

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
CENTRO UNIVERSITARIO DE ORIENTE  
AGRONOMÍA**

**DETERMINACIÓN DE LAS ZONAS POTENCIALES DE RECARGA  
HÍDRICA EN LAS SUBCUENCAS DE LOS RÍOS TACÓ Y SHUSHO,  
MUNICIPIO DE CHIQUIMULA, DEPARTAMENTO DE CHIQUIMULA.**



**MANUEL GILBERTO GARCÍA ÁLVAREZ**

**INGENIERO AGRONOMO**

**CHIQUIMULA, NOVIEMBRE DE 2009.**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
CENTRO UNIVERSITARIO DE ORIENTE  
AGRONOMÍA



**DETERMINACIÓN DE LAS ZONAS POTENCIALES DE RECARGA HÍDRICA EN  
LAS SUBCUENCAS DE LOS RÍOS TACÓ Y SHUSHO, MUNICIPIO DE  
CHIQUMULA, DEPARTAMENTO DE CHIQUMULA.**

Presentado al Honorable Consejo Directivo

Por:

MANUEL GILBERTO GARCÍA ÁLVAREZ

En el acto de investidura como

**INGENIERO AGRONOMO EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGRICOLA, EN EL GRADO  
ACADEMICO DE LICENCIADO**

CHIQUMULA, NOVIEMBRE DE 2009.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
CENTRO UNIVERSITARIO DE ORIENTE  
AGRONOMÍA



**DETERMINACIÓN DE LAS ZONAS POTENCIALES DE RECARGA HÍDRICA EN  
LAS SUBCUENCAS DE LOS RÍOS TACÓ Y SHUSHO, MUNICIPIO DE  
CHIQUIMULA, DEPARTAMENTO DE CHIQUIMULA.**

MANUEL GILBERTO GARCÍA ÁLVAREZ  
200240485

CHIQUIMULA, NOVIEMBRE DE 2009.

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS E GUATEMALA  
CENTRO UNIVERSITARIO DE ORIENTE  
AGRONOMÍA**



**RECTOR**

LIC. CARLOS ESTUARDO GÁLVEZ BARRIOS

**CONSEJO DIRECTIVO DEL CENTRO UNIVERSITARIO DE ORIENTE**

Presidente:	MSc. Mario Roberto Díaz Moscoso
Secretario:	MSc. Nery Waldemar Galdámez Cabrera
Representantes de docentes:	Dr. Benjamín Alejandro Pérez Valdés MSc. Gildardo Guadalupe Arriola Mairén
Representante de egresados:	Ing. Agr. Walter Orlando Felipe Espinosa
Representantes de estudiantes:	PC Edgar Wilfredo Chegüén Herrera PC Giovanna Gisela Sosa Linares

**COORDENADOR ACADÉMICO**

Ing. Agr. Edwin Filiberto Coy Cordón

**COORDINADOR CARRERA DE AGRONOMÍA**

MSc. José Leonidas Ortega Alvarado

**TERNA EVALUADORA**

Ing. Agr. Jeovani Rosa Pérez

Ing. Agr. Milton Solís

Ing. Ricardo Suchini Paiz

Chiquimula, noviembre de 2009.

Señores  
Consejo Directivo  
Centro Universitario de Oriente  
Ciudad de Chiquimula

Honorables Miembros:

De conformidad con las normas establecidas por la Universidad de San Carlos de Guatemala, tengo el honor de someter a su consideración el trabajo de graduación titulado:

**DETERMINACIÓN DE LAS ZONAS POTENCIALES DE RECARGA HÍDRICA  
EN LAS SUBCUENCAS DE LOS RÍOS TACÓ Y SHUSHO, MUNICIPIO DE  
CHIQUMULA, DEPARTAMENTO DE CHIQUMULA.**

El cual presento como requisito previo a optar el título de Ingeniero Agrónomo en Sistema de Producción Agrícola, en el grado de Licenciado.

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Manuel Gilberto García Álvarez  
Carnet: 200240485

## ***ACTO DEDICADO A:***

Dios, el Divino Maestro, quien me ha guiado durante todo el camino que he recorrido en mi vida.

La Familia García Álvarez, mis padres y hermanos, en especial a nuestro nuevo miembro: Lourdes Margarita.

Al Ing. Arg. MSc. Marlon Bueso Campos, por inspirarme a llevar a cabo este trabajo de investigación.

Mis amigos y compañeros de estudios, en este Centro Universitario.

### **AGRADECIMIENTOS:**

*Al Ing. Agr. Hugo Villafuerte Villeda y al Ing. Geólogo Leonel Leytán Aguilar, quienes aceptaron amablemente asesorar este trabajo de investigación.*

*Al MSc. Alejandro Cacao, Universidad de Cádiz, España; y al Hidrogeólogo Keith Thompson, por su valiosa colaboración en la clasificación de los tipos geológico del área bajo estudio.*

### **AGRADECIMIENTOS ESPECIALES:**

**Al Ing. Agr. Elmer Barillas y a los estudiantes del Curso "Manejo de Cuencas Hidrográficas" de la Carrera de Agronomía, 2009; quienes fueron de mucha ayuda durante el estudio de campo:**

LUIS EMILIO GRANADOS PADILLA  
JOSÉ RONALD SANDOVAL ESPAÑA  
LUIS ROLANDO ROSALES  
GEOVANY SALOMÓN MIRANDA VILLELA  
ANTONIO JOSÉ CASASOLA SANTISTEBÁN  
JOSÉ ARMANDO FRANCO HERNÁNDEZ  
JOSÉ LEONARDO ZAPAROLLI CARRERA  
LUIS OMAR QUIJADA CORDERO  
CÉSAR AUGUSTO CALDERÓN LEMUS  
MARIO AUGUSTO LEMUS

LESTER ESTUARDO GARCÍA  
OTTO JOSÉ RODRÍGUEZ ROSAS  
FERDY NAPOLEÓN MIGUEL ESPINOZA  
HEYDI KAROLINA CERNA PORTILLO  
JORGE LUIS GUANCHÉ GARCÍA  
MIRNA LILIANA MORÁN VASQUEZ  
CARLOS HUMBERTO MORÁN VASQUEZ  
GUILLERMO ESTUARDO MEDINA PINEDA  
BRAULIO ESTUARDO ORELLANA OLIVA

## ÍNDICE GENERAL

<i>CONTENIDO</i>	<i>PÁGINA</i>
ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	v
RESUMEN	vii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO CONCEPTUAL	3
2.1. Antecedentes	3
2.2. Justificación	6
2.3. Definición y delimitación del problema	7
3. MARCO TEÓRICO	10
3.1. Cuenca hidrográfica	10
3.2. Recarga hídrica	11
3.2.1. Zonas de recarga hídrica	11
3.2.2. Clasificación de zonas de recarga hídrica	12
3.3. Balance hídrico	13
3.4. Factores que afectan la recarga hídrica	14
3.4.1. Clima	15
3.4.2. Tipo de suelo	17
3.4.3. Relieve	18
3.4.4. Pendiente	19
3.4.5. Geología	19
3.4.6. Cobertura vegetal y uso de la tierra	22
3.5. Recarga hídrica y actividad antrópica en la cuenca	22
3.6. Metodología participativa para la determinación de zonas de recarga hídrica	23
4. MARCO REFERENCIAL	26
4.1. Ubicación del área de estudio	26
4.2. Descripción del área de estudio	26
4.3. Características biofísicas del área de estudio	27
4.3.1. Zonas de vida	27
4.3.2. Clima	28
4.4. Aspectos sociales	29
4.5. Características geomorfométricas de las subcuencas bajo estudio	30
5. MARCO METODOLÓGICO	32
5.1. Objetivo general	32
5.2. Objetivos específicos	32

<i>CONTENIDO</i>	<i>PÁGINA</i>
5.3. Descripción de la metodología	32
5.4. Fase de gabinete inicial	34
5.4.1. Delimitación del área de estudio	34
5.4.2. Determinación de puntos de muestreo para el estudio de suelos	35
5.5. Fase de campo	36
5.5.1. Determinación de la textura del suelo	36
5.5.2. Determinación de capacidad de infiltración del suelo	37
5.5.3. Localización de manantiales (Surgencias)	38
5.6. Fase de gabinete final	39
5.6.1. Determinación de zonas potenciales de recarga hídrica	39
5.6.2. Generación de un modelo automatizado para el procesamiento de datos	47
5.6.3. Descripción de las principales características que intervienen en la determinación de las zonas potenciales de recarga hídrica	48
5.6.4. Lineamientos para el manejo y conservación de las zonas de recarga hídrica	48
6. RESULTADOS	49
6.1. Descripción y análisis de las variables involucradas en la determinación de las zonas potenciales de recarga hídrica	49
6.1.1. Pendientes	49
6.1.2. Tipo de suelo	50
6.1.3. Geología	54
6.1.4. Uso del suelo	60
6.1.5. Cobertura Vegetal	63
6.2. Modelo automatizado para el procesamiento de datos requeridos para la aplicación de la ecuación de recarga hídrica	64
6.3. Identificación y descripción de las zonas potenciales de recarga hídrica	67
6.4. Escenarios	70
6.5. Lineamientos generales para el manejo y conservación de las zonas de recarga hídrica, dentro de las subcuencas de los ríos Tacó, Shusho y Sasmó	73
7. CONCLUSIONES	78
8. RECOMENDACIONES	80
9. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	82
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
11. APÉNDICES	
12. ANEXOS	

## ÍNDICE DE CUADROS

<i>CUADRO</i>		<i>PÁGINA</i>
1	Efecto de la actividad antrópica sobre los acuíferos.	23
2	Método de clasificación por importancia para determinar el peso relativo de cada variable. Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas.	24
3	Método de rateo para determinar el peso relativo de cada variable. Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas.	24
4	Peso relativo promedio final para cada variable. Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas.	24
5	Especies vegetales indicadoras del bosque seco subtropical.	28
6	Especies vegetales indicadoras del bosque húmedo subtropical (templado).	28
7	Centros poblados dentro del área de estudio según el Instituto Nacional de Estadística, municipio de Chiquimula.	30
8	Características geomorfométricas de las subcuencas involucradas en la determinación de las zonas potenciales de recarga hídrica.	31
9	Matriz para la clasificación y ponderación de pendientes, según la ecuación para la determinación de zonas de recarga hídrica.	39
10	Matriz para clasificación y ponderación de texturas del suelo, según la ecuación para la determinación de zonas de recarga hídrica.	40
11	Matriz para la clasificación y ponderación de la velocidad de infiltración, según la ecuación para la determinación de zonas de recarga hídrica.	41
12	Matriz para la clasificación y ponderación de la geología de suelos, según la ecuación para la determinación de zonas de recarga hídrica.	43
13	Matriz para la clasificación y ponderación del porcentaje de cobertura del suelo, según la ecuación para la determinación de zonas de recarga hídrica.	44

<i>CUADRO</i>		<i>PÁGINA</i>
14	Matriz para la ponderación del uso del suelo, según la ecuación para la determinación de zonas de recarga hídrica.	46
15	Matriz para la determinación del potencial de recarga hídrica, según la ecuación para la determinación de zonas de recarga hídrica.	47
16	Distribución de la pendiente según rango y subcuenca, dentro del área de estudio, municipio de Chiquimula.	49
17	Resumen de tipos de texturas del suelo, según clase textural y según subcuenca dentro del área de estudio, municipio de Chiquimula, 2009.	50
18	Resultado de las pruebas de velocidad de infiltración y su respectiva granulometría, determinada en laboratorio por el método de Bouyoucos. Chiquimula, 2009.	52
19	Resultados de velocidad de infiltración del suelo, obtenidos por el método Porchet; según rango de velocidad y según subcuenca a la que pertenecen; municipio de Chiquimula, 2009.	53
20	Tipos geológicos dentro del área de estudio, distribución según tipo y subcuenca a la que pertenecen, municipio de Chiquimula.	54
21	Distribución de la cobertura vegetal y uso de la tierra para el año 2006, según tipo de uso y subcuenca dentro del área de estudio, municipio de Chiquimula.	61
22	Cobertura vegetal permanente según porcentaje y según subcuenca dentro del área de estudio, municipio de Chiquimula.	63
23	Distribución de zonas de recarga hídrica según potencial de recarga, y, según subcuenca en la que se ubican; municipio de Chiquimula.	67
24	Matriz de recomendaciones para el manejo de las zonas de recarga hídrica dentro de las subcuencas de los ríos Tacó, Shusho y Sasmó.	75

## ÍDICE DE FIGURAS

<i>FIGURA</i>		<i>PÁGINA</i>
1	Triangulo textural para la determinación de la textura de los suelos, en base al porcentaje de sus partículas primarias.	18
2	Ciclo geológico de la rocas.	20
3	Mapa de ubicación del área de estudio. Ubicación nacional y Local en el municipio de Chiquimula.	26
4	Mapa que muestra la forma en la que está integrada el área de estudio, para la determinación de las zonas potenciales de recarga hídrica.	27
5	Esquema que muestra la metodología utilizada para la determinación de las zonas potenciales de recarga hídrica, en el área de estudio.	34
6	Mapa de la distribución de 135 puntos de muestreo. Área de estudio, municipio de Chiquimula.	36
7	Triángulo textural para la determinación de la textura del suelo, mediante el método del tacto.	37
8	Mapa de clases texturales, resultantes de la determinación de la textura en base al método del tacto. Subcuencas de los ríos Tacó, Shusho y Sasmó. Municipio de Chiquimula, 2009.	51
9	Plutones de Chiquimula. Cercanías de la aldea Shusho en Medio. Municipio de Chiquimula, 2009.	55
10	Basaltos vesiculares superficiales en los alrededores de la aldea El Pinalito, municipio de Chiquimula, 2009.	56

<i>FIGURA</i>		<i>PÁGINA</i>
11	Rocas del grupo Padre Miguel que presentan un estado de fractura significativo. Subcuenca río Shusho, municipio de Chiquimula, 2009.	57
12	Aluvionales del valle de la ciudad de Chiquimula, Municipio de Chiquimula, 2009.	58
13	Esquistos fracturados del grupo Santa Rosa, en la parte alta de la subcuenca del río Shusho. Municipio de Chiquimula, 2009.	59
14	Mapa de cobertura vegetal y uso de la tierra, actualizado al año 2006 a través de interpretación de imágenes de satélite. Área de estudio, municipio de Chiquimula.	61
15	Modelo de geoprociamiento generado en Model Builder, para la determinación del potencial de recarga hídrica.	65
16	Mapa de zonas de recarga hídrica, según la ecuación de recarga hídrica planteada, subcuencas de los ríos Tacó, Shusho y Sasmó; municipio de Chiquimula, 2009.	67
17	Zonas de recarga hídrica en comparación con la red hídrica y surgencias de las subcuencas de los ríos Tacó, Shusho y Sasmó; municipio de Chiquimula, 2009.	69
18	Escenario I. Pérdida de la cobertura forestal dentro de las subcuencas de los ríos Tacó y Shusho, a causa del avance de la Frontera agrícola. Municipio de Chiquimula, 2009.	71
19	Escenario II. Impacto de la recuperación del área boscosa, en todas las áreas actualmente identificadas como con potencial “moderado” de recarga hídrica. Municipio de Chiquimula. 2009.	72

## RESUMEN

El presente estudio tiene como propósito fundamental, determinar las zonas potenciales de recarga hídrica en dos subcuencas hidrográficas, las cuales incluyen a los ríos Tacó, Shusho y Sasmó en el municipio de Chiquimula; para lo cual se aplicó un modelo metodológico para la determinación del potencial de recarga hídrica; basado en las variables: pendiente, geología, velocidad de infiltración, textura del suelo, uso del suelo y cobertura vegetal. Cada una de estas variables, fue analizada con el propósito de describir la forma en que éstas determinan la recarga hídrica del área geográfica.

El modelo metodológico comprende una estimación cualitativa del potencial de recarga, y fue aplicado a través del software de SIG ArcGIS 9.2; al mismo tiempo fue creado un modelo de geoprocésamiento a través de la aplicación Model Builder, lo que permitió el planteamiento de dos escenarios. El primero plantea la pérdida de la cobertura forestal actual, lo que implica una reducción del potencial de recarga hídrica en 15% del área; mientras que el segundo, identifica las áreas que mejorarían su potencial de recarga al proporcionar un tipo de cobertura comparable a la de los bosques. Con esto se demuestra, la utilidad que este tipo de tecnología tiene para la planificación, enfocada a la administración de los recursos naturales y al ordenamiento territorial.

Como resultado, fue generado el mapa “Zonas Potenciales de Recarga Hídrica, en las subcuencas de los ríos Tacó, Shusho y Sasmó”; el cual clasifica el área de estudio en cinco categorías, según el potencial de recarga hídrica: *muy alto (1.15%), alto (18.30%), moderado (64.80%), bajo (14.68%) y muy bajo (1.07%)*. La subcuenca del río Tacó, posee más área con potencial alto y muy alto; caracterizada por suelos con textura gruesa, velocidad de infiltración rápida y cobertura forestal; lo que supera las limitantes que otras variables pueden representar.

De acuerdo a las características identificadas, fue posible generar una propuesta de manejo para cada una de las zonas de recargas. Para las zonas con un potencial muy alto y alto, medidas de protección y conservación son las más apropiadas; mientras que para las de potencial moderado, el manejo y control de las actividades agropecuarias y la eliminación de focos de contaminación, deben ser enfoques prioritarios. Por otro lado, las zonas con potencial bajo y muy bajo, necesitan de prácticas agrícolas que minimicen el impacto de la actividad humana y la administración efectiva del territorio, especialmente en las zonas cercanas a la ciudad de Chiquimula.

## 1. INTRODUCCIÓN

En Guatemala, el estudio de la recarga hídrica tiene una década, y varios métodos cualitativos o cuantitativos han sido aplicados con el propósito de identificar aquellas zonas en las cuales ocurre la recarga hídrica dado su nivel de importancia para el ciclo hidrológico. El estudio más reciente a nivel nacional fue llevado a cabo por el Instituto Nacional de Bosques –INAB– a una escala de 1:250000, y cuyo informe fue publicado en 2005.

La recarga hídrica se define como la capacidad que tiene una zona territorial para capturar el agua proveniente de la precipitación *INAB (2005)*. Este tema toma relevancia política con la creación del decreto 101-96, Ley Forestal, la cual establece en su artículo 47, el manejo que dichas áreas deben recibir. A partir de entonces el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación –MAGA–, crea el primer mapa relacionado con la recarga hídrica para la república de Guatemala. La metodología utilizada inicialmente fue propuesta por la Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala –FAUSAC–, luego surgió otra metodología que fue validada por el Instituto Nacional de Bosques –INAB–; las cuales han servido para realizar estudios hidrológicos a nivel nacional y en varias subcuencas de la república.

La metodología aceptada en la actualidad es la del INAB, y ésta requiere determinar cierto número de variables para su ejecución: *capacidad de uso de la tierra, fisiografía, pendientes, textura de suelos, taxonomía de suelos, balance hídrico, recarga hídrica potencial, densidad de drenaje y susceptibilidad a la erosión*. Esto ha limitado su aplicación a una escala cartográfica muy pequeña; y aunque la información generada es muy útil para la planificación a nivel nacional, sirve de poco a nivel local, debido a la generalidad de su detalle cartográfico.

A fin de obtener información cartográfica más detallada y relacionada con la recarga hídrica, el presente estudio propone un nuevo enfoque, para obtener información que será de utilidad en los proyectos de planificación, orientados al manejo de los recursos naturales o el ordenamiento territorial. Para lograr esto se adaptó la metodología para la identificación de áreas potenciales de recarga hídrica desarrollada por *Matus Silva (2007)*.

Como áreas de estudio, se seleccionaron las subcuencas de los ríos Tacó y Shusho, cercanas a la ciudad de Chiquimula; ya que ésta última, pasa en la actualidad por problemas con el suministro de agua para la población, en parte generados por la degradación de las cuencas mencionadas y en parte por la creciente demanda del recurso. El estudio se desarrolló durante los meses de enero a agosto de 2009, y estuvo enfocado en la creación de un base de datos espaciales manejada a través del Sistema de Información Geográfica y que estará a disposición del Centro de Información Ambiental del Centro Universitario de Oriente; a fin de facilitar el

procesamiento de los datos y que la metodología resultante sea fácilmente aplicada en estudios posteriores.

El presente estudio pretende generar información que sirva de herramienta para que las autoridades puedan planificar a futuro el desarrollo local, establecer las pautas para la conservación del recurso hídrico y mantener su disponibilidad; por ello, también se aportan los lineamientos generales a seguir para el manejo y conservación de cada uno de los tipos de zonas de recarga hídrica resultantes.

## 2. MARCO CONCEPTUAL

### 2.1. Antecedentes

Dentro del territorio guatemalteco, se han llevado a cabo varios estudios relacionados con la identificación de zonas de recarga hídrica, que han hecho uso de diversas metodologías. Algunos han sido aplicados a nivel nacional como el *“Mapa de Zonas de Recarga Hídrica modificado de la República de Guatemala y el Mapa de Tierras Forestales de Captación y Regulación Hidrológica”* presentado por el INAB en 2005; mientras que otros –la mayoría– se han enfocado en zonas específicas a nivel local, utilizando la *“cuenca hidrográfica”* como unidad de estudio.

La gran mayoría de estos estudios se han llevado a cabo teniendo como escala de detalle 1:250000, *INAB (2005)*, esto significa que si bien la información generada es de utilidad, únicamente permite llevar a cabo una planificación a nivel nacional o regional, *Rossiter (2004)*; por lo que, si lo que se pretende es facilitar la planificación a nivel municipal es necesario aumentar el detalle de la información cartográfica existente; y el tema de los recursos naturales, su conservación y preservación, es uno de los enfoques a seguir.

Por otro lado, es evidente el crecimiento de la ciudad de Chiquimula, lo cual significará en un futuro cercano el incremento por la demanda de recursos naturales. Para satisfacer la demanda de recursos hídricos, la ciudad de Chiquimula, utiliza como fuentes de suministro al río Tacó, la fuente *“El Abundante”* y varios pozos excavados, ya sean municipales o privados; además de lo que podría suministrar el río Shusho. Estos dos ríos que rodean a la ciudad proporcionan además, aguas arriba, sustento a los 45 centros poblados que comprenden ambas subcuencas, *INE (2002)*.

A partir del año de 1996, la ley forestal de Guatemala declara como prioridad el manejo y la conservación de aquellas áreas que sean consideradas como zonas de recarga hídrica, *Congreso de Guatemala (1996)*. Es por ello que en 2001 el MAGA publicó el primer mapa relacionado con la recarga hídrica, luego en 2005 el INAB con apoyo de la FAUSAC desarrolló y validó una metodología para el mapeo de las zonas de recarga hídrica a nivel nacional, *INAB (2005)*, y a partir de entonces otros estudios se han llevado a cabo en cuencas específicas; pero con la limitante que la mayoría de ellos han conservado un detalle de estudio muy general (1:250000). Esto último, se ha venido dando ya que la información cartográfica, de las variables consideradas, se encuentra en su mayoría a dicha escala. Sin embargo, se insiste en que estudios más detallados son necesarios a fin de lograr definir un manejo apropiado para las zonas de recarga hídrica a niveles municipales, *INAB (2005)*.

Debido a la limitante de la información cartográfica, la mayoría de los estudios a nivel local han adoptado la metodología del INAB, si bien no se pretende criticar dicha metodología, las variables implicadas limitan el detalle del trabajo, ya que se carece de información detallada de las mismas. A continuación se describen algunos de estos estudios, únicamente se incluyen los datos más relevantes de los mismos. En la bibliografía al final de este documento se hace referencia a los reportes completos.

#### **A. Metodología para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural**

Estudio llevado a cabo por la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala –FAUSAC– y el Instituto Nacional de Bosques –INAB–; entre 2003 y 2004. Entre sus propósitos se encuentra la unificación de criterios para la determinación de las áreas de recarga hídrica, además generó varias matrices de decisión para evaluar el potencial de recarga de las áreas naturales.

Las variables consideradas como determinantes fueron: el origen geológico, la tasa de infiltración básica, la recarga anual y la pendiente. Éste se estableció como un método de aplicación muy general.

#### **B. Validación de la metodología para la delimitación de tierras forestales de captación y regulación hídrica y la elaboración del primer vaciado de información de una base de datos de tierras forestales de captación y regulación hídrica**

A cargo del INAB, este proyecto tuvo como resultado la generación del mapa de “Tierras Forestales de Captación y Regulación Hídrica de la República de Guatemala” en el año 2005, con un detalle de 1:250000. Éste se basó en buena parte en el manual de 2004, al cual fueron hechas varias modificaciones, se agregaron las variables: ubicación relativa potencial y el uso del suelo. *Ver Anexo 2.*

#### **C. Estudios Localizados basados en Cuencas Hidrográficas**

Además de los estudios a nivel nacional llevados a cabo por el INAB, también se han desarrollado otros estudios en áreas específicas para identificar las áreas o zonas de recarga hídrica. Entre otros se pueden mencionar:

- Identificación de las Tierras Forestales de Captación y Regulación Hidrológica, de la subcuenca Los Vados, cuenca río Los Esclavos. *INAB (2005).*

- Determinación de las áreas principales de Recarga Hídrica Natural en la microcuenca del río Sibacá, Chinique, Quiché. *Noriega (2005)*.
- Cuantificación de la Recarga Hídrica Natural y Determinación de las principales áreas de Regulación Hidrológica de la subcuenca del río Xequijel, cuenca del río Salamá, departamento de Quetzaltenango. *Ramírez Cardona (2007)*.
- Delimitación de las Tierras Forestales de Captación y Regulación Hidrológica de la microcuenca Pixcayá, San Juan Comalapa, Chimaltenango. *INAB (2007)*.

De estos estudios se derivan conclusiones y recomendaciones relacionadas con la determinación de la recarga hídrica. A continuación se listan únicamente aquellas más relevantes para el presente caso.

- ⊕ Se evidencia la necesidad de conservar y/o restaurar las áreas en las cabeceras de las cuencas, por su importancia en la captación y regulación del ciclo hidrológico, *INAB (2005)*.
- ⊕ Las áreas identificadas de muy alta susceptibilidad de recarga hídrica son las que tienen aptitud preferentemente forestal, las cuales tendrán que sujetarse a un manejo especial ya que son de importancia por los aportes de agua a los acuíferos, por la ubicación de los mismos, *Ramírez Cardona (2007)*.
- ⊕ A escala 1:250,000 queda muy subjetiva la información, es recomendable bajar el detalle a 1:50000, y en áreas más pequeñas (microcuencas), priorizando en las que existen los nacimientos, para obtener apoyo de iniciativas locales en el manejo de las Tierras Forestales de Captación y Regulación Hídrica –TFCRH–, *INAB (2005)*.
- ⊕ Las áreas críticas (*mayor potencial de recarga*) deberán ser objeto de un manejo especial que permita mantener y/o mejorar sus características en cuanto a la cobertura forestal y el manejo del suelo, *Ramírez Cardona (2007)*.
- ⊕ En la iniciativa de un plan de manejo para la microcuenca, las acciones de conservación deben estar orientadas a las Tierras Forestales de alta Captación y Regulación Hídrica, *INAB (2007)*.

- ⊕ Establecer áreas de protección de los manantiales, principalmente los utilizados para consumo humano, *Noriega Arriaga (2005)*.
- ⊕ Aplicar la metodología en subcuencas priorizadas, tanto para la escala 1:250,000 como para 1:50,000, *INAB (2007)*.
- ⊕ Se recomienda una sistematización de la actualización de la base de datos, para que en un tiempo prudencial se pueda contar con la información suficiente para desarrollar un proceso de modelación a nivel nacional y poder proyectar un mapa de delimitación y priorización de TFCRH, *INAB (2007)*.

## 2.2. Justificación

El recurso hídrico de determinada área geográfica toma importancia cuando se enfoca la mirada en la preservación de los recursos hídricos, así mismo, no se puede negar que el agua dulce representa un bien natural de suma importancia para el desarrollo de las poblaciones humanas. Dicha agua puede encontrarse en forma superficial, como en el caso de los ríos y lagos, o en forma subterráneas. Estas fuentes de agua son alimentadas según la hidrología por áreas geográficas conocidos como “zonas de recarga”, las cuales dependiendo de sus características mantienen el suministro de ríos, lagos, acuíferos, etc.

La información disponible sobre los recursos hídricos a nivel nacional es en cierta medida limitada o muy general, como es el caso del Perfil Ambiental de Guatemala publicado en 2006, *IARNA (2006)*, e incluso lo presentado en el Perfil Ambiental del departamento de Chiquimula, *CODEMA (2006)*; por lo que se carece de información *específica* que permita la planificación a futuro del manejo que debería darse a los recursos naturales, y entre ellos a los recursos hídricos.

A nivel local se hacen evidentes varias situaciones relacionadas con el recurso hídrico. Primero, la única información disponible es muy general o no contempla los temas hídricos a fondo, *IARNA y CODEMA (2006)*. Segundo, es evidente la creciente demanda por los recursos hídricos que existe en una ciudad que crece urbanísticamente a un ritmo acelerado, esto hace que aumente la necesidad de contar con fuentes para el suministro de agua para uso domiciliar e industrial; y las fuentes principales de agua que utiliza buena parte del municipio de Chiquimula corresponden a los ríos aledaños como en el caso del río Tacó, o a afluentes que son alimentados por éstos, como los pozos y surgencias aledaños a los ríos San José y Susho.

Por otro lado, el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales –MARN– reporta que el 40 por ciento de la población de la ciudad de Chiquimula se abastece de agua subterránea proveniente

de los mantos freáticos de la ciudad, a través de diferentes pozos municipales y privados, *MARN (2006)*. Lo que significa que el restante 60 por ciento proviene de fuentes superficiales como el río Tacó (con excepción de la fuente “El Abundante”); además, las aldeas que componen las subcuencas hidrográficas de los ríos Tacó y Shusho dependen de las surgencias (o nacimientos de agua) que terminan por formar los cauces principales. Entre dicha comunidades: La Catocha, El Sauce, El Poshte, Tierra Blanca, El Pato, Tacó Arriba, Shusho Arriba, Maraxcó, El Pinalito, Plan del Guineo; por mencionar algunas, *Estrada Muy (1989) e INE (2002)*.

Todo esto viene a realzar la importancia que los ríos Tacó y Shusho tiene tanto para las comunidades que en ella se desarrollan como para la ciudad de Chiquimula, en cuanto a satisfacer las necesidades de agua para diferentes usos. Por lo que, el asegurar el mantenimiento de este recurso representa una tarea que las autoridades, entidades, y en general los ciudadanos del municipio de Chiquimula deberían estar comprometidos a emprender; ya que del nivel de degradación o conservación de las zonas de recarga hídrica, dependerá la disponibilidad de los recursos hídricos. El presente estudio aporta información clave que les permitirá trabajar en la conservación de los recursos hídricos, y enfoca los esfuerzos en determinar las zonas potenciales de recarga hídrica dentro de las subcuena de los ríos Tacó y Shusho, en el municipio de Chiquimula, aplicando una metodología que combina aspectos de las metodologías desarrolladas por el INAB en 2005, *INAB (2005)*, y de la propuesta por *Matus Silva (2007)*. Esta combinación es posible ya que ambas metodologías utilizan matrices de decisión para la ponderación de las variables consideradas y ambas dan como resultado una clasificación cualitativa de las zonas de recarga hídrica en función de su propio potencial de recarga. Lo que genera información cartográfica a un detalle de 1:50000, con el propósito de que en el futuro mediato dicha información pueda contribuir con la planificación municipal en cuanto al manejo de los recursos naturales se refiere, tal como lo recomienda *INAB (2005)*.

La culminación del estudio aporta información descriptiva y cartográfica sobre la ubicación de las zonas que alimentan y sostienen la existencia de los afluentes de los ríos Tacó y Shusho en el municipio de Chiquimula, a fin de dar a conocer la importancia que dichas zonas tienen para mantener el balance hídrico de las subcuencas. Por lo que, se hacen aportes importantes al sector forestal, la planificación y ordenamiento territorial, y la administración territorial municipal.

### **2.3. Definición y delimitación del problema**

Los temas relacionados con el ambiente y los recursos naturales han sido poco tratados a nivel local en las investigaciones, excepto por esfuerzos institucionales de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, el Ministerio de Agricultura, Ganadería y

Alimentación, el Instituto Nacional de Bosques o el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales; pero muchas veces los esfuerzos se limitan a la recopilación de información de otras fuentes y al final se presenta un resumen. Con esto no se pretende criticar el desempeño de dichas instituciones, sino, el sacar a la luz la falta de información nueva relacionada con los recursos naturales en el departamento de Chiquimula. Por otro lado, la información existente suele ser muy general o carente de actualizaciones, lo cual deja claro la existencia de un vacío en cuanto a la generación de nueva información en esta área del conocimiento.

Atendiendo esta situación, y enfocando los esfuerzos en el municipio de Chiquimula, uno de los temas ambientales o de los recursos naturales que cobra importancia es el tema relacionado con el agua, en especial los que se relacionan con los principales ríos que circundan el casco urbano de la cabecera departamental y que son fuente importante de agua para la población en general. Por lo que, el conocimiento de ciertas condiciones y características de temas relacionado con dichos ríos, sus respectivas cuencas hidrográficas y sus principales zonas de recarga, podrán en un futuro permitir enfocar esfuerzos para perpetuar el uso de este recurso, el cual (aunque no existen publicaciones que consideren el problema científicamente) se ha visto mermado debido a la falta de manejo de los recursos naturales. Esto ha hecho que se plantee la cuestión de cómo conservar o mantener este recurso disponible para la creciente población del municipio de Chiquimula, y de cuáles son y en qué lugar las medidas pertinentes deberían ser tomadas. Desde el punto de vista de la Hidrología aquellas áreas que alimentan los afluentes naturales son las zonas de recarga hídrica, pero su localización requiere de un estudio específico para una determinada área geográfica. Mientras que, los estudios desarrollados anteriormente presentan información muy general al respecto; se hace muy difícil aplicar sus resultado a áreas relativamente pequeñas como lo son la subcuencas de los ríos Tacó y Shusho, y más aún para la planificación local, como en el caso de la ciudad de Chiquimula. Todo esto hace evidente que un estudio más localizado y detallado es necesario.

La incertidumbre sobre la ubicación y extensión de las zonas de recarga hídrica a una escala que facilite la planificación local, las cuales contribuyen efectivamente con la captación de agua de lluvia dentro de las subcuencas mencionadas, ha planteado por mucho tiempo la cuestión sobre en dónde deben ser desarrollados los programas de reforestación, así como la extensión que deben tener los mismos y de si el uso actual del suelo en dichas áreas tiene un impacto desfavorable para los procesos naturales. Así mismo, sobre qué áreas deberían recibir un trato especial desde el punto de vista ambiental y dentro de la planificación territorial del municipio; a esto se une la creciente demanda y presión por el recurso hídrico que afrontan las comunidades que integran las subcuencas de los ríos Tacó y Shusho, así como la Ciudad de Chiquimula; recurso especialmente para uso doméstico e industrial.

Además, la generación de este tipo de información se enmarca en el eje de investigación de los "Recursos naturales y sostenibilidad ambiental" y podría tener impactos en las líneas de

investigación de: manejo y uso de recursos hídricos, gobernabilidad de recursos hídricos y ordenamiento territorial; definidos como prioritarios por la carrera de Agronomía del Centro Universitario de Oriente.

El problema relacionado con zonas de recarga hídrica, está limitado en este estudio a las subcuencas hidrográficas que tienen mayor influencia sobre la ciudad de Chiquimula, es decir aquellas que conforman los ríos Tacó y Shusho, además se integró al área de estudio subcuenca del río Sasmó; con lo cual se cubre la mayor parte del casco urbano de la ciudad de Chiquimula. Además, el estudio se enfoca en la producción de información cartográfica semidetallada; específicamente a una escala 1:50,000, y que de acuerdo con *Rossiter (2004)*; este nivel de detalle es suficiente para permitir la planificación a nivel local. Por último, la mayor parte del análisis se realizó en base a los principios establecidos por los Sistemas de Información Geográfica, a la información cartográfica disponible a la escala especificada, y haciendo uso del software ArcGIS 9.1; por lo que los procedimientos metodológicos se establecen considerando que deben respetar principios y limitaciones intrínsecas a las herramientas informáticas disponibles y ser compatibles entre ellos, además de permitir obtener la información necesaria para identificar las zonas de recarga hídrica.

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1. Cuenca hidrográfica

Es el espacio de territorio delimitado por la línea divisoria de las aguas, conformado por un sistema hídrico que conducen sus aguas a un río principal, a un río muy grande, a un lago o a un mar. Este es un ámbito tridimensional que integra las interacciones entre la cobertura sobre el terreno, las profundidades del suelo y el entorno de la línea divisoria de las aguas.

En la cuenca hidrográfica se encuentran los recursos naturales, la infraestructura que el hombre ha creado, allí el hombre desarrolla sus actividades económicas y sociales generando diferentes efectos favorables y no favorables para el bienestar humano. No existe ningún punto de la tierra que no pertenezca a una cuenca hidrográfica, *Matus Silva (2007)*.

Desde el punto de vista del manejo de cuencas en Guatemala, una cuenca hidrográfica es la superficie topográfica delimitada por un parte aguas, que es drenada por una corriente principal y sus afluentes, de tal manera que toda la escorrentía proveniente de la precipitación y fuentes de agua presentes en su interior, deben formar parte de la red de drenaje que fluye hasta el punto de desembocadura en el mar, golfo o lago principal. En ella existen ecosistemas naturales y artificiales con componentes físicos, bióticos y socioeconómicos, que interactúan para formar un sistema, el cual puede ser aprovechado en forma sostenible para el desarrollo de la población humana. (Curso de Cuencas, CUNORI, 2006).

#### **Clasificación de cuencas hidrográficas**

Dentro del plano profesional de aquellos que se dedican a trabajar en temas relacionados con el manejo de cuencas, se maneja un tecnicismo en cuanto a la clasificación de cuencas hidrográficas en el plano nacional. Dicha clasificación se hace en función de su tamaño –la extensión territorial que ocupa– o a disposiciones a nivel nacional. Ésta comprende:

**Cuenca:** aunque su extensión es variable, se refiere a la división adoptada por el INSIVUMEH para la República de Guatemala y su delimitación se basa en el punto de aforo considerado según el caso. Éstos pueden ser: el océano Pacífico, el Atlántico, un lago o la frontera nacional. De esta forma Guatemala cuenta con 38 cuencas hidrográficas.

**Sub-cuenca:** se considera como subcuenca a aquella área que siendo parte de una cuenca no llega a abarcar toda la extensión de esta última y el área que ocupa es superior a 40 Km<sup>2</sup>. Para éstas no existe una delimitación considerada como oficial, en el caso de Guatemala.

**Microcuenca:** comprende una cuenca cuya extensión territorial tiene como límite superior 40 Km<sup>2</sup>. Este término es utilizado para indicar que determinado estudio se realiza para un área muy específica y pequeña.

### 3.2. Recarga hídrica

Para *INAB (2005)* citado por *Matus (2007)* recarga es el nombre que se le da al proceso que permite que el agua alimente un acuífero. Este proceso ocurre de manera natural cuando la lluvia se filtra hacia un acuífero a través del suelo o roca.

La recarga es el proceso de incorporación de agua a un acuífero producido a partir de diversas fuentes: la precipitación, las aguas superficiales y por transferencias de otro acuífero. Los métodos para estimarla son de variada naturaleza entre los que se destacan los balances hidrológicos, el seguimiento de trazadores ambientales o artificiales (químicos e isotópicos), las mediciones directas en piezómetros, la cuantificación del flujo subterráneo y las fórmulas empíricas entre los más comunes. Los resultados son inseguros debido a la incertidumbre de los componentes considerados en las ecuaciones, la naturaleza empírica o semiempírica de las fórmulas utilizadas, la simplificación de las variables y de los procesos y errores en las mediciones de calibración, *Matus Silva (2007)*.

En términos generales se denomina *recarga al proceso por el cual se incorpora a un acuífero agua procedente del exterior del contorno que lo limita*. Son varias las procedencias de esa recarga, desde la infiltración de la lluvia (la más importante en general) y de las aguas superficiales (importantes en climas poco lluviosos), hasta la transferencia de agua desde otro acuífero, si los mismos son externos al acuífero o sistema acuífero en consideración.

#### 3.2.1. Zonas de recarga hídrica

El área o zona donde ocurre la recarga se llama **zona de recarga hídrica**. Los acuíferos se recargan principalmente a través de la precipitación en “suelos de alta capacidad de infiltración” o rocas superficialmente permeables. Las áreas de recarga de los acuíferos pueden o no estar a grandes distancias de donde son explotados, *Matus Silva (2007)*.

Así mismo, también tenemos que la infiltración es mayor cuando en la zona de recarga o entrada se da además de la precipitación local, el escurrimiento superficial de alguna área tributaria. Esto sucede principalmente en pendientes aluviales que

reciben aguas superficiales provenientes de áreas montañosas con fuerte precipitación, *INAB (2003)*.

Las áreas de mayor recarga son las que más nos interesa conservar, tanto en sus características físicas de permeabilidad que afectan la magnitud de la recarga, como en actividades que produzcan contaminación que fácilmente se pueda infiltrar al acuífero afectando la calidad de sus aguas. Debido a que gran parte de la precipitación es de origen orogénico, las montañas y zonas altas, principalmente si su suelo y subsuelo son permeables y debido a su mayor constancia de precipitación, son por lo general áreas de recarga importantes, *Matus Silva (2007)*.

### 3.2.2. Clasificación de zonas de recarga hídrica

De acuerdo con el movimiento del agua en el suelo, subsuelo y manto rocoso, las zonas de recarga hídrica se pueden clasificar en:

- a) **Zonas de recarga hídrica superficial:** prácticamente es toda la cuenca hidrográfica, excluyendo las zonas totalmente impermeables, esta es la que se humedece después de cada lluvia, originando escorrentía superficial, según las condiciones de drenaje (relieve del suelo y su saturación). La medición de este caudal se realiza en el cauce principal del río y se conoce como descarga superficial o caudal de escorrentía superficial.
- b) **Zonas de recarga hídrica subsuperficial:** es la que corresponde a las zonas de la cuenca con suelos con capacidad de retención de agua o almacenamiento superficial sobre una capa impermeable que permite que el flujo horizontal en el subsuelo se concentre aguas abajo en el sistema de drenaje. Es la ocurrencia de caudales en la red hídrica, aun cuando las lluvias hayan finalizado, también dependen de la cantidad de precipitación y el efecto “esponja” del suelo (libera lentamente el agua en su movimiento horizontal). Este caudal se mide igual que en el caso anterior y puede ocurrir después de las lluvias y en épocas secas, cuando el agua proveniente es posiblemente de los bosques.
- c) **Zonas de recarga hídrica subterránea<sup>1</sup>:** es la que corresponde a las zonas de la cuenca (sitios planos o cóncavos, y rocas permeables) en el cual el flujo vertical de la infiltración es significativo, ésta es la que forma o alimenta los acuíferos. Un aspecto importante en esta zonificación es la conexión entre acuíferos y la recarga externa (que viene de otra cuenca).

- d) **Zonas de recarga hídrica subterránea**<sup>2</sup>: es la que corresponde a zonas de la cuenca que presentan fallas geológicas profundas o cuando en el balance hidrogeológico se identifica una pérdida por percolación profunda. Generalmente coincide con las zonas de recarga subterránea<sup>1</sup>.

### 3.3. Balance hídrico

La evaluación de los recursos hídricos requiere una correcta estimación del balance hidrológico o de la repartición de la precipitación entre evapotranspiración, escorrentía y recarga de los acuíferos.

La ecuación de continuidad, o de balance hidrológico, es la ley más importante en Hidrología, y aunque su expresión es muy simple, la cuantificación de sus términos es normalmente complicada, principalmente por la falta de medidas directas y por la variación espacial de la evapotranspiración, de las pérdidas profundas (a acuíferos) y de las variaciones del agua almacenada en una cuenca. En respuesta a estas dificultades, generalmente se admiten dos suposiciones, la primera supone que **las pérdidas profundas son despreciables** (se considera, por tanto, que la cuenca es impermeable), y la segunda admite que **las variaciones del agua almacenada en la cuenca son despreciables** para un período suficientemente largo (normalmente un año).

El balance hídrico es una representación teórica de los intercambios de agua entre las plantas, el suelo y la atmósfera, este nos permite cuantificar los recursos hídricos a diferente escala como parcela, finca, cuenca, región y las modificaciones del mismo por influencia de las técnicas de manejo de la agricultura y de las actividades del hombre en general.

La ecuación general para la determinación del balance hídrico superficial directo, es la siguiente **(20)**:

$$\text{Balance hídrico} = \text{Total de Entradas} - \text{Total de Salidas}$$

En dónde, la principal entrada de agua en una cuenca hidrográfica es la precipitación, y las salidas están dadas por la escorrentía y el drenaje natural de los afluentes de la cuenca, junto con la evapotranspiración potencial y real del área en cuestión. Los parámetros de Evapotranspiración pueden ser calculados por medio de la fórmula de Thornthwaite, la cual considera los cálculos en forma mensual, *Remenieras (1974)*.

### 3.4. Factores que afectan la recarga hídrica

La recarga hídrica depende del régimen de precipitación, de la escorrentía superficial, y del caudal de los ríos; así mismo, varía de acuerdo a la permeabilidad de los suelos, de su contenido de humedad, de la duración e intensidad de la lluvia y del patrón de drenaje de la cuenca. También la pendiente de la superficie constituye un factor importante, puesto que las muy inclinadas favorecen la escorrentía superficial y, si son menos fuertes, retienen por más tiempo el agua favoreciendo la infiltración, *INAB (2003)*.

Los acuíferos recargan en cualquier área en que: a) exista suelo o roca permeable en la superficie, b) que esté en comunicación hidráulica con los acuíferos, y c) que esté temporalmente en contacto con agua. Todos estos factores que definen la recarga, ocurren en diferentes grados relativos, en las capas que sobre yacen a los acuíferos. Para conocer y delimitar las principales zonas de recarga de un acuífero y su mecánica de funcionamiento, se necesitan muy variados y específicos estudios hidrogeológicos.

Según INAB los factores que afectan la recarga hídrica son:

- **El clima**, dentro de estos los factores que afectan la recarga hídrica son: la evapotranspiración, debido a las pérdidas de agua por la transpiración de las plantas y la evaporación del agua y la precipitación pluvial.
- **El suelo**, debido a que suelos impermeables o compactos impiden o dificultan la infiltración o recarga hídrica, mientras que suelos permeables facilitan la recarga en los acuíferos. Las características del suelo que influyen en la recarga son, la textura, la densidad aparente, grado de saturación del suelo (contenido de humedad) y la capacidad de infiltración.
- **Topografía**, esta influye debido al tiempo de contacto que permite entre el agua con la superficie, pendientes fuertes favorecen la escorrentía superficial, disminuyen el tiempo de contacto del agua con la superficie y reducen la infiltración del agua o recarga de los acuíferos.
- **Estratigrafía geológica**, es muy importante estudiar la estratigrafía de la zona, es decir conocer la disposición de los diferentes materiales geológicos en los distintos estratos o capas del suelo hasta llegar a la zona saturada (agua subterránea), ya que estos pueden afectar grandemente la cantidad de recarga hídrica.

- **Cobertura vegetal**, ésta disminuye la escorrentía superficial, permitiendo mayor contacto del agua con la superficie y facilitando el proceso de infiltración del agua, por otro lado gran parte de la lluvia que cae es depositada en la cobertura vegetal como intersección; en este factor es necesario considerar la profundidad radicular y la capacidad de retención vegetal.
- **Escurrimiento**, el agua que cae proveniente de las precipitaciones forma flujos superficiales, subsuperficiales y subterráneos los cuales son captados por los cauces de los ríos.

### 3.4.1. Clima

El clima juega un papel muy importante en la recarga hídrica de una cuenca, en especial porque de las condiciones climáticas locales dependen las entradas (precipitación) y salidas (evaporación y evapotranspiración) que regulan el ciclo hidrológico. Si estas condiciones varían marcadamente a lo largo de la extensión territorial de una cuenca, esto da lugar a que determinadas zonas de la cuenca contribuyan en mayor o menor medida con la recarga hídrica.

#### a) Precipitación

La precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre, y sus mediciones y análisis forman el punto de partida de la mayor parte de los estudios concernientes al uso y control del agua.

La precipitación es la cantidad de agua meteórica total, líquida o sólida, que cae sobre una superficie horizontal determinada, llamada sección pluviométrica. En general, es la superficie colectora del pluviómetro. Las precipitaciones agrupan todas las aguas meteóricas recogidas en una cuenca vertiente o una zona determinada. Se presenta en forma líquida (lluvia, niebla, rocío) o sólida (nieve, granizo, escarcha), *Kohler Paulus (1986)*.

Según Villón citado por Matus (2007), las precipitaciones se clasifican en relación al factor que provoca la elevación del aire en la atmósfera en:

**Precipitación convectiva.** En tiempo caluroso, se produce una abundante evaporación a partir de la superficie del agua, formando grandes masas de vapor de

agua, que por estar más calientes, se elevan sufriendo un enfriamiento de acuerdo a la adiabática seca o húmeda.

Generalmente viene acompañada de rayos y truenos, propias de las regiones tropicales, donde las mañanas son muy calurosas, el viento es calmo y hay una predominancia de movimiento vertical del aire.

**Precipitación orográfica.** Se producen cuando el vapor de agua que se forma sobre la superficie de agua es empujada por el viento hacia las montañas, aquí las nubes siguen por las laderas de las montañas, y ascienden a grandes alturas, hasta encontrar condiciones para la condensación y la consiguiente precipitación.

**Precipitación ciclónica.** Se producen cuando hay un encuentro de dos masas de aire, con diferente temperatura y humedad, las nubes más calientes son violentamente impulsadas a las partes más altas, donde pueden producirse la condensación y la precipitación. Están asociadas con el paso de ciclones o zonas de baja presión.

## b) Evapotranspiración

El término evapotranspiración fue introducido por Thornthwaite, y este define a la *evapotranspiración potencial* como “la pérdida de agua que ocurriría si en ningún momento existiera un deficiencia de agua en el suelo para el uso de la vegetación”. Por tanto, se ha encontrado que la evapotranspiración depende de la densidad de cobertura del suelo y de su estado de desarrollo. *Kohler Paulus (1986)*.

El empleo del término evapotranspiración implica la consideración conjunta de dos procesos diferentes: la evaporación y la transpiración:

La *evaporación* es el fenómeno físico en el que el agua pasa de líquido a vapor, y se produce desde: a) la superficie del suelo y la vegetación inmediatamente después de la precipitación; b) las superficies de agua (río, lago, embalse); c) el suelo, agua infiltrada que se evapora desde la parte más superficial de suelo, a partir de agua recién infiltrada o en áreas de descarga.

La *transpiración* es el fenómeno biológico por el que las plantas pierden agua a la atmósfera, y ésta está íntimamente relacionada con las especies de plantas que cubren la superficie del suelo, así como por el área foliar de las mismas.

La Evapotranspiración según Thornthwaite se calcula en base a las siguientes fórmulas, *Remenieras (1974)*:

$$ETP = ETP_{\text{sin corr.}} \cdot \frac{N}{12} \times \frac{d}{30}$$

$$ETP_{\text{sin corr.}} = 16 \left( \frac{10 \cdot t}{I} \right)$$

$$I = \sum i$$

$$i = \left( \frac{t}{5} \right)^{1.514}$$

Donde:

*ETP* = evapotranspiración potencial

*i* = índice de calor mensual

*t* = temperatura media mensual °C

*I* = índice de calor anual (12 meses)

*ETP sin corr.* = *ETP sin corregir mensual* –mm/mes–

*N* = número máximo de horas de sol

*d* = número de días del mes

### 3.4.2. Tipo de suelo

Cuando se habla de recarga hídrica el suelo representa una parte fundamental, ya que es en éste en donde el agua proveniente de las precipitaciones es capturada y luego redirigida a los acuíferos que componen el sistema hidrológico de las cuencas. Aunque las características del suelo que intervienen en el proceso de recarga son muchas, tales como la porosidad, estructura, cantidad de arcillas, presencia de capas impermeables, entre otras; dos propiedades se destacan entre las demás por ser de fácil determinación en campo y aportar datos significativo en cuanto a la capacidad de recarga hídrica; éstos son la textura y la capacidad de infiltración del suelo.

#### a) Textura del suelo

Está determinada por la conformación granulométrica o composición mecánica del suelo e indica la proporción que existe entre las diferentes fracciones granulométricas como arena (2 – 0.05 mm), limo (0.05 - 0.002 mm) y arcilla (< 0.002mm). Para determinar la clase textural de los suelos, se realizan análisis mecánicos de laboratorio y los resultados se interpretan a través del triángulo de la textura. *Figura 1.*

La textura del suelo es una de las características básicas del suelo y tiene influencia sobre otras propiedades como las relaciones hídricas, la fuerza o succión con que es retenida el agua por los coloides o arcillas del suelo y el rango de disponibilidad de agua (en porcentaje) para las plantas. Determina parcialmente el grado de aireación

del suelo, ya que dependiendo del tipo de textura predominan los macroporos (rango 60 – 100  $\mu$ ) o los microporos (menores de 60  $\mu$ ); y el aire se desplaza más fácilmente en los macroporos.

La infiltración o velocidad con que el agua penetra en la superficie del suelo, es siempre mayor en suelos de textura gruesa (arenosa, franco arenosa, arenosa franca) que en suelos de textura fina o pesados, como los arcillosos.

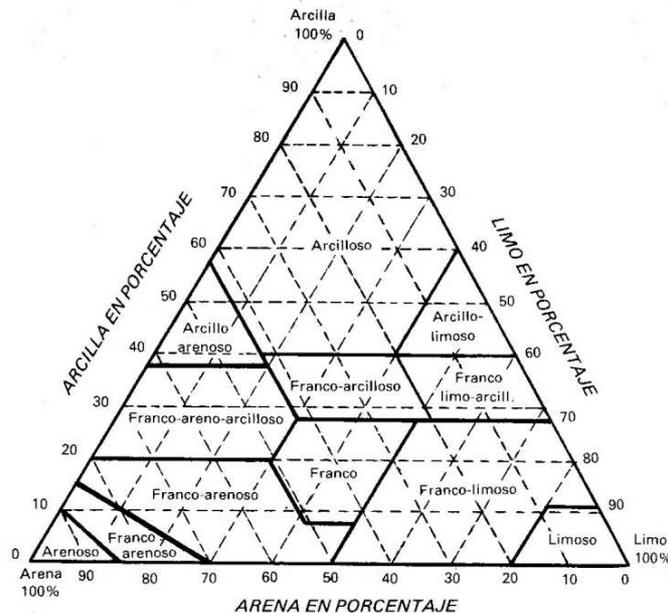


Figura 1. Triángulo textural para la determinación de la textura de los suelos, en base al porcentaje de sus partículas primarias. FUENTE: Milford, M.H., 1997. Soils and Soils Science: Laboratory excercises. 4<sup>th</sup> Edition. USA.

## b) Capacidad de infiltración

La capacidad de infiltración del suelo viene dada en términos numéricos por su velocidad de infiltración, es decir la entrada vertical de agua a través de los poros por unidad de tiempo.

Entre los métodos para la determinación de la velocidad de infiltración de un suelo se encuentran; El método de Doble Cilindro, y el método Porchet o de Cilindro Invertido. FAUSAC (2005).

### 3.4.3. Relieve

El relieve es la configuración física de la superficie de la tierra, incluyendo las irregularidades (elevaciones y depresiones de la tierra) al considerarlas en conjunto.

El relieve es consecuencia de los procesos geológicos y de la meteorización actuando sobre los materiales geológicos, y es considerado como factor formador del suelo. Una de las varias características del relieve es la pendiente, que modifica las condiciones del suelo como son el drenaje, la infiltración, la profundidad, la susceptibilidad a la erosión, el cúmulo de materiales, etc., afectando por lo tanto el desarrollo y la evolución del perfil en el tiempo, su grado de utilidad agrícola y su clasificación. *MAGA (2001)*.

#### **3.4.4. Pendiente**

La pendiente se refiere a la relación entre el cambio en distancia horizontal de dos puntos en el terreno y su respectivo cambio en distancia vertical, de manera que esto determina el grado de inclinación de la superficie del terreno.

Para que la recarga hídrica se lleve a cabo el agua proveniente de la precipitación debe permanecer el mayor tiempo posible sobre la superficie del suelo a efecto de que ésta se infiltre y pueda ser almacenada temporalmente o no dentro del mismo. De este modo existe una relación inversamente proporcional entre el grado de inclinación del suelo (pendiente) y la capacidad de recarga que pueda tener un suelo. Debido a que existe variación en el grado de pendiente en la extensión que ocupa una cuenca hidrográfica, así mismo variarán las zonas que poseerán una mayor recarga.

#### **3.4.5. Geología**

La geología es la ciencia que estudia la tierra, su composición, su estructura, los fenómenos de toda índole que en ella tienen lugar, y su pasado, mediante los documentos que de él han quedado en las rocas.

Según *Escobar* citado por *Matus (2007)*, la geología es la ciencia que estudia el planeta Tierra en su conjunto, describe los materiales que la forman para averiguar su historia y su evolución e intenta comprender la causa de los fenómenos endógenos y exógenos. La unidad de tiempo en geología es el millón de años.

##### **a) Tipo de rocas**

Las rocas son agregados naturales que están formadas por minerales que en su estado sólido presentan un patrón atómico y/o molecular ordenado y

tridimensional. Los minerales son sustancias inorgánicas con características definidas de color, brillo, dureza, estructura cristalina, composición química, simetría espacial, relación tridimensional de ejes, etc.

En ciclo de las rocas (*Figura 2*): el magma se transforma en rocas ígneas y de éstas pueden generarse sedimentos, rocas sedimentarias o rocas metamórficas. Las rocas ígneas y sedimentarias dan origen a las rocas metamórficas y éstas al magma.

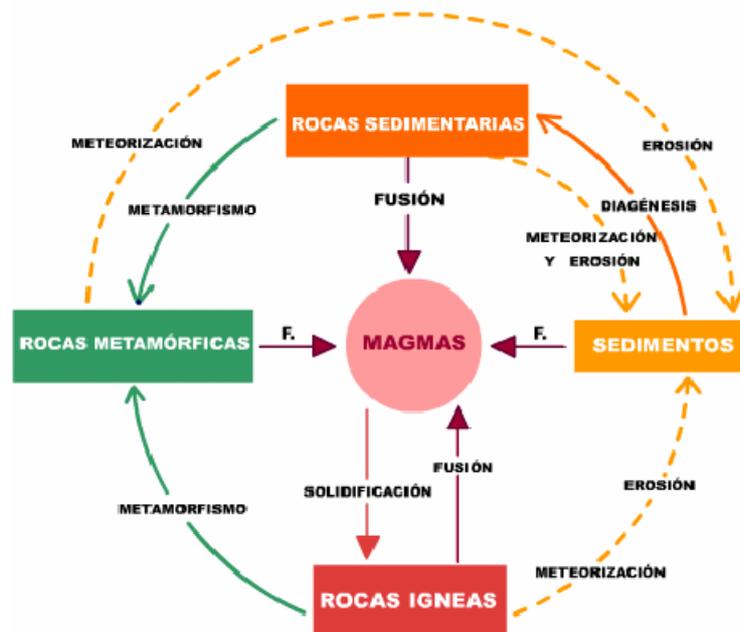


Figura 2. Ciclo geológico de las rocas.

En general las rocas por su origen se clasifican en: ígneas, metamórficas y sedimentarias.

**Rocas ígneas:** son el fruto de la solidificación del magma, fragmentado o compacto, sobre o en el interior de la corteza terrestre. Las temperaturas de cristalización oscilan así: para los magmas riolíticos 1000 °C, para los andesíticos 1150 °C y para los basálticos 1250 °C. La composición mineralógica promedio de las rocas ígneas es: 59% feldespatos, 12% cuarzo, 17% anfíboles y piroxenos, 4% micas y 8% otros minerales (Escobar citado por Matus, 2007).

Según Núñez (1981), las rocas ígneas pueden ser **volcánicas (efusivas)**, cuando han salido al medio exterior y endurecen como el basalto, la ceniza volcánica, el lapilli.

**Plutónicas (intrusivas):** se forman por enfriamiento lento, por esta razón forman cristales (minerales) de granos gruesos o texturas más gruesas. **Hipoabisales:** son las

que se forman por enfriamiento rápido, son rocas que cristalizan cerca de la superficie. A causa de este enfriamiento rápido, presentan cristales más finos.

**Rocas sedimentarias:** se originan a partir de la erosión, remoción y deposición (producto disuelto e hidrolizado) de fragmentos de rocas ígneas y metamórficas, a través de procesos diagenéticos. Geológicamente, esto significa que ocurre transformación de los materiales depositados, lo cual produce rocas sedimentarias de características definidas que se consolidan y se compactan por desecamiento, presión y/o por cementación de sustancias en el medio. Estas rocas se han formado por la consolidación o litificación de sedimentos. Los factores que determinan el tipo de roca son fundamentalmente la fuente de los sedimentos, el agente que los erosiona y transporta, y el medio de deposición y forma de litificación.

**Rocas metamórficas:** se originan a partir de rocas ígneas y rocas sedimentarias preexistentes, como consecuencia de altas presiones (termomorfismo) y altas temperaturas (dinamorfismo). Esos cambios dan el estado sólido como consecuencia de intensos cambios de presión, temperatura y ambiente químico; los cambios están asociados a las fuerzas que pliegan, fallan capas, inyectan magma y elevan o deprimen masas de roca. Se restringe el metamorfismo a cambios de textura y composición de la roca porque existe recristalización (aumento de tamaño de granos minerales), metasomatismo (cambio de un mineral en otro) y neocrystalización (formación de nuevos minerales). *Matus Silva (2007)*.

## b) Porosidad de la rocas

La porosidad de las rocas, es la porción del volumen total de una roca no ocupada por material mineral sólido, donde estos espacios pueden ser ocupados por agua y/o aire. Dichos espacios se conocen como poros o intersticios. Los intersticios se caracterizan por su tamaño, forma, irregularidad y distribución. Los intersticios pueden ser primarios, son los que se forman con la roca y secundarios, que se desarrollan después de la formación de la roca (fracturas, grietas de disolución, etc.).

La permeabilidad de las rocas depende directamente de su porosidad, es decir, de los espacios huecos que puedan existir entre los elementos que la integran, y que de estos huecos estén comunicados entre sí. Son rocas muy permeables, las arenas, las gravas y las calizas fisuradas; algo menos permeables los aluviones, en los que la arena y grava están mezcladas con arcillas, y las areniscas, según su grado de cementación. Son rocas impermeables, las arcillas, las margas, las pizarras y las rocas eruptivas cuando no están fracturadas. *Matus Silva (2007)*.

#### **3.4.6. Cobertura vegetal y uso de la tierra**

Según MAGA 2006, la cobertura vegetal concierne a la vegetación natural que proporciona una cobertura al suelo y que puede o no estar utilizada por el hombre (pastos, bosques y humedales), y el uso de la tierra concierne al hombre y el uso que éste le está dando al suelo para su provecho, principalmente la agricultura.

También es importante considerar que el uso del suelo es dinámico y que un mapa sobre este tema representa un período establecido de tiempo (determinado por la fecha de toma del producto del sensor remoto utilizado y la comprobación de campo). Por lo tanto el mapa en sí, constituye una imagen tridimensional que representa: a) el cultivo y/o cobertura natural, b) la superficie que ocupa y c) el tiempo.

El uso de la tierra puede definirse como cualquier aplicación humana del recurso tierra. El manejo del uso de la tierra es básicamente un asunto de gobierno e incluye la administración, definición y hasta cierto punto el establecimiento de determinados usos dentro de ciertos límites de la tierra. Esto incluye dar licencias para usar la tierra de cierta manera y tal vez cierto tiempo, y puede incluir en alguna forma el control sobre la aplicación de las políticas de uso de la tierra dentro de un contexto legal.

La necesidad del manejo de la tierra se explica mediante dos factores: la apremiante escasez del recurso tierra per cápita y los efectos negativos de los usos de la tierra más allá de un potencial sostenible fuera de su propio ambiente en tiempo y espacio.

#### **3.5. Recarga hídrica y actividad antrópica en la cuenca**

El mal manejo de los recursos naturales, consecuencia del desarrollo, el crecimiento demográfico, urbanístico, industrial y la expansión de las fronteras agropecuarias conducen a los efectos e implicaciones en los acuíferos, presentados en el *Cuadro 1*.

Las zonas de recarga hídrica son una parte importante del sistema hidrológico de una cuenca hidrográfica, por lo que cualquier fenómeno que altere el estado de dichas zonas provocará un efecto que se verá reflejado en los acuíferos que integran la cuenca, tales como surgencias (nacimientos), quebradas, ríos y lagos; de igual manera si ocurre en las áreas circundantes, los cuales pueden representar tanto beneficios como perjuicios.

**Cuadro 1. Efecto de la actividad antrópica sobre los acuíferos.**

ACTIVIDADES	IMPLICACIONES EN EL ACUÍFERO
Mayor explotación de las aguas subterráneas.	Descenso de niveles de agua. Mejoramientos del drenaje en tierras bajas (control de inundaciones). Aumento de costos de bombeo. Intrusión de aguas salinas en zonas costeras (degradación). Disminución de descargas naturales (manantiales, flujos base).
Impermeabilización de los suelos (zonas de recarga). Deforestación (compactación de los suelos por lluvia y erosión por mayor escorrentía superficial). Construcciones (urbanizaciones, carreteras).	Menor recarga (menor potencial de los acuíferos, aumento de la escorrentía superficial y erosión en zonas de recarga).
Intensificación de actividades humanas.	Contaminación de agua y suelo.

Fuente: Matus Silva, 2007.

### 3.6. Metodología participativa para la determinación de zonas de recarga hídrica

Este apartado hace referencia a la metodología utilizada para el desarrollo de la fórmula (ecuación) para la determinación del potencial de recarga que se menciona más adelante y que fue propuesta por Matus Silva como una forma práctica, de fácil comprensión y aplicación por los habitantes de las áreas rurales. La investigación lleva por título *“Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa, Nicaragua”*.

En resumen, la metodología aplicada para la formulación de la ecuación comprendió tres fases: 1.- Elaboración de una propuesta metodológica para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica; 2.- Aplicación y validación de la metodología. 3.- Proponer estrategias y acciones para el manejo de zonas de recarga hídrica.

En la primera fase se identificaron las características que de acuerdo a la literatura consultada y a la experiencia de varios expertos, son determinantes en la identificación de zonas de recarga hídrica. Seguidamente se desarrolló una serie de talleres participativos considerando tres grupos de usuarios distintos: el primer grupo conformado por expertos en el manejo de cuencas, bosques, suelos y geología; el segundo conformado por extensionistas con experiencia en el área en que se llevó a

cabo el estudio; el tercero conformado por miembros de las comunidades pertenecientes a la cuenca en estudio.

A cada uno de los grupos de usuarios se les pidió que ponderaran numéricamente, según su peso relativo, cada una de las cinco variables implicadas: pendiente, tipo de suelo, tipo de roca, cobertura vegetal permanente, y uso del suelo. Se hicieron dos ponderaciones, una en base a la clasificación (nivel de importancia) y otra en base a un rateo (calificación de 0 a 100 de cada variable según su importancia como factor determinante de la recarga hídrica).

Con los resultados obtenidos de la ponderación, se calculó el peso relativo final para las variables en cuestión, los cálculos hechos se resumen en los *Cuadros 2, 3, y 4*.

**Cuadro 2. Método de clasificación por importancia para determinar el peso relativo de cada variable. Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas.**

VARIABLE	EXTENSIONISTAS										SUMATORIA	PESO PROMEDIO
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Pendiente y microrelieve	3	5	5	5	4	3	1	4	5	3	38	25.33
Tipo de suelo	5	4	4	4	2	4	4	2	3	4	36	24.00
Tipo de roca	1	1	2	2	5	1	2	1	2	1	18	12.00
Cobertura vegetal	4	2	3	3	1	5	5	5	4	5	37	24.67
Uso del suelo	2	3	1	1	3	2	3	3	1	2	21	14.00
<b>TOTAL</b>	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	<b>150</b>	<b>100.00</b>

FUENTE: Matus Silva, 2007.

**Cuadro 3. Método de rateo para determinar el peso relativo de cada variable. Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas.**

VARIABLE	EXTENSIONISTAS										SUMATORIA	PESO PROMEDIO
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Pendiente y microrelieve	20	50	40	50	10	10	15	20	50	15	280	28.00
Tipo de suelo	40	20	20	15	30	40	20	10	10	20	225	22.50
Tipo de roca	5	5	15	10	20	10	15	15	10	15	120	12.00
Cobertura vegetal	30	10	15	15	30	30	30	40	20	30	250	25.00
Uso del suelo	5	15	10	10	10	10	20	15	10	20	125	12.50
<b>TOTAL</b>	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	<b>1000</b>	<b>100.00</b>

FUENTE: Matus Silva, 2007.

**Cuadro 4. Peso relativo promedio final para cada variable. Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas.**

VARIABLE	Peso promedio clasificación	Peso promedio rateo	Peso promedio final
Pendiente y microrelieve	25.33	28.00	<b>27</b>
Tipo de suelo	24.00	22.50	<b>23</b>
Tipo de roca	12.00	12.00	<b>12</b>
Cobertura vegetal	24.67	25.00	<b>25</b>
Uso del suelo	14.00	12.50	<b>13</b>

FUENTE: Matus Silva, 2007.

El “*peso promedio final*” fue incluido en la ecuación de potencial de recarga hídrica (**ZR**) como coeficiente para cada una de las variable. Quedando la fórmula de la siguiente manera:

$$ZR = 0.27(\text{Pendiente}) \pm 0.23(\text{Tipo de Suelo}) \pm 0.12(\text{Tipo de Roca}) \pm 0.25(\text{Cobertura Vegetal}) \pm 0.13(\text{Uso del suelo})$$

## 4. MARCO REFERENCIAL

### 4.1. Ubicación del área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en el municipio y departamento de Chiquimula, abarca una extensión de 117.50 Km<sup>2</sup>, lo que corresponde a aproximadamente el 33% de la superficie que ocupa el municipio de Chiquimula.

El área se encuentra localizada dentro del cuadrante definido por las coordenadas: 587771 y 606029 en "X"; y, 1632060 y 1643454 en "Y" (Sistema Coordinado GTM, Zona 15.5, Datum WGS84). Dicho cuadrante incluye además a la ciudad de Chiquimula, cabecera departamental de Chiquimula.

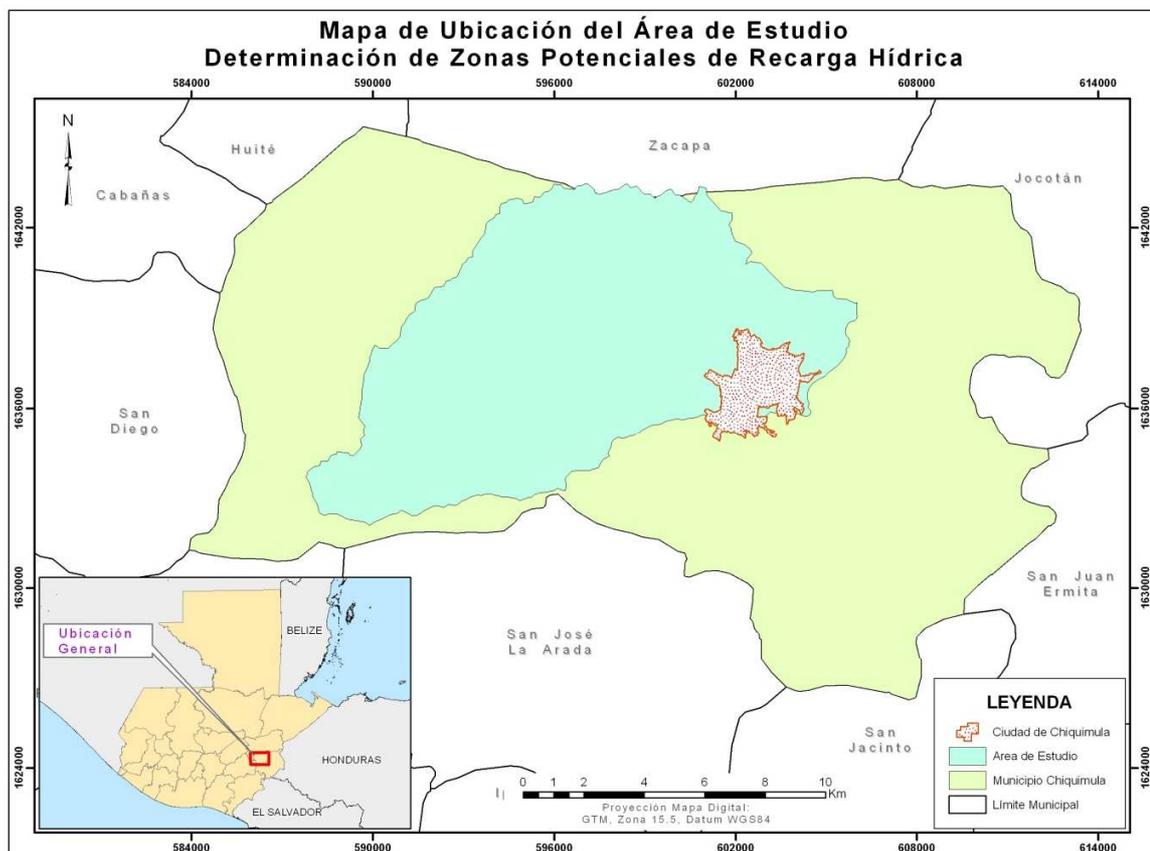


Figura 3. Mapa de ubicación del área de estudio. Ubicación nacional y local en el municipio de Chiquimula. Fuente Instituto Geográfico Nacional –IGN– Guatemala.

### 4.2. Descripción del área de estudio

El área para el estudio comprende las subcuencas de los ríos Tacó (26.32 Km<sup>2</sup>) y Shusho (78.21 Km<sup>2</sup>) del municipio y departamento de Chiquimula, además de un área

complementaria –que incluye al área drenada por el río Sasmó– (12.97 Km<sup>2</sup>), esta última fue añadida para incluir la mayor parte de la ciudad de Chiquimula y para obtener un área de forma más regular.

Esto da como resultado un área total para el estudio de 117.5 Km<sup>2</sup>, la cual está integrada tal y como se muestra en la *Figura 4*.

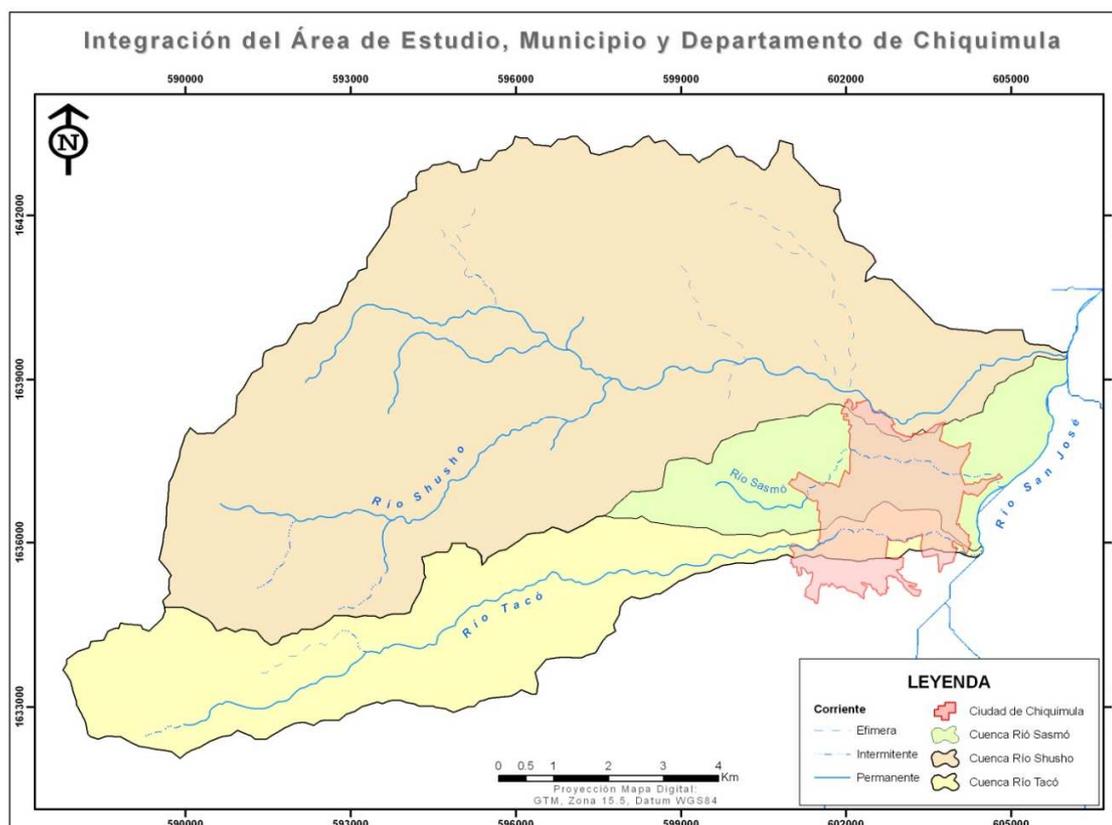


Figura 4. Mapa que muestra la forma en la que está integrada el área de estudio, para la determinación de las zonas potenciales de recarga hídrica. Fuente: IGN-Guatemala.

### 4.3. Características biofísicas del área de estudio

#### 4.3.1. Zonas de vida

El área de estudio comprende dos zonas de vida, según el mapa de Zonas de Vida elaborado por el MAGA; el Bosque Seco Subtropical –sb-S– y el Bosque Húmedo Subtropical (templado) –bh-S(t)–. Como es muy común en el territorio guatemalteco esto ocasiona que las condiciones climáticas y los ecosistemas que se desarrollan en un área, cambien drásticamente en una extensión relativamente pequeña de terreno. El 11.40% pertenece al Bosque Seco Subtropical, el cual ocupa la parte baja

de las subcuencas. Según De La Cruz, 1982; ésta se caracteriza por una precipitación entre 500 y 1000 mm/año; la biotemperatura varía entre los 19 y 24 °C. Además la relación de evapotranspiración potencial es de alrededor de 1.5.

Entre las especies vegetales indicadoras de esta zona de vida se encuentran:

**Cuadro 5. Especies vegetales indicadoras del bosque seco subtropical**

NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE COMÚN
<i>Cochlospermum vitifolium</i>	Pochote
<i>Swietenia humulis</i>	Caoba del pacífico
<i>Alvaradoa amorphoides</i>	Cola de ardilla
<i>Sabal mexicana</i>	Botán
<i>Phyllocarpus septentrionalis</i>	Guacamayo
<i>Ciba aescutifolia</i>	Ceibillo
<i>Albizzia caribea</i>	Conacaste blanco
<i>Rhizophora mangle</i>	Mangle colorado
<i>Avicennia nitida</i>	Mangle blanco
<i>Leucaena guatemalensis</i>	Yaje

Fuente: De La Cruz, 1982.

El restante 88.60% corresponde al Bosque Húmedo Subtropical (templado), el cual presenta una precipitación de entre los 1100 y los 1349 mm/año. La biotemperatura media anual varía entre los 20 y los 26 °C; y una relación de evapotranspiración potencial alrededor de 1.0.

Las especies vegetales indicadoras de esta zona de vida se presentan en el *Cuadro 6*:

**Cuadro 6. Especies vegetales indicadoras del bosque húmedo subtropical (templado)**

NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE COMÚN
<i>Pinus oocarpa</i>	Pino colorado
<i>Curatella americana</i>	Lengua de vaca
<i>Quercus spp.</i>	Roble, encino
<i>Byrsonima crassifolia</i>	Nance

Fuente: De La Cruz, 1982.

#### 4.3.2. Clima

Aunque el área de estudio tiene una extensión relativamente pequeña, su rango altitudinal varía entre los 314 y los 1800 msnm, esto tiene como consecuencia que las condiciones climáticas a nivel local varíen marcadamente entre las partes bajas, medias y altas de las subcuencas que componen el área.

De acuerdo con los modelos climáticos generados por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación de Guatemala; la precipitación en el área de estudio varía

entre 500 y los 800 mm anuales, aunque estas estimaciones no consideran ciertas situaciones microclimáticas que causan que los valores mencionados en este apartado parezcan demasiado conservadores.

Mientras que la temperatura media anual se encuentra entre los 20 y los 27 grados centígrados, siendo mayor la temperatura en las partes bajas de las subcuencas y cercanas a la ciudad de Chiquimula, mientras que las partes altas registran valores de temperatura más bajos. Esto influenciado grandemente por los gradientes adiabáticos.

En cuanto a la evapotranspiración potencial, ésta se encuentra entre 1973 y 2000 mm por año, en dónde el valor mayor ocurre en las partes más bajas de las subcuencas bajo estudio. Esto provoca que las partes bajas de las cuencas presenten condiciones climáticas bastante secas, mientras que las partes altas poseen condiciones climáticas más favorables.

#### **4.4. Aspectos sociales**

El área de estudio comprende una zona urbana –la ciudad de Chiquimula– y varias zonas rurales –la mayor parte del territorio–. Está integrada por 45 centros poblados (según la información cartográfica generada por el INE en 2005), excluyendo a la ciudad de Chiquimula. Por centro poblado, debe entenderse lo que en lenguaje común se conocen como: ciudades, provincias, aldeas, caseríos, entre otros. Una lista de los centros poblados mencionados aparece en el *Cuadro 7*.

Del total de centros poblados, 12 corresponden a la subcuenca del río Tacó, 2 comparten la jurisdicción, y los restantes 31 corresponden a la subcuenca del río Shusho.

Con respecto a la ciudad de Chiquimula, ésta cuenta con 31,808 habitantes, según el censo de 2002, a esto debe sumarse una gran cantidad de personas que visitan o que se establecen temporalmente en la ciudad. Además, es en la ciudad de Chiquimula en la que se concentra la mayor densidad poblacional del departamento. Esto hace que la demanda de los recursos, especialmente por el hídrico, sea muy alta.

Como toda población humana demanda de su entorno varios recursos para su supervivencia y desarrollo, la interacción humano-naturaleza puede crear un desbalance entre las partes, en primer lugar en forma negativa hacia a los recursos naturales involucrados, y por último hacia la propia sociedad humana. Por tanto, en cualquier

estudio sobre los recursos naturales, necesariamente debe considerarse la relación de éstos con el ser humano.

**Cuadro 7. Centros poblados dentro del área de estudio según el Instituto Nacional de Estadística, municipio de Chiquimula.**

Microcuenca	Centro Poblado	Categoría	Microcuenca	Centro Poblado	Categoría
R í o  T a c ó	CARRIZAL	CASERIO	R í o  S h u s h o	EL PINALITO	ALDEA
	EL CHILAR	CASERIO		EL PITAL	CASERIO
	EL FILO	CASERIO		GUIOR	ALDEA
	EL PATO	CASERIO		JABILLA	PARAJE
	EL SAUCE	CASERIO		LAS MESAS	CASERIO
	GUAYABILLAS	CASERIO		LOS FELIPES	CASERIO
	LA LAGUNA	ALDEA		LOS GARCIA	CASERIO
	LOMA LARGA	CASERIO		LOS RAMOS	CASERIO
	TACO ARRIBA	ALDEA		MARAXCO	ALDEA
	TAMIZ O CARBONERAS	FINCA		PALO VERDE	CASERIO
	TERRERO BARROSO	CASERIO		PETAPILLA	ALDEA
TIERRA BLANCA	ALDEA	PLAN DEL GUINEO	ALDEA		
R í o  S h u s h o	AGUACATE		Ríos Tacó y Shusho	QUEBRADA LOS CANGREJOS	CASERIO
	CUESTA SAN ANTONIO	CASERIO		SABANETAS	CASERIO
	EL CARRIZAL	ALDEA		SAN ANDRES O LOS DUARTE	FINCA
	EL CERRON	CASERIO		SHUSHO ARRIBA	ALDEA
	EL CONACASTE	ALDEA		SHUSHO ENMEDIO	CASERIO
	EL JUTE	CASERIO		TICANLU	CASERIO
	EL LIMONAL	CASERIO		ZOMPOPERO	PARAJE
	EL MORRAL	CASERIO		EL POXTE	CASERIO
	EL OTRO LADO	CASERIO		LA CATOCHA	ALDEA
	EL PALMAR	ALDEA			
	EL PASO DE LOS MENENDEZ	CASERIO			
EL PERICON	FINCA				

Fuente: Capa temática "lugares poblados 2005", Instituto Nacional de Estadística.

#### 4.5. Características geomorfométricas de las subcuencas bajo estudio

Las características geomorfométricas de una cuenca definen parámetros que son esenciales en el estudio de cuencas. Debido a que localización de las zonas con potencial de recarga hídrica dentro de una cuenca está relacionada en cierta medida con la forma, relieve y configuración propia de cada cuenca.

Las características mostradas en el *Cuadro 8*, manifiestan las diferencias geomorfométricas que existen entre las subcuencas que integran el área de estudios, las cuales como lo muestra la *Figura 4*, son de formas y tamaños diferentes. A pesar de las diferencias mostradas, la integración como área de estudio se hace necesaria ya que en ellas se incluyen los afluentes que son de importancia para el suministro de agua de la ciudad de Chiquimula.

Las características geomorfométricas de las cuencas establecen parámetros simples y teóricos sobre ciertas relaciones hidrológicas, por lo que, es posible inferir que algunas de

estas características definirán en cierta medida el total de área de recarga que existe en cada una de las subcuencas bajo estudio. Una mayor densidad de drenaje y mayor número de corrientes de un río daría como resultado que estas cuencas poseerán mayor superficie de recarga ya que alimentan muchas corrientes tributarias del cauce principal – *pero esto no siempre es aplicable*–; otra inferencia se podría hacer en cuanto a la pendiente media de la cuenca, ya que el grado de inclinación del terreno controla la cantidad de escorrentía superficial durante una lluvia, por lo que a mayor pendiente menor posibilidad de recarga; aunque éstos no dejan de ser razonamientos muy generales.

**Cuadro 8. Características geomorfométricas de las subcuencas involucradas en la determinación de las zonas potenciales de recarga hídrica.**

	CARACTERÍSTICA	CUENCA RÍO TACÓ	CUENCA RÍO SHUSHO	AREA COMPLEMENTARIA	AREA TOTAL DE ESTUDIO
ASPECTOS LINEALES	Número de corrientes	5	33	1	39
	Orden de corrientes	2	3	1	-----
	Longitud acumulada de corrientes (Km)	20.86	54.50	6.65	82.01
	Longitud Cauce Principal (Km)	16.73	26.88	3.14	-----
	Perímetro (Km)	40.51	47.74	22.78	54.00
	Radio de Bifurcación	1.5	1.59	-----	-----
ASPECTOS DE SUPERFICIE	Area (Km <sup>2</sup> )	26.32	78.21	12.97	117.5
	Relación de Forma	0.09	0.11	1.32	-----
	Relación Circular	0.20	0.43	0.31	0.51
	Radio de Elongación	0.35	0.37	1.29	-----
	Densidad de Drenaje	0.79	0.70	0.51	0.70
	Frecuencia o densidad de corrientes	0.19	0.42	0.08	0.33
ASPECTOS DEL RELIEVE	Pendiente Media	42.46%	36.17%	18.30%	35.67%
	Pendiente del Cauce Principal	5.21%	0.89%	2.64%	-----
	Coeficiente de Robustes	28.2	29.72	15.98	-----

Fuente: Elaboración propia, 2009. Cálculos en base al MDT generado por el MAGA en base a la cartografía 1:50000.

## 5. MARCO METODOLÓGICO

### 5.1. Objetivo general

Contribuir en el proceso de planificación y manejo de los recursos naturales, a través de la generación de información cartográfica y descriptiva de las zonas de recarga hídrica; presentes en las subcuencas de los ríos Tacó y Shusho, para mejorar el abastecimiento de agua en el municipio de Chiquimula.

### 5.2. Objetivos específicos

- Identificar y cartografiar las zonas con potencial de recarga hídrica en las subcuencas de los ríos Tacó y Shusho a una escala 1:50,000, a través del uso de sistemas de información geográfica, para facilitar la planificación territorial a nivel local.
- Describir y analizar las principales características de las zonas de recarga hídrica, haciendo énfasis en las variables: pendiente, geología, tipo de suelo, cobertura vegetal, y velocidad de infiltración del suelo.
- Generar un modelo metodológico para determinar las zonas potenciales de recarga hídrica en cuencas hidrográficas, desarrollado según los principios de sistemas de información geográfica y *aplicable* a nivel local.
- Proponer lineamientos generales para el manejo y conservación de los recursos naturales, en las zonas de recarga hídrica identificadas dentro de las subcuencas en estudio.

### 5.3. Descripción de la metodología

La metodología propuesta para llevar a cabo este estudio, reúne consideraciones hechas en varias metodologías anteriormente aplicadas a la recarga hídrica: *la metodología para la determinación de Tierras Forestales de Captación y Regulación Hídrica del INAB*; y *la metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica, desarrollada por Matus Silva en 2007*. Además, añade las consideraciones y adaptaciones relacionadas con el tipo y características de la información geográfica disponible; entre otras: *la reducción del número de variables utilizadas (capas temáticas), aplicación a una escala de*

*semi-detalle, modificación de las matrices de ponderación para las diferentes variables y la automatización del análisis a través de la generación de un modelo de geoprocésamiento.* Por otro lado, incluye adaptaciones que facilitan la aplicación de herramientas de un SIG, a un nivel que permite automatizar el análisis y la generación de información, a fin de que estudios similares sean replicados en otras áreas con mucha más facilidad.

Para la identificación de las áreas con mayor potencial de recarga hídrica, se partió de la ecuación desarrollada por *Matus Silva (2007)*; la cual considera cinco variables y las respectivas ponderaciones que a cada una deben ser asignadas. La ecuación general de Matus para las zonas de recarga (ZR) es la siguiente:

$$ZR = 0.27(\text{Pendiente}) \pm 0.23(\text{Tipo de Suelo}) \pm 0.12(\text{Tipo de Roca}) \pm 0.25(\text{Cobertura Vegetal}) \pm 0.13(\text{Uso del suelo})$$

Para el presente estudio y considerando la información geográfica disponible para el área, la ecuación de Matus ha sido modificada –mas sin embargo se mantiene la integridad de la misma–, a la siguiente forma:

$$ZR = 0.27(\text{Pendiente}) + 0.23(\text{Tipo de Suelo}) + 0.12(\text{Geología}) + 0.25(\text{Cobertura Vegetal}) + 0.13(\text{Uso del suelo})$$

*Donde:*

ZR = potencial de recarga.

Pendiente = resultado obtenido en base al mapa de pendientes.

Tipo de suelo =  $\frac{\text{Textura} + \text{Velocidad de Infiltración}}{2}$

2

Geología = resultado obtenido de las hojas geológicas 1:50000.

Cobertura = resultado obtenido del % del suelo cubierto por vegetación permanente.

Uso del suelo = resultado obtenido del mapa de “cobertura vegetal y uso del suelo, 2003”

(0.27, 0.23, 0.12, 0.25, 0.13; Representan la importancia relativa de cada una de las variables)

En base a la ecuación expuesta arriba y un detalle del estudio que permita la toma de decisiones a nivel municipal, la metodología comprendió tres fases. *Figura 5.*

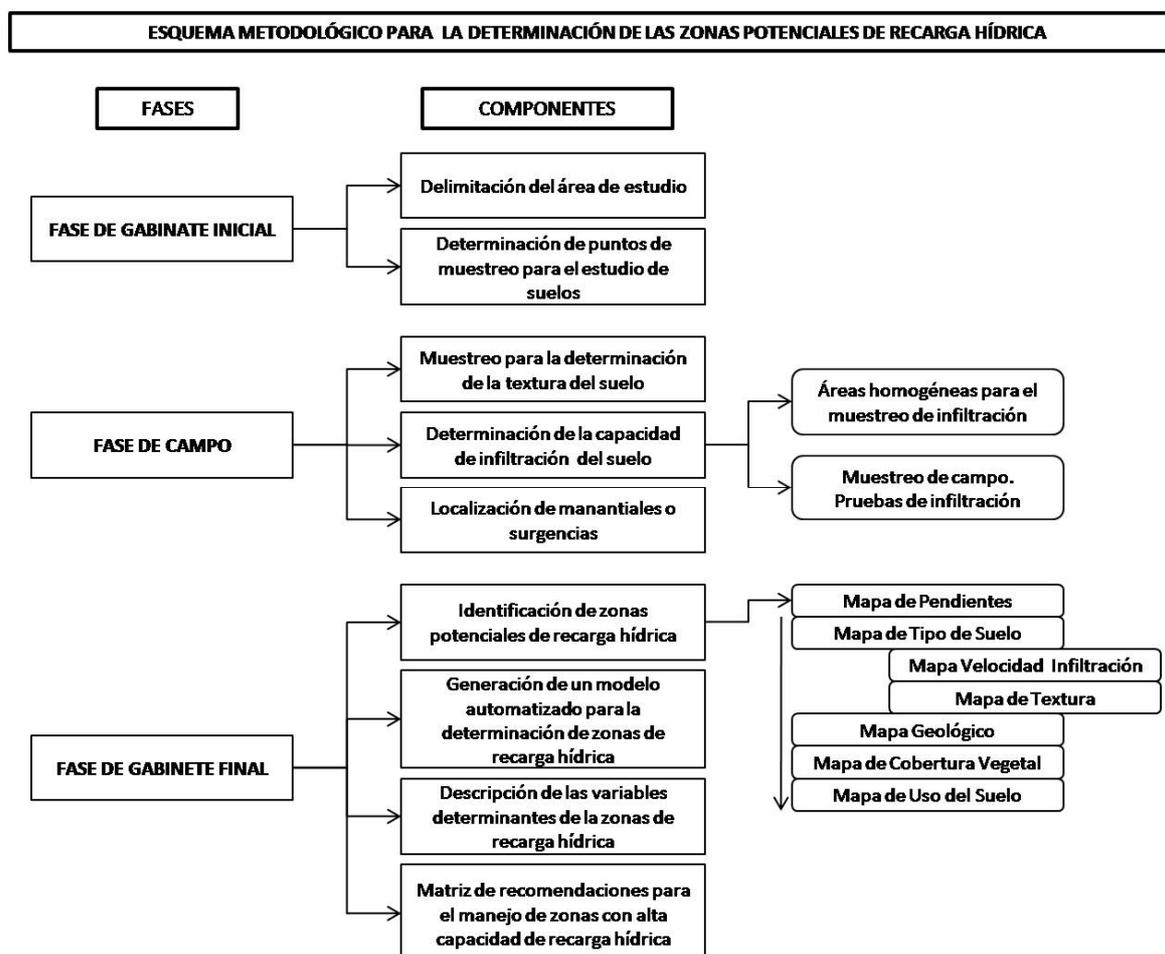


Figura 5. Esquema que muestra la metodología utilizada para la determinación de las zonas potenciales de recarga hídrica, en el área de estudio.

FUENTE: elaboración propia, 2009.

#### 5.4. Fase de gabinete inicial

La mayor parte de preparación y procesamiento de los datos se llevó a cabo utilizando las herramientas disponibles en el software ArcGIS 9.2 ArcInfo. Además, todos los pasos expuestos están relacionados con la aplicación de los sistemas de información geográfica a la generación de información relacionada al tema de recarga hídrica.

##### 5.4.1. Delimitación del área de estudio

El primer paso, fue delimitar el área de estudio, en este caso las subcuencas de los ríos Tacó y Shusho. Este procedimiento se llevó a cabo utilizando el Modelo Digital del Terreno a escala 1:50000 generado por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y

Alimentación –MAGA–; y aplicando las herramientas hidrológicas con las que cuenta ArcGIS 9.2.

Luego de delimitar por separado las subcuencas mencionadas, se procedió a su unificación, es decir, se trazó nuevamente el límite exterior de las áreas independientes a manera de obtener un área uniforme, *Figura 4*. Debido a que los puntos de aforo de ambas subcuencas no poseen un punto en común, y distan uno de otro en aproximadamente 3.8 Km, en el estudio propuesto se incluyó el área entre los puntos de aforo respectivos (correspondiente al área drenada por el río Sasmó); con el propósito de obtener un área de estudio de forma más regular.

Una vez delimitada el área de estudio, se procedió a calcular su área geométrica en kilómetros cuadrados, a través del software de SIG; lo cual sirvió de punto de partida para el muestreo de campo.

#### **5.4.2. Determinación de puntos de muestreo para el estudio de suelos**

Una vez delimitada y calculada el área de estudio, se procedió a la determinación de puntos de muestreo, lo que permitió mapear el área de una manera lógica y consistente para la elaboración del mapa de texturas de suelo, para lo cual se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- La intensidad de muestreo respondió un nivel Medio “semidetallado”, es decir a una muestra por kilómetro cuadrado. *Rossiter (2004)*.
- El muestreo para las clases texturales de suelo se realizó con una distribución regular en forma de grilla y con una separación de 1000 m entre puntos. La distribución de los puntos de muestreo, se hizo utilizando las herramientas de análisis de Hawth (Hawth’s Analysis Tools) diseñadas para ArcGIS 9<sup>1</sup>, dando como resultado un total de 135 puntos. Tal como se muestra en la *Figura 6*.
- Para el muestreo de campo, se excluyeron las áreas que corresponden a los centros poblados dentro del área de estudio, lo que permitió reducir el nivel de error, al no considerar áreas que en teoría no presentan ninguna recarga hídrica significativa.

---

<sup>1</sup> Beyer, H. L. 2004. Hawth's Analysis Tools for ArcGIS. Disponible en <http://www.spatial ecology.com/htools>.

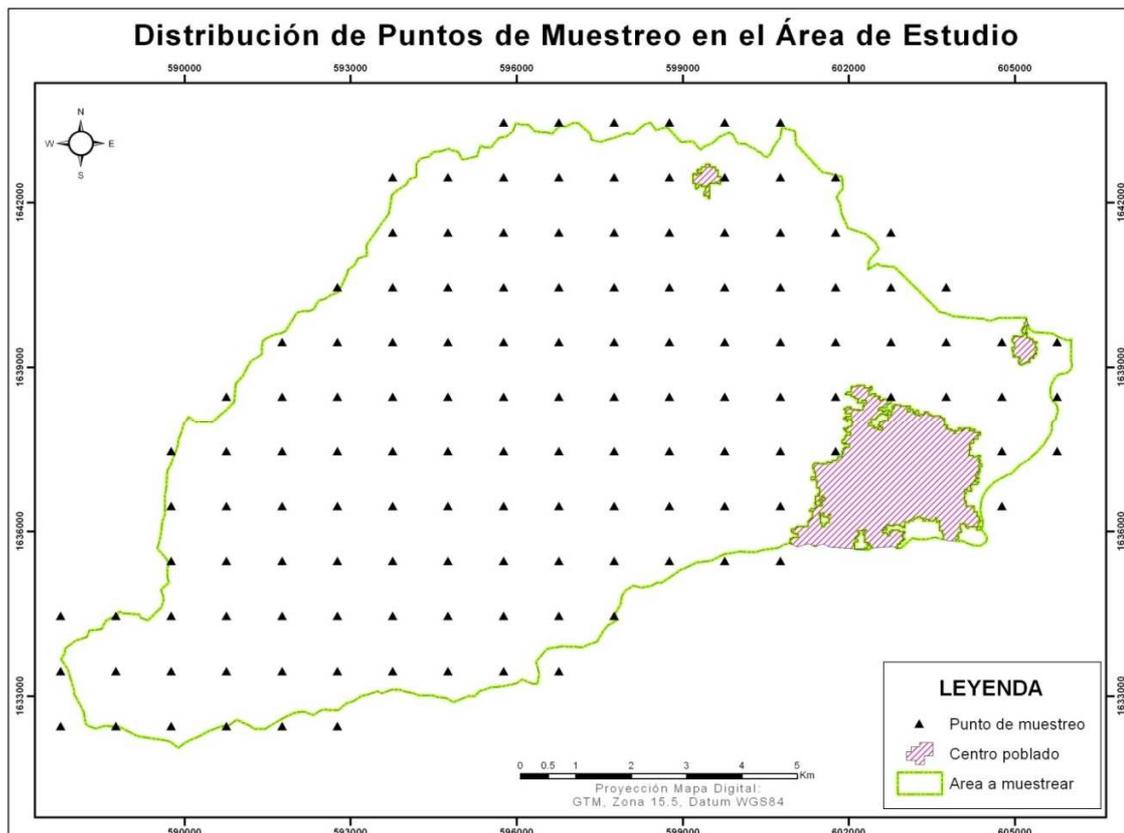


Figura 6. Mapa de distribución de los 135 puntos de muestreo. Área de estudio, municipio de Chiquimula.

Una vez distribuidos los puntos de muestreo sobre el área de estudio, se calcularon sus coordenadas en el plano geográfico, las cuales sirvieron para la identificación de los puntos a nivel de campo.

## 5.5. Fase de campo

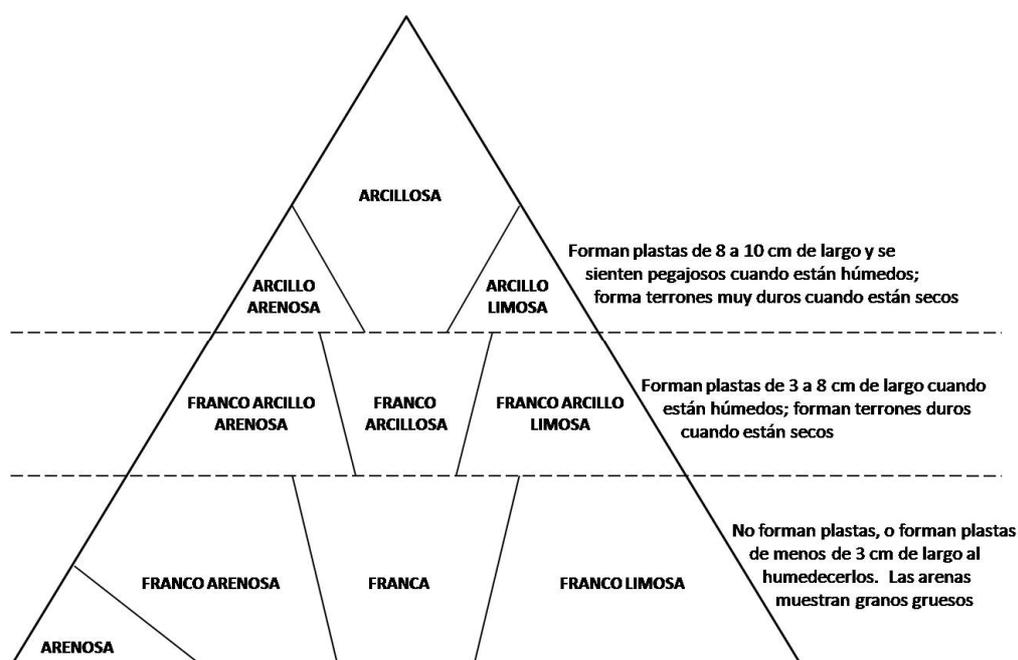
A nivel de campo, los puntos de muestreo se identificaron utilizando un sistema GPS, a través de un receptor tipo navegador. La fase de campo comprendió dos muestreos sucesivos para la obtención de los valores de las variables: textura y velocidad de infiltración; consideradas en el presente estudio.

### 5.5.1. Determinación de la textura del suelo

Ésta comprendió un primer muestreo llevado a cabo en el campo. Para ello, una vez ubicado el punto de muestreo con la ayuda de un sistema GPS, se procedió a recolectar una muestra de suelo, para determinar de la textura del suelo, por el

método del tacto, por considerarlo de bajo costo y de fácil aplicabilidad. Además de proporcionar un nivel de precisión y detalle aceptable, en este caso.

Para este propósito se utilizó el triángulo textural modificado, que aparece en la *Figura 7*. La metodología para determinar la textura a través de este método se presenta en el *Anexo 3*.



*Figura 7. Triángulo textural para la determinación de la textura del suelo, mediante el método del tacto.*

El procedimiento se repitió a fin de determinar el tipo textural de cada uno de los puntos de muestreo considerados en el estudio. Los datos fueron recolectados en una boleta de campo que se diseñó para tal propósito. *Apéndice D*.

### 5.5.2. Determinación de la capacidad de infiltración del suelo

#### a) Homogenización de áreas para el muestreo de infiltración

A fin de reducir el número de muestras necesarias para la determinación de la variable “velocidad de infiltración”, el número y localización de los puntos de muestreo, se determinaron en base a los resultados obtenidos del muestreo para la determinación de la textura de suelos y su respectivo mapa. Las áreas resultantes del mapa de texturas de suelo fueron consideradas para el presente caso como “áreas homogéneas”, considerando los criterios expuestos por

*Sandoval Illescas (1974)* y *Matus Silva (2007)*, en cuanto a que existe una relación estrecha entre la textura del suelo y su respectiva velocidad de infiltración.

Atendiendo dichas consideraciones, la determinación del número y localización de los puntos de muestreo para determinar la velocidad de infiltración, se llevó a cabo considerando que la velocidad de infiltración del suelo es constante para una misma clase textural y área definida por el mapa de texturas de suelo. Por lo cual, las pruebas de infiltración del suelo, se distribuyeron de manera que para cada clase de textura resultante, correspondió una prueba de infiltración.

#### **b) Pruebas de infiltración del suelo**

Una vez identificados los puntos de muestreo, estos fueron establecidos a nivel de campo con la ayuda de un sistema GPS.

Para las pruebas de infiltración se utilizó el método Porchet o de Cilindro Invertido, por ser un método que perturba en menor medida el estado natural del suelo y es de fácil aplicación a nivel de campo. La metodología para aplicar este método aparece en el *Anexo 4*.

Considerando la posibilidad de encontrarse con terrenos en los cuales el alcanzar el punto de saturación resultase casi imposible, por la cantidad de agua que sería necesaria durante la época seca, las pruebas de infiltración se llevaron a cabo una vez iniciada la temporada lluviosa, dejando un período de entre dos a tres días después de la última lluvia copiosa, para permitir que el suelo alcanzase su capacidad de campo.

Los datos recolectados para cada una de las nueve pruebas realizadas fueron tabulados en una hoja electrónica de cálculo, según la fórmula para la determinación de la infiltración básica de este tipo de prueba. Los resultados de estas pruebas se resumen en el *Apéndice A*.

#### **5.5.3. Localización de manantiales (Surgencias)**

Para aquellas zonas del área de estudio, en las que no se contó con información reciente al respecto, se llevó a cabo la localización de las surgencias o nacimientos que tributan a los ríos Tacó, Susho y Sasmó; utilizando un sistema GPS para su

localización. Únicamente fueron consideradas las surgencias que de acuerdo con los habitantes del lugar son permanentes.

Los datos obtenidos complementaron la información hidrológica del área de estudio, y permitieron hacer una estimación de la relación entre la ubicación de corrientes tributarias y las zonas de recarga que las alimentan.

## 5.6. Fase de gabinete final

Una vez obtenidos todos los datos de campo, se procedió al procesamiento con el software ArcGIS 9.2; y utilizando como tipo de dato principal para este procesamiento de la información el modelo RASTER y los principios de álgebra de mapas.

### 5.6.1. Determinación de zonas potenciales de recarga hídrica

La determinación del potencial de recarga hídrica se llevó a cabo al aplicar la ecuación siguiente:

$$ZR = 0.27(\text{Pendiente}) + 0.23(\text{Tipo de Suelo}) + 0.12(\text{Geología}) + 0.25(\text{Cobertura Vegetal}) + 0.13(\text{Uso del suelo})$$

#### a) Mapa de pendientes

Las pendientes dentro del área de estudio fueron calculadas en base al Modelo Digital del Terreno a escala 1:50000, elaborado por el MAGA, en base a las hojas cartográficas del país. Los resultados se clasificaron y ponderaron en base a la siguiente matriz:

**Cuadro 9. Matriz para la clasificación y ponderación de pendientes, según la ecuación para la determinación de las zonas de recarga hídrica.**

% Pendiente	Posibilidad de Recarga	Ponderación
0-6	Muy Alta	5
6-15	Alta	4
15-45	Moderada	3
15-65	Baja	2
> 65	Muy Baja	1

Fuente: Matus Silva, 2007

Como resultado de la aplicación de la matriz presentada en el *Cuadro 9* al mapa de pendiente, se obtuvo: 1) el mapa de pendientes clasificado según los rangos establecidos, y 2) el mapa de pendientes ponderadas; éste último fue el que aportó los valores para la aplicación de la ecuación de Recarga Hídrica –*Apéndice B, figura (a)*–.

## b) Mapa de tipo de suelo

El tipo de suelo hace referencia a dos importantes características del suelo que intervienen en la recarga hídrica, éstas son: la textura del suelo y la velocidad de infiltración.

### ○ Mapa de texturas de suelo

Para la elaboración del mapa de texturas de suelo, se partió de los datos de 135 muestras colectadas en campo. Las cuales fueron comparadas en su conjunto y se delimitaron aquellas áreas que reunían puntos de muestreo bajo la misma clase textural.

Las áreas resultantes del modelo de texturas de suelo fueron clasificadas y ponderadas en base a la siguiente matriz:

**Cuadro 10. Matriz para la clasificación y ponderación de texturas del suelo, según la ecuación para la determinación de zonas de recarga hídrica.**

Clase Textural	Posibilidad de Recarga	Ponderación
Fanco Arenoso - Arenoso	Muy Alta	5
Franco	Alta	4
Franco Limoso	Moderada	3
Franco Arcillo Arenoso - Franco Arcilloso	Baja	2
Arcillo arenoso - Arcilloso	Muy Baja	1

*Fuente: Matus Silva, 2007*

El mapa resultante contiene los valores que fueron considerados en la determinación del valor correspondiente al tipo de suelo.

○ **Mapa de velocidad de infiltración**

A partir de los datos de campo obtenidos de las pruebas de velocidad de infiltración del suelo, ésta fue calculada para cada uno de los puntos de muestreo, en base a la ecuación de capacidad de infiltración dada por el método Porchet, de la siguiente manera:

$$f = \left( \frac{R}{2(t_2 - t_1)} \right) \times \text{Ln} \left( \frac{2h_1 + R}{2h_2 + R} \right)$$

Donde:

f: Velocidad de infiltración en cm/h

R: Radio del agujero en cm.

T<sub>1</sub>: Tiempo 1 en horas.

T<sub>2</sub>: Tiempo 2 en horas.

H<sub>1</sub>: altura de la columna de agua en el tiempo 1.

H<sub>2</sub>: altura de la columna de agua en el tiempo 2.

Ln: logaritmo natural.

El valor buscado al aplicar la ecuación anterior, es aquel que se considera como poco cambiante. Para el presente estudio, el valor de “f” aceptado fue aquel obtenido en la última lectura, luego de haber agregado 120 Lt de agua a un agujero circular de 20 cm de diámetro por 40 cm de profundidad, en dónde fue posible alcanzar estas dimensiones.

El resultado obtenido, para un determinado punto de muestreo, se generalizó para el total del área que ocupa una clase textural.

Los valores de velocidad de infiltración y sus respectivas áreas de influencia, fueron clasificados en base a la matriz presentada en el *Cuadro 11*.

**Cuadro 11. Matriz para la clasificación y ponderación de velocidad de infiltración, según la ecuación para la determinación de zonas de recarga hídrica.**

Infiltración Básica (cm/hr)	Posibilidad de Recarga	Ponderación
> 25	Muy Alta	5
12.7 - 25.0	Alta	4
2.0 - 12.7	Moderada	3
0.13 - 2.0	Baja	2
< 0.13	Muy Baja	1

Fuente: *Elaboración propia.*

Como resultado de este análisis se obtuvo el mapa de velocidad de infiltración ponderado, de acuerdo a los criterios presentados en el cuadro anterior, éste proporcionó los valores requeridos para la ponderación del Tipo de Suelo – *Apéndice B, figura (c)*–.

Una vez obtenidos los valores ponderados de texturas de suelo y velocidad de infiltración, se procedió a la creación del mapa de Tipo de suelo, basado en los valores dados para la textura y la velocidad de infiltración. Esto se llevó a cabo al determinar el valor promedio entre los valores obtenidos para la textura y la velocidad de infiltración, como se indica a continuación:

$$\text{Tipo de Suelo: } \frac{\text{Valor ponderado "Textura"} + \text{Valor ponderado "Velocidad de Infiltración"}}{2}$$

El resultado conformó el mapa de tipo de suelo –*Apéndice B, figura (d)*–, y sus valores fueron aplicados a la ecuación general, para la determinación de zonas de recarga hídrica.

### **c) Mapa geológico**

Este mapa se obtuvo a partir de la hoja geológica generada por el IGN a escala 1:50000, debido a que la información geológica a este nivel de detalle no se encontraba en el formato requerido, fue necesaria la digitalización del área geológica que comprende el área de estudio.

Las unidades geológicas resultantes fueron clasificadas según sus características geológicas, considerando el nivel de permeabilidad al agua que podrían presentar; la clasificación se hizo en base a las categorías presentadas en el *Cuadro 12*. Este cuadro sirvió luego para la asignación de los valores ponderados al mapa geológico.

Los valores obtenidos de este mapa, fueron considerados en la ecuación general para la determinación del potencial de las zonas de recarga hídrica, de acuerdo a su valor de importancia.

**Cuadro 12. Matriz para la clasificación y ponderación de la geología de suelos, según la ecuación para la determinación de zonas de recarga hídrica.**

Tipo de Roca	Posibilidad de Recarga	Ponderación	Geología IGN 1:50000*
Muy Permeables, muy suaves	Muy Alta	5	Qal, Tmpa
Permeables, Sueaves	Alta	4	KTi
Moderadamente permeables	Moderada	3	Qb, Tmpb
Poco permeables	Baja	2	Tpmt, Psr
Impermeables	Muy Baja	1	Otros
	Ninguna	0	Cuerpos de Agua

Fuente: Matus Silva, 2007. \* Adaptación realizada según consideraciones dadas por INAB (2005); y por expertos.<sup>2</sup>

#### d) Mapa de cobertura vegetal

La cobertura vegetal para el presente estudio, se refiere al porcentaje de área de suelo cubierta por vegetación permanente. Para la determinación de esta cobertura, se utilizó el mapa de cobertura vegetal y uso de la tierra, actualizado al 2006, resultante del proceso de interpretación de imágenes de satélite.

El porcentaje de cobertura representa una proporción entre el área de una unidad de mapeo y el área cubierta por determinada vegetación. Para el presente caso, las unidades de mapeo (provisionales) la constituyeron las áreas resultantes del traslape de los mapas de pendientes, tipo de suelo y geología; las cuales se superpusieron sobre el mapa de cobertura vegetal y uso de la tierra que contenía únicamente, lo que, desde el punto de vista agronómico se considera como vegetación permanente. Para el presente caso los usos considerados como cobertura permanente fueron:

- *Bosque conífero*
- *Bosque latifoliado*
- *Arbustos y matorrales*
- *Frutales tropicales*
- *Café*

Seguidamente, se hizo la comparación entre el área de la unidad de mapeo provisional y el área que dentro de dicha unidad de mapeo ocupó la cobertura de

<sup>2</sup> Leytán A. L. 2009. Ingeniero Geólogo; Cacao A. 2009. Ing. Geólogo, Msc. Universidad de Cádiz, España; y Thompson K. 2009. Hidrogeólogo

tipo permanente. El porcentaje de cobertura fue calculado para cada unidad de mapeo provisional, en base a la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Cobertura} = (\text{Área con cobertura permanente} / \text{Área Unidad provisional de Mapeo}) * 100$$

Los resultados de aplicar esta fórmula –*Apéndice A, figura (g)*– se compararon y ponderaron en base a la clasificación presentada en el *Cuadro 13*.

**Cuadro 13. Matriz para la clasificación y ponderación del porcentaje de cobertura del suelo, según la ecuación para la determinación de zonas de recarga hídrica.**

% Cobertura	Posibilidad de Recarga	Ponderación
> 80	Muy Alta	5
70 - 80	Alta	4
50 - 70	Moderada	3
30 - 50	Baja	2
< 30	Muy Baja	1

*Fuente: Matus Silva, 2007*

De la aplicación de la matriz del *Cuadro 13*, al porcentaje de cobertura del suelo, se obtuvieron los valores ponderados necesarios para la aplicación de la ecuación general de zonas de recarga hídrica.

#### e) Mapa de uso del suelo

El mapa de uso del suelo, fue actualizado a partir de imágenes de satélite del Landsat 7 ETM+, del año 2006, este año fue escogido ya que datos más detallados sobre el uso (ortofotografías a escala 1:10000) se encontraban disponibles para el mismo año.

La imagen utilizada corresponde al archivo *L710190502006096ASN00.tar.gz* obtenida de forma gratuita a través del Departamento de Levantamientos Geológicos del Gobierno de los Estados Unidos.<sup>3</sup> Debido a que el procesamiento de imágenes para la obtención de un producto cartográfico como el uso del suelo, conlleva la realización de muchas tareas individuales, y éste no es el tema principal a tratar en este estudio; únicamente se señalarán los puntos clave que llevaron a la actualización del mapa de uso de la tierra, para el área que ocupa la zona geográfica de interés:

<sup>3</sup> Este tipo de datos están disponible en línea a través de los exploradores presentados en el URL [http://landsat.usgs.gov/links\\_view\\_search\\_order.php](http://landsat.usgs.gov/links_view_search_order.php)

- *Como consecuencia del mal funcionamiento del corrector lateral del sensor Landsat 7 fue necesario rellenar las áreas sin datos, utilizando una escena de la misma área geográfica y el mismo mes para el año 2003.*
- *El procesamiento de las imágenes fue llevado a cabo utilizando software libre, ILWIS 3.3 Academic, desarrollado inicialmente por el ITC de Holanda.*
- *Se realizó una clasificación de la combinación de las bandas 4, 5, 7; esta combinación fue seleccionada en base al cálculo del Factor de Índice Óptimo (OIF). La clasificación supervisada se basó en datos de uso del suelo recolectados durante la fase de campo y haciendo comparaciones con las ortofotografías disponibles para el año 2006.*
- *La intensidad de las bandas seleccionadas fue sustituida por la banda pancromática, en este caso la banda 8, para lograr un detalle de pixel de 15m.*
- *Las categorías de uso utilizadas fueron las mismas que las definidas por el MAGA en el mapa de cobertura vegetal y uso de la tierra para la república de Guatemala, año 2003. De igual manera se utilizaron sus mismas definiciones **(17)**.*
- *Se removieron áreas consideradas como mal clasificadas utilizando criterios como: bosque de pinos no existentes por debajo de 800 msnm, abajo 900 msnm para los robles, comparación de área de café con el mapa del 2003; entre otros.*
- *Por último, se llevó a cabo un pos-proceso para hacer de las áreas con los diferentes usos de la tierra un poco más correctos desde el punto de vista cartográfico, de acuerdo por lo establecido por Vink en **(24)**.*

Los usos resultantes de la actualización del mapa –*Apéndice B, figura (f)*– fueron comparados con los criterios del *Cuadro 14* para la obtención de las ponderaciones necesarias; tal y como se muestra a continuación:

**Cuadro 14. Matriz para ponderación del uso del suelo, según la ecuación para la determinación de zonas de recarga hídrica.**

Equivalente Mapa de Cobertura Vegetal y Uso del Suelo 2003*	Uso del Suelo (Matus, 2007)	Posibilidad de Recarga	Ponderación
Plantaciones Forestales Bosque Naturales: conífero, latifoliado y mixto	Bosques con 3 estratos: árboles, arbustos y hierbas o zacate denso	Muy Alta	5
Café, cítricos, aguacate, mango, frutales deciduos, banano-platano, otros frutales	Sistemas agroforestales o silvopastoriles	Alta	4
Granos Básicos, mosaico de cultivos CON prácticas de conservación (zonas determinadas a nivel de campo) Matorrales (por considerarse como áreas en barbecho)	Terrenos cultivados con obras de conservación	Moderada	3
Granos Básicos, mosaico de cultivos SIN practicas de conservación (zonas identificadas a nivel de campo)	Terrenos cultivados sin obras de conservación	Baja	2
Hortalizas, melón, sandía Pastos cultivados Pastos naturales	Terrenos agropecuarios con manejo intensivo	Muy Baja	1
Centros Poblados, aeropuestos, cementerios, cuerpos de agua, playa/arena	-----	**Ninguna	0

Fuente: Elaboración propia.

\* Clasificación hecha en base a las categorías de uso presentadas en el mapa del MAGA, 2003.

\*\* Ponderación añadida para considerar estos tipos de uso.

Una vez, obtenidos todos los valores ponderados para cada uno de las variables, se procedió a la aplicación de la ecuación modificada (es decir a la suma de los valores de todas las capas, utilizando el modelo *raster* como base para el geoprocesamiento), para la determinación del potencial y clasificación de las zonas de recarga:

$$ZR = 0.27(\text{Pendiente}) + 0.23(\text{Tipo de Suelo}) + 0.12(\text{Geología}) + 0.25(\text{Cobertura Vegetal}) + 0.13(\text{Uso del suelo})$$

Los resultados obtenidos para cada unidad de mapeo resultante (celda) fueron comparados y reclasificados en base a lo planteado en el Cuadro 15.

**Cuadro 15. Matriz para la determinación del potencial de recarga hídrica, según la ecuación para la determinación de zonas de recarga hídrica.**

POSIBILIDAD DE RECARGA	VALOR RESULTANTE
Muy Alta	4.10 - 5.00
Alta	3.50 - 4.09
Moderada	2.60 - 3.49
Baja	2.00 - 2.59
Muy Baja	0.75 - 1.99*

*Fuente: Matus Silva, 2007*

\* Rango modificado para incluir la variación de los valores causada por las modificaciones hechas a los Cuadros 12 y 14.

De la aplicación de la matriz del *Cuadro 15*, se obtuvo como resultado el mapa de zonas con mayor potencial de recarga hídrica dentro del área de estudio.

### 5.6.2. Generación de un modelo automatizado para el procesamiento de datos

El procesamiento de los datos espaciales (*geoprocesamiento*) procedentes del campo y relacionados con la recarga hídrica se llevó a cabo haciendo uso del software ArcGIS 9.2 ArcInfo. A dicho procesamiento se aplicaron una serie de pasos que se desarrollaron a medida que avanzó el proceso y se ejecutaron varias herramientas de procesamiento y análisis de datos, a fin de obtener el resultado deseado en base a la metodología especificada.

En este caso la metodología para la determinación del potencial de zonas de recarga hídrica ya ha sido expuesta, dentro del software ArcGIS 9.1 ArcInfo la metodología fue resumida a través de la aplicación *Model Builder* en una serie de tareas que dicho programa realizó para obtener el resultado. Esto tiene una gran ventaja, el poder aplicar un mismo análisis o metodología de forma automática, reduciendo así el tiempo de análisis; y eliminando la subjetividad y el error cometido por el experto en SIG.

Por tal motivo, la metodología descrita anteriormente y relacionada con la determinación de zonas de recarga hídrica, fue simplificada en un modelo automatizado que permitirá que en un futuro, estudios basados en la misma metodología sean analizados en una forma más simple para el usuario del software.

### **5.6.3. Descripción de las principales características que intervienen en la determinación de las zonas potenciales de recarga hídrica**

Durante la descripción de las variables más relevantes en la determinación de las zonas de recarga hídrica, se puso énfasis en describir las condiciones de cada una de ellas; al tiempo que se resaltan las diferencias entre las subcuencas que conforman el área total de estudio.

Además, se analizaron las relaciones e influencias que dichas variables tienen en la recarga hídrica; a fin de describir de la mejor manera posible las condiciones actuales de las subcuencas de los ríos Tacó y Shusho, en cuanto a las características hidrológicas, y en la medida en que fue posible se mencionaron las situaciones que han llevado a tales condiciones.

### **5.6.4. Lineamientos para el manejo y conservación de las zonas de recarga hídrica**

Con la información resultante del estudio, se elaboró una matriz de recomendaciones orientada al manejo de las zonas de recarga hídrica, haciendo distinción entre las medidas más apropiadas para cada una de las zonas, según su potencial.

Dentro del análisis se consideraron aspectos legales, como los presentados en la ley Forestal, decreto 101-96; aspectos socioeconómicos de las poblaciones que habitan el área de estudios; la filosofía de manejo de cuencas y el ordenamiento territorial.

La matriz de recomendaciones pretende dar los lineamientos generales que permitan: conservar los recursos naturales, regular el aprovechamiento, y mantener el abastecimiento de agua para las poblaciones dentro de las subcuencas en estudio; este último punto es de mucha relevancia ya que el área de estudio incluye a la ciudad de Chiquimula.

Se aplicó la metodología de marco lógico propuesta por el Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social –ILPES– para la etapa de identificación de problemas, fines, logros, alternativas de solución y complementos, para que fueran acorde a los objetivos planteados, *Ortegón (2005)*. Los resultados se resumieron en la matriz de recomendaciones respectiva.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Descripción y análisis de las variables involucradas en la determinación de las zonas potenciales de recarga hídrica.

#### 6.1.1. Pendientes

Las pendientes llanas permiten que el agua de lluvia permanezca por más tiempo sobre la superficie del suelo, mientras que lo contrario sucede con las pendientes escarpadas, las cuales facilitan una escorrentía más rápida; reduciendo de este modo la cantidad de agua que podría infiltrarse en el suelo.

**Cuadro 16. Distribución de la pendiente según rango y subcuenca, dentro del área de estudio, municipio de Chiquimula.**

PENDIENTE	SUBCUENCA TACÓ		SUBCUENCA SHUSHO		ÁREA COMPLEMENTARIA		TOTAL ÁREA DE ESTUDIO	
	ÁREA (Ha)	ÁREA (%)	ÁREA (Ha)	ÁREA (%)	ÁREA (Ha)	ÁREA (%)	ÁREA (Ha)	ÁREA (%)
0 - 6 %	170.11	1.45	533.54	4.54	642.43	5.47	1346.08	11.46
6 - 15 %	64.36	0.55	985.28	8.39	173.67	1.48	1223.31	10.41
15 - 45 %	1290.99	10.99	3971.82	33.80	373.78	3.18	5636.59	47.97
45- 65 %	925.53	7.88	1926.63	16.40	92.88	0.79	2945.04	25.06
> 65 %	180.54	1.54	403.65	3.44	14.68	0.12	598.87	5.10
<b>TOTALES</b>	<b>2631.53</b>	<b>22.40</b>	<b>7820.91</b>	<b>66.56</b>	<b>1297.44</b>	<b>11.04</b>	<b>11749.88</b>	<b>100.00</b>

FUENTE: Elaboración propia, 2009.

En el Cuadro 16, se muestra que a diferencia del *área complementaria*, las subcuencas Tacó y Shusho poseen más del 50 % del área con una pendiente mayor del 15%; mientras que el 11.45% del área total posee un pendiente entre cero y seis por ciento, éstas áreas consideradas como planicies, se encuentran en su mayoría en las subcuencas del río Shusho y el río Sasmó, en lo que se conoce como el valle de la ciudad de Chiquimula. Esta primera observación nos inclina a pensar que considerando únicamente a la pendiente como una de las variables determinantes de la recarga hídrica, quienes aportan más potencial para la recarga hídrica son las 1,346 Ha que conforman las planicies.

Considerando el área total de estudio, el comportamiento de la pendiente parece no variar significativamente, ya que el 47.97% del área total se encuentra en el rango medio (15 – 45 %), el 25.06% del área se encuentra entre el rango de 45 – 65 %; mientras que el 11.476% pertenece a las áreas que podrían llamarse planas. La gran mayoría de estas áreas planas se ubican cerca de las desembocaduras de los tres ríos que integran el área de estudio, las que a su vez comprenden el 80% del área que actualmente comprende la ciudad de Chiquimula. La distribución dentro del área de estudio, de los rangos de pendiente mostrados en el Cuadro 13 puede apreciarse de mejor manera en la *figura (a)* del Apéndice B.

Estos resultados demuestran lo accidentado de la topografía dentro del área, y que esta característica tiende a promover una escorrentía superficial del agua de lluvia mucho más rápida, reduciendo el tiempo que permanece sobre la superficie del suelo y la posibilidad de infiltración.

En función de la pendiente, las áreas más idóneas para la recarga hídrica son los alrededores de la ciudad de Chiquimula y en algunas zonas de menor tamaño en las aldeas Maraxcó, El Pinalito y Conacaste; mientras que las menos idóneas se ubican a lo largo de la subcuenca del río Tacó y en la parte alta de la subcuenca del río Shusho.

### 6.1.2. Tipo de suelo

La generación del mapa de tipo de suelo, implicó la evaluación de dos sub-variables: textura y velocidad de infiltración del suelo. Los resultados se discuten por separado, a continuación.

#### a) Textura del suelo

Una vez determinada la textura de cada una de las muestras, los resultados individuales fueron agrupados según su clase textural. De esto se derivan los resultados que aparecen en *el Cuadro 17* y la *Figura 8*. Un total de 10 clases texturales diferentes fueron identificadas.

**Cuadro 17. Resumen de tipos de textura del suelo, según clase textural y según subcuenca dentro del área de estudio, municipio de Chiquimula, 2009.**

CLASE TEXTURAL	SUBCUENCA TACÓ		SUBCUENCA SHUSHO		AREA COMPLEMENTARIA		TOTAL AREA DE ESTUDIO	
	AREA (Ha)	AREA (%)	AREA (Ha)	AREA (%)	AREA (Ha)	AREA (%)	AREA (Ha)	AREA (%)
Arena-franca	236.64	2.01	204.72	1.74	0.00	0.00	441.36	3.76
Arenoso	247.11	2.10	0.00	0.00	0.00	0.00	247.11	2.10
Franco-arenoso	355.79	3.03	1431.11	12.18	431.77	3.68	2218.67	18.88
Franco	0.00	0.00	0.00	0.00	42.46	0.36	42.46	0.36
Franco-arcillo-arenoso	838.66	7.14	1672.36	14.23	118.79	1.01	2629.82	22.38
Franco-arcilloso	128.90	1.10	856.21	7.29	4.77	0.04	989.88	8.43
Franco-arcillo-limoso	299.48	2.55	475.91	4.05	83.47	0.71	858.86	7.31
Arcillo-arenoso	379.52	3.23	507.84	4.32	247.71	2.11	1135.07	9.66
Arcillo-limoso	27.91	0.24	1613.24	13.73	42.89	0.37	1684.03	14.33
Arcilloso	116.42	0.99	1059.42	9.02	325.59	2.77	1501.43	12.78
<b>TOTALES</b>	<b>2630.45</b>	<b>22.389</b>	<b>7820.80</b>	<b>66.567</b>	<b>1297.44</b>	<b>11.043</b>	<b>11748.69</b>	<b>100.00</b>

FUENTE: Elaboración propia, 2009.

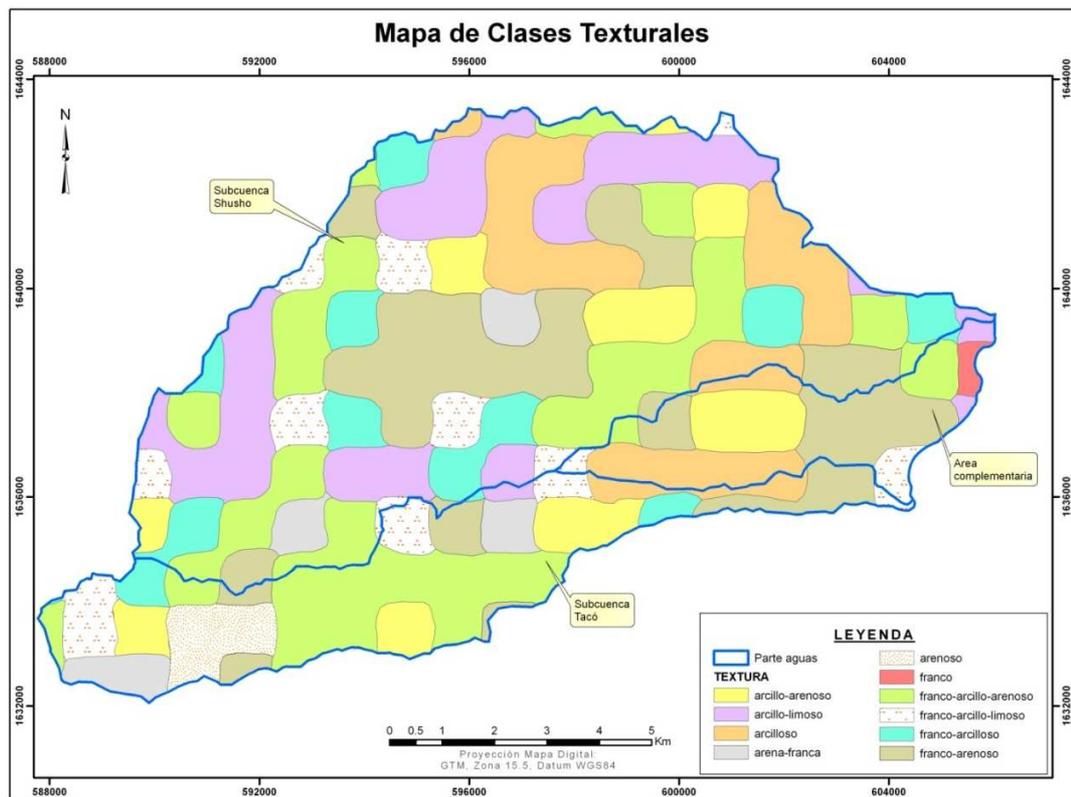


FIGURA 8. Mapa de clases texturales, resultante de la determinación de la textura del suelo en base al método del tacto. Subcuencas de los ríos Tacó, Shusho y Sasmó. Municipio de Chiquimula, 2009.

Del Cuadro 17, se puede resumir el comportamiento que tiene la textura del suelo en el área de estudio, haciendo énfasis en la capacidad que cada clase tiene para facilitar la infiltración del agua, más que en el analizar el porcentaje de partículas primarias que corresponde a cada clase. El 24.74% de área total se encuentra en la categoría de *texturas gruesas* (arena-franca, arenoso, franco-arenoso), las cuales presentan un mejor potencial para la recarga hídrica, y las subcuencas que más aportan áreas de este tipo son: la subcuenca del río Shusho y el área complementaria, este hecho se hace más evidente al analizar detenidamente el mapa de la Figura 8; mientras que el 38.49% pertenece a las *texturas medias* (franco, franco-arcillo-arenoso, franco-arcilloso, franco-arcillo-limoso), con una menor posibilidad de recarga; y el restante 36.77% se encuentra en la categoría de las *texturas finas* (arcillo-arenoso, arcillo-limoso, arcilloso), con la menor posibilidad de recarga comparado con las primeras dos categorías. Por lo que, de acuerdo con los resultados obtenidos, la posibilidad de recarga se haya entre un nivel medio y un nivel bajo, ya que más del 75% de área de estudio, se encuentran entre las clases de textura que tienden a condicionar desfavorablemente la recarga hídrica de los suelos.

## b) Velocidad de infiltración del suelo

Los resultados de esta variable, se determinaron aplicando el método Porchet, en puntos representativos de las nueve clases texturales predominantes de suelo (*se excluyó la clase Franco, por presentar en una extensión muy reducida dentro del área de estudio*), que aparecen en el *Cuadro 17*. En el lugar elegido para la aplicación de la prueba de infiltración, una muestra del suelo fue remitida al laboratorio de suelos de CUNORI, para determinar la granulometría por el método de *Bouyoucos*. Los resultados de las pruebas de infiltración y los resultados del análisis de laboratorio aparecen en *Cuadro 18*.

**Cuadro 18. Resultado de las pruebas de velocidad de infiltración y su respectiva granulometría, determinada en laboratorio por el método de Bouyoucos. Chiquimula, 2009.**

PRUEBA	DIAMETRO (cm)	PROFUNDIDAD (cm)	PORCENTAJE DE PARTICULAS (BOUYOUCOS)			INFILTRACIÓN (cm/h)
			ARENA	LIMO	ARCILLA	
1	20.00	40.00	67.62	22.91	9.48	91.46
2	20.00	40.00	61.06	19.29	19.65	88.95
3	20.00	40.00	21.42	14.77	63.81	0.14
4	20.00	40.00	67.08	15.15	17.77	9.55
5	20.00	40.00	27.75	35.26	36.98	1.57
6	20.00	30.00	29.48	40.01	30.50	2.06
7	20.00	40.00	61.44	25.40	13.17	13.45
8	20.00	40.00	83.96	8.44	7.60	14.28
9	20.00	40.00	82.23	9.87	7.89	26.53

FUENTE: *Elaboración propia, 2009.*

Al analizar detenidamente los resultados del cuadro 18, en especial los de las pruebas 8 y 9, pareciera existir una inconsistencia entre la granulometría que estos suelos posee y la infiltración resultante de la prueba, el suelo de la prueba 8 debería poseer una mayor velocidad de infiltración que el de la prueba 9, ya que contiene una mayor proporción de arenas. Esto se explica, ya que el contenido de partículas primarias del suelo no condiciona por completo la velocidad de infiltración, aunque es uno de los factores más importantes; por lo que, otros factores como la estructura del suelo, el grado de compactación, contenido de materia orgánica y el grado de humedad del suelo al momento de aplicar la prueba, también afectan la velocidad de infiltración; factores que son considerados en cierta medida dentro de las variables “uso del suelo” y “cobertura del suelo” en el modelo metodológico planteado para la determinación de las zonas potenciales de recarga hídrica.

Por otro lado, también se hace evidente al comparar los resultados granulométricos de laboratorio con los mostrados en el *Apéndice A*, que existe cierto desfase entre las clases texturales que resultan como consecuencia de la aplicación del método de Bouyoucos y las mostradas en la *Figura 8*, determinadas a través del método del

tacto. Por ello, debe recordarse que el método del tacto es un método un tanto subjetivo y que dentro de sus limitantes se encuentra una difícil discriminación entre el contenido de arcillas y limos de una muestra de suelo; mientras que al ser el método de Bouyoucos un método que estima la densidad de una muestra de suelo en suspensión, para determinar la proporción de partículas primarias, y cuya cuantificación es comparada con un triángulo textural elaborado para tal propósito; éste resulta ser un método cuyos resultados generan un mayor grado de certeza. Esto no significa que el método del tacto ofrezca resultados errados, sino que se trata de una discrepancia entre los métodos que el presente estudio no tiene por objeto resolver.

El mapa de textura del suelo considera una muestra por cada kilómetro cuadrado según lo recomendado por Rossiter (24), por lo que es de esperar variaciones en los resultados de textura al cambiar de ubicación geográfica, incluso si se trata de una misma área de muestreo. Por lo que, por ahora los resultados obtenidos del muestreo de campo y la aplicación del método del tacto para la determinación de la textura, y, los datos de velocidad de infiltración mostrados en el *Cuadro 18*, son los que participaron dentro de la estimación de la variable *Tipo de Suelo*, que contempla la ecuación para la determinación del potencial de recarga hídrica.

Los resultados de velocidad de infiltración obtenidos en los puntos muestreados – Ver *Apéndice A y Apéndice B, Figura (c)*–, dan como resultado la distribución de las áreas en función de esta variable, tal y como lo muestra el *Cuadro 19*.

**Cuadro 19. Resultados de velocidad de infiltración del suelo, obtenidos por el método Porchet; según rango de velocidad y según subcuenca a la que pertenecen; municipio de Chiquimula, 2009.**

INFILTRACIÓN BÁSICA	SUBCUENCA TACÓ		SUBCUENCA SHUSHO		AREA COMPLEMENTARIA		TOTAL AREA DE ESTUDIO	
	AREA (Ha)	AREA (%)	AREA (Ha)	AREA (%)	AREA (Ha)	AREA (%)	AREA (Ha)	AREA (%)
< 0.13 cm/hr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.13 - 2 cm/hr	142.92	1.22	2670.95	22.73	368.18	3.13	3182.05	27.08
2 - 12.7 cm/hr	1138.81	9.69	2146.82	18.27	244.66	2.08	3530.28	30.05
12.7 - 25 cm/hr	376.88	3.21	856.64	7.29	4.78	0.04	1238.31	10.54
> 25 cm/hr	972.92	8.28	2146.50	18.27	679.82	5.79	3799.24	32.33
<b>TOTALES</b>	<b>2631.53</b>	<b>22.40</b>	<b>7820.91</b>	<b>66.56</b>	<b>1297.44</b>	<b>11.04</b>	<b>11749.88</b>	<b>100.00</b>

FUENTE: Elaboración propia, 2009.

El *Cuadro 19* muestra que las zonas que presentan el mayor potencial de recarga, de acuerdo con lo expuesto en el marco teórico (infiltración básica mayor a 25 cm/h), comprenden más del 32% del área total de estudio, esto apunta a considerar a dichas áreas, como las mejores en cuanto a recarga hídrica se refiere.

Otra buena porción del territorio se encuentra entre el rango de 2 a 12.7 cm/hr de infiltración básica, el 30.05%, considerada como una velocidad de infiltración que

aporta un potencial medio a la recarga hídrica; mientras que el 27.08 % presenta un potencial bajo (0.13 a 2.00 cm/hr). Aunque es importante señalar que en toda el área de estudio ninguna porción del territorio mostró velocidades de infiltración básica muy bajas (< 0.13 cm/hr), valores que limitarían grandemente el movimiento de agua a través del suelo.

### 6.1.3. Geología

De acuerdo al mapa geológico 1:50,000 generado por el IGN, se pudo determinar que dentro del área de estudio existen cinco tipos diferentes de geología: Plutón de Chiquimula, Basaltos, Grupo Padre Miguel (que a su vez comprende tres subtipos), Aluvionales y Grupo Santa Rosa. Ver Apéndice B, figura (e).

La geología según tipo y según el área que ocupan dentro de cada una de las subcuencas se resume en el Cuadro 20.

**Cuadro 20. Tipos geológicos dentro del área de estudio, distribución según tipo y según subcuenca a la que pertenecen, municipio de Chiquimula.**

GEOLOGÍA	SUBCUENCA TACÓ		SUBCUENCA SHUSHO		AREA COMPLEMENTARIA		TOTAL AREA DE ESTUDIO	
	AREA (Ha)	AREA (%)	AREA (Ha)	AREA (%)	AREA (Ha)	AREA (%)	AREA (Ha)	AREA (%)
KTi	2026.93	17.251	3906.27	33.245	333.48	2.838	6266.67	53.334
Qb	230.90	1.965	2227.42	18.957	142.80	1.215	2601.11	22.137
Qal	200.49	1.706	440.77	3.751	821.17	6.989	1462.42	12.446
Psr	168.85	1.437	1132.51	9.638	0.00	0.000	1301.36	11.075
Tpmt	0.00	0.000	106.04	0.903	0.00	0.000	106.04	0.903
Tpma	1.10	0.009	7.35	0.063	0.00	0.000	8.45	0.072
Tpmb	1.68	0.014	0.45	0.004	0.00	0.000	2.14	0.018
Agua	1.64	0.014	0.09	0.001	0.00	0.000	1.74	0.015
<b>TOTALES</b>	<b>2631.59</b>	<b>22.397</b>	<b>7820.91</b>	<b>66.561</b>	<b>1297.44</b>	<b>11.042</b>	<b>11749.94</b>	<b>100.000</b>

FUENTE: Instituto Geográfico Nacional, mapa geológico 1:50,000; 1966.

Además de los datos obtenidos de la cartografía existente, se llevó a cabo un total de 64 observaciones de campo, a lo largo de los cortes de las principales carreteras y lechos de los ríos dentro del área de estudio. Como resultado fue posible realizar una descripción del estado de alteración del material geológico, de la manera más general posible; y al mismo tiempo extrapolando las condiciones encontradas en los puntos observados, para la totalidad del área que ocupa un determinado tipo de geología. Esta descripción se presenta a continuación.

#### **Plutón de Chiquimula –KTi–**

Un plutón es una masa de roca magmática que, procedente de grandes profundidades, se ha abierto paso entre las rocas suprayacentes, consolidándose luego antes de llegar a la

superficie. Un plutón forma una intrusión muy grande de hasta varios kilómetros, dentro de la roca encajante. La mayoría de las veces el magma se ha solidificado a profundidades de hasta 10 km, circunstancia a la cual se debe que sólo sean visibles en aquellos casos en que todo el manto de roca que los cubría ha sido eliminado por la erosión.

Las rocas plutónicas se han consolidado a partir de soluciones de roca fundida, llamado magma en el interior de la corteza terrestre, sin comunicación con el exterior y que han penetrado en otras rocas. Pueden penetrar en rocas sedimentarias, metamórficas o en otras rocas ígneas. Tienen los granos gruesos, están formados de cuarzo, feldespato y mica.

El plutón de Chiquimula comprende el 53.33% del área de estudio, y data del período Terciario y de la edad del Maestrichtiano-Paleoceno, se compone de gabbro, diorita, granodiorita, adamelita y en menor grado dellanita y aplita (14). Éstas son rocas ígneas intrusivas que varían en su composición en cuanto al contenido de silicatos que poseen, de tal forma que el gabbro posee menor contenido de silicatos y mayor contenido de magnesio y hierro, lo que significa que por lo general posee colores más oscuros; mientras que la diorita y la granodiorita se encuentran en un punto intermedio en cuanto al contenido de silicatos se refiere, de una forma similar varía su contenido de cuarzo. En cuanto a su textura están formadas por cristales iguales o mayores a 1 mm.

El gabbro es una roca de textura granítica de color oscuro, verde, gris oscuro o negro, se compone de: plagioclasa cálcica, auguita, piroxeno, y olivino, no hay cuarzo. Los gabros son menos abundantes, probablemente que las dioritas. Mientras que la diorita es una roca intermedia, de coloración oscura debido a la abundancia de minerales ferromagnesianos. De textura granuda y contiene minerales como: plagioclasa, feldespato alcalino, micas y cuarzo (escaso), con hornblenda o biotita



FIGURA 9. Plutones de Chiquimula. Cercanías de la aldea Shusho en Medio. Municipio de Chiquimula, 2009.

como principal constituyente oscuro. Las dioritas pasan a convertirse en gabros al disminuir el feldespato que contienen y aumentar los minerales ferromagnesianos, haciendo que la roca sea más oscura.

En cuanto a su distribución y nivel de alteración; el intrusivo presente en la cuenca del río Tacó, presentan un mayor grado de alteración tipo Lehm, lo cual indica que de la roca se has alterado diversos materiales, especialmente los feldespatos, en dónde las aristas de éstos se han perdido, provocando una fisuración en el contacto con los minerales de cuarzo y mica originando que los suelos del lugar contengan gran cantidad de arenas, esto es

especialmente obvio en la parte Sur y Sur-oeste de la subcueca de río Tacó. Mientras que en el resto del área que ocupa este tipo de geología las rocas se ven menos alteradas, aunque en general presentan un mayor grado de fracturas y fallas, esto podría favorecer la infiltración del agua durante las precipitaciones. En general se considera que los tipos de roca que forman el Plutón de Chiquimula presentan mediana permeabilidad al agua<sup>4</sup>, especialmente por la alteración que presenta, así como por el grado de fisuras y fracturas dentro de su estructura interna.

### **Basaltos –Qb–**

Son roca efusiva, cuyos componentes principales son la plagioclasa (labradorita-anortita), piroxeno y magnetita, y secundarios, olivino, hornblenda y biotita. Son de color negro a negro grisáceo, pardo negruzco; la roca es densa y con fractura concoidal con superficie áspera y matriz de grano muy fino, por lo general se distinguen poco los fenocristales de plagioclasa, piroxeno y olivino. Se origina a partir de magmas gabroides, apareciendo en corrientes de lava, en mantos (forma a menudo en ellos grandes columnas poligonales, originadas durante la consolidación), en troncos y filones.

Los basaltos, en su mayoría superficiales ocupan el 22.14% del área total y a diferencia de los plutones, esta es una roca ígnea extrusiva, esto significa que el magma que le dio origen sufrió de un enfriamiento rápido en la superficie terrestre, por lo que los cristales que los forman son finos y su color tiende a ser gris oscuro o negro.

De acuerdo al mapa geológico, los basaltos presentes en el área de estudio comprenden además de los basaltos en sí mismos (rocas de este tipo geológico de diversos tamaños); formaciones como los conos cineríticos y presencia de olivinos; los cuales datan del período cuaternario y de la edad del Pleistoceno y Reciente. La ubicación de los conos cineríticos revela el origen de los basaltos de la zona.



FIGURA 10. Basaltos vesiculares superficiales en los alrededores de la aldea El Pinalito, municipio de Chiquimula, 2009.

Según las observaciones hechas en campo, las zonas que pertenecen a este tipo geológico son principalmente tres; aunque existen algunas zonas pequeñas y dispersas. Dentro de las características a destacar sobre los basaltos en esta zona están; su condición de superficiales dentro de la mayor parte del área que ocupan, esto se explica ya que este material ígneo

<sup>4</sup> Cacao A. 2009. Ing. Geólogo, Msc. Universidad de Cádiz, España.

procede de varios conos cineríticos que durante el Terciario expulsaron material volcánico que corrió y cubrió los alrededores. Además, los tipos de basalto encontrados comprenden “porfirítico” y “vesicular”. Los porfiríticos presentan una matriz muy fina que prácticamente no deja espacio para la formación de poros en el material; mientras que los vesiculares presentan espacios claramente visibles en la roca y originados por la acumulación de gases durante el proceso de enfriamiento del magma, aunque éstos no presentan interconectividad.

En cuanto al estado de las rocas basálticas, esta se hayan bastante fracturadas en las áreas más alejadas de los conos cineríticos que les dieron origen, encontrándose fragmentos que van de unos cuantos centímetros hasta varios metros de diámetro (Figura 10); mientras que la roca muy cercana a los conos se encuentra fracturada en menor grado y formando bloques bastante grandes. Aunque en sí, los basaltos no tienden a formar poros interconectados, el grado de fractura de la roca podría ayudar a la infiltración del agua de lluvia a capas más profundas de la corteza terrestres y de esta forma alimentar a los acuíferos.

#### **Grupo Padre Miguel –Tpma, Tpmb, Tpmt–**

El material correspondiente al Grupo Padre Miguel que se encuentra dentro del área de estudio, comprende areniscas volcánicas, fluviales y lacustres –Tpma–; coladas y diques basálticos con depósitos tipo lahar –Tpmb–; y Tobas Felsíticas –Tpmt–. Este grupo corresponde únicamente al 0.10% del área total y su distribución se limita a 5 zonas geológicas muy pequeñas, comparadas con los otros tipos de geología; de estas zonas es el subtipo Tpmt el que posee mayor extensión (0.90% del área total).

Las tobas son rocas sedimentarias calcáreas, porosas y esponjosas, formadas por la precipitación y depósito del carbonato cálcico que llevan en solución las corrientes fluviales. También se aplica a los materiales volcánicos consolidados, formado por cenizas y arenas; como lo es en el caso de tobas felsíticas pertenecientes al tipo geológico Tpmt.

Estas formaciones pertenecen al período Terciario y a la época del Mioceno-paloceno. Este tipo de material geológico se compone en buena parte por cementación de



FIGURA 11. Rocas del grupo Padre Miguel que presentan un estado de fractura significativo. Subcuenca río Shusho, municipio de Chiquimula, 2009.

materiales más finos y erosionados de otras rocas, algunas de las rocas resultantes por su composición y contenido de arcillas (originadas principalmente de cenizas volcánicas) tienen la capacidad de expandirse hasta siete veces su volumen original al entrar en contacto con el agua, como es el caso del tipo T<sub>pm</sub>; por lo que se considera como un tipo de roca que absorbe y transmite muy bien el agua proveniente de las lluvias. Dicha capacidad de expansión y posterior contracción fractura el material, lo que facilita la entrada de agua en el suelo.

Otro de los tipos geológicos presentes (pertenecientes al grupo Padre Miguel), corresponde a las Tobas Felsíticas, rocas ígneas originadas a partir de cenizas volcánicas durante el mismo período y época que el grupo Padre Miguel. Este tipo de geología ocupa un área de 106.04 hectáreas, correspondiente al 0.90% del área total, la cual se extiende en las cercanías del caserío "Paso de Los Méndez" en el nor-este del área de estudio. Comparado con los tipos T<sub>pm</sub> y T<sub>pmb</sub>, las tobas felsíticas se consideran un tipo de geología con menor capacidad para transmitir el agua a través de la roca, y por tanto limitando la recarga hídrica de la zona en la que se extiende.

### **Aluvionales**

El aluvión es un material detrítico transportado y depositado transitoria o permanentemente por una corriente de agua, que puede ser repentina y provocar inundaciones, dicho material no consolidado puede estar compuesto por arena, grava, arcilla o limo.

Estos materiales se acumulan en los canales de las corrientes, en las planicies inundables y en los deltas. Mientras que otros pueden proceder de la sedimentación de lagos o estuarios que luego han desaparecido, este último parece ser el caso de los aluviones presentes en el área de estudio.<sup>5</sup>

Los aluviones ocupan prácticamente todo el valle de la ciudad de Chiquimula, corresponden a un 12.5% del área de estudio, pertenece al período Cuaternario y a la época del Pleistoceno y Reciente. Su composición incluye principalmente: gravas, arenas y lechos arcillosos interestratificados, que generalmente se disponen en capas formando horizontes en algunos casos muy bien diferenciados; lo cual se debe al origen de su formación; es decir, la acumulación de materiales erosionados de las formaciones



FIGURA 12. Aluvionales del valle de la ciudad de Chiquimula, Municipio de Chiquimula, 2009.

<sup>5</sup> Leytán A. L. 2009. Ingeniero Geólogo.

montañosas circundantes y cuyo origen es más antiguo.

*Este tipo de formación geológica (especialmente en las áreas con gran cantidad de arenas y gravas) posibilita la existencia de acuíferos dentríticos, ya que la arenas y grabas permiten la formación de un material geológico con porosidad efectiva (es decir que permiten el flujo de agua a través del material). Por lo tanto, los aluviones poseen una gran capacidad para captar y almacenar el agua de lluvia, y son una de las formaciones geológicas más importantes para la alimentación de los acuíferos que utiliza la ciudad de Chiquimula para abastecerse de agua.*

### **Grupo Santa Rosa**

*Este grupo pertenece a las rocas metamórficas y comprende: filitas, esquistos y en menor grado cuarzita y gneis; ocupa el 11.08% del área. Estas rocas datan posiblemente del período Pensilvánico. En este grupo geológico predominan los esquistos y las filitas, y durante las observaciones este hecho fue evidente.*

*Los esquistos constituyen un grupo de rocas metamórficas de grado medio, notables principalmente por la preponderancia de minerales laminares tales como la mica, la clorita, el talco, la hornblenda, grafito y otros. El cuarzo se halla con frecuencia en granos estirados hasta al extremo que se produce una forma particular llamada cuarzo esquisto. Por definición, el esquisto contiene más de un 50% de minerales planos y alargados, a menudo finamente intercalado con cuarzo y feldespatos.*

*En el esquisto los granos minerales individuales, alargados hasta formar escamas por el calor y la presión, pueden verse a simple vista. El esquisto está característicamente foliado, lo que quiere decir que los granos de minerales individuales pueden separarse fácilmente en escamas o láminas. Ciertos esquistos proceden de rocas ígneas de grano fino como basaltos y tobas. La mayoría de los esquistos son de mica, aunque también son frecuentes los de grafito y clorita.*

*La filita es una roca metamórfica micácea, de grano fino, constituida por moscovita, sericita, clorita y cuarzo. Se reconoce fácilmente por su estructura laminar planar u ondulada, producida por la orientación de filosilicatos, y su textura de grano muy fino, no visible a simple vista. Las superficies poseen un brillo sedoso, a veces muy característico, y tacto untuoso, semejante al del talco. Se laja*



FIGURA 13. Esquistos fracturados del grupo Santa Rosa, en la parte alta de la subcuenca del río Shusho. Municipio de Chiquimula, 2009.

*fácilmente y es relativamente poco coherente. Su color es variable; gris, gris-verdoso, gris-azulado, violeta e incluso marrón o rojizo.*

*Dentro del área de estudio, el estado de la roca se presenta en su mayoría fracturada a muy fracturada, además se debe recordar que estos tipos de roca por su naturaleza y composición, tienden a ser materiales bastante frágiles, lo que posiblemente haya facilitado la fractura del material. Las filitas se componen principalmente de cuarzo, mica sericítica y clorita; y formada como producto del metamorfismo de contacto de los esquistos.*

*Las rocas metamórficas como los esquistos y las filitas son rocas con diferentes grados de metamorfismo, y poseen una apariencia fólida; es decir que, están formados por la aglomeración de finas hojas de material unidas entre sí, que tienden a fracturarse en láminas de diferente tamaño.*

*Comparado con los tipos geológicos descritos, este tipo de geología presenta un flujo efectivo de agua bastante limitado, llegándose a considerar como un material de muy poca permeabilidad.*

Una vez descritos los tipos de geología, presentes en el área de estudio, se pueden mencionar algunas de las comparaciones hechas en el *Cuadro 20*. Un hecho a resaltar es que en el *área complementaria* se ubica la mayor porción de los tipos geológicos que posee una mejor capacidad para facilitar la recarga hídrica, estos son los aluviones; más de 333 hectáreas de terreno pertenecen a este tipo geológico. Así mismo, posee otros tipos geológicos que se consideran como medianamente capaces de favorecer la recarga, éstos son los basaltos por su grado de fractura, y los plutones por su grado de alteración. En cuanto a las subcuencas Tacó y Shusho, los tipos geológicos dominantes (KTi, Qb) manifiestan una capacidad de recarga un tanto moderada y en cierta medida potenciada levemente por el grado de fractura del material presente. Este comportamiento se mantiene al considerar el área de estudio en toda su extensión, ya que los tipos geológicos KTi y Qb siguen ocupando la mayor proporción de toda el área bajo estudio; por lo que, en cuanto a la geología se podría esperar que estos tipos se definieran como zonas con un potencial moderado para la recarga hídrica.

#### **6.1.4. Uso del suelo**

Los resultados del proceso de actualización del mapa de uso de la tierra al año 2006, se aprecian en la *Figura 14*; y los datos comparativos en cuanto tipo de uso y subcuenca a la que pertenecen se pueden apreciar en el *Cuadro 21*.

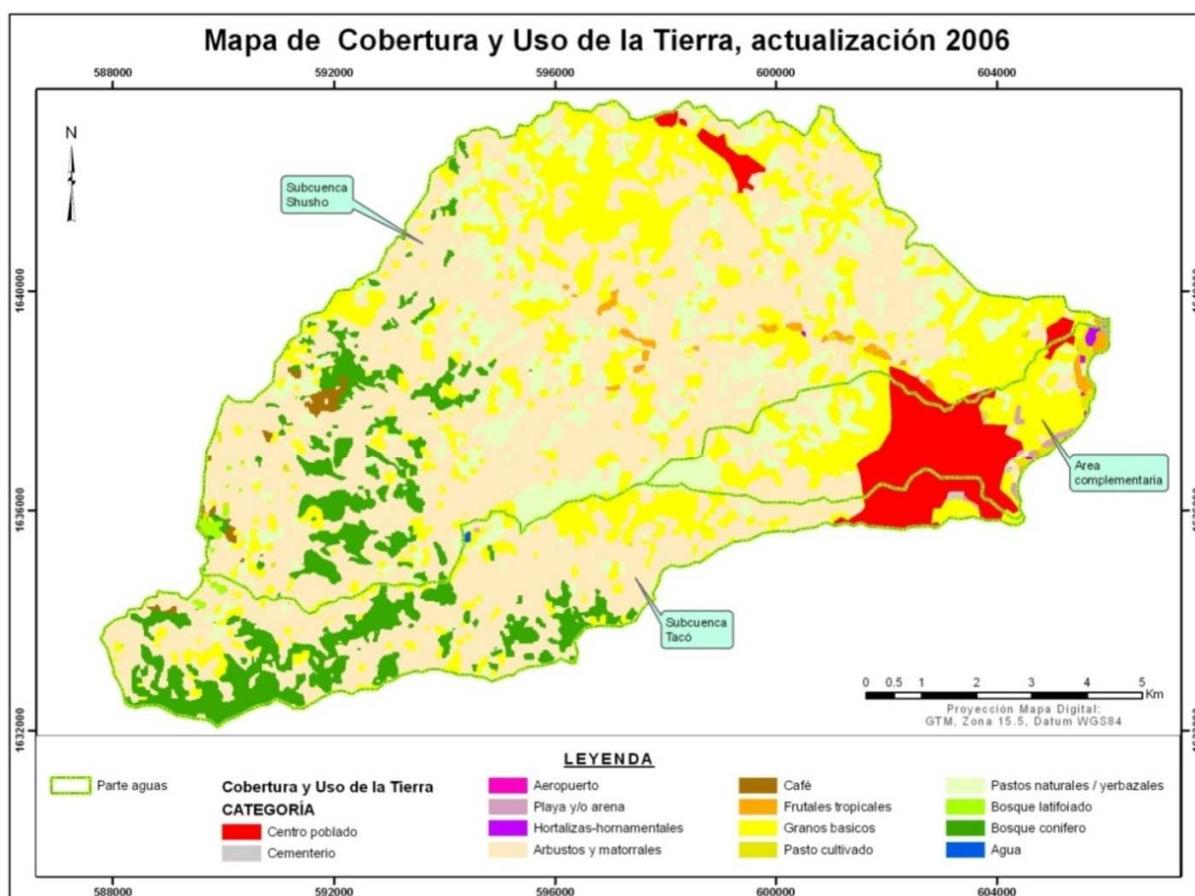


FIGURA 14. Mapa de cobertura vegetal y uso de la tierra, actualizado al año 2006 a través de interpretación de imágenes de satélite. Área de estudio, municipio de Chiquimula.

**Cuadro 21. Distribución de la cobertura vegetal y uso de la tierra para el año 2006, según tipo de uso y subcuenca dentro del área de estudio, municipio de Chiquimula.**

TIPO DE USO	SUBCUENCA TACÓ		SUBCUENCA SHUSHO		ÁREA COMPLEMENTARIA		TOTAL ÁREA DE ESTUDIO	
	ÁREA (Ha)	ÁREA (%)	ÁREA (Ha)	ÁREA (%)	ÁREA (Ha)	ÁREA (%)	ÁREA (Ha)	ÁREA (%)
Centro poblado	157.38	1.34	104.97	0.89	369.34	3.14	631.69	5.38
Aeropuerto	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.0001
Cementerio	4.19	0.04	0.00	0.00	1.26	0.01	5.45	0.05
Playa y/o arena	3.14	0.03	2.42	0.02	21.09	0.18	26.66	0.23
Granos básicos	408.59	3.48	1827.93	15.56	424.77	3.62	2661.29	22.65
Hortalizas-hornamentales	0.00	0.00	0.98	0.01	9.48	0.08	10.45	0.09
Arbustos y matorrales	1409.45	12.00	4226.25	35.97	217.17	1.85	5852.87	49.81
Café	3.73	0.03	41.66	0.35	0.00	0.00	45.39	0.39
Frutales tropicales	0.00	0.00	49.05	0.42	25.70	0.22	74.75	0.64
Pasto cultivado	1.46	0.01	13.57	0.12	27.40	0.23	42.43	0.36
Pastos naturales y/o yerbazaes	96.90	0.82	1118.44	9.52	201.24	1.71	1416.58	12.06
Bosque conífero	536.84	4.57	419.48	3.57	0.00	0.00	956.31	8.14
Bosque latifoliado	7.46	0.06	15.98	0.14	0.00	0.00	23.44	0.20
Cuerpo de gua	2.37	0.02	0.17	0.00	0.00	0.00	2.54	0.02
<b>TOTALES</b>	<b>2631.52</b>	<b>22.396</b>	<b>7820.90</b>	<b>66.562</b>	<b>1297.44</b>	<b>11.042</b>	<b>11749.86</b>	<b>100.00</b>

FUENTE: Elaboración propia, 2009.

Las categorías utilizadas durante el proceso de actualización del mapa de uso de la tierra presentadas en el Cuadro 21, fueron establecidas tal y como lo hace el mapa de "Cobertura Vegetal y Uso de la Tierra" elaborado por el MAGA en 2003.

De los datos mostrados en la *Figura 14* y el *Cuadro 21*, lo más importante a considerar son aquellos tipos de uso que favorecen la capacidad natural del suelo para facilitar la infiltración del agua de lluvia. Entre los principales tipos de uso que promueven esta capacidad se encuentran los bosques, por el grado de cobertura que proveen, los sistemas agroforestales o agricultura de cultivos permanentes, como los frutales y el cultivo de café; y los pastos y matorrales que por su sistema radicular profuso, alteran la estructura de los suelos pesados y permite una entrada más rápida de agua en el suelo.

Dentro de la subcuencas que forman el área de estudio, el río Tacó posee la mayor área de bosque (sin hacer distinción entre bosque conífero y latifoliado) con un 4.63% del área total, le sigue la subcuenca del río Shusho con 3.71%; mientras que en el área complementaria prácticamente no existe ningún tipo de bosque –aunque se debe hacer la aclaración de que una parte de lo clasificado como “Arbustos y matorrales” corresponde al bosque seco de la región y que debido a las limitaciones intrínsecas de la metodología empleada no fue posible identificarlo como un tipo de uso diferente, aunque sí lo que domina en ésta última área es la zona urbana de la Ciudad de Chiquimula.

Al observar los resultados en la columna de “TOTAL AREA DE ESTUDIO” es evidente que el tipo de uso predominante es el de “Arbustos y matorrales”, cubriendo el 49.81%, esta dominancia se explica ya que la mayoría de tierras son utilizadas para el cultivo de granos básicos, seguido por un período de barbecho sin manejo, o para la extracción de leña como fuente de energía en los hogares rurales; lo que genera áreas cubiertas por especies arbustivas y en algunos casos en espera de un uso diferente que las releve.

Otro de los usos predominantes corresponde a los granos básicos (categoría que incluye el cultivo de maíz, frijol y manía), el cual ocupa un 22.65% del área; este tipo de uso podría considerarse como un uso que favorece muy poco la recarga hídrica, por dos hechos relevantes: el primero, la mayoría de este tipo de cultivos (a excepción de la manía) se desarrolla sobre las laderas de las montañas y como se muestra en el *Cuadro 16*, una buena parte del área tiende a ser escarpada; por lo que, la agricultura limpia favorece una escorrentía mucho más rápida. El segundo, hace referencia a la escasa aplicación de medidas de conservación de suelo, aunque la práctica de establecer los cultivos siguiendo el nivel del terreno es universal; otras prácticas más elaboradas como la construcción de terrazas no son aplicadas.

Por último, los pastos naturales, áreas que los residentes utilizan para el pastoreo de ganado bovino, y aunque algunos autores afirman que las áreas cubiertas con pastos

pueden favorecer la infiltración del agua en el suelo a un nivel que pueden incluso compararse con áreas cubiertas con bosque, debido a la abundancia de su sistema radicular; el hecho que sean utilizadas como áreas de pastoreo reduce su capacidad de absorción, principalmente porque la quema de éstas áreas es una práctica común; lo que implica que el suelo se encontrará descubierto durante las primeras lluvias de cada año.

### 6.1.5. Cobertura vegetal

Se considera como cobertura vegetal al porcentaje de una unidad de terreno que posee vegetación permanente. Como cobertura vegetal permanente se consideraron los tipos de uso: arbustos y matorrales, frutales tropicales, café y bosques coníferos y latifoliados.

Los resultados del cálculo del porcentaje de cobertura permanente se resumen en el *Cuadro 22*.

**Cuadro 22. Cobertura vegetal permanente según porcentaje y según subcuenca dentro del área de estudio, municipio de Chiquimula.**

COBERTURA	SUBCUENCA TACÓ		SUBCUENCA SHUSHO		AREA COMPLEMENTARIA		TOTAL AREA DE ESTUDIO	
	AREA (Ha)	AREA (%)	AREA (Ha)	AREA (%)	AREA (Ha)	AREA (%)	AREA (Ha)	AREA (%)
< 30 %	300.19	2.55	810.44	6.90	871.95	7.42	1982.57	16.87
30 - 50 %	22.83	0.19	1030.21	8.77	131.99	1.12	1185.03	10.09
50 - 70 %	460.95	3.92	3051.52	25.97	267.25	2.27	3779.72	32.17
70 - 80 %	260.30	2.22	686.93	5.85	5.02	0.04	952.25	8.10
> 80 %	1587.26	13.51	2241.81	19.08	21.24	0.18	3850.31	32.77
<b>TOTALES</b>	<b>2631.53</b>	<b>22.40</b>	<b>7820.91</b>	<b>66.56</b>	<b>1297.44</b>	<b>11.04</b>	<b>11749.88</b>	<b>100.00</b>

FUENTE: Elaboración propia, 2009.

En relación a la recarga hídrica, entre mayor sea el porcentaje de cobertura vegetal mayor será la posibilidad de recarga, por tanto los datos más relevantes los constituyen aquellas áreas que posee más del 80% de cobertura vegetal. Tal como lo muestra el *Cuadro 22*, éstas áreas comprenden el 32.77% de toda el área de estudio, dicho porcentaje lo aportan la subcuentas de los ríos Tacó y Shusho, mientras que el *área complementaria*, prácticamente no tiene participación en este resultado. Dentro de las subcuencas el mayor porcentaje de cobertura se concentran en las partes más altas. La distribución de estas zonas puede apreciarse en el *Apéndice B, figura (g)*.

El comportamiento en cuanto a la distribución de las zonas con mayor porcentaje de cobertura vegetal permanente, se puede explicar por dos condiciones claves que participaron en el cálculo. La primera, relacionada con las unidades de terreno

utilizadas como unidades de mapeo para el cálculo (consideradas como 100% de área), ya que la generación de estas unidades dio como resultado unidades relativamente pequeñas y abundantes en las partes altas; lo que favoreció que las unidades de mapeo fuesen cubiertas en mayor proporción por la vegetación permanente circundante (el porcentaje de cobertura se determinó en base a la razón: *área cubierta/área total*, para cada unidad de mapeo). La segunda condición es el hecho que en estas partes de las subcuencas es en dónde se concentran los bosques, los que por supuesto se consideran como cobertura permanente.

Así mismo, un tercio del área, el 32.17%, se encuentra en el rango de cobertura entre 50 a 70%, resultado generado principalmente por la distribución de las zonas cuya cobertura permanente corresponde principalmente a los arbustos y matorrales. Lo que hace suponer en este punto que en cuanto al nivel de cobertura del suelo, estas zonas generan un potencial medio de recarga hídrica.

En el *área complementaria*, la mayor parte del territorio se encuentra por debajo del 30% de cobertura; este fenómeno es claramente comprensible, ya que es en esta zona en donde se desarrolla la ciudad de Chiquimula, lo que implica una mayor presión sobre los recursos naturales, principalmente para la extensión de las zonas urbanas e industriales.

## **6.2. Modelo automatizado para el procesamiento de datos requeridos para la aplicación de la ecuación de recarga hídrica**

Este modelo fue generado utilizando la aplicación Model Builder de ArcGIS 9.1. El modelo de procesamiento de datos en forma gráfica se presenta en la *Figura 15*, la cual aparece en la siguiente página.

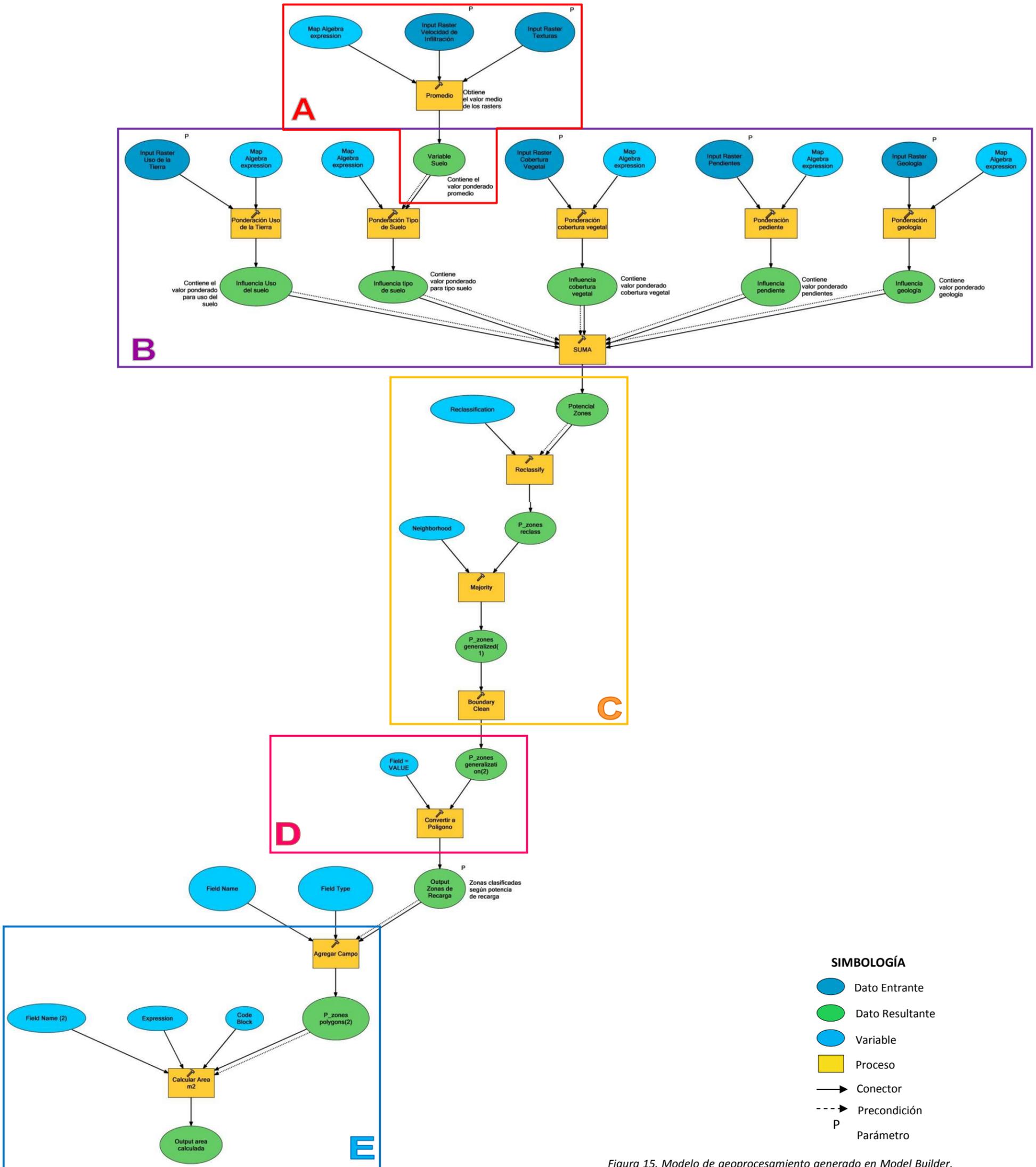


Figura 15. Modelo de geoprocesamiento generado en Model Builder, para la determinación del potencial de recarga hídrica.

El procesamiento en cada uno de los apartados, se describe a continuación:

- A. Las capas raster conteniendo los valores ponderados (entre 1 y 5) para las variables *velocidad de infiltración* y *textura*, son sumadas y luego el valor resultante se divide entre dos (2), con el propósito de obtener un valor promedio, que conforma la capa raster *Tipo de suelo*.
- B. La ecuación de *Recarga Hídrica* es aplicada a través del álgebra de mapas, para combinar las variables: *tipo de suelo*, *pendientes*, *geología*, *uso del suelo* y *cobertura vegetal*; dando como resultado un nuevo raster, con valores que podrían estar entre 0.75 y 5.00, este valor representa el potencial de recarga hídrica para cada una de las celdas.
- C. Se realiza un proceso de reclasificación, para agrupar los valores resultantes del proceso anterior, en cinco rangos, de acuerdo a lo expuesto en el *Cuadro 15*, seguidamente se aplica un proceso de generalización de los datos reclasificados, de tal forma que el área mínima a representar en el mapa equivale a un círculo de radio equivalente a 10 hectáreas. Este proceso incluye un remuestreo de acuerdo a la mayoría de celdas circundantes seguido de un remuestreo para la eliminación de celdas vacías. De esto se obtiene una nueva capa raster con las zonas de recarga hídrica, en la cual las zonas muy pequeñas han sido removidas.
- D. El raster resultante del proceso de generalización es convertido a polígonos para hacer posible calcular las áreas. Los polígonos son salvados en un shapefile.
- E. Por último, a la tabla de atributos del nuevo shapefile le es agregado un nuevo campo con el nombre [Area\_m2] en el cual se calcula el área en metros cuadrados para cada polígono generado. El producto final resultante es un archivo tipo shapefile que muestra las zonas de recarga hídrica, en función de su potencial y el área que cada una ocupa, en toda la extensión de los datos ingresados al inicio del modelo.

Como resultado de la generación de este modelo, fue creada la herramienta de geoprocésamiento "Recarga Hídrica", la cual permitirá aplicar este modelo a cualquier otra zona geográfica que se desee, siempre y cuando se cuenten con los datos necesarios. El *Apéndice E* presenta un instructivo para la instalación y uso de la herramienta mencionada, a través de ArcGIS 9.x.

### 6.3. Identificación y descripción de las zonas potenciales de recarga hídrica

Una vez obtenidos todos los datos de campo, fue ejecutado el modelo presentado en la *Figura 15*; y como resultado se determinaron las zonas de recarga hídrica según su potencial. Los resultados de este proceso se presentan en la *Figura 16* y en el *Cuadro 23*.

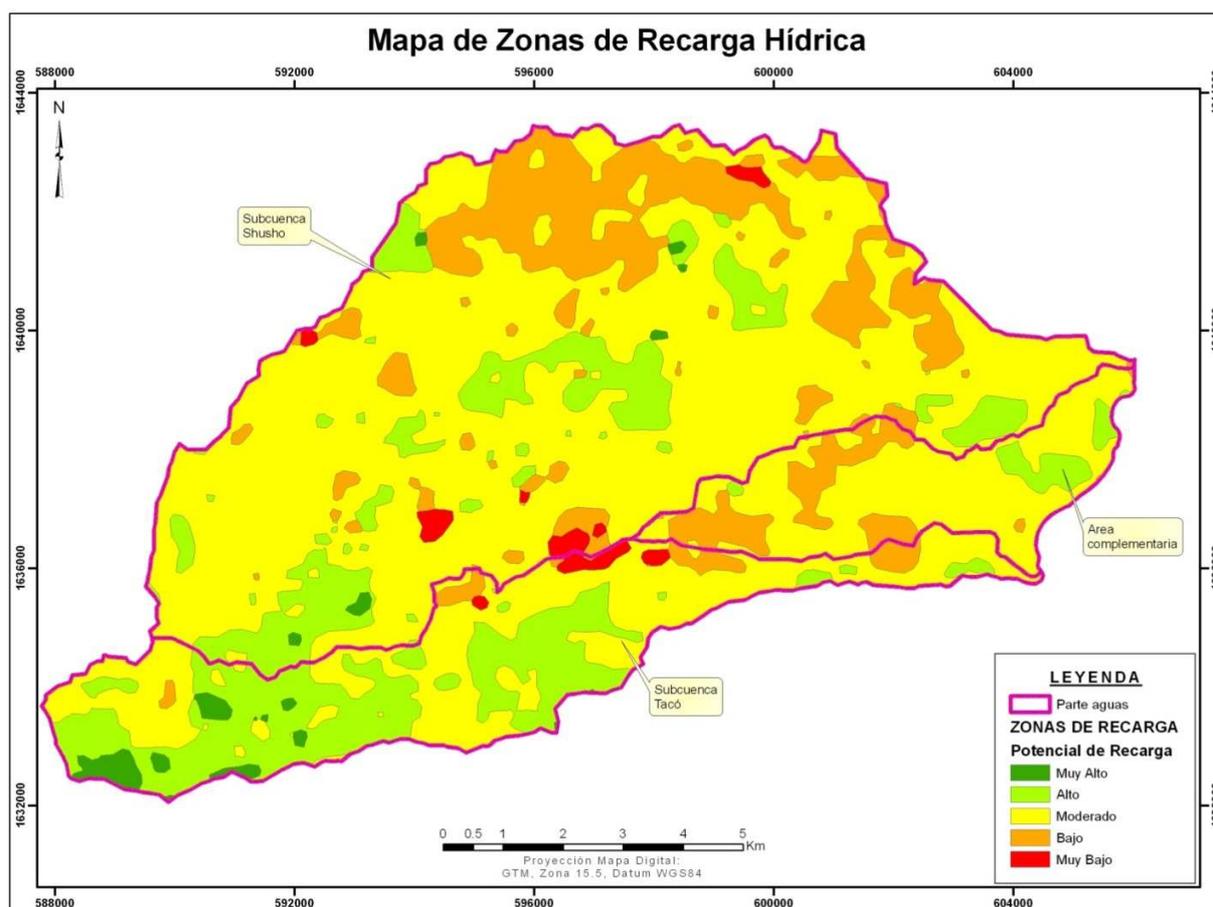


FIGURA 16. Mapa de zonas de recarga hídrica, según la ecuación de recarga hídrica planteada, subcuencas de los ríos Tacó, Shusho y Sasmó; municipio de Chiquimula, 2009.

Cuadro 23. Distribución de zonas de recarga hídrica según potencial de recarga, y, según subcuenca en la que se ubican; municipio de Chiquimula.

POTENCIA DE RECARGA	SUBCUENCA TACÓ		SUBCUENCA SHUSHO		AREA COMPLEMENTARIA		TOTAL AREA DE ESTUDIO	
	AREA (Ha)	AREA (%)	AREA (Ha)	AREA (%)	AREA (Ha)	AREA (%)	AREA (Ha)	AREA (%)
Muy Alto	105.61	0.90	29.05	0.25	0.00	0.00	134.66	1.15
Alto	1079.31	9.19	965.89	8.22	104.95	0.89	2150.15	18.30
Moderado	1287.57	10.96	5411.61	46.06	914.43	7.78	7613.60	64.80
Bajo	112.93	0.96	1334.33	11.36	278.07	2.37	1725.32	14.68
Muy Bajo	46.18	0.39	80.03	0.68	0.00	0.00	126.21	1.07
<b>TOTALES</b>	<b>2631.59</b>	<b>22.40</b>	<b>7820.91</b>	<b>66.56</b>	<b>1297.44</b>	<b>11.04</b>	<b>11749.94</b>	<b>100.00</b>

FUENTE: Elaboración propia, 2009.

Las zonas con un potencial *muy alto*, resultan se caracterizan por un uso del suelo y cobertura bastante buenos (áreas con bosques de pino), suelos con texturas gruesas e infiltración rápida, lo que maximiza su potencial y éste supera el inconveniente de lo escarpado de las pendientes del lugar. Aunque el total de estas zonas es una pequeña porción del territorio, el 1.15%; más de la mitad de las áreas pertenecen a la subcuenca del río Tacó; la subcuenca Shusho apenas aporta territorio a estas zonas, mientras que en el *área complementaria* no existen zonas con este potencial de recarga.

Las zonas clasificadas con un potencial *Alto*, abarcan el 18.30%, estas se encuentran dispersas dentro de las subcuencas bajo estudio, pero es la subcuenca del río Tacó quien presenta una mayor porción de territorio.

Un total de 7613.60 Ha o el 64.80% posee un potencial de recarga *Moderado*, lo que indica que en general, el peso que las variables involucradas adquieren en estas zonas, influyen de una manera significativa con el componente hidrológico. Mientras que, el 14.68% del área total tiene un potencial de recarga *Bajo*, y en este caso son las subcuencas de los ríos Susho y Sasmó quienes aportan más territorio bajo esta clasificación.

Por último, el 1.07% del área en estudio posee un potencial muy bajo de recarga hídrica, una porción muy pequeña, lo que en general es favorable para los acuíferos del área. Estas zonas que aparecen en rojo en la *Figura 16*, se ubican dentro de las dos subcuencas más grandes. Un análisis más detallado de las variables que dan origen a estas zonas poco deseables revela que, para este caso en particular, la combinación de: poca cobertura vegetal, una baja velocidad de infiltración y la prevalencia de texturas finas de los suelos (con alto contenido de arcillas); provoca que el potencial de recarga de estas zonas se reduzca grandemente. Aún cuando, no tengan en común el mismo uso del suelo (los usos varían entre *pastos naturales o yerbazales*, y *centros poblados*), y la pendiente se encuentre entre los valores medios de 15 a 45%.

El área que ocupa la ciudad de Chiquimula, a pesar de generar condiciones desfavorables para la recarga hídrica, entre ellas la impermeabilización del suelo generado por las construcciones, aún arroja un resultado *moderado* como potencial de recarga, lo que lleva a pensar que su potencial fue en algún momento mucho mayor, especialmente por los aluviones que forman parte del componente geológico de esta zona.

Una de la utilidades de la identificación de las zonas de recarga hídrica, la constituye el asociar éstas con los acuíferos superficiales (surgencias) a fin de poder inferir sobre la relación que existe entre las surgencias y sus posibles zonas de recarga. La *Figura 17*, muestra las surgencias, identificadas durante la fase de campo, en contraposición con las

zonas de recarga resultantes. Al observar esta figura detenidamente, puede notarse que algunas de las surgencias aparecen sobre o en las cercanías de las zonas con un potencial de recarga *alto*, lo que lleva a pensar que son éstas áreas las que alimentan los acuíferos, que luego son descargados a través de ellas; de esto también se deriva que si se desea realizar alguna medida de protección para estas surgencias, los esfuerzos deberían enfocarse en las áreas circundantes que posean el mejor potencial de recarga hídrica.

Otro enfoque importante, es el evaluar el impacto que focos de contaminación, como el basureo municipal de Chiquimula (*Figura 17*), tienen sobre los recursos hídricos, si es que este se encontrara en una zona con un potencial de recarga que facilitara la percolación de compuestos tóxicos y la posterior contaminación de los acuíferos de las cercanías. Como es posible apreciar en la *Figura 17*, el basurero municipal se ubica en una zona con un potencial moderado y muy cerca de una surgencia que alimenta uno de los ramales del río Shusho, por lo que la posibilidad de que este foco de contaminación provoque daños considerables a los ecosistemas naturales y humanos, debe ser tomada muy en serio.

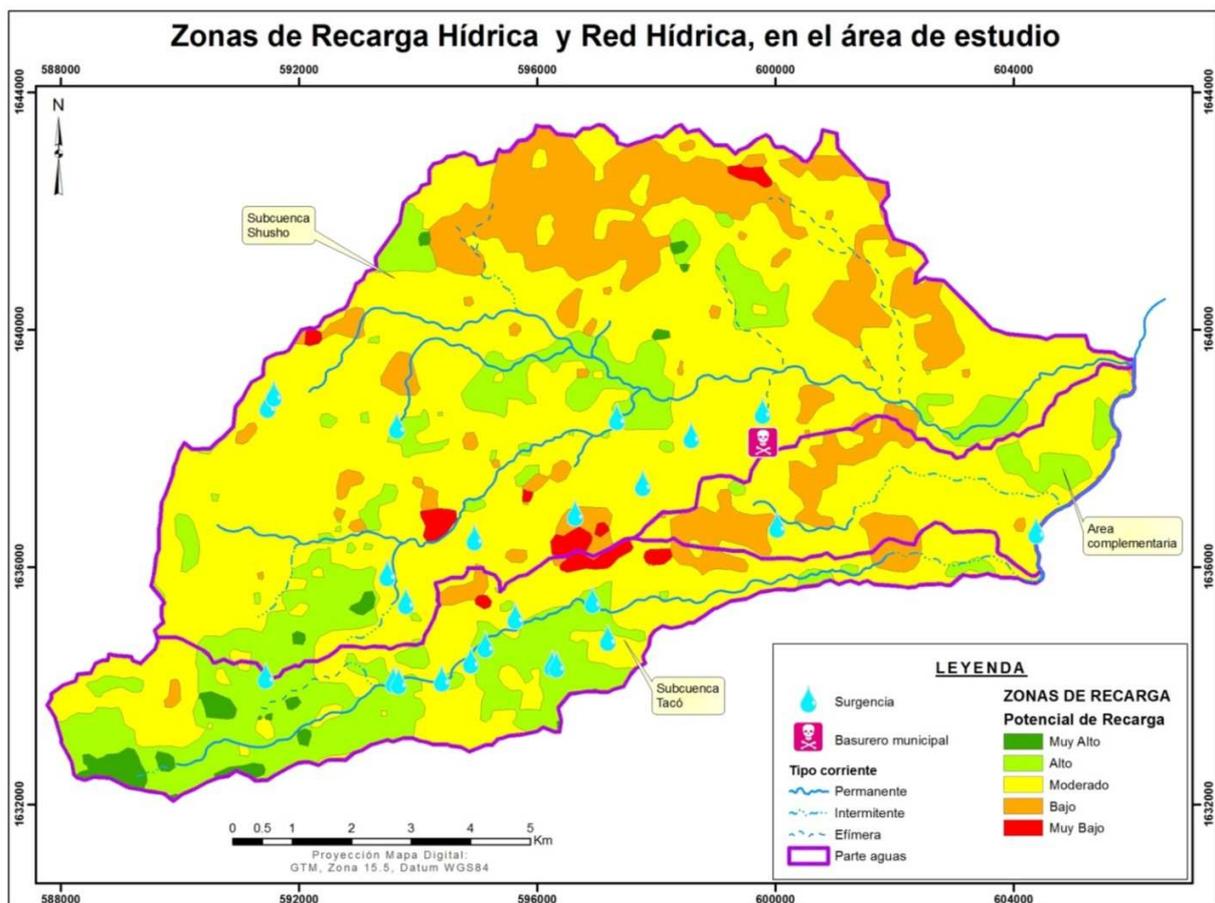


FIGURA 17. Zonas de recarga hídrica en comparación con la red hídrica y surgencias de las subcuencas de los ríos Tacó, Shusho y Sasmó; municipio de Chiquimula, 2009.

Al analizar detenidamente el mapa de la *Figura 17*, se nota que las surgencias tienden a concentrarse en la parte media de la subcuenca del río Tacó y en la parte sur de la subcuenca del río Shusho; esto concuerda con la distribución de zonas con un alto y muy alto potencial de recarga hídrica, ya que es de esperar que en las cercanías de este tipo de zonas de recarga exista a la vez descarga de la mismas, evidenciando así el comportamiento hidrológico de las subcuencas bajo estudio.

#### 6.4. Escenarios

La generación de un modelo automatizado para el procesamiento de los datos de las variables que intervienen en el potencial de recarga hídrica, tal y como fue presentado en el apartado 6.2, facilita la ejecución de este modelo de análisis espacial, haciendo pequeñas variaciones en los valores de entrada; lo que permite el planteamiento de escenarios en los cuales ciertas condiciones relacionadas con las variables que determinan el potencial de recarga variarían favorable o desfavorablemente, o el impacto que la aplicación de ciertas medidas, con el objetivo de mejorar la recarga hídrica de los suelos, tendrían en un futuro mediato o distante.

Para ilustrar la utilidad de la automatización del procesamiento de datos, dos ejemplos se exponen a continuación:

##### a. Escenario I

Las comunidades que se ubican dentro del área de estudio (*Ver Apéndice C*), generan presión sobre los recursos naturales, una de las presiones más importantes es generada por la demanda de tierras para la agricultura y la ganadería, principales actividades cuyo impacto se ve acentuado por la siempre creciente población en las zonas rurales. Por tanto, este fenómeno conocido como “avance de la frontera agrícola” es la principal amenaza para la cobertura forestal existente.

Uno de los escenarios de interés es determinar el impacto que tendría la desaparición de la cobertura forestal actual (año 2006), sobre la recarga hídrica del área. Para obtener los resultados de este escenario, el mapa de uso de la tierra fue modificado; y las áreas clasificadas como: bosque conífero, bosque latifoliado y mixto; fueron cambiadas por un uso de *granos básicos*, considerando que este cambio sería el más probable. Con lo cual el valor para la variable de uso del suelo baja de 5.00 a 2.00; esto también afecta la cobertura del suelo, por lo que un nuevo cálculo fue necesario.

Una vez modificados los datos de entrada en el modelo, el resultado de ejecutarlo bajo las condiciones explicadas anteriormente se presenta en la *Figura 18*.

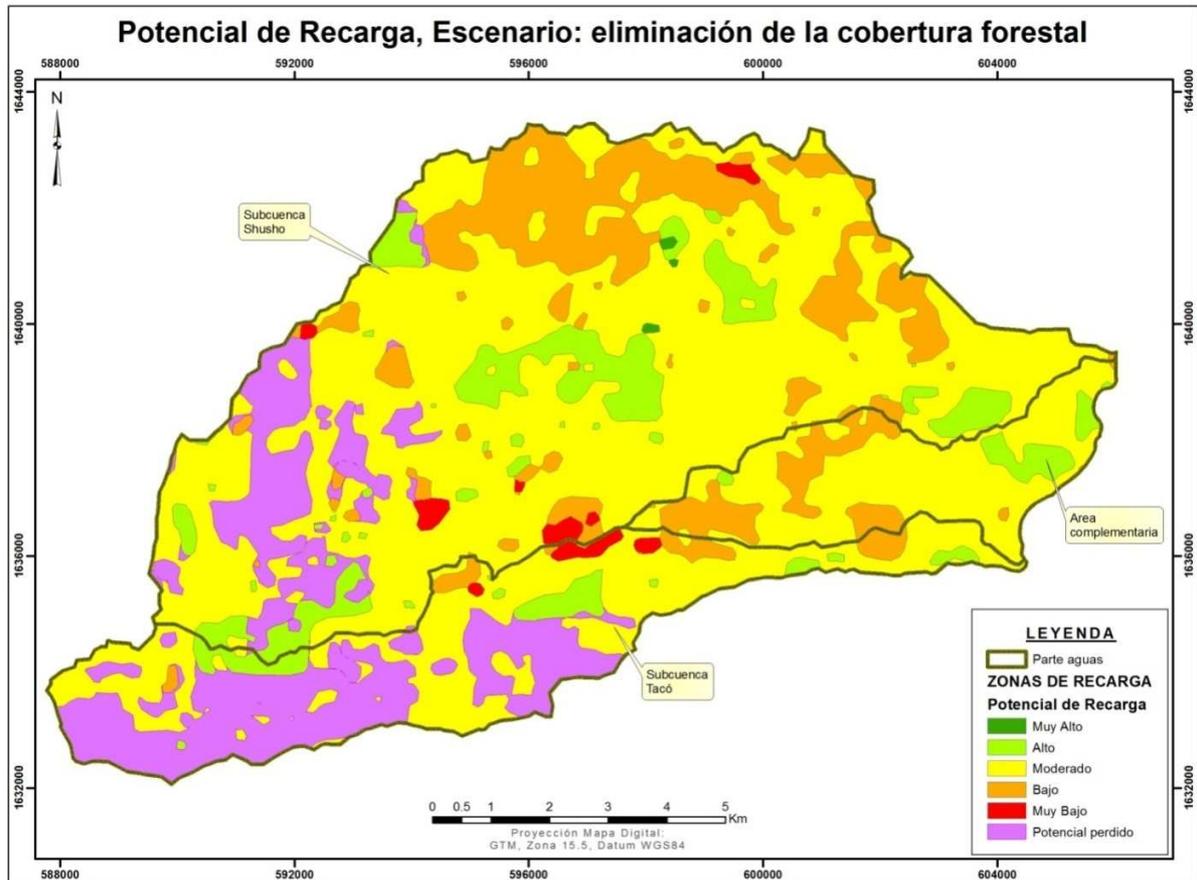


FIGURA 18. Escenario I. Pérdida de la cobertura forestal dentro de las subcuencas de los ríos Tacó y Shusho, a causa del avance de la frontera agrícola. Municipio de Chiquimula. 2009.

La *Figura 18* muestra que este escenario provoca que el potencial de recarga hídrica se reduzca en un área de 1755.42 Ha, lo que equivale al 14.93% del área total. El área con potencial perdido supera el área boscosa eliminada, esto se explica por la interacción que existe entre las variables de *uso de la tierra* y *cobertura del suelo* del modelo metodológico utilizado.

De este resultado se puede concluir que la conservación y protección de los bosques existentes debe ser una medida prioritaria a poner en práctica, ya que su efecto sobre el potencial de recarga es evidentemente significativo.

## b. Escenario II

En este escenario se plantea el impacto que tendría la recuperación de la cobertura forestal sobre las zonas que originalmente poseen un potencial moderado de recarga

hídrica, con el objetivo de determinar en qué áreas el potencial de recarga se ve favorecido por contar con un uso y una cobertura del suelo diferente.

Para esto, el uso del suelo dentro de las zonas que resultaron con un potencial *moderado*, fue cambiado a “bosque”, así mismo el porcentaje de cobertura del suelo fue nuevamente calculado; asumiendo que el bosque ya hubiera alcanzado una edad suficiente para proporcionar una cobertura de más de 80% del suelo, entre 10 y 15 años de edad.

Como resultado de la introducción de estas modificaciones, se obtienen los resultados mostrados en la *Figura 19*.

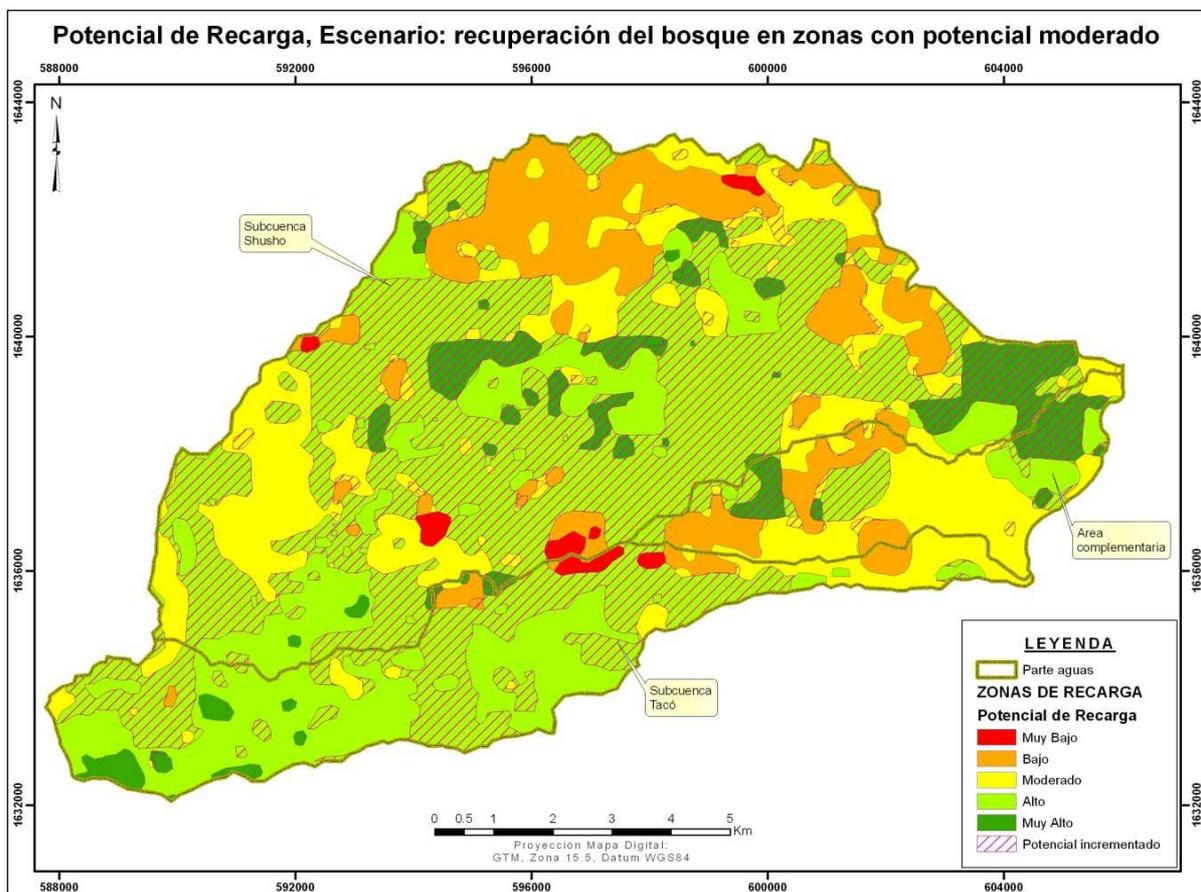


FIGURA 19. Escenario II. Impacto de la recuperación del área boscosa, en todas las áreas actualmente identificadas como con un potencial “moderado” sobre de recarga hídrica. Municipio de Chiquimula. 2009.

El resultado de este escenario es el incremento del potencial de recarga en más del 72% del área originalmente con un potencial *moderado*; lo que equivale a 5,536.55 Ha. Además, se hace evidente que el resto del área, el 28%, no ha sufrido mejora alguna, por lo que si se tomara la decisión de emprender proyectos de reforestación en estas zonas, los esfuerzos deben enfocarse en el área que muestran un efecto favorable al modificar

las condiciones de cobertura y uso del suelo. Por lo que, plantear un escenario de este tipo, permite evaluar de antemano el impacto ambiental que para con la recarga hídrica, generarían proyectos de reforestación; mucho antes de que se haya plantado el primer árbol. Lo que se traduce en inversiones más seguras y mucho más acertadas, de los recursos que se destinen para tales propósitos.

#### **6.5. Lineamientos generales para el manejo y conservación de las zonas de recarga hídrica, dentro de las subcuencas de los ríos Tacó, Shusho y Sasmó**

Los cinco tipos de zonas de recarga hídrica identificados, presentan algunas condiciones distintas y otras compartidas entre sí, en cuanto, a qué las definen dentro de cada tipo de clasificación. Las zonas con un potencial *Muy Alto* y *Alto* se caracterizan por poseer buena cobertura del suelo y uso generalmente forestal, lo que contrarresta algunas limitantes como las pendientes muy pronunciadas del territorio en dónde se ubican; además, poseen suelos con texturas gruesas y buena capacidad de infiltración. Por lo que, en este caso las medidas de conservación y protección son las que se adaptan mejor para el manejo de las mismas.

En cuanto a las zonas con potencial *Moderado*, éstas presentan limitante en cuanto a la cobertura, uso del suelo: granos básicos, con excepción de la ciudad de Chiquimula, y pendientes poco pronunciadas; lo que lleva a dirigir el manejo a controlar y a mejorar las prácticas agrícolas en éstas zonas, así como a emprender medinas para evitar la contaminación del agua proveniente de estas zonas, ya que es en donde se encuentra el basurero municipal de Chiquimula. Estas zonas deben recibir una consideración preferencial por cuanto se encuentran en un punto medio en cuanto a su potencial de recarga, es decir que su potencial puede ser incrementado; pero si no se toman medidas adecuadas ese potencial también puede verse disminuido.

Las zonas con *Baja* capacidad de recarga, presentan limitantes en el tipo geológico, tipo de suelo, uso y cobertura; al respecto únicamente el uso y la cobertura pueden ser manipulados y mejorados. Esto lleva a pensar que el enfoque en este tipo de zonas debe ser en cuanto a cambios en los sistemas de producción agropecuarios existente, que permitan minimizar el impacto negativo de las limitantes mencionadas.

Por último, las zonas con un potencial *Muy Bajo* de recarga, ocupan un porcentaje muy pequeño de las subcuencas; en donde: las pendientes, el uso, la cobertura y el tipo de suelo; limitan grandemente el potencial de recarga. Por lo que, intentar mejorar el potencial de recarga resulta poco razonable, en este caso medidas enfocadas a contener estas zonas y administrar el territorio a fin de evitar la expansión de las mismas, serían las más acertadas.

Como resultado de analizar las causas y efectos de lo que se considera como problema central: *“Degradación por factores antrópicos de las zonas de recarga hídrica en las subcuencas de los ríos Tacó, Shusho y Sasmó”*, se deriva una propuesta para el manejo de las zonas de recarga hídrica, la cual se resume en la matriz de recomendaciones que se presenta en la siguiente página, en el *Cuadro 24*.

Cuadro 24. Matriz de recomendaciones para el manejo de las zonas de recarga hídrica dentro de las subcuencas de los ríos Tacó, Shusho y Sasmó.

FIN	ZONIFICACIÓN	PROPOSITOS	RECOMENDACIONES	OBJETIVOS	COMPONENTES/PRODUCTOS
Reducción del nivel de degradación de las zonas potenciales de recarga hídrica en las subcuencas de los ríos Tacó, Shusho y Sasmó.	ZONAS CON MUY ALTO POTENCIAL DE RECARGA	Mantener el suministro de agua para las comunidades humanas que se desarrollan dentro de las subcuencas de los ríos Tacó, Shusho y Sasmó.	Fortalecer la Unidad de Gestión Ambiental Municipal.	Aumentar la capacidad local de administrar los recursos forestales, capacitar y brindar asistencia técnica a las comunidades, en temas de conservación ambiental.	- Unidad de Gestión Ambiental Municipal en operación. - Personal municipal capacitado en temas relacionados con la gestión ambiental.
			Aumentar la presencia de miembros del SIPECIF, como medio para la prevención de incendios forestales.	Reducir las pérdidas de masa forestal a causa de incendios forestales naturales o intencionales, dentro de las subcuencas de los ríos Tacó y Shusho.	- Áreas boscosas afectadas por incendios reducidas. - Mayor número de elementos del SIPECIF presentes en el área de influencia.
			Declarar como área protegida los bosques de pino dentro de la subcuenca del río Tacó.	Garantizar la conservación y manejo apropiado de los bosques de pino en la parte alta de la subcuenca del río Tacó	- Nuevas áreas integradas al SIGAP.
			Ampliar el Plan de Manejo del Fuego, a los bosques de pino, y apoyar al plan de manejo que se encuentra actualmente en operación.	Dirigir las iniciativas existentes hacia la conservación y protección de los recursos forestales, en las subcuencas de los ríos Tacó y Shusho.	- Integración de los Bosques de Pino al Plan de Manejo del Fuego.
	ZONAS CON ALTO POTENCIAL DE RECARGA	Conservar los caudales de las surgencias que alimentan los caudales de los Ríos Tacó y Shusho.	Incrementar el área reforestada y protegida con los programas de incentivos forestales PINFOR y PINPEP.	Promover la conservación y recuperación de las tierras con vocación forestal, de manera que favorezcan la recarga hídrica de las áreas intervenidas.	- Áreas nuevas son reforestadas y protegidas con los programas de incentivos forestales.
			Identificar y declarar como área protegida los remanentes de bosque seco dentro de las subcuencas de los ríos Tacó y Shusho.	Garantizar la conservación y manejo apropiado del bosque seco dentro de las subcuencas de los ríos Tacó y Shusho.	- Áreas del bosque seco integradas al SIGAP
			Construcción de estructuras que favorezcan la infiltración de agua en el suelo, en las áreas que actualmente poseen bosque.	Incrementar la capacidad de infiltración de los suelos, al contrarrestar el efecto de las pendientes en las áreas boscosas.	- Presencia de acequias de infiltración en áreas boscosas con más del 35% de pendiente.
			Creación de un programa municipal de incentivos forestales, para la recuperación de tierras con vocación forestal dentro de las zonas con un alto potencial de recarga hídrica	Incrementar el área boscosa dentro del territorio que ocupan las subcuencas de los ríos Tacó y Shusho, en un plazo de 10 años.	- Programa de incentivos forestales municipales creado y en operación. - Tierras con vocación forestal recuperadas e integradas al manejo de bosques.

Fuente: Elaboración propia, 2009.

Continuación Cuadro 24.

FIN	ZONIFICACIÓN	PROPOSITOS	RECOMENDACIONES	OBJETIVOS	COMPONENTES/PRODUCTOS
Reducción del nivel de degradación de la zonas potenciales de recarga hídrica en las subcuencas de los ríos Tacó, Shusho y Sasmó.	ZONAS CON MODERADO POTENCIAL DE RECARGA	Aumentar el potencial de recarga hídrica, dentro de las subcuencas de los ríos Tacó, Shusho y Sasmó.	Implementar el sistema agroforestal "Agricultura migratoria con manejo de Barbecho", en las áreas dedicadas al cultivo de granos básicos	Promover la implementación de sistemas agrícolas sostenibles, que a su vez proporcionen una mejor cobertura del suelo.	- Zonas agrícolas para el cultivo de granos básicos bajo el sistema de "agricultura migratoria con manejo de Barbecho" -Agricultores que adoptan el sistema agroforestal de manejo de barbecho.
			Implementar prácticas de conservación de suelos, como: barreras vivas o muertas y cultivo en terrazas, en las zonas de cultivo, con pendientes mayores al 30% de pendiente.	Reducir los efectos adversos de la pendiente en las zonas agrícolas, mediante la implementación de cultivos en terrazas.	- Construcción de terrazas para el cultivo, en zonas con pendientes pronunciadas. - Sistemas agrícolas bajo las prácticas culturales de cultivos en terrazas.
			Crear un relleno sanitario municipal, para disponer adecuadamente de los desechos sólidos generados por la ciudad de Chiquimula.	Eliminar los principales focos potenciales de contaminación para los acuíferos, dentro de las subcuencas de los ríos Tacó, Shusho y Sasmó.	- Creación de un relleno sanitario para los desechos sólidos de la ciudad de Chiquimula.
			Trasladar el basurero municipal hacia un lugar más adecuado, para la disposición de desechos sólidos generados por la ciudad de Chiquimula.	Reducir la contaminación generada por la disposición inadecuada de los desechos sólidos, en las zonas con mejor potencial de recarga hídrica, dentro de las subcuencas de los ríos Tacó, Shusho y Sasmó.	- Basurero municipal trasladado a un lugar más idóneo para tal fin.
			Construir pozos de infiltración dentro y en los alrededores de la ciudad de Chiquimula.	Contribuir con la recarga de los acuíferos, a través de estructuras que permitan la recarga artificial de los mismos.	200 pozos de infiltración dentro y en los alrededores del casco urbano de Chiquimula.
			Elaborar el primer borrador de ordenamiento territorial municipal, por parte de los miembros del COMUDE y aquellas organizaciones sociales y privadas que deban ser involucradas.	Propiciar un ordenamiento urbano ordenado, poniendo énfasis en el uso sostenible de los recursos naturales, a largo plazo.	- Elaboración de un plan de ordenamiento territorial para el municipio de Chiquimula.

Fuente: Elaboración propia, 2009.

Continuación Cuadro 24.

FIN	ZONIFICACIÓN	PROPOSITOS	RECOMENDACIONES	OBJETIVOS	COMPONENTES/PRODUCTOS
Reducción del nivel de degradación de la zonas potenciales de recarga hídrica en las subcuencas de los ríos Tacó, Shusho y Sasmó.	ZONAS CON <b>BAJO</b> POTENCIAL DE RECARGA	Reducir el impacto de las condiciones biofísicas que limitan la recarga hídrica.	Adopción del sistema agroforestal "Cultivo en Callejones, en áreas destinadas al cultivo de granos básicos.	Promover la adopción del cultivo en callejones en las áreas cercanas a las aldeas Maraxcó, El Pinalito, El Concaste y El Jute.	- Áreas agrícolas bajo el manejo del sistema de cultivo en callejones. - Agricultores implementando el sistema de cultivo en callejones.
			Implementar sistemas silvopastoriles, en las áreas destinadas al pastoreo de ganado.	Incrementar la cobertura del suelo y facilitar el cambio favorable del uso de la tierra en áreas de pastoreo.	- Áreas de pastoreo bajo manejo de sistemas silvopastoriles. - Ganaderos adoptando el sistema silvopastoril de árboles dispersos en potreros.
	ZONAS CON <b>MUY BAJO</b> POTENCIAL DE RECARGA	Propiciar la administración del territorio, para controlar la influencia de los cambios en el uso de la tierra sobre las zonas de recarga hídrica.	Implementar un plan de ordenamiento territorial para las zonas urbanas existentes y las emergentes.	Controlar y dirigir el crecimiento urbanístico de las aldeas más pobladas dentro de las subcuencas Tacó, Shusho y Sasmó.	- Plan de ordenamiento local para cada comunidad. - División del territorio según su potencial de producción y desarrollo.
			Definición del uso más apropiado de las áreas cercanas a las zonas con Muy Bajo potencial de recarga hídrica.	Frenar la disminución del potencial de recarga hídrica de las áreas aledañas a las zonas con muy bajo potencial de recarga.	- Implementación de sistemas agrosilvopastoriles en áreas de cultivo de granos básicos. - Estructuras de conservación de suelos como: curvas de nivel, barreras vivas y muertas, terrazas, entre otras.
					Áreas bajo el manejo de sistemas silvopastoriles

Fuente: Elaboración propia, 2009.

Las recomendaciones presentadas en el *Cuadro 24*, se enfocan al manejo que cada tipo de zona de recarga debe seguir, para conseguir el fin planteado para toda el área bajo estudio. Para esto, un propósito principal fue definido, del cual se derivan las recomendaciones y sus respectivos objetivos. Por último, los componentes presentan lo que se debe alcanzar con cada una de las recomendaciones; y de esta manera lograr un manejo apropiado para las subcuencas de los ríos Tacó, Shusho y Sasmó.

## 7. CONCLUSIONES

- El potencial de las zonas de recarga del territorio bajo estudio está constituido por el 1.15% (134.66 Ha) con potencial *muy alto*, el 18.30% (2150.15 Ha) con potencial *alto*, el 64.80% (7613.60 Ha) con potencial *moderado*, el 14.68% (1725.32 Ha) con potencial *bajo*, y el 1.07% (126.21 Ha) con potencial *muy bajo*.
- Las zonas con potencial muy alto y alto de recarga hídrica, se ubican en áreas en donde los suelos presentan texturas gruesas, infiltraciones más rápidas y la presencia de bosques; superando de este modo limitantes en cuanto al tipo geológico y la pendiente de los suelos.
- Las zonas de recarga con un potencial moderado predominan dentro del área de estudio, y son resultado del uso de la tierra, en donde se encuentran: arbustos y matorrales, pastos naturales y granos básicos; la poca cobertura que éstos le ofrecen al suelo y la predominancia de pendientes que varían entre 15 y 45%.
- La subcuenca del río Tacó, es la que posee más área con potencial de recarga *Muy Alto y Alto*, aportando de este modo 1,184.92 Ha, lo que equivale al 10.09 % del total del área bajo estudio.
- Con respecto a la variable “pendiente”, las áreas más propicias para la recarga hídrica se ubican en los alrededores de la ciudad de Chiquimula, y en las cercanías de las aldeas Maraxcó, El Pinalito y El Conacaste; mientras que las menos propicias se ubican a lo largo de la subcuenca del río Tacó y la parte alta del río Shusho.
- Aunque varios autores señalan la estrecha relación entre las clases texturales y la velocidad de infiltración, los resultados obtenidos en este estudio indican que esto no es una regla general, ya que la textura por definición no considera la estructura del suelo, un aspecto muy relevante en cuanto a la infiltración del agua de lluvia.
- El tipo geológico más importante para la recarga hídrica dentro del área de estudio, corresponde a los Aluvionales –Qal–, el cual a su vez conforma el valle de la ciudad de Chiquimula, por lo que la expansión de las áreas urbanas sobre este territorio está limitando la recarga en esta zona.

- La comparación entre los resultados obtenidos de la actualización del mapa de uso del suelo al año 2006 y los resultados del mapa de 2003, demuestran que el área cubierta por bosques a disminuido un 4.69%, dentro del área de estudio; con lo cual es probable que un área de igual proporción haya disminuido su potencial de recarga hídrica, a causa de un cambio en el uso de la tierra.
- El modelo automatizado que se aplicó para la determinación del potencial de recarga hídrica, permite el planteamiento de escenarios para evaluar el impacto que ciertas medidas de protección y/o conservación tendrían sobre manejo de los recursos naturales de las cuencas hidrográficas.
- El impacto generado por la eliminación de la cobertura forestal dentro de las subcuencas de los ríos Tacó y Shusho, implicaría la reducción del potencial de recarga en un 15% del territorio, afectando de esta forma el balance hídrico de los ríos.

## 8. RECOMENDACIONES

- Las zonas que presentan un potencial de recarga ALTO y MUY ALTO, deben ser consideradas como áreas prioritarias en los planes de manejo de las subcuencas y en los proyectos municipales de protección y/o conservación del área.
- A pesar de la utilidad de la información derivada del este estudio, una estimación cuantitativa de la recarga se hace necesaria. Por lo que, esta primera aproximación, debería convertirse en un medio que impulse el interés por aplicar métodos más acertados, para la cuantificación de la recarga de la zonas identificadas.
- El método descrito para la identificación de zonas de recarga hídrica debe evaluarse en otras áreas, a fin obtener un mejor estimado de su precisión y exactitud; este modo, generar más confianza entre aquellos que deseen utilizar los resultados como parámetro que permita tomar decisiones.
- Completar la clasificación de las categorías de uso de la tierra, dentro de la matriz de ponderación, para la determinación del potencial de recarga hídrica, a fin de facilitar la aplicación de la metodología para la determinación del potencial de recarga hídrica, en cualquier locación dentro de la república de Guatemala.
- El modelo de geoprocésamiento que fue generado, puede utilizarse como herramienta para el planteamiento de escenarios, que permitan la elección más acertada de las estrategias a seguir, para la conservación o recuperación de las zonas de recarga hídrica, en las subcuencas bajo estudio y en cualquier área geográfica en dónde este tópico deba ser considerado.
- Un plan de ordenamiento territorial para las áreas urbanas es una prioridad que las autoridades municipales deben atender, ya que los efectos provocados por el desarrollo urbanístico y económico descontrolado, podrían generar la reducción progresiva e irreversible del potencial de recarga hídrica del valle de Chiquimula.
- Los resultados obtenidos de la aplicación del método para la determinación del potencial de recarga hídrica; deben constituirse como una herramienta para la planificación territorial, forestal, la gestión ambiental y la agricultura,

entre otras disciplinas; y no, como un formalismo que llene determinados requisitos de un plan de manejo de cuencas hidrográficas.

- Los lineamientos generales para el manejo de las zonas de recarga hídrica, deben ser aplicados y considerados en los espacios de toma de decisiones de las organizaciones locales, entre ellas: CODEMA, COMUDE, CODEDE y Mancomunidades.
- Restringir el desarrollo de áreas residenciales al Oeste de la ciudad de Chiquimula, ya que las estructuras propias de las zonas urbanas limitan grandemente la recarga de los acuíferos subterráneos.
- Legislar a través de ordenanzas municipales, la construcción de estructuras de recarga hídrica artificiales dentro de las viviendas, en el casco urbano de la ciudad de Chiquimula.

## 9. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

**Determinación de las Zonas Potenciales de Recarga Hídrica en las Subcuencas de los Ríos Tacó y Shusho, Municipio de Chiquimula, departamento de Chiquimula.**

ACTIVIDAD								
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO
Recopilación de información cartográfica existente								
Delimitación del área de estudio								
Determinación de puntos de muestreo para el estudio de suelos								
Muestreo para la textura del suelo								
Pruebas de infiltración del suelo								
Localización de manantiales y surgencias								
Procesamiento de datos para la identificación de zonas de recarga hídrica								
Generación del modelo automatizado, en Model Builder								
Descripción de las variables que determinan las zonas potenciales de recarga hídrica (Elaboración del documento)								
Elaboración de Matriz de Recomendaciones, para el manejo de las zonas potenciales de recarga hídrica.								

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **CODEMA (Comisión Departamental de Medio Ambiente, GT)**. 2006. Perfil ambiental del departamento de Chiquimula. Chiquimula, GT. 1 disco compacto, 80 min.
2. **Congreso de la República de Guatemala**. 1996. Ley forestal, decreto número 101-96. Guatemala. 36 p.
3. **Estrada Muy, RA et al.** 1989. Caracterización preliminar de la cuenca del río Tacó, Chiquimula. Chiquimula, GT, USAC-DIGI, Facultad de Agronomía. 181 p.
4. **FAUSAC (Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala)**. 2004. Manual técnico, metodología para la determinación de zonas críticas de recarga hídrica natural. Guatemala. 106 p.
5. **Kohler Paulus, L.** 1986. Hidrología para ingenieros. 2 ed. México, Editorial McGraw Hill. p. 144-149.
6. **IARNA (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente, GT)**. 2006. Perfil ambiental de Guatemala: tendencias y reflexiones sobre la gestión ambiental. Guatemala, URL; AIIA. 250 p.
7. **INAB (Instituto Nacional de Bosques, GT)**. 2003. Metodología para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural: manual técnico. Guatemala. 106 p.
8. \_\_\_\_\_. 2005. Identificación de las tierras forestales de captación y regulación hidrológica, de la subcuenca Los Vados, cuenca río Los Esclavos. Guatemala, INAB/CEFE. 70 p.
9. \_\_\_\_\_. 2005. Mapa de tierras forestales de captación y regulación hidrológica. Guatemala. Escala 1:250000. Color.
10. \_\_\_\_\_. 2005. Presentación mapa de tierras forestales de captación y regulación hidrológica (en línea). Guatemala. Consultado 20 jul. 2008. Disponible en <http://www.inab.gob.gt>
11. \_\_\_\_\_. 2005. Programa de investigación de hidrología forestal. Guatemala, INAB. 38 p.
12. \_\_\_\_\_. 2005. Validación de la metodología para la delimitación de tierras forestales de captación y regulación hídrica y la elaboración y primer vaciado de información de una base de datos de tierras forestales de captación y regulación hídrica. Guatemala, INAB. 20 p.
13. \_\_\_\_\_. 2007. Delimitación de las tierras forestales de captación y regulación hidrológica de la microcuenca Pixcayá, San Juan Comalapa, Chimaltenango. Guatemala, INAB. 63 p.
14. **IGN (Instituto Geográfico Nacional, GT)**. 1966. Mapa geológico de Guatemala, Hoja Chiquimula No. 2260 II G. Guatemala. Escala 1:50000. Color.
15. **INE (Instituto Nacional de Estadística, GT)**. 2002. Estadísticas de medio ambiente departamento de Chiquimula (en línea). Guatemala. Consultado 17 jul. 2008. Disponible en <http://www.ine.gob.gt/descargas/ambientales/chiquimula.htm>

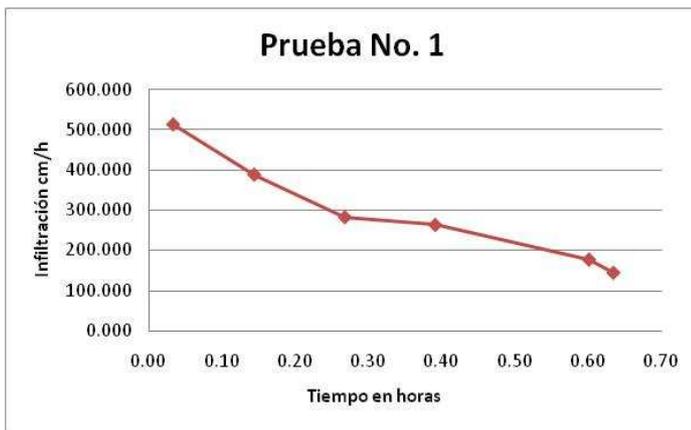
16. \_\_\_\_\_. 2002. XI censo nacional de población y VI de habitación 2002. Guatemala, INE. 1 disco compacto. 80 min.
17. **MAGA (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, GT)**. 2006. Mapa de cobertura vegetal y uso de la tierra: memoria técnica y descripción de resultados. Guatemala. 198 p.
18. \_\_\_\_\_. 2001. Mapa de zonas de recarga hídrica modificado de la república de Guatemala. Guatemala. Escala 1:250000. Color.
19. **MARN (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, GT)**. 2006. Lucha contra la desertificación: inicia programa de reforestación en corredor seco (en línea). Guatemala. Consultado 17 jul. 2008. Disponible en [http://www.marn.gob.gt/noticias/noticia\\_59.html](http://www.marn.gob.gt/noticias/noticia_59.html)
20. **Matus Silva, OD**. 2007. Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa, Nicaragua. Tesis MSc. en Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas. Turrialba, CR, CATIE. 247 p.
21. **Noriega Arriaga, JP**. 2005. Determinación de las áreas principales de recarga hídrica natural en la microcuenca del río Sibacá, Chinique, Quiché. Tesis Ing. Agr. Guatemala, FAUSAC. 68 p.
22. **Ortegón, E et al.** 2005. Metodología del marco lógico para la planificación, el seguimiento y la evaluación de proyectos y programas. Santiago de Chile, Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social. 124 p.
23. **Ramírez Cardona, OE**. 2007. Cuantificación de la recarga hídrica natural y determinación de las principales áreas de regulación hidrológica de la subcuenca del río Xequijel, cuenca del río Salamá, departamento de Quetzaltenango. Tesis Ing. Forestal. Guatemala, URL. 100 p.
24. **Remenieras, G**. 1974. Tratado de hidrología aplicada. 2 ed. España, Editores Técnicos Asociados, S. A. p. 257 – 273.
25. **Rossiter, DG**. 2004. Metodologías para el levantamiento del recurso suelo. Trad. Vargas Rojas. Holanda, ITC. 145 p.
26. **Sánchez, FJ**. 2006. Evapotranspiración, concepto de evapotranspiración, utilidad, unidades (en línea). España, Universidad de Salamanca, Departamento de Geología. Consultado 15 sep. 2008. Disponible en <http://web.usal.es/~javisan/hidro/temas/T040.pdf>

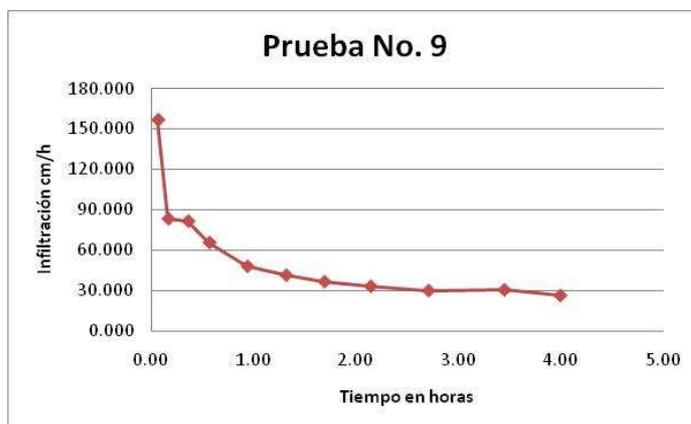
## **11. APÉNDICES**

## APÉNDICE A.

Resultados de las Pruebas de Infiltración del Suelo, según la Textura de suelo.

PRUEBA	DIAMETRO (cm)	PROFUNDIDAD (cm)	TEXTURA (Médoto del tacto)	INFILTRACIÓN (cm/h)
1	20.00	40.00	Franco-arenoso	91.46
2	20.00	40.00	Arcillo-arenoso	88.95
3	20.00	40.00	Arcilloso	0.14
4	20.00	40.00	Franco-arcillo arenoso	9.55
5	20.00	40.00	Arcillo-limoso	1.57
6	20.00	30.00	Franco-arcillo limoso	2.06
7	20.00	40.00	Franco-arcilloso	13.45
8	20.00	40.00	Arenoso	14.28
9	20.00	40.00	Arena Franca	26.53





## APÉNDICE B.

Resumen Gráfico de los Resultados de la Variables que determinan el Potencial de Recarga Hídrica.

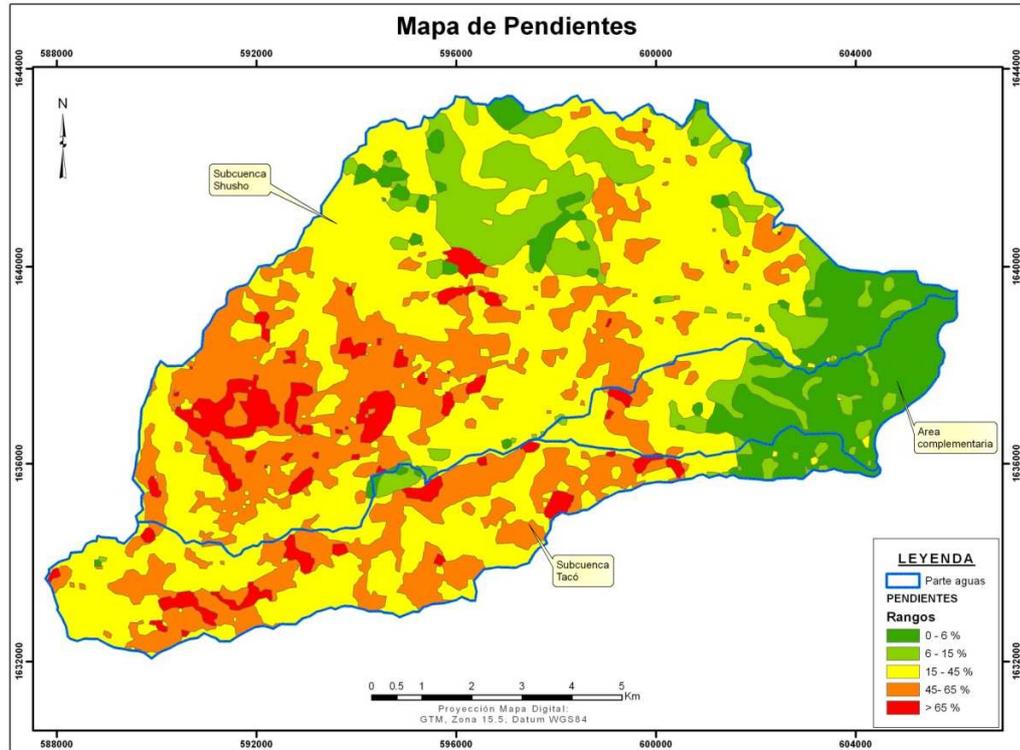


Figura (a).

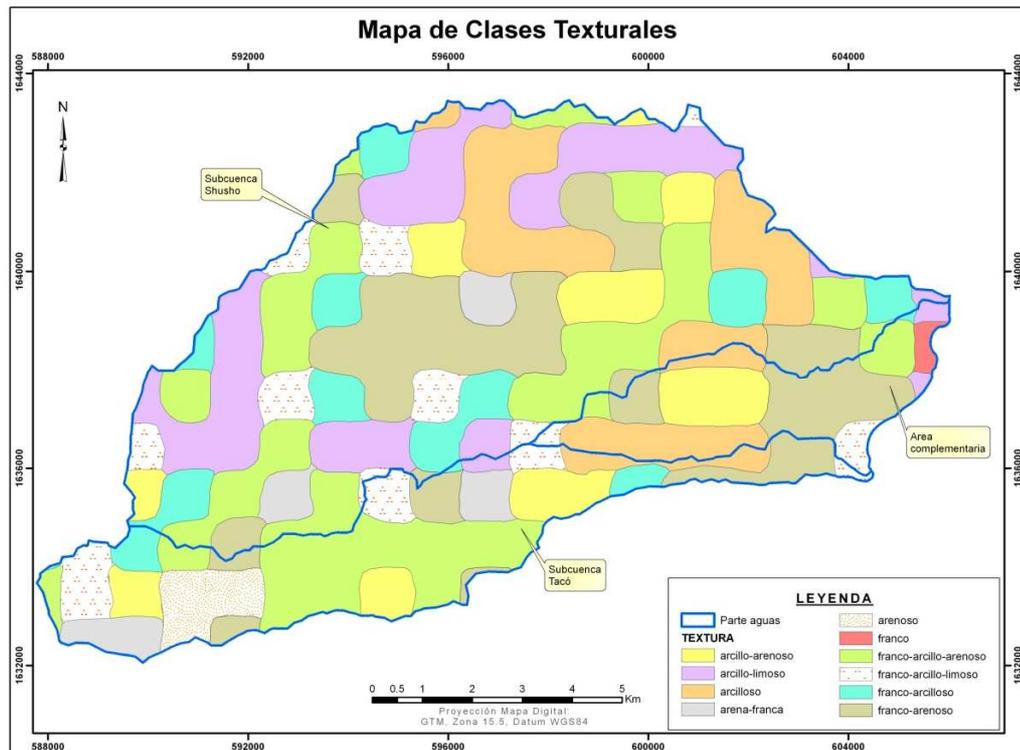


Figura (b).

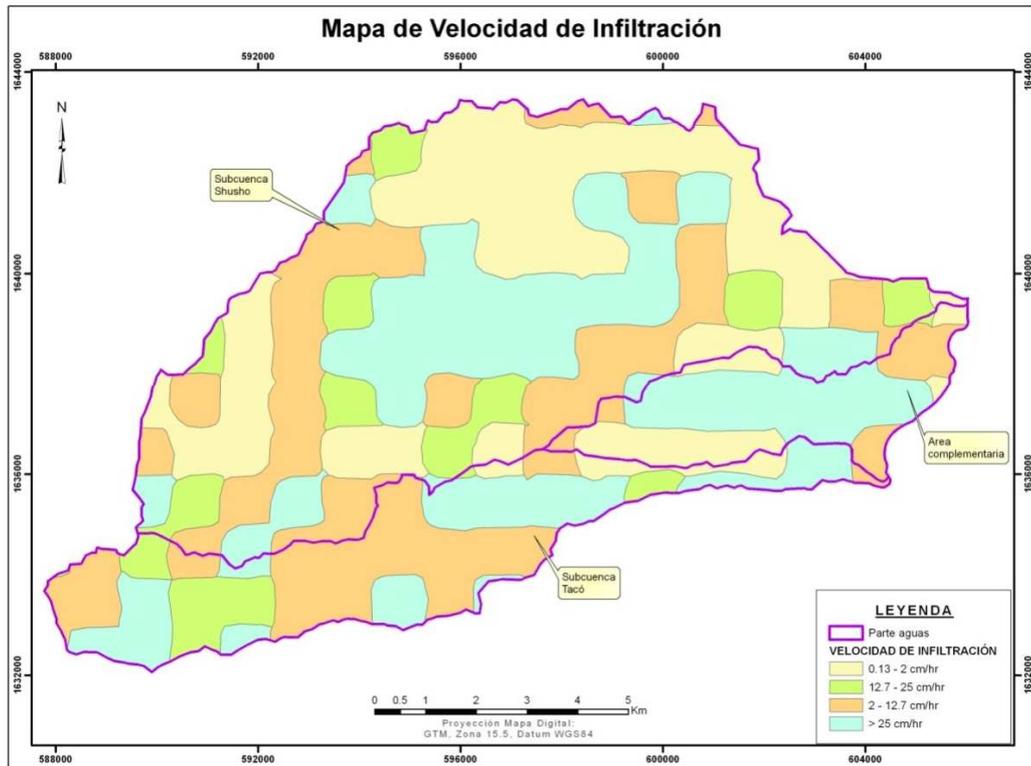


Figura (c).

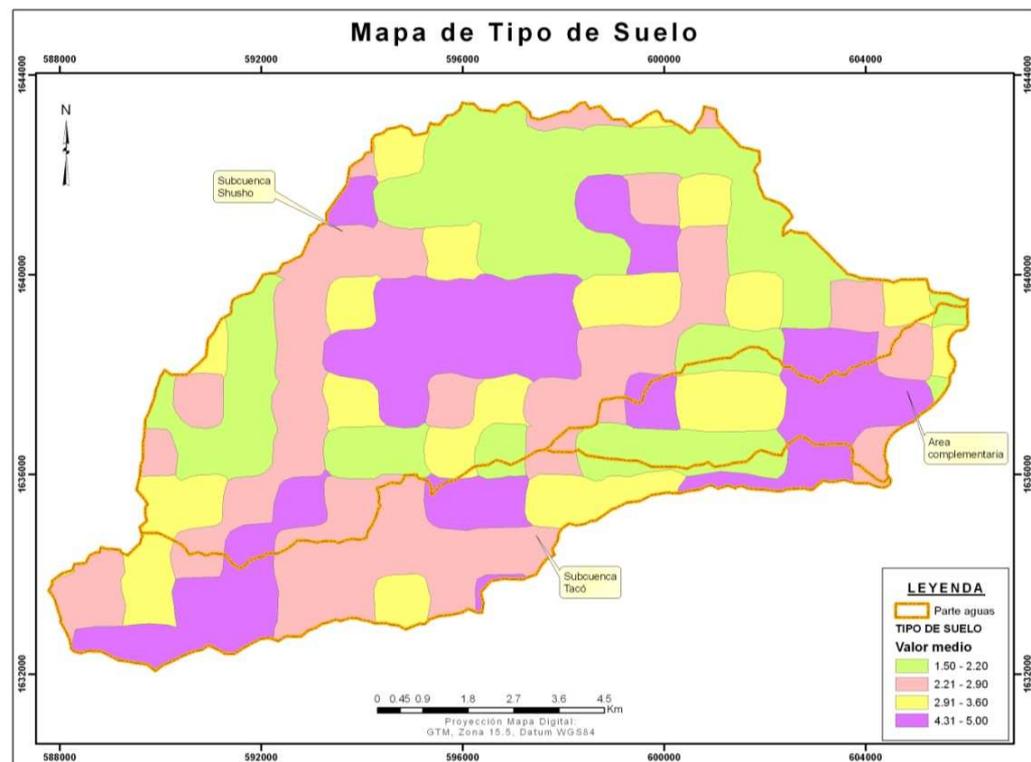
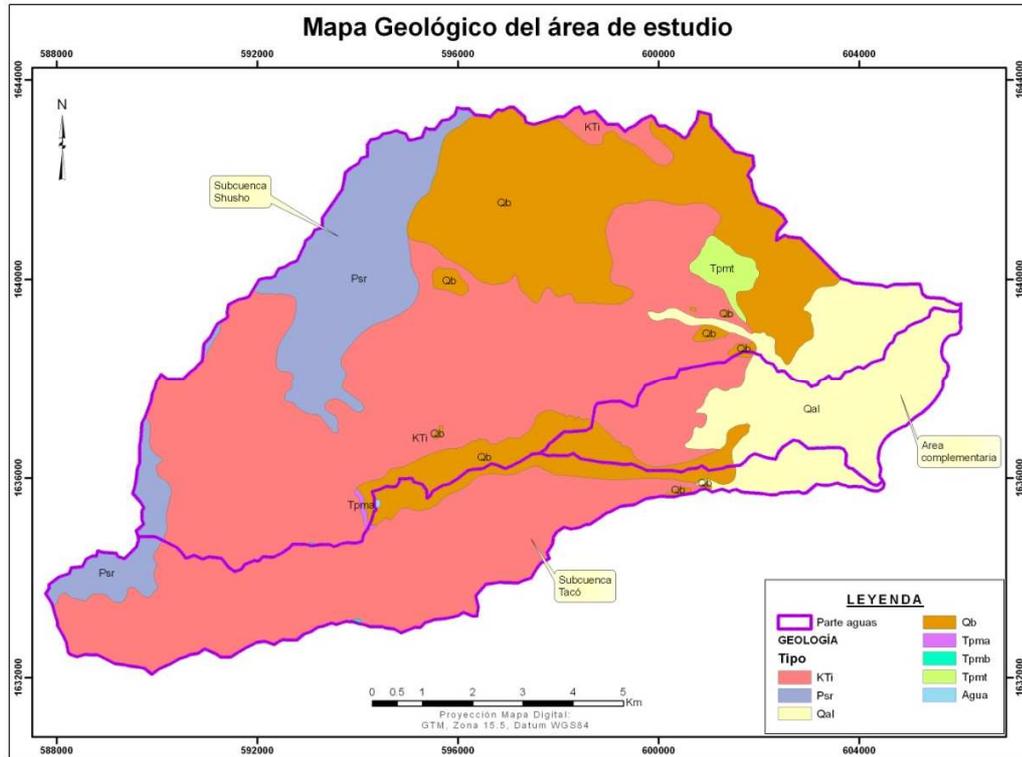
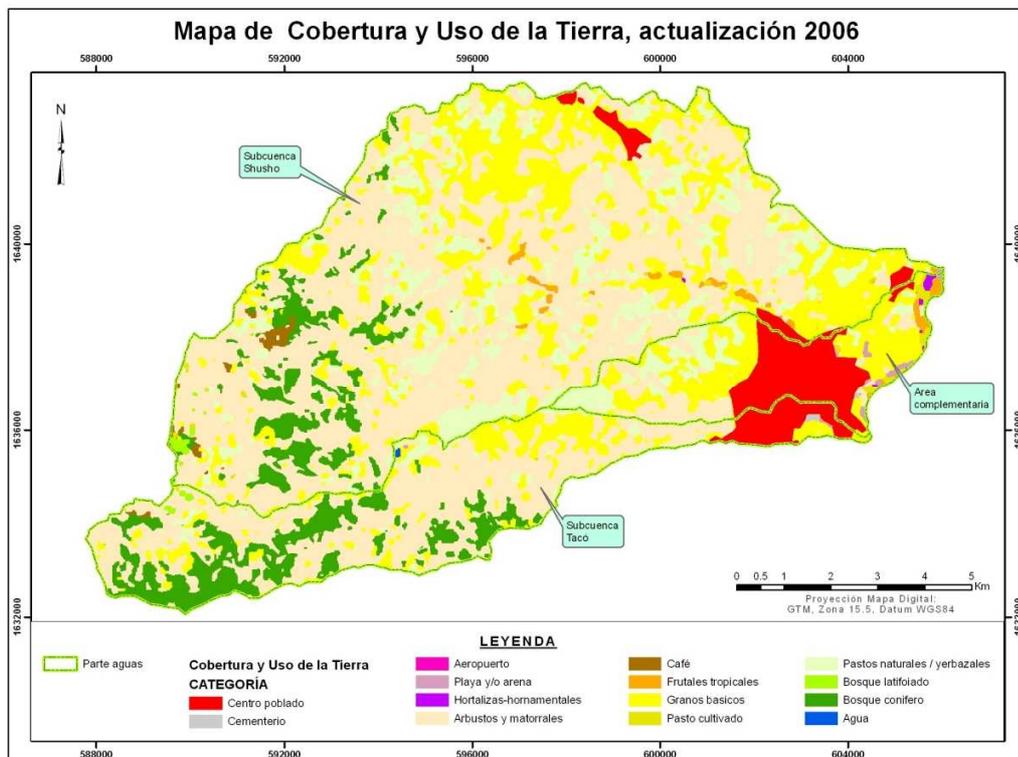


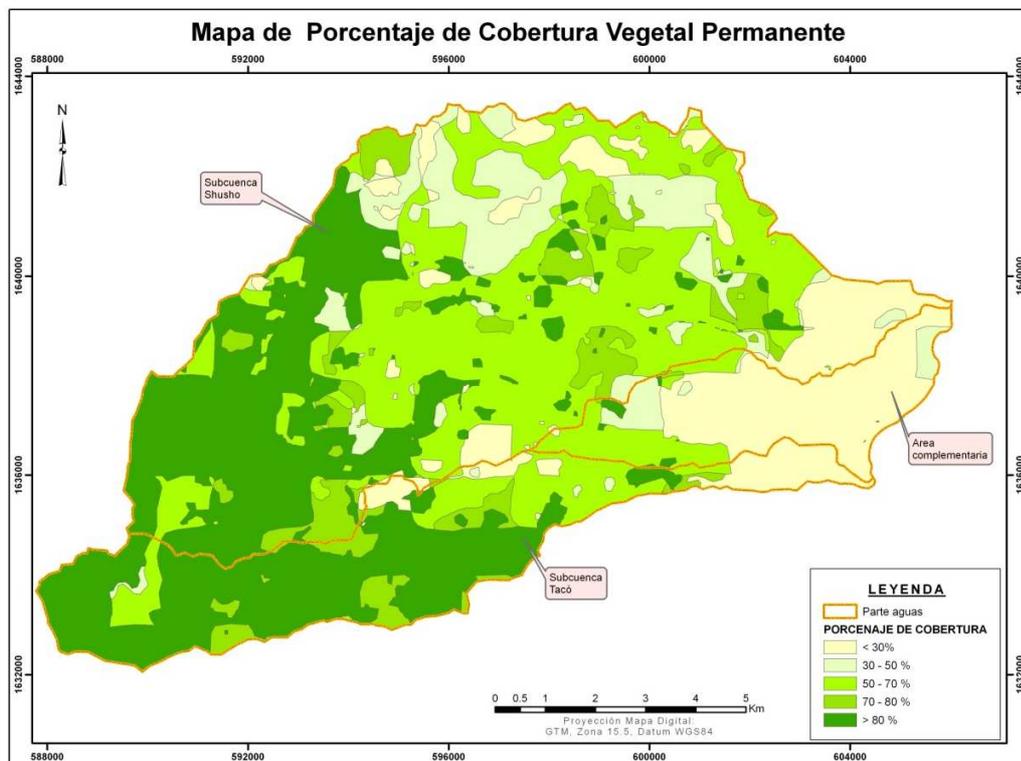
Figura (d).



**Figura (e).**



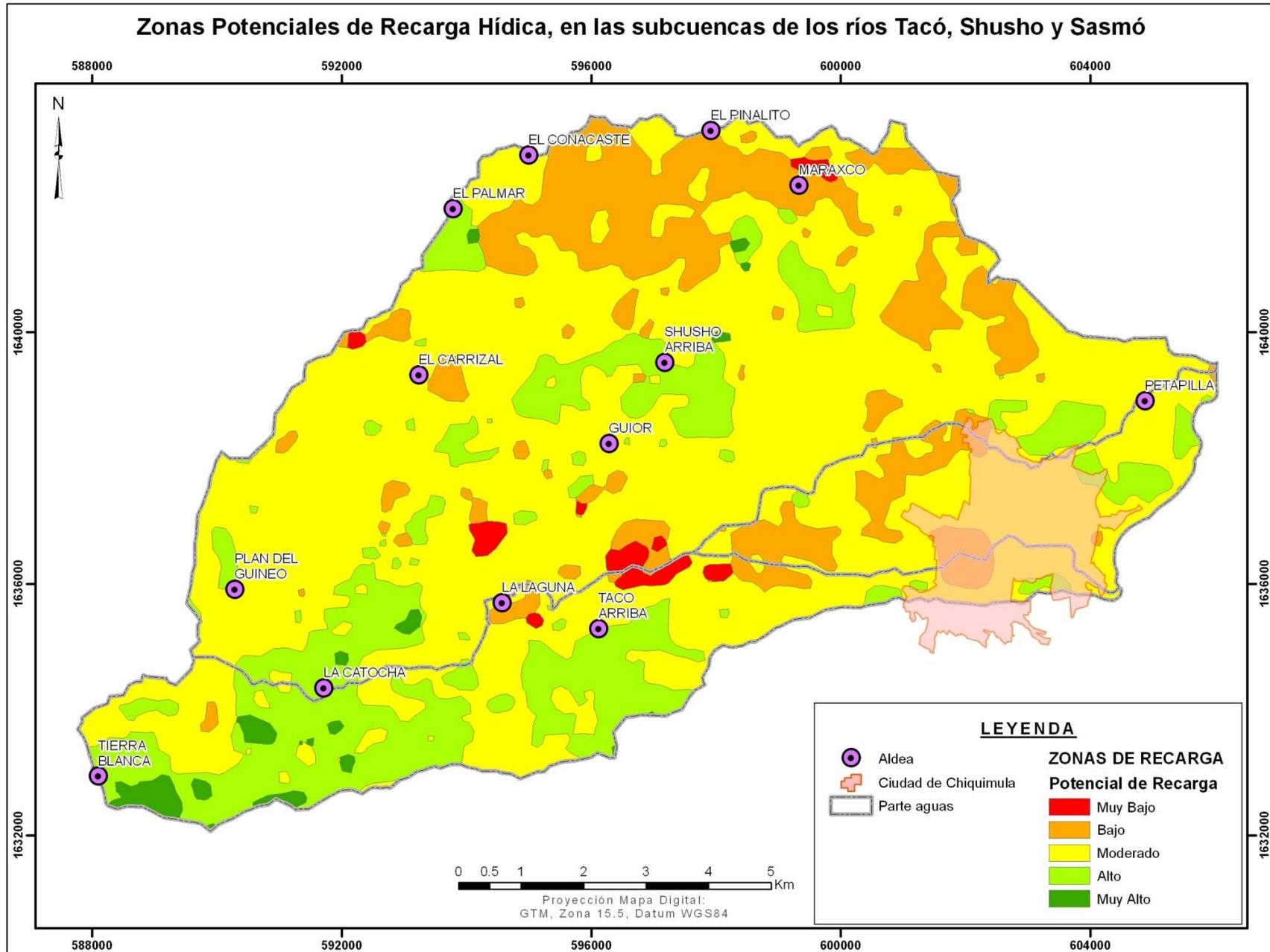
**Figura (f).**



**Figura (g).**

### APÉNDICE C.

## Zonas Potenciales de Recarga Hídrica, en las subcuencas de los ríos Tacó, Shusho y Sasmó



APÉNDICE D.

Boleta de Campo para la Recolección de Muestras de Suelo

Id	POINT_X	POINT_Y	Sample_Id	Date	Texture	Comments
1	587772	1632454				
2	588772	1632454				
3	589772	1632454				
4	590772	1632454				
5	591772	1632454				
6	592772	1632454				
7	587772	1633454				
8	588772	1633454				
9	589772	1633454				
10	590772	1633454				
11	591772	1633454				
12	592772	1633454				
...	xxxxxxx	xxxxxxx				
...	xxxxxxx	xxxxxxx				
...	xxxxxxx	xxxxxxx				
135	600772	1643454				

## APÉNDICE E.

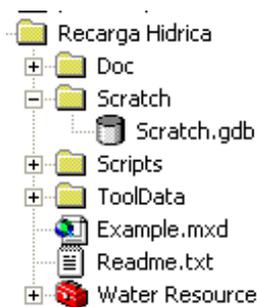
### INSTRUCTIVO PARA EL USO DEL MODELO DE GEOPROCESAMIENTO “Recarga Hídrica”

Antes de utilizar esta herramienta permítase leer el archivo Readme.txt que acompaña a esta herramienta de geoprocésamiento, así como el documento “Determinación de Zonas Potenciales Recarga Hídrica en las subcuencas de los ríos Tacó y Shusho, municipio de Chiquimula, departamento de Chiquimula”; en el directorio Doc\...

#### 1. Instalación de la Herramienta

Esta se proporciona en un archivo comprimido con extensión “.rar” por lo que un descompresor de este tipo es necesario.

Al descomprimir el archivo encontrará un directorio con la siguiente estructura:



- El directorio *ToolData* contiene seis archivos tipo raster que se utilizan en una demostración del funcionamiento de la herramienta.
- En el directorio *Scratch* se encuentra una File Geodatabase, en la cual se almacenan todos los datos intermedios resultantes de modelo de geoprocésamiento.
- El archivo *Readme.txt* contiene información sobre las condiciones de uso de esta herramienta.
- El archivo *Example.mxd* proporciona un ejemplo sobre la aplicación de la herramienta.
- El Toolbox *Water Resource* contiene el modelo de geoprocésamiento generado en ModelBuilder.

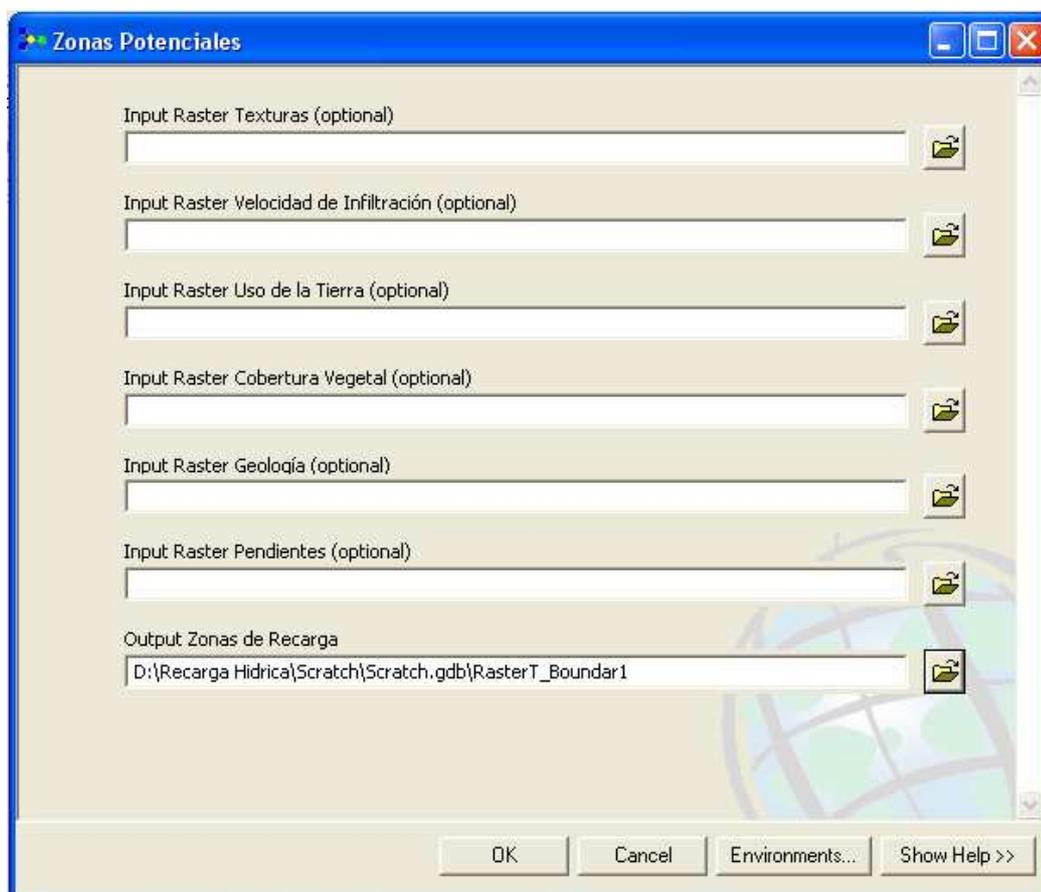
Para instalar esta herramienta siga las siguientes instrucciones:

- o Descomprima el archivo *GeoTool.rar* en cualquier ubicación de su preferencia.
- o Copie todo el directorio *Recarga Hídrica* a una ubicación de su preferencia. Es recomendable que sea directamente a una de las unidades de almacenamiento que utilice, por ejemplo en C:\...
- o Listo la instalación está completa.

## 2. Uso de la Herramienta de Geoprocesamiento “Zonas Potenciales”

Esta herramienta puede ejecutarse directamente desde ArcCatalog o a través del ArcToolBox en ArcMap. Se explicará a continuación cómo agregar la herramienta al ArcToolbox desde ArcMap.

- Inicie ArcMap, cree un nuevo documento de mapa o abra uno existente en el cual desee utilizar la nueva herramienta.
- Despliegue ArcToolbox.
- Clic derecho sobre el encabezado *ArcToolbox* que aparece dentro de la ventana de ArcToolBox.
- Clic en *Add ToolBox...*
- En el directorio busque y seleccione la caja de herramientas *Water Resource*.
- Clic en Open.
- La caja de herramientas *Water Resource* será agregada al ArcToolBox. Deberá repetir este procedimiento cada vez que desee utilizar esta herramienta en un documento de mapa diferente, a no ser que, guarde estos cambios en la plantilla normal de ArcMap.
- Para utilizar la herramienta, expanda el contenido de *Water Resource*, y luego expanda el contenido del ToolSet *Hydrologic Recharge*.
- Doble clic sobre el modelo *Zonas potenciales*, la siguiente ventana se desplegará:



- Es importante aclarar que aunque dentro de la ventana anterior la mayoría aparecen etiquetados como opcionales (optional), no es así para lograr ejecutar el modelo de geoprocésamiento; por lo que todos los campos deben considerarse como REQUERIDOS.

Acerca de las capas requeridas:

Todas las capas requeridas deben estar en formato GRID de ESRI y el valor para cada variable almacenado en el campo *Value* de cada una de las capas.

*Raster Textura*: contiene los valores en enteros entre 1 y 5 para el tipo de textura del suelo, ponderados según la matriz de clasificación de la textura de acuerdo con el modelo metodológico.<sup>6</sup>

*Raster Velocidad de Infiltración*: contiene los valores en enteros entre 1 y 5 para la velocidad de infiltración del suelo, ponderados según la matriz para la clasificación de la velocidad de infiltración de acuerdo con el modelo metodológico.

*Raster Uso de la Tierra*: contiene los valores en enteros entre 0 y 5 para el tipo de uso del suelo, ponderados según la matriz para la clasificación del uso del suelo de acuerdo con el modelo metodológico.

*Raster Cobertura Vegetal*: contiene los valores en enteros entre 1 y 5 para el porcentaje de cobertura vegetal permanente, ponderados según la matriz para la clasificación de la cobertura vegetal de acuerdo con el modelo metodológico. Dicha matriz se limita a clasificar 8 tipos de geología, por lo que, una clasificación de tipos geológicos diferentes se hará necesaria según sea el caso.

*Raster Geología*: contiene los valores en enteros entre 0 y 5 para el tipo de geología, ponderados según la matriz para la clasificación del tipo geológico de acuerdo con el modelo metodológico.

*Raster Pendientes*: contiene los valores en enteros entre 1 y 5 para los valores de pendiente expresados en porcentaje, ponderados según la matriz para la clasificación de la pendiente del suelo de acuerdo con el modelo metodológico.

*Output Zonas de Recarga*: en este campo deberá especificar el nombre y ubicación del archivo que contendrá la delimitación y clasificación de las zonas de recarga hídrica según su potencial.

- Asigne las capas que contienen los valores requeridos de acuerdo a lo explicado anteriormente.
- Asigne un directorio y nombre de salida para los datos resultantes.
- Clic en Ok.
- Espere a que la tarea de geoprocésamiento se complete. Dependiendo de la configuración de su sistema de cómputo esto durará entre 1 y 5 minutos.

NOTA: la extensión Spatial Analyst debe estar disponible para que la herramienta pueda ser ejecutada.

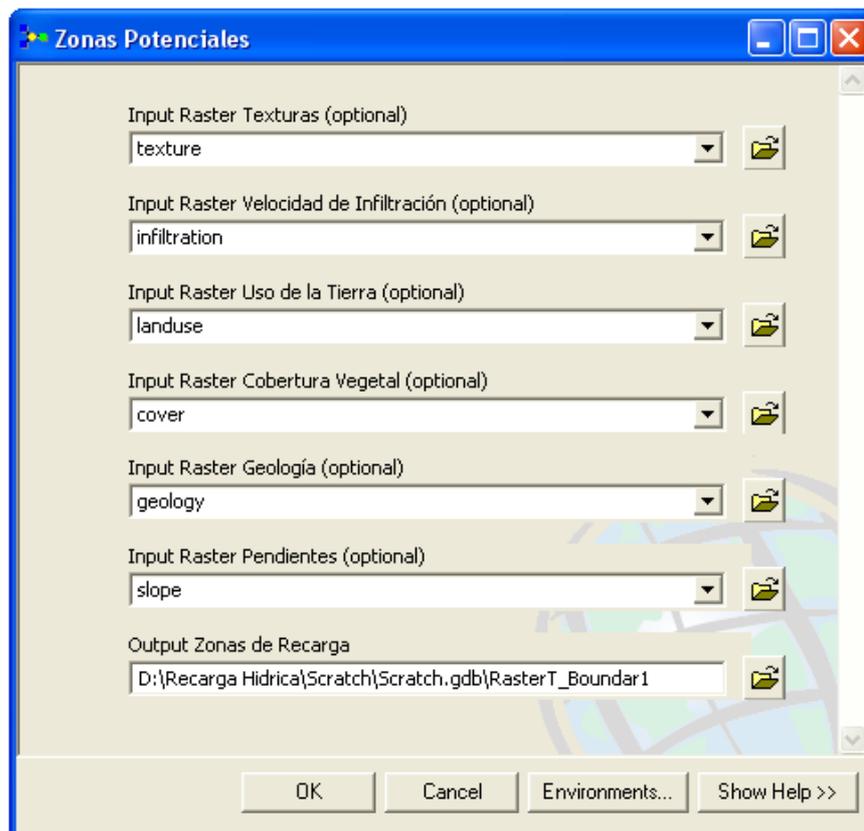
---

<sup>6</sup> García Álvarez, MG. 2009. *Determinación de Zonas Potenciales de Recarga Hídrica en las subcuencas de los ríos Tacó y Shusho, municipio de Chiquimula, departamento de Chiquimula. Tesis Ingeniero Agrónomo. CUNORI, Guatemala.*

### 3. Ejemplo de Aplicación de la Herramienta “Zonas Potenciales”

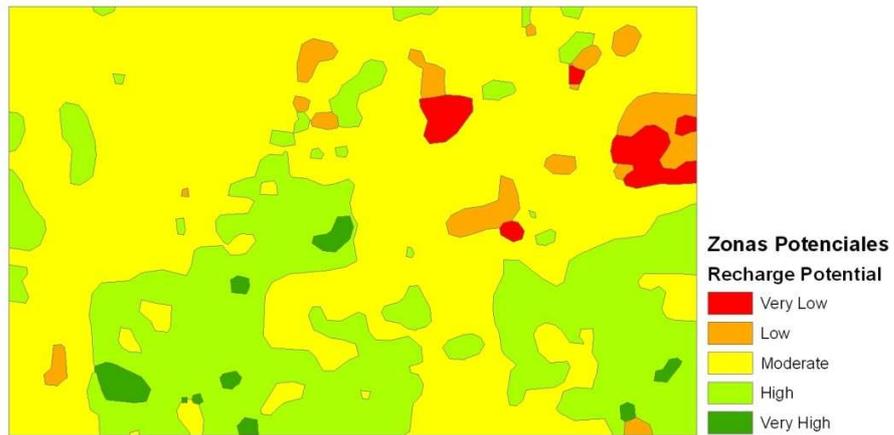
Para demostrar el funcionamiento correcto de esta herramienta de geoprocésamiento se ha incluido un ejemplo.

- Abra el documento de mapa *Example.mxd* que se proporciona con esta herramienta.
- Un documento conteniendo cinco capas raster en formato GRID se desplegará.
- Si ArcToolBox no se despliega dentro del mapa. Ábralo.
- En el ArcToolBox aparecerá cargada únicamente el ToolBox *Water Resource*.
- Expanda el contenido de *Water Resource* y luego el de *Hydrologic Recharge*.
- Doble clic sobre el modelo *Zonas Potenciales*.
- En ventana desplegada asigne los rasters que aparecen en la tabla de contenidos, tal y como aparecen en la siguiente ilustración:



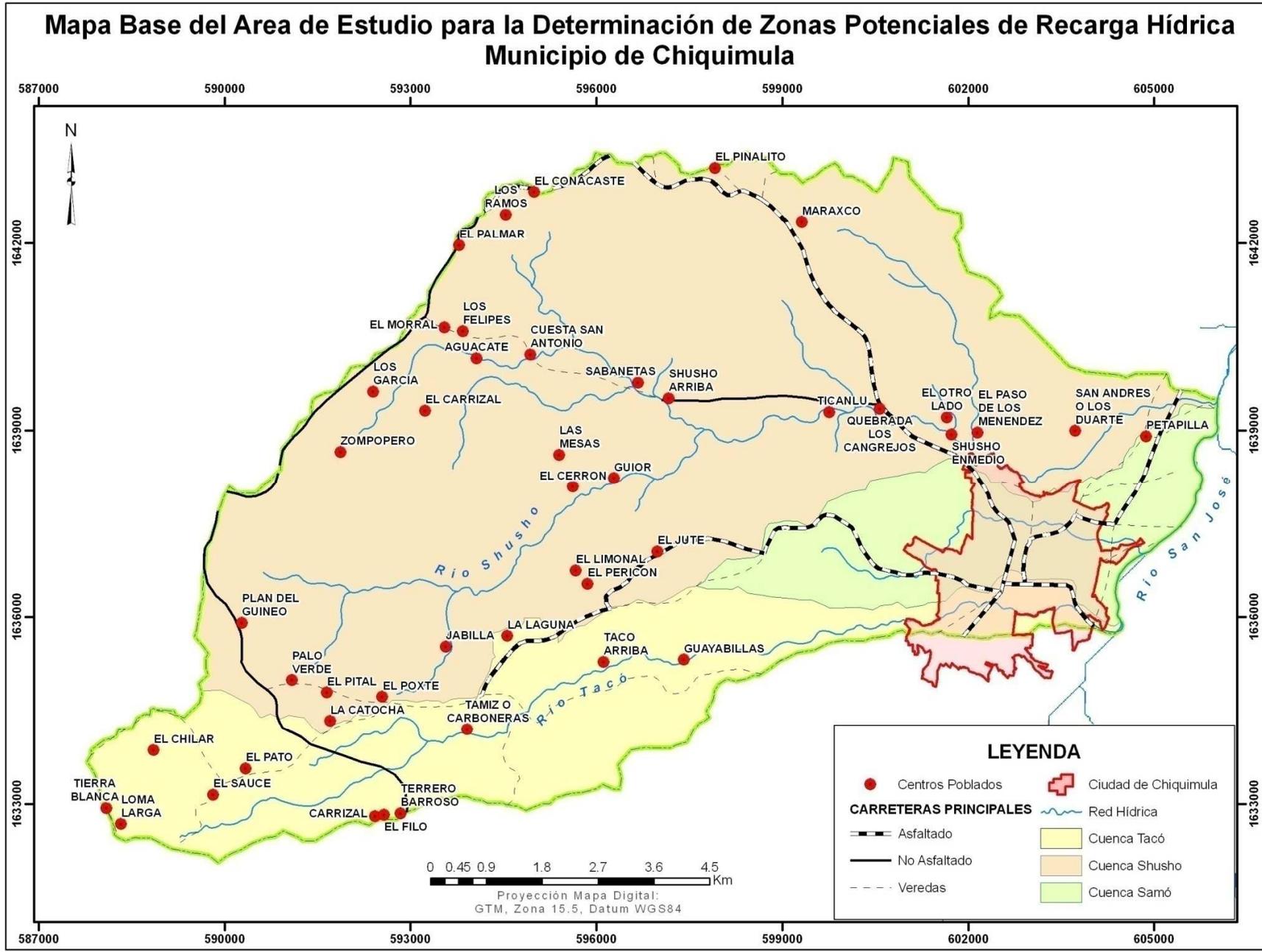
- Cambie la ubicación del archivo de salida *Zonas de Recarga* a una ubicación temporal, ya que si se deja la ubicación por defecto el archivo resultante no será añadido al mapa y no podrá ver los resultados inmediatamente.
- Asigne un nombre de su preferencia al archivo de salida.
- Clic en OK.

- Espere a que se complete el geoprocesamiento.
- Una vez completado el procesamiento, una nueva capa tipo shape será agregada al mapa y ésta deberá mostrar la clasificación de las zonas de recarga en función de su potencial, de menor (very low) a mayor (very high). Además, la tabla de atributos contendrá el área que ocupa cada zona, calculada en metros cuadrados.



## 12. ANEXOS

ANEXO 1



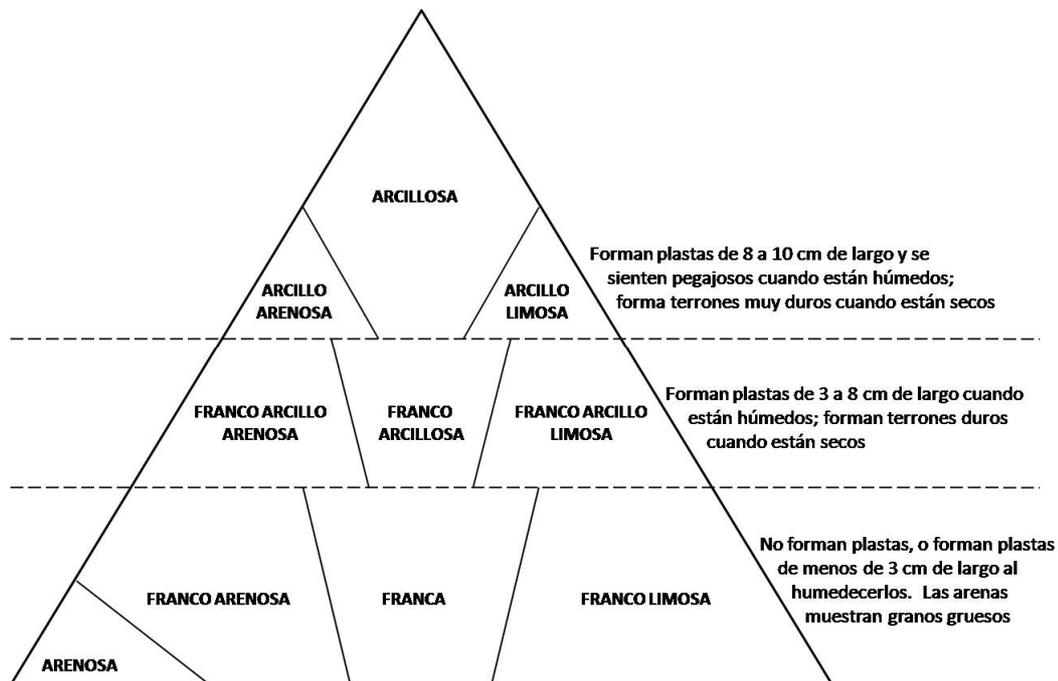


### ANEXO 3.

## Determinación de la textura del suelo mediante la técnica del “Tacto”

### Procedimiento:

- Piense en un triángulo textural modificado como se muestra en la Figura. Observe que básicamente está constituido por suelos con textura *arcillosa*, *franco-arcillosa*, y *franca* (siga el eje vertical del triángulo).



- Tome una porción del suelo y haga una pelota de suelo humedeciéndola hasta llegar al “punto pegajoso”. El punto pegajoso se logra cuando la bola de suelo no está tan húmeda que tienda a quedarse pegada en la mano, ni tan seca que no se sienta pegajosa. Cuando el suelo esté en su punto, presiónelo entre el dedo pulgar y el índice y trate de formar una plasta lo más larga posible.
- Determine si el suelo cae dentro de la categoría textural *arcillosa*, *franco-arcillosa*, o *franca*. Esto lo logrará observando si al humedecer el suelo puede formar con sus dedos plastas *largas*, *medianas*, o *cortas*, respectivamente.
- Suelos de textura *arcillosa* (*arcillo-arenosa*, *arcillosa*, y *limo-arcillosa*) forman plastas largas (8-10 cm); de textura *franco-arcillosa* (*franco-arcillo-arenosa*, *franco-arcillosa*, *franco-arcillo-limosa*) hacen plastas medianas (3-8 cm); de textura *franca* (*franco-arenosa*, *franca*, y *franco-limosa*) forman plastas muy cortas (menos de 3 cm) o no forman plastas, y suelos de textura *arenosa* no forman plastas.
- Una vez determinado si su suelo es *arcilloso*, *franco-arcilloso*, o *franco*, reexamine la muestra. Si al frotarlo se siente definitivamente arenoso (áspero), llámelo *arcillo-arenoso*, *franco-arcillo-arenoso*, o *franco-arenoso*, dependiendo del tipo de plasta que haya formado. Si al frotarlo se siente excepcionalmente suave, llámelo *arcillo-limoso*, *franco-arcillo-limoso*, o *franco-limoso*. Si no se siente

ni arenoso ni excepcionalmente suave, llámelo simplemente *arcilloso*, *franco-arcilloso*, o *franco*, dependiendo del tamaño de la plasta formada.

- f. A suelos de grano grande que se muestran muy sueltos cuando están secos, y que forman terrones muy frágiles cuando están húmedos llámelos *arenosos*. A los que son un poco más cohesivos cuando están secos, y que cuando están húmedos forman terrones que pueden levantarse del suelo con la mano sin que se fracturen (pero que se fracturan al dejarlos caer sobre la palma de la mano desde una altura de 15-20 cm) llámelos *areno-francos*. Si los terrones no se fracturan al dejarlos caer desde una altura de 15-20 cm llámelos *franco-arenosos*.

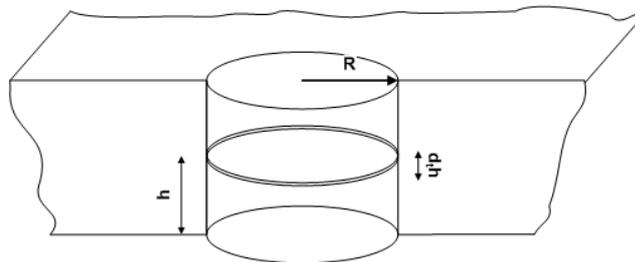
#### REFERENCIA

Milford, M.H., 1997. Soils and Soils Science: Laboratory excercises. 4<sup>th</sup> Edition. Texas A&M University. Kendall/Hunt Publishing Company. Dubuque, Iowa. USA. Consultado, 5 DE Octubre de 2008. TOMADO DE <http://textura1.tripod.com/>

#### ANEXO 4.

### Determinación de la Velocidad de Infiltración del Suelo a través del método Porchet o Cilindro Invertido

Este método se considera preciso y versátil en el campo. Es conocido también como el de cilindro excavado en el suelo o cilindro invertido. Consiste en excavar en el suelo un agujero cilíndrico de radio  $R$ , el cual se llena de agua hasta una altura conocida " $h$ ", y medir un cambio en el tiempo ( $dt$ ) para suponer la capacidad de infiltración ( $f$ ) en ese intervalo como constante.



La superficie por la cual se infiltra el agua es:

$$S = \pi R(2h + R)$$

Para un tiempo,  $dt$ , suficientemente pequeño para que pueda suponerse constante la capacidad de infiltración,  $f$ , se verificará la igualdad:

$$\pi R(2h + R)f = R^2 (dh/dt)$$

separando variables tenemos la ecuación diferencial:

$$f dt = -R (dh/(2h+R))$$

Al integrar resulta:

$$f = (R/2(t_2 - t_1)) * \ln ((2h_1 + R)/(2h_2 + R))$$

Por lo tanto, para determinar  $f$ , basta medir pares de valores  $(h_1, t_1)$ ,  $(h_2, t_2)$ , de forma que  $t_2$  y  $t_1$  no difieran demasiado y utilizarlos en la expresión dada.

El procedimiento para la realización de la prueba consiste en limpiar el área, hacer un agujero de 40 cm de diámetro por 15 cm de profundidad; luego colocar una sonda graduada de referencia para la toma de las profundidades agregar agua en él hasta alcanzar humedad cercana al punto de saturación del suelo, luego se aplica agua nuevamente y se toman los datos  $h$  y  $t$ , a intervalos pequeños para obtener la velocidad de infiltración que será utilizada.