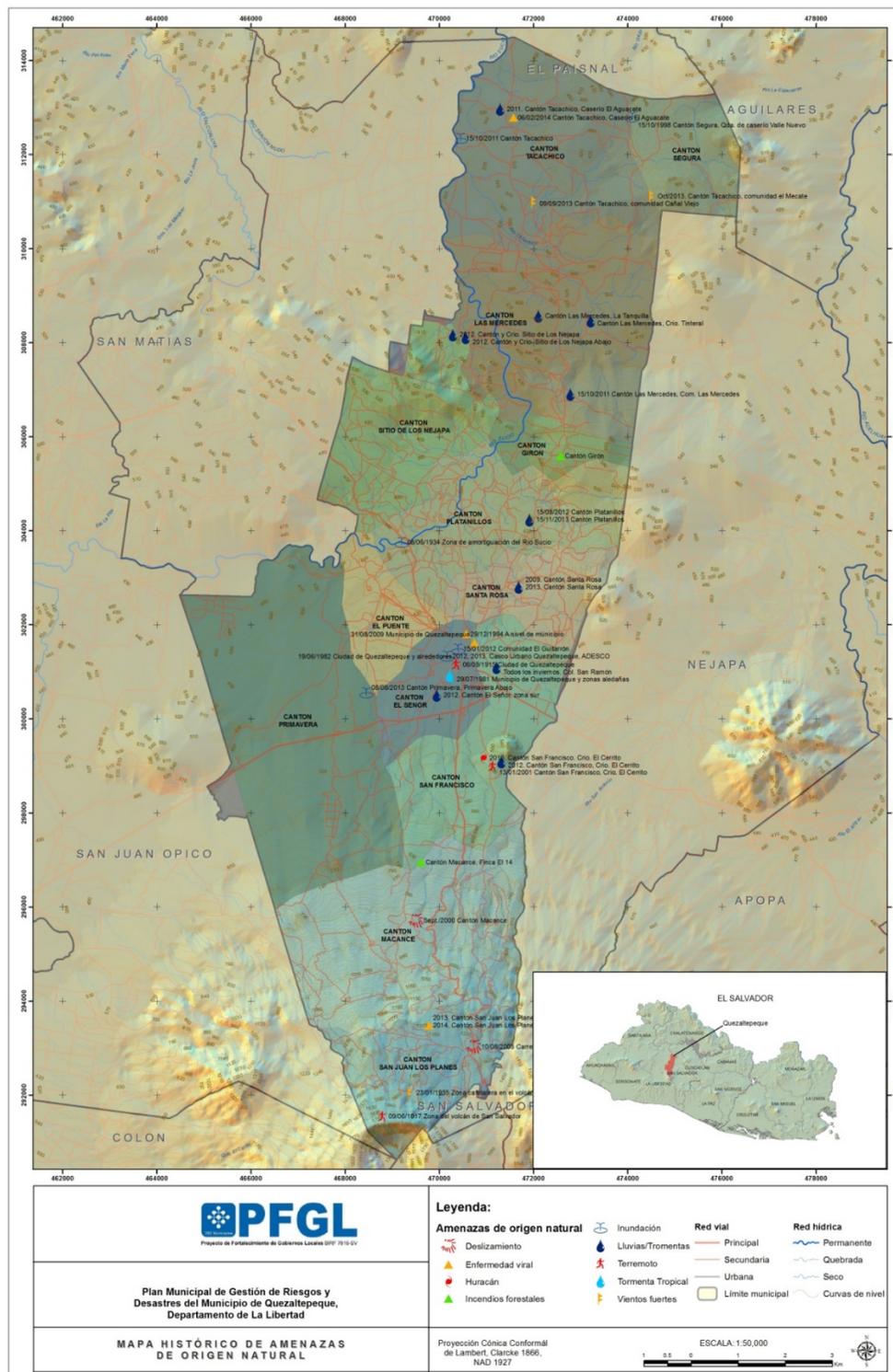


Anexo 4-4 Mapa de Riesgo del municipio de Jayaque

Fuente: (PFGL, ISDEM, & Alcaldía Municipal de Jayaque, Plan Municipal de Gestión de Riesgos de Desastres de Jayaque, Departamento de La Libertad, El Salvador. Período 2013-2018., 2013).

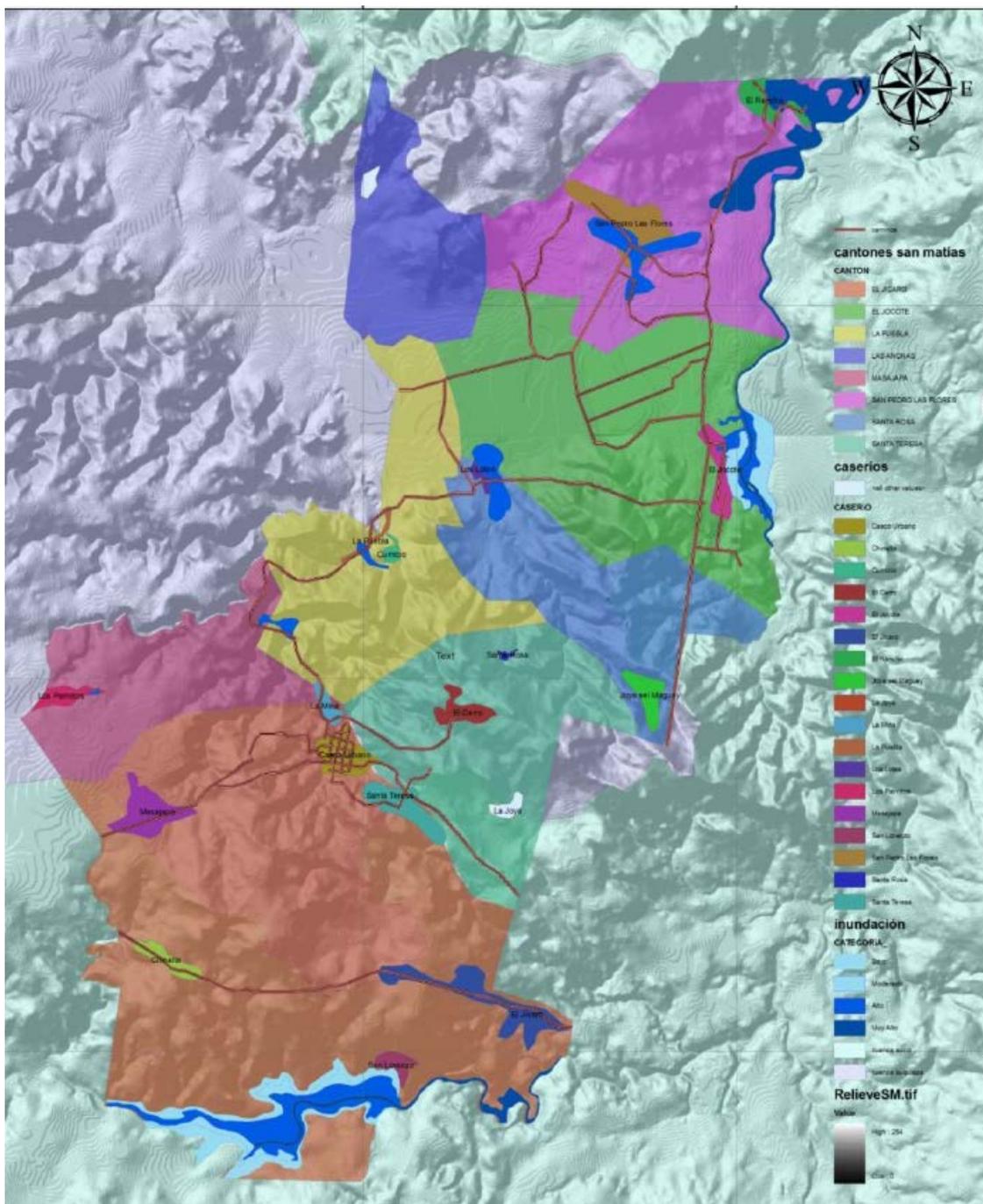


Anexo 4-5 Mapa de amenaza por inundación del municipio de Nejapa.
 Fuente: (Aguilar, PFGGL, ISDEM, FISDL, & Alcaldía Municipal de Nejapa)



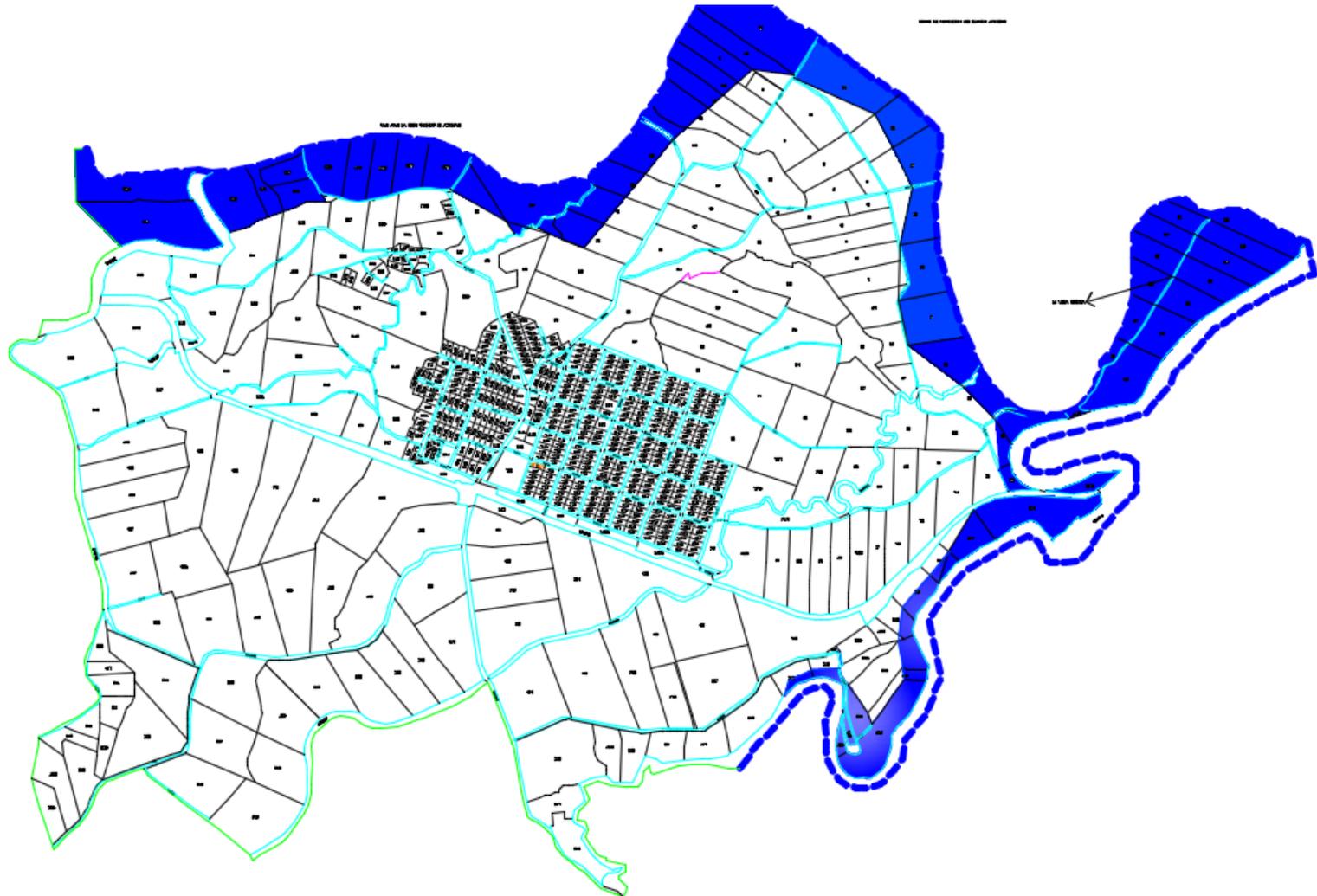
Anexo 4-6 Mapa histórico de amenazas de origen natural del municipio de Quezaltepeque.

Fuente: (ISDEM, PFGL, & Alcaldía Municipal de Quezaltepeque, 2014)



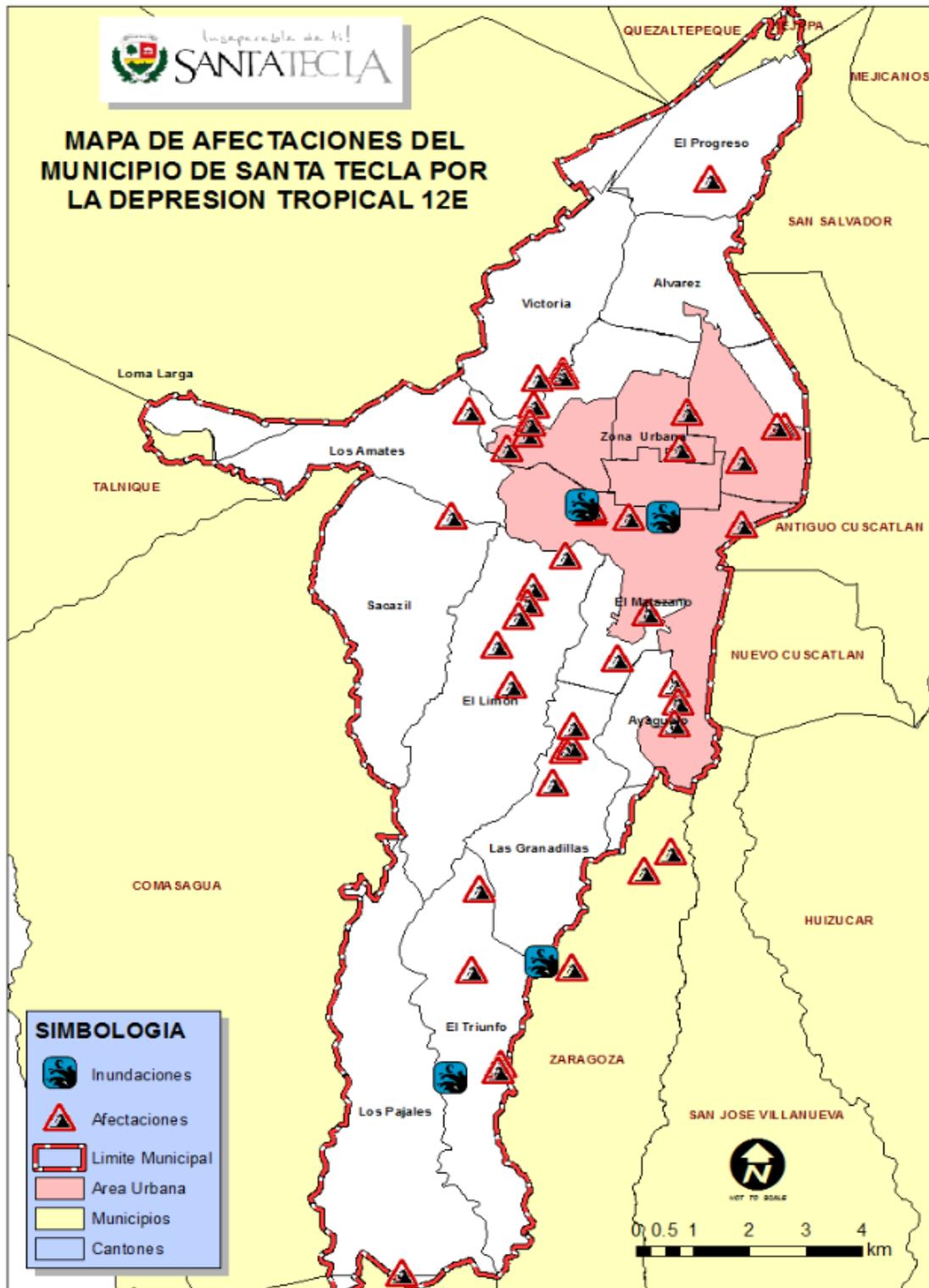
Anexo 4-7 Mapa de amenaza de inundación del municipio de San Matías.

Fuente: (Montoya de Reyna, FISDL, PFGL, ISDEM, & Alcaldía Municipal de San Matías, 2013)

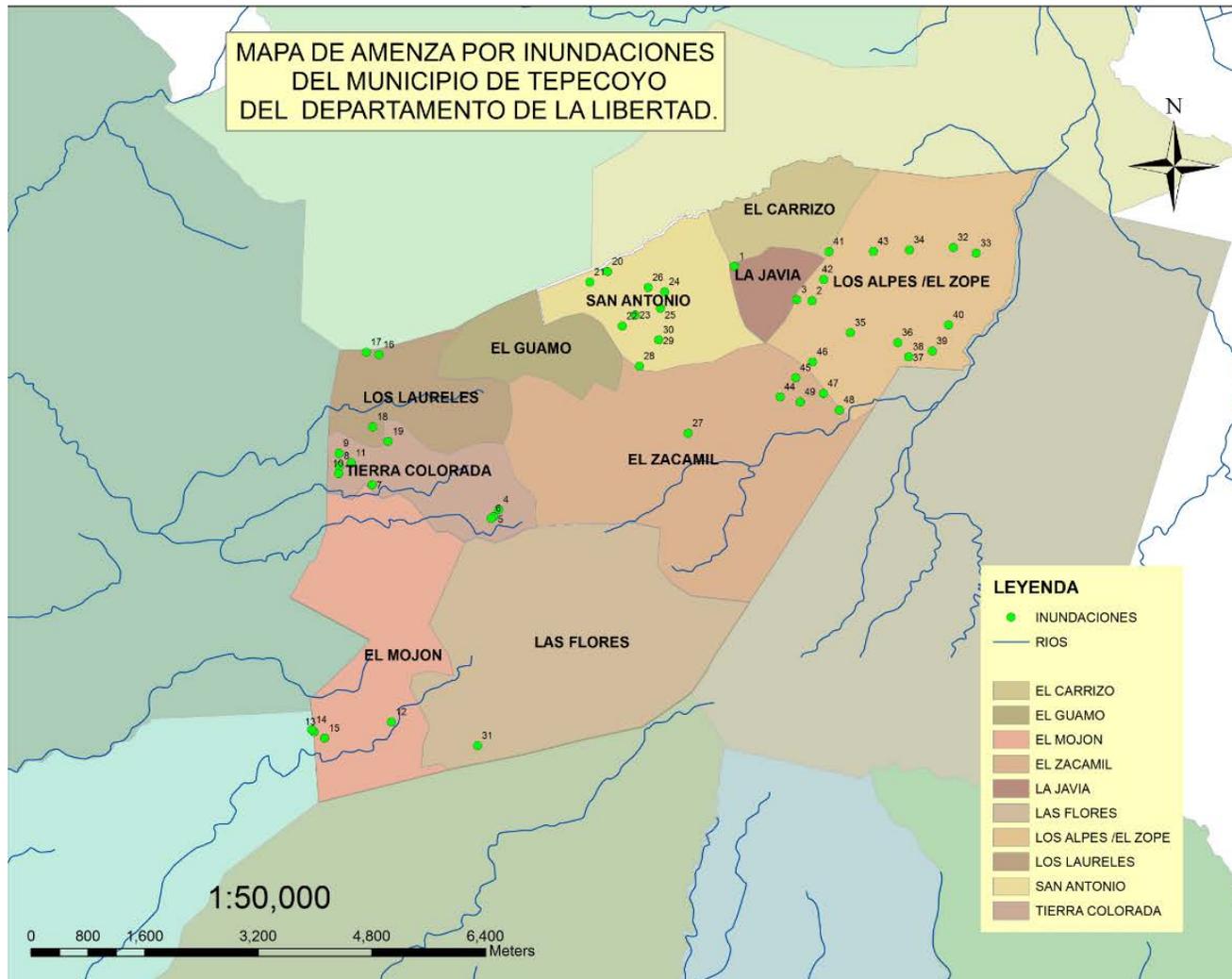


Anexo 4-8 MApa de inundación del cantón Atiocoyo del municipio de San Pablo Tacachico.

Fuente: Municipalidad de San Pablo Tacachico.



Anexo 4-9 Mapa de afectaciones del municipio de Santa Tecla.
Fuente: Alcaldía Municipal de Santa Tecla.



Instituto Salvadoreño de Desarrollo Municipal

PLAN MUNICIPAL DE GESTIÓN DE RIESGOS DE DESASTRES DEL MUNICIPIO DE TEPECOYO, DEPARTAMENTO DE LA LIBERTAD, EL SALVADOR, 2013-2014

ELABORADO POR EVELIA DEL CARMEN MARTÍNEZ QUIJANO ESPECIALISTA EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS Y EVALUACIÓN DE LAS PELIGROSIDADES NATURALES.

Anexo 4-10 Mapa de amenaza por inundaciones del municipio de Tepecoyo. Fuente: (Martínez Quijano, 2014)

ANEXO 4.2

Ubicación de las Zonas de Inundación de la Cuenca del Río Sucio.

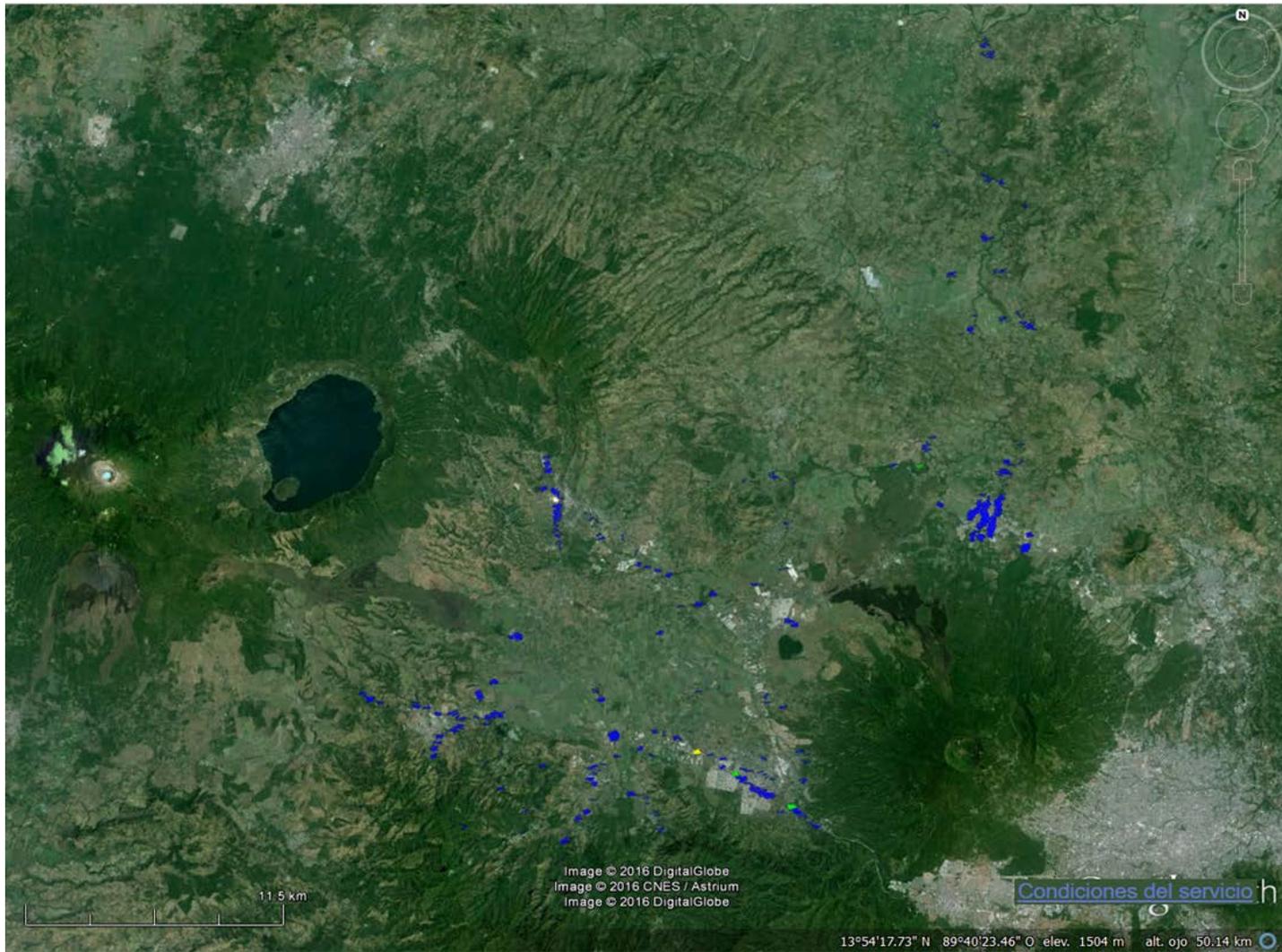


Anexo 4-11 Ubicación de las zonas de inundación en la cuenca del río Suctio.

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por las municipalidades que conforman la cuenca del río Suctio.

ANEXO 4.3

Levantamiento de los Elementos Expuestos a Inundación de la Cuenca del Río Sucio.



Anexo 4-12 Levantamiento de los elementos expuestos a inundación en la cuenca del río Sucio.
Fuente: Elaboración propia mediante el uso de la herramienta Web CAPRA.