

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
PROGRAMA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN MANEJO SOSTENIBLE DE SUELO Y AGUA**



**DETERMINACIÓN DE PRINCIPALES ÁREAS DE RECARGA
HÍDRICA NATURAL Y DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA
MICROCUEENCA DEL RÍO COTÓN, BAJA VERAPAZ.**

JUAN CARLOS FUENTES MONTEPEQUE

GUATEMALA, FEBRERO DE 2005.

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
PROGRAMA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN MANEJO SOSTENIBLE DE SUELO Y AGUA**

**DETERMINACIÓN DE PRINCIPALES ÁREAS DE RECARGA
HÍDRICA NATURAL Y DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA
MICROCUCENCA DEL RÍO COTÓN, BAJA VERAPAZ.**

**TESIS SOMETIDA A LA CONSIDERACIÓN DE LA HONORABLE JUNTA
DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA, PARA OPTAR AL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS EN MANEJO SOSTENIBLE DE SUELO Y AGUA, CON
ESPECIALIDAD EN PLANIFICACIÓN Y MANEJO DE RECURSOS
HÍDRICOS EN AGRONOMÍA.**

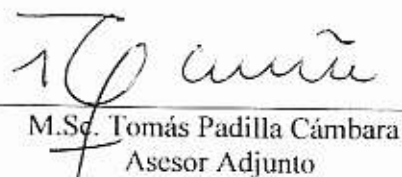
JUAN CARLOS FUENTES MONTEPEQUE

GUATEMALA, FEBRERO DE 2005.

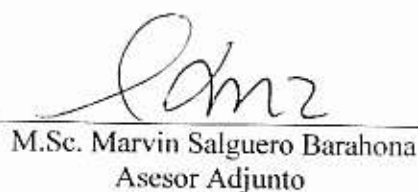
ESTA TESIS FUE ACEPTADA POR EL CONSEJO ACADÉMICO DE ESTUDIOS DE POSTGRADO DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA Y APROBADA POR EL COMITÉ ASESOR DE LA INVESTIGACIÓN, COMO REQUISITO PREVIO A OPTAR AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN MANEJO SOSTENIBLE DE SUELO Y AGUA, CON ESPECIALIDAD EN PLANIFICACIÓN Y MANEJO DE RECURSOS HÍDRICOS EN AGRONOMÍA.



M.Sc. Eugenio Orozco y Orozco
Asesor Principal



M.Sc. Tomás Padilla Cámara
Asesor Adjunto



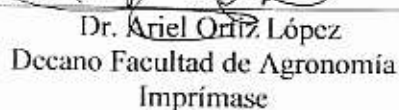
M.Sc. Marvin Salguero Barahona
Asesor Adjunto



M.Sc. Iván Dimitri Santos
Coordinador de Maestría



M.Sc. Edgar Oswaldo Franco Rivera
Director del Programa de
Estudios de Postgrado



Dr. Ariel Ortiz López
Decano Facultad de Agronomía
Imprimase




Ing. Agr. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Estudiante

Guatemala, Febrero de 2.005.

DEDICATORIA

A:

DIOS

Todo poderoso, fuente de entendimiento y sabiduría, por permitirme alcanzar esta meta.

MIS PADRES

Carlos Rodolfo Enrique Fuentes Reyes y Gloria Elizabeth Montepeque de Fuentes, como un reconocimiento por su apoyo brindado, que Dios los bendiga.

MIS HERMANOS

Fernando y Manolo, con cariño especial.

MIS HIJOS

Luis Carlos y María Fernanda, como un ejemplo para que lo superen.

MI FAMILIA

Como muestra de cariño.

MIS AMIGOS

Como recuerdo de experiencias vividas y compartidas.

LA CINCUENTENARIA FACULTAD DE AGRONOMÍA

LA TRICENTENARIA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

MI PATRIA GUATEMALA

AGRADECIMIENTOS

A: MIS ASESORES: Ing. M.Sc. Eugenio Orozco y Orozco, Ing. M.Sc. Tomás Padilla Cámbara e Ing. M.Sc. Marvin Salguero, por compartir su amistad y asesoría brindada para la realización del presente estudio.

RED CENTROAMERICANA PARA EL MANEJO DE RECURSOS HÍDRICOS, por haberme otorgado la beca para realizar los estudios de maestría.

MUNICIPALIDAD DE PACHALÚM, QUICHÉ, por toda la colaboración brindada en la realización del presente estudio.

INSTITUTO NACIONAL DE BOSQUES, por la información proporcionada para la realización del presente estudio.

COMITÉS DE DESARROLLO DE LOS CASERÍOS: Los Altos (Pachalúm), Tuncáj (Cubulco), Ojo de Agua, Manzanote, Joya de La Vega y El Aviadero (Granados), por su colaboración brindada en la etapa de campo.

EL PERSONAL DE LABORATORIO DE SUELO, AGUA Y PLANTA DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA, por su colaboración en el análisis de muestras de suelo y agua.

EL PERSONAL DE LA UNIDAD DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, por su colaboración en la digitalización de la información.

LOS CATEDRÁTICOS DEL PROGRAMA DE MAESTRÍA EN MANEJO SOSTENIBLE DE SUELO Y AGUA: Ing. M.Sc. Eugenio Orozco, Ing. M.Sc. Tomás Padilla, Ing. M.Sc. Marvin Salguero, Ing. M.Sc. Marino Barrientos, Ing. M.Sc. David Juárez, Dr. Hugo Cardona, Ing. M.Sc. Oscar González e Ing. M.Sc. Adolfo Revolorio, por todos los conocimientos brindados durante mi formación profesional.

MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS DE MAESTRÍA: Inga. Lucrecia Pocón, Inga. Vivian Soto, Lic. Francisco Castañeda Moya, Ing. Luis Macz López e Ing. Elías Raymundo, por compartir su amistad y apoyo brindado.

ESTE ESTUDIO SE DESARROLLÓ CON EL APOYO DE LA RED CENTROAMERICANA PARA EL MANEJO DE RECURSOS HÍDRICOS -CARA-, DE LA CUAL FORMAN PARTE LAS UNIVERSIDADES DE CALGARY Y WATERLOO DE CANADÁ, LA UNIVERSIDAD DE COSTA RICA, LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA Y LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA.



UNIVERSITY OF
CALGARY



RESUMEN

“DETERMINACIÓN DE PRINCIPALES ÁREAS DE RECARGA HÍDRICA NATURAL Y DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA MICROCUENCA DEL RÍO COTÓN, BAJA VERAPAZ.”

“DETERMINATION OF PRINCIPALS AREAS OF NATURAL WATER RECHARGE AND WATER QUALITY IN THE BASIN RIVER COTÓN, BAJA VERAPAZ.”

La presente investigación consistió en la estimación de los volúmenes de agua que se recargan por efecto de la precipitación pluvial, realizado a través de un balance hídrico de suelos, y en que áreas se presenta en mayor medida, así como la calidad del agua para consumo humano y riego en la microcuenca del río Cotón, con la finalidad de generar lineamientos estratégicos de manejo que permitan la sostenibilidad del recurso hídrico. En años anteriores se tuvieron problemas en el área, lo cual fue debido al manejo forestal, ya que las comunidades de la parte baja no estaban de acuerdo con las licencias forestales vigentes, porque sus fuentes de agua estaban siendo afectadas y sus caudales se estaban reduciendo significativamente, situación que fue la causa de que se generarán conflictos.

La microcuenca es de importancia en el abastecimiento de agua para consumo humano y riego en comunidades de los municipios de Pachalúm (Quiché), Granados y Cubulco (Baja Verapaz), la cual ocupa una extensión de 28.47 km², situada en jurisdicción de los municipios de Granados y Cubulco. Pertenecer a la subcuenca del río El Tumbadero, el cual es tributario de la cuenca del río Motagua, en la vertiente del Océano Atlántico.

El río Cotón es una corriente relativamente pequeña de orden 3, con un caudal de estiaje en el punto de aforo de 9.043 m³/día, aumentando significativamente en la época de lluvias, debido al ambiente geológico existente, el cual es metamórfico. Esta situación se manifiesta en la estructura laminar de los suelos y la baja permeabilidad de los mismos, debido a estas características gran parte de la lluvia escurre sobre la superficie del suelo, principalmente en la parte baja de la microcuenca.

El balance hídrico de suelos se realizó tomando en cuenta el clima (precipitación pluvial y evapotranspiración) geología, cobertura vegetal (tipo de cobertura y profundidad radicular), suelo (infiltración básica, textura, densidad aparente, capacidad de campo y punto de marchites) y pendiente. Los resultados obtenidos indican que el 11% de la precipitación pluvial constituye la recarga hídrica (4,775.034

$\text{m}^3/\text{año}$), de la cual el 97% se presenta en los suelos de la parte alta y media, clasificados como *algo permeables*, lo que equivale al 63.26% del área total. El restante 3% se presenta en los suelos de la parte baja, donde la permeabilidad de los mismos es significativamente menor, clasificándose algunos suelos como *poco permeables*. Los suelos de la parte alta y media de la microcuenca fueron clasificados como áreas críticas de alta y moderada susceptibilidad, es decir un manejo contrario al de su capacidad disminuye su potencial de recarga hídrica.

La evapotranspiración real constituye más del 50% de la precipitación pluvial ($23,073,277 \text{ m}^3/\text{año}$), debido a que aproximadamente el 40% del área está cubierta por bosque denso de coníferas y en menor proporción de latifoliadas. La escorrentía superficial constituye el 22% ($9,547,689 \text{ m}^3/\text{año}$), produciéndose el 67% en la parte baja. El restante 16% ($7,129,207 \text{ m}^3/\text{año}$) es retenido por la cobertura vegetal y posteriormente es devuelto a la atmósfera en forma de vapor de agua.

De acuerdo al muestreo de 17 fuentes de aguas en la época de estiaje, la calidad de la misma es apta para riego, no así para consumo humano, debido principalmente a contaminación bacteriológica, existiendo algunos manantiales captados (sellados) para consumo humano en donde se detectó la presencia de *E. coli*. La contaminación representa un riesgo para la salud de la población ya que actualmente el agua es distribuida sin ningún tratamiento previo de potabilización, y en el caso de los manantiales que abastecen sistemas de riego, los cultivos que se irrigan son de exportación. Lo anterior es debido a que no existen zonas delimitadas de protección de manantiales, en donde se controle o limite a un nivel adecuado toda actividad antropogénica potencialmente contaminante.

La demanda de agua para riego oscila entre 2 y 7 mm/día, y para consumo humano se estima que aumentará de acuerdo a la proyección realizada (20 años) el 330% ($2,475 \text{ m}^3/\text{día}$), por lo que es sumamente importante darle sostenibilidad al recurso hídrico.

Los principales problemas detectados en el área son: falta de manejo adecuado a las áreas de recarga hídrica natural, riesgo de contaminación, proyección de déficit de agua para los diversos usos, destrucción acelerada de los recursos naturales y poca participación comunitaria. Por lo que los lineamientos que se proponen son sobre aspectos del manejo de las áreas de recarga hídrica natural, calidad del agua, aprovechamiento (consumo humano y riego), proyectos de desarrollo, capacitación, investigación y organización, los cuales están encaminados a lograr un uso sostenible y racional del recurso, que garantice la conservación y protección del mismo para las presentes y futuras generaciones.

ÍNDICE DE CUADROS

x

ÍNDICE DE FIGURAS

xiii

CAPÍTULO 1. ASPECTOS INTRODUCTORIOS

1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 JUSTIFICACIÓN	3
1.3 OBJETIVOS	4
1.4 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO	5
1.5 HIDROGRAFÍA Y RELIEVE	5
1.6 SUELOS	8
1.7 GEOLOGÍA	10
1.8 FISIOGRAFÍA	15
1.9 ZONA DE VIDA Y CLIMA	17
1.10 USO DE LA TIERRA	18

CAPÍTULO 2. MÉTODOS

2.1 FASE PRELIMINAR	22
2.2 FASE DE CAMPO	23
2.3 FASE DE ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS	25
2.4 ELABORACIÓN FINAL DEL INFORME	26

CAPÍTULO 3. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL

3.1 CICLO HIDROLÓGICO	27
3.2 RECARGA HÍDRICA	39
3.3 METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR RECARGA HÍDRICA	52
3.4 BALANCE HÍDRICO DE SUELOS	56
3.5 DETERMINACIÓN DE PRINCIPALES ÁREAS DE RECARGA HÍDRICA NATURAL	64
3.6 DETERMINACIÓN DE ÁREAS CRÍTICAS DE RECARGA HÍDRICA NATURAL	65

CAPÍTULO 4. CALIDAD DEL AGUA

4.1 DEFINICIÓN E IMPORTANCIA	69
4.2 CONSUMO HUMANO	72
4.3. RIEGO	82

CAPÍTULO 5. SITUACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES

5.1 AGUA	89
5.2 SUELO	99

5.3 BOSQUE	101
------------	-----

CAPÍTULO 6. LINEAMIENTOS DE MANEJO

6.1 CONCEPTOS	103
6.2 ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL	103
6.3 LINEAMIENTOS DE MANEJO	106

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES	111
7.2 RECOMENDACIONES	113

BIBLIOGRAFÍA	114
--------------	-----

ANEXO 1. DATOS CLIMÁTICOS Y DEL BALANCE HÍDRICO	118
ANEXO 2. PRUEBAS DE INFILTRACIÓN	122
ANEXO 3. BALANCE HÍDRICO DE SUELOS	167
ANEXO 4. DIAGRAMAS DE PIPER	196

ÍNDICE DE CUADROS

Pág.

Cuadro 1.	Uso actual de la tierra en la microcuenca del río Cotón.	18
Cuadro 2.	Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas situadas en la microcuenca del río Cotón.	28
Cuadro 3.	Precipitación pluvial mensual (mm) de las estaciones situadas en la microcuenca del río Cotón.	29
Cuadro 4.	Temperatura máxima, mínima y media (°C) promedio mensual de las estaciones situadas en la microcuenca del río Cotón.	30
Cuadro 5.	Evapotranspiración potencial (mm) en la estación meteorológica Tuncáj situada en la parte alta de la microcuenca del río Cotón.	30
Cuadro 6.	Evapotranspiración potencial (mm) en la estación meteorológica Medio Monte situada en la parte media de la microcuenca del río Cotón.	31
Cuadro 7.	Ubicación y caudal del cauce principal y manantiales aforados en el mes de Marzo en la microcuenca del río Cotón.	34
Cuadro 8.	Caudal del cauce principal y manantiales aforados en el mes de Agosto en la microcuenca del río Cotón.	36
Cuadro 9.	Aforos diferenciales realizados en el mes de Marzo en la parte baja de la microcuenca del río Cotón.	38
Cuadro 10.	Aforos diferenciales realizados en el mes de Abril en la parte alta y media de la microcuenca del río Cotón.	39
Cuadro 11.	Textura, densidad aparente, contenidos de humedad y materia orgánica de los suelos de la microcuenca del río Cotón.	45
Cuadro 12.	Velocidad de infiltración básica de los suelos de la microcuenca del río Cotón.	49
Cuadro 13.	Valores de coeficientes (Kp) según rangos de pendientes.	55
Cuadro 14.	Valores de coeficientes (Kv) según tipo de cobertura vegetal.	55
Cuadro 15.	Recarga hídrica natural anual de las unidades de mapeo de la microcuenca del río Cotón.	61
Cuadro 16.	Balance hídrico de suelos de la microcuenca del río Cotón.	62
Cuadro 17.	Porcentaje de error de la estimación del balance hídrico de suelos.	63
Cuadro 18.	Clasificación de áreas de recarga hídrica natural de la microcuenca del río Cotón.	64

Cuadro 19.	Códigos asignados a los factores evaluados en la delimitación de áreas críticas de recarga hídrica natural.	65
Cuadro 20.	Priorización de áreas críticas de recarga hídrica natural en la microcuenca del río Cotón.	66
Cuadro 21.	Ubicación de las fuentes de agua muestreadas en la microcuenca del río Cotón.	70
Cuadro 22.	Parámetros físicos de las fuentes de agua de la microcuenca del río Cotón.	75
Cuadro 23.	Parámetros fisicoquímicos de las fuentes de agua de la microcuenca del río Cotón.	76
Cuadro 24.	Clasificación fisicoquímica de las fuentes de agua de la microcuenca del río Cotón.	79
Cuadro 25.	Parámetros bacteriológicos de las fuentes de agua de la microcuenca del río Cotón.	81
Cuadro 26.	Parámetros fisicoquímicos para riego de las fuentes de agua de la microcuenca del río Cotón.	85
Cuadro 27.	Efecto del Sodio sobre las propiedades físicas del suelo.	88
Cuadro 28.	Área de protección de los manantiales captados en proyectos de abastecimiento de agua para consumo humano en la microcuenca del río Cotón.	91
Cuadro 29.	Eficiencias de conducción de proyectos de abastecimiento de agua para consumo humano en la microcuenca del río Cotón.	93
Cuadro 30.	Ubicación de los manantiales captados en proyectos de abastecimiento de agua para consumo humano en la microcuenca del río Cotón.	95
Cuadro 31.	Disponibilidad y demanda de agua para consumo humano en las comunidades de la microcuenca del río Cotón.	96
Cuadro 32.	Proyección de la demanda de agua para consumo humano en las comunidades de la microcuenca del río Cotón.	97
Cuadro 33.	Análisis FODA de la situación actual de la microcuenca del río Cotón.	104
Cuadro 34A.	Precipitación media mensual (mm) estimada mediante el método de las curvas isoyetas para cada unidad de mapeo de la microcuenca del río Cotón.	119
Cuadro 35A.	Evapotranspiración media mensual (mm) estimada mediante el método de las curvas isopletras para cada unidad de mapeo de la microcuenca del río Cotón.	120
Cuadro 36A.	Factores utilizados en el balance hídrico de suelos.	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1.	Ubicación geográfica de la microcuenca del río Cotón, Baja Verapaz.	6
Figura 2.	Centros poblados y vías de acceso de la microcuenca del río Cotón, Baja Verapaz.	7
Figura 3.	Hipsometría e hidrografía de la microcuenca del río Cotón, Baja Verapaz.	9
Figura 4.	Series de suelos según Simmons, de la microcuenca del río Cotón, Baja Verapaz.	11
Figura 5.	Unidades geológicas de la microcuenca del río Cotón, Baja Verapaz.	16
Figura 6.	Uso actual de la tierra en la microcuenca del río Cotón, Baja Verapaz.	21
Figura 7.	Unidades de mapeo de la microcuenca del río Cotón, Baja Verapaz.	24
Figura 8.	Ubicación de sitios de aforos diferenciales en la microcuenca del río Cotón, Baja Verapaz.	40
Figura 9.	Isolíneas y dirección del flujo en la microcuenca del río Cotón, Baja Verapaz.	41
Figura 10.	Áreas críticas de recarga hídrica natural de la microcuenca del río Cotón, Baja Verapaz.	68
Figura 11.	Ubicación de fuentes de agua muestreadas en la microcuenca del río Cotón, Baja Verapaz.	71
Figura 12.	Áreas estimadas de protección de manantiales captados para consumo humano en la microcuenca del río Cotón, Baja Verapaz.	92
Figura 13.	Déficit hídrico en la estación Tuncáj.	98
Figura 14.	Comparación de los coeficientes de recarga hídrica natural y escorrentía superficial.	101
Figura 15A.	Diagrama de Piper de los manantiales captados para abastecimiento de proyectos de agua para consumo humano.	197
Figura 16A.	Diagrama de Piper de los manantiales captados para abastecimiento de proyectos de agua para riego.	198
Figura 17A.	Diagrama de Piper del cauce principal y del manantial Joya Oscura.	199

LISTADO DE ACRÓNIMOS

COGUANOR	Comité Guatemalteco de Normas
CONAMA	Comisión Nacional del Medio Ambiente
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
FAUSAC	Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos
IGN	Instituto Geográfico Nacional
IIA	Instituto de Investigaciones Agronómicas
INAB	Instituto Nacional de Bosques
INE	Instituto Nacional de Estadística
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología
LAMIR	Laboratorio de Microbiología
MAGA	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación
NOVIB	Organización Holandesa Para la Cooperación Internacional al Desarrollo
OMS	Organización Mundial de la Salud
OPS	Organización Panamericana de la Salud
PIRENAR	Programa de Investigación de Recursos Naturales Renovables
SIECA	Secretaría de Integración Económica Centroamericana
SIGAP	Sistema Guatemalteco de Áreas Protegidas
UNICEF	Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia
USAC	Universidad de San Carlos de Guatemala
USDA	United States Department of Agriculture

CAPÍTULO 1

ASPECTOS INTRODUCTORIOS

1.1 ANTECEDENTES

La Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala, desde hace más de una década, ha estado involucrada en la investigación de los recursos naturales renovables y específicamente en el recurso hídrico. En el año 1.990, el Instituto de Investigaciones Agronómicas (IIA) creó y aprobó el programa de investigación de recursos naturales renovables (PIRENAR), en donde se elaboró el proyecto “Priorización de Cuencas Hidrográficas”, seleccionándose como prioritarias las cuencas de los ríos Achiguate en la vertiente del océano Pacífico, Grande de Zacapa en la vertiente del océano Atlántico y Chixoy en la vertiente del golfo de México. (USAC, 1994)

En el año 2.003, conjuntamente con el Instituto Nacional de Bosques (INAB), se estableció el primer adendum al convenio de cooperación técnica, para realizar estudios que permitan la planificación, manejo sostenible, protección y recuperación de los recursos hídricos y forestales en áreas geográficas de interés común, razón por la cual se realizó la presente investigación, en donde participaron las instituciones mencionadas anteriormente, la municipalidad de Pachalúm (Quiché), y comunidades de los municipios de Granados y Cubulco (Baja Verapaz).

En lo que respecta a aspectos legales, en Guatemala no existe un marco legal en materia de uso, manejo y protección del recurso hídrico, sin embargo, existen algunas leyes dispersas que hacen mención del recurso. En la constitución de la república de Guatemala, la ley forestal en el artículo 47 menciona lo siguiente: “Se prohíbe eliminar el bosque en las partes altas de las cuencas, en especial las que están ubicadas en zonas de recarga hídrica que abastecen fuentes de agua, las que gozarán de protección especial. En el caso de zonas deforestadas en zonas importantes de recarga hídrica, en tierras municipales, estatales o privadas, deberán establecerse programas especiales de regeneración y rehabilitación”. Y según el reglamento de la ley forestal, en su artículo 35, establece: “El INAB en un plazo no mayor de un año, a partir de la promulgación del presente reglamento, identificará las áreas de recarga hídrica que sea necesario conservar y restaurar, los bosques ubicados en las zonas de recarga hídrica que podrán ser sujetas a manejo forestal sostenible, conforme plan de manejo. El INAB, además fomentará con recursos financieros del fondo forestal privativo, procesos de negociación y proyectos de manejo y restauración de cuencas con el fin de reconocer a los propietarios de bosques, los servicios ambientales generados por los ecosistemas forestales”.

Además la ley de áreas protegidas (decreto 4-89 y sus modificaciones), se refiere a la protección de las fuentes de agua en los siguientes términos “Fuentes de Agua”. Como programa prioritario del SIGAP (Sistema Guatemalteco de Áreas Protegidas), se crea el subsistema de conservación de bosques pluviales, de tal manera de asegurar un suministro de agua constante y de aceptable calidad para la comunidad guatemalteca, dentro de el podrá haber reservas naturales privadas.

De acuerdo a la ley forestal (acuerdo gubernativo 101-96), al INAB le corresponde emitir normas especiales en zonas de recarga hídrica, particularmente donde el vínculo hidrológico-forestal es relevante en la regulación de ciclos hidrológicos locales y/o regionales, particularmente en función del mejoramiento del bosque a la recarga hídrica. De esta manera, este mecanismo partirá de una delimitación de las zonas de recarga, una caracterización de las condiciones del bosque en estas zonas y mecanismos de uso, restauración y protección. Asimismo, el artículo 47 establece protección especial de áreas de recarga hídrica y establecimiento de programas especiales de rehabilitación y restauración de áreas degradadas.

El área de influencia de la microcuenca del río Cotón, el cerro Tuncáj, ocupa una extensión de 81 km², el cual es considerado de gran importancia, por ser una zona de captación y recarga hídrica que abastece de agua a los pobladores de los municipios de Rabinal, El Chol, Cubulco, Granados y Pachalúm, ha tenido un manejo inadecuado de las áreas boscosas, tal y como ocurre en otras regiones de Guatemala. Este manejo inadecuado ha provocado la degradación y erosión de los suelos, así como una disminución de la cantidad de agua, repercutiendo además en la biodiversidad, dado a que los recursos agua, suelo y bosque están interrelacionados. El deterioro y/o mal manejo de cada uno de los recursos naturales afecta directa o indirectamente la condición de los demás, por lo que un manejo integral es de vital importancia para la sostenibilidad del recurso hídrico.

Ávalos (2003), menciona que en años anteriores se tuvieron problemas en el área, lo cual fue debido al manejo forestal, ya que personas de las comunidades de la parte baja no estaban de acuerdo con las licencias forestales vigentes, porque sus fuentes de agua estaban siendo afectadas y sus caudales se estaban reduciendo significativamente, situación que fue la causa de que se generaran conflictos, el problema se agudizó cuando se autorizaron talas rasas en terrenos con fuertes pendientes. Aducían, a que el deterioro del recurso bosque es por la autorización de licencias forestales, pero no se reconoce que este tipo de actividades tiene compromisos de recuperación de las áreas, el cual se logra mediante el establecimiento de nuevas plantaciones.

Dada la problemática planteada anteriormente, delimitar las áreas de recarga hídrica natural en la microcuenca del río Cotón, es fundamental para conocer los volúmenes de agua que se recargan por efecto de la lluvia y en que áreas se presenta en mayor medida, así como la calidad y la disponibilidad en la época de estiaje, ya que actualmente se desconoce.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El agua es un recurso natural, finito y vulnerable, en años anteriores era abundante y disponible en cualquier época, pero actualmente en muchos países del mundo es escasa. En Guatemala ha venido sufriendo un gran deterioro, por otro lado también disminuye su calidad para ser utilizada con fines de consumo humano y riego en la agricultura, lo cual es debido principalmente al manejo inadecuado en las áreas de recarga hídrica en las cuencas hidrográficas, ocasionado por la deforestación y la contaminación que se ocasiona a los acuíferos, principalmente por los sectores agrícola, industrial y doméstico, aunado a esto el aumento en la demanda de agua debido al acelerado crecimiento demográfico y el desarrollo socioeconómico.

FAO (1996), menciona que la escasez del agua amenaza aspectos fundamentales de la seguridad humana, tal como la producción de alimentos, la salud del medio acuático y la estabilidad social y política, ya que es la causa de que actualmente se generen conflictos entre usuarios, tanto en el ámbito nacional como internacional. Esta situación se dio en el área de influencia de la microcuenca del río Cotón, de mucha importancia, debido a que es la única fuente de abastecimiento de agua para consumo humano de los pobladores de la cabecera municipal de Pachalúm y de comunidades de los municipios de Granados y Cubulco, ya que no existen extracciones de agua subterránea mediante pozos perforados y/o artesanales.

De esto se deriva la importancia de proteger las áreas de recarga hídrica natural, mediante la delimitación de áreas críticas, para posteriormente definir el manejo sostenible a realizar con el objetivo de mantener y/o mejorar sus características, y de esta forma, contribuir con la productividad y sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo, preservar los caudales base de ríos y manantiales, así como la biodiversidad.

En el plan de acción para la gestión integrada de los recursos hídricos del istmo centroamericano (SIECA *et al.* 1998) se menciona que no solamente es necesario conocer la cantidad de agua que recarga naturalmente el acuífero, si no la calidad de la misma para cada uso específico, dado a que es característico, único e indivisible en la gestión del agua. Conocer la calidad del agua en la microcuenca es de gran importancia, principalmente para consumo humano, ya que actualmente esta es distribuida a la población sin

recibir ningún tratamiento previo de potabilización. Además López Choc (1998), realza la importancia de realizar estudios de disponibilidad de agua en acuíferos que puedan servir para la planificación de las actividades del sector y el desarrollo de proyectos.

En este caso se propuso estudiar el problema al nivel de cuenca hidrográfica, siendo la microcuenca del río Cotón, que forma parte del cerro Tuncáj.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 General

1. Determinar las principales áreas de recarga hídrica natural de la microcuenca del río Cotón, con el fin de planificar su manejo sobre el recurso hídrico.

1.3.2 Específicos

1. Estimar la recarga hídrica natural que se produce en la microcuenca del río Cotón, a través del balance hídrico de suelos.
2. Delimitar las áreas de recarga hídrica natural en la microcuenca del río Cotón.
3. Determinar la calidad fisicoquímica y bacteriológica de los principales ríos y manantiales de la microcuenca del río Cotón, para consumo humano y riego.
4. Proporcionar lineamientos estratégicos que permitan un manejo racional y sostenible del recurso hídrico en la microcuenca del río Cotón.

1.4 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

La microcuenca del río Cotón, se encuentra en jurisdicción de los municipios de Granados y Cubulco, ambos pertenecientes al departamento de Baja Verapaz. Se localiza en el Sur-Occidente de este departamento, en la zona limítrofe con el departamento de Quiché. (IGN, 1976)

Pertenece a la subcuenca del río El Tumbadero, el cual es tributario de la cuenca del río Motagua, en la vertiente del Océano Atlántico. La parte alta de la microcuenca limita con la vertiente del Golfo de México. (Figura 1)

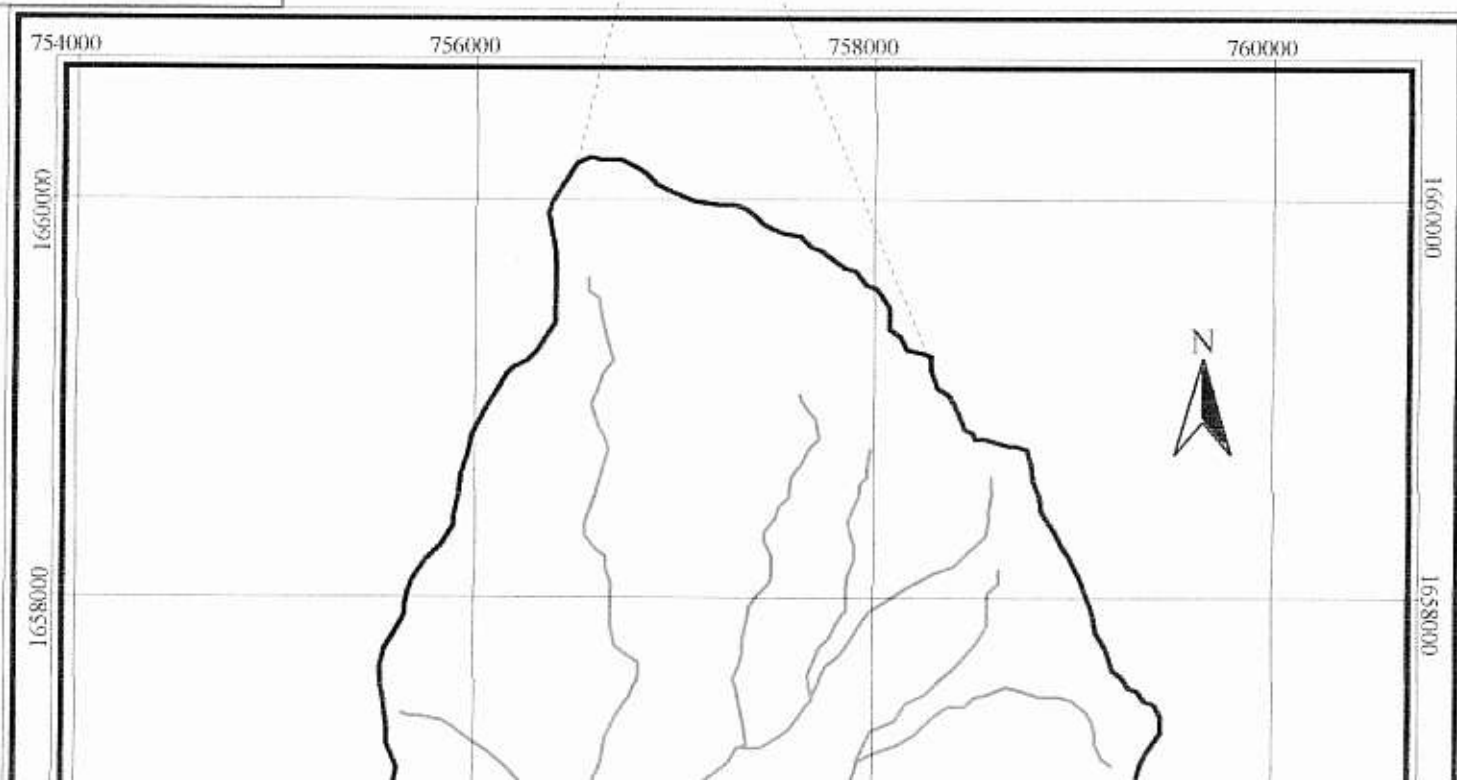
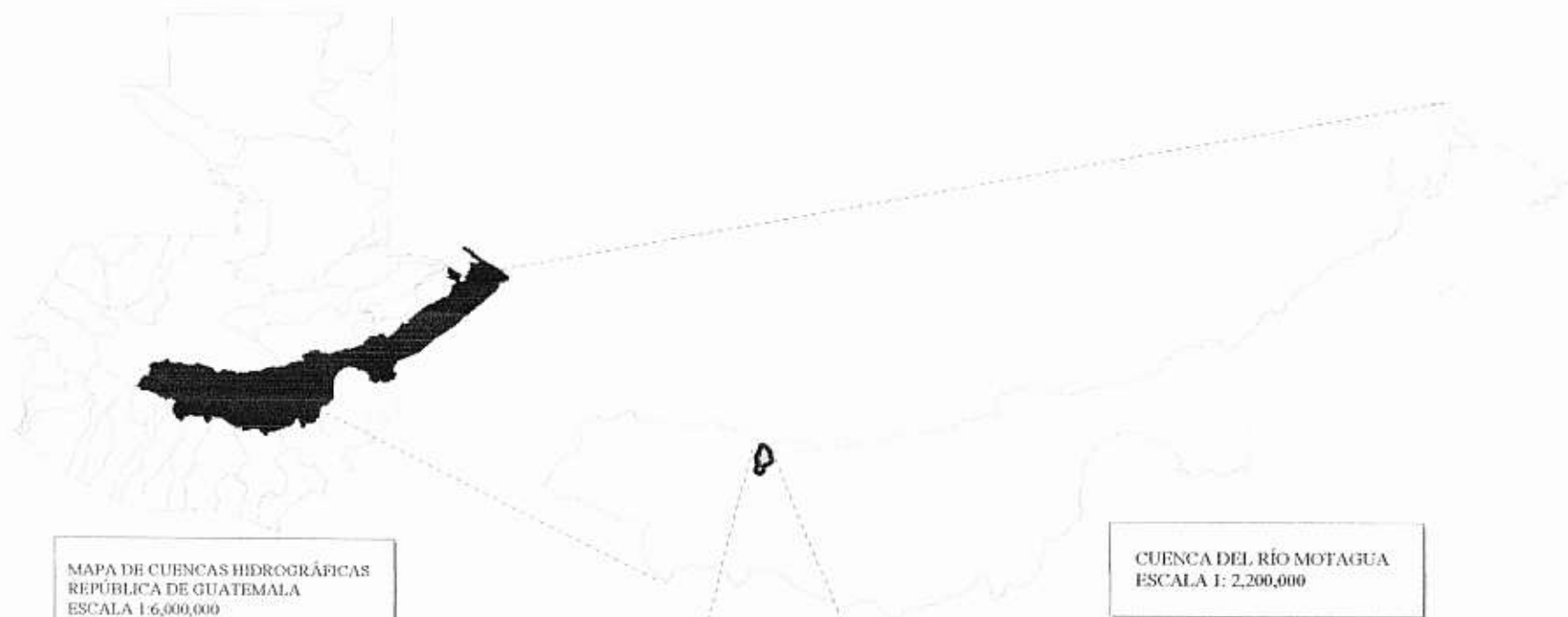
La microcuenca en estudio ocupa una extensión de 28.47 km² y se localiza en las coordenadas geográficas: 14° 54' 49" y 15° 00' 26" de latitud Norte; 90° 38' 24" y 90° 35' 3" de longitud Oeste. La altura oscila entre los 1.100 y 2.400 msnm. De acuerdo con Aparicio (2001), la microcuenca se clasifica como exorreica.

El acceso a la microcuenca es por la carretera de terracería que comunica las cabeceras municipales de Pachalúm (Quiché) y Cubulco (Baja Verapaz), la cual es transitable en su mayoría durante todo el año. Desde la cabecera municipal de Pachalúm, se puede acceder sobre el km 78 y 82 de esta ruta, para ingresar a la parte media y alta, por las comunidades de Ojo de Agua y Tuncáj respectivamente, estos caminos pertenecen a la red vial interna de la microcuenca, la cual en su mayoría es transitable solamente en la época seca. (Figura 2)

1.5 HIDROGRAFÍA Y RELIEVE

La república de Guatemala presenta dos grandes regiones hidrográficas determinadas por el sistema orográfico. La primera región está formada por los ríos que desembocan en el océano Pacífico (vertiente del océano Pacífico) y la segunda región, formada por los ríos que desembocan en el océano Atlántico, la cual se subdivide en los ríos que desembocan en el golfo de México (vertiente del golfo de México) y los ríos que desembocan en el golfo de Honduras (vertiente del Océano Atlántico). (MAGA, 1991)

El río Cotón, es una corriente relativamente pequeña de orden 3, con un caudal en la época de estiaje en el punto de aforo de aproximadamente 9,043 m³/día. La mayoría de sus corrientes tributarias son permanentes, a excepción de la corriente Ojo de Agua 2, manantial 1 y las corrientes 1, 2 y 3 de Rancho Viejo, que son efímeras.



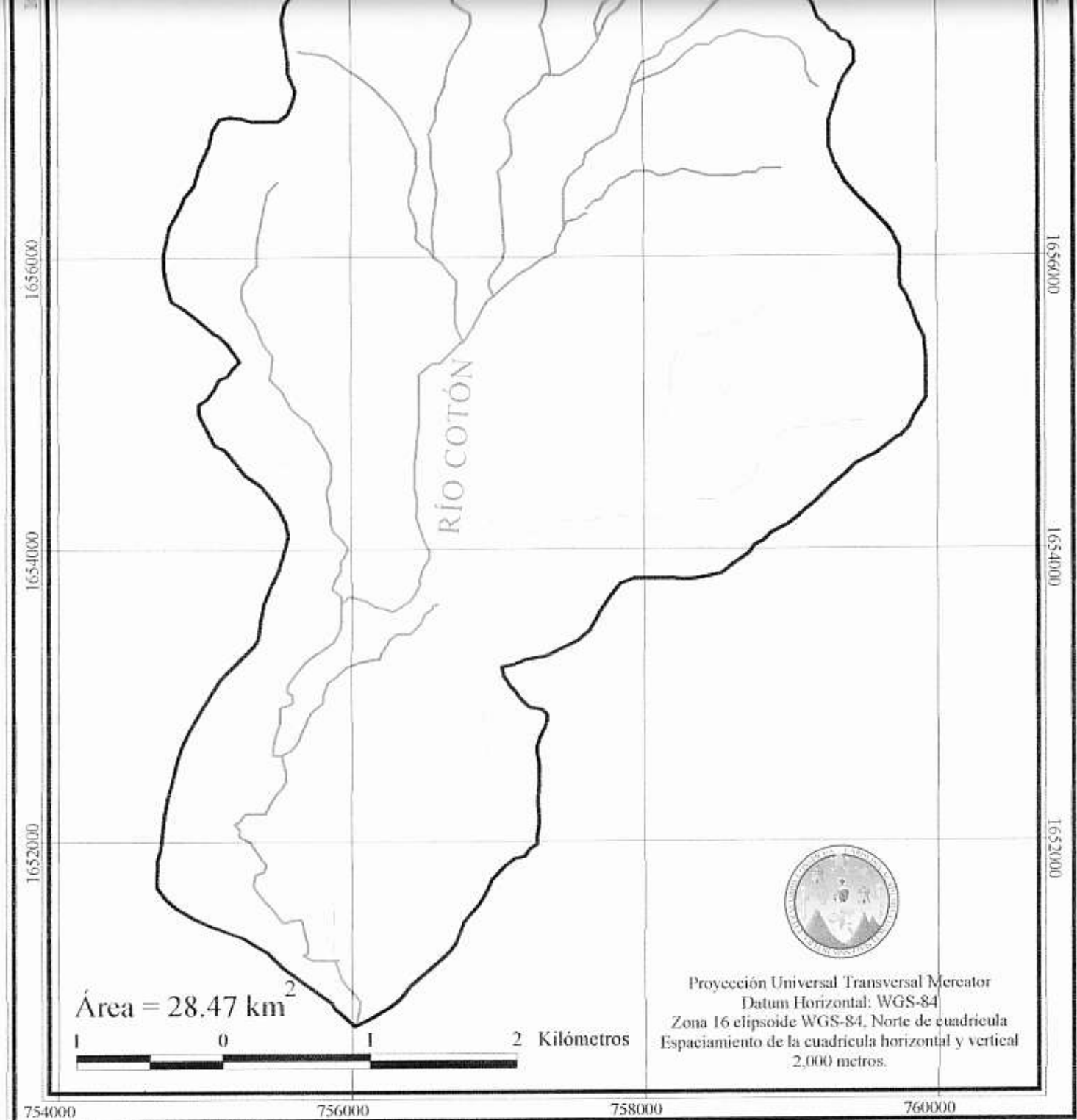
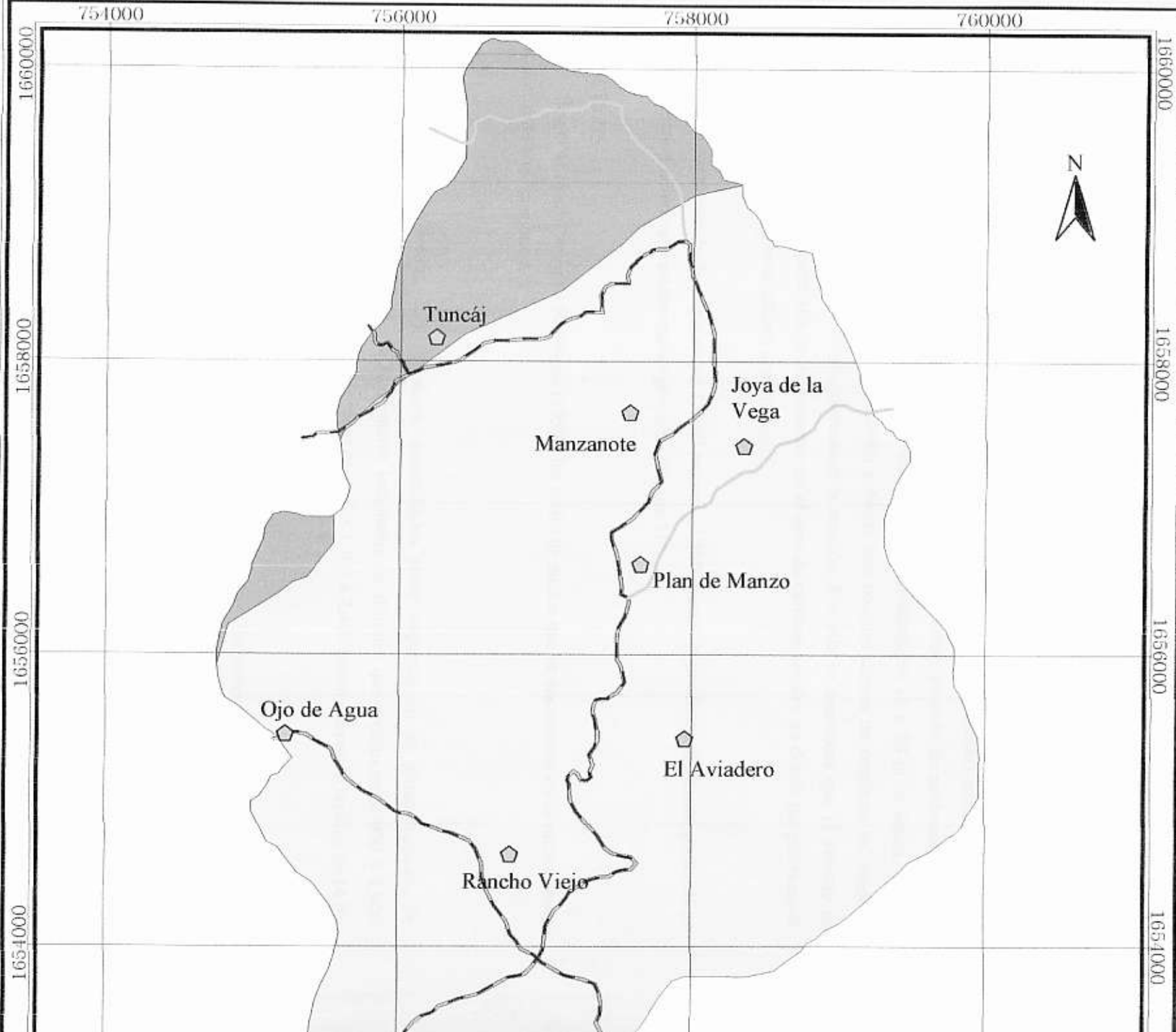


FIGURA 1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA



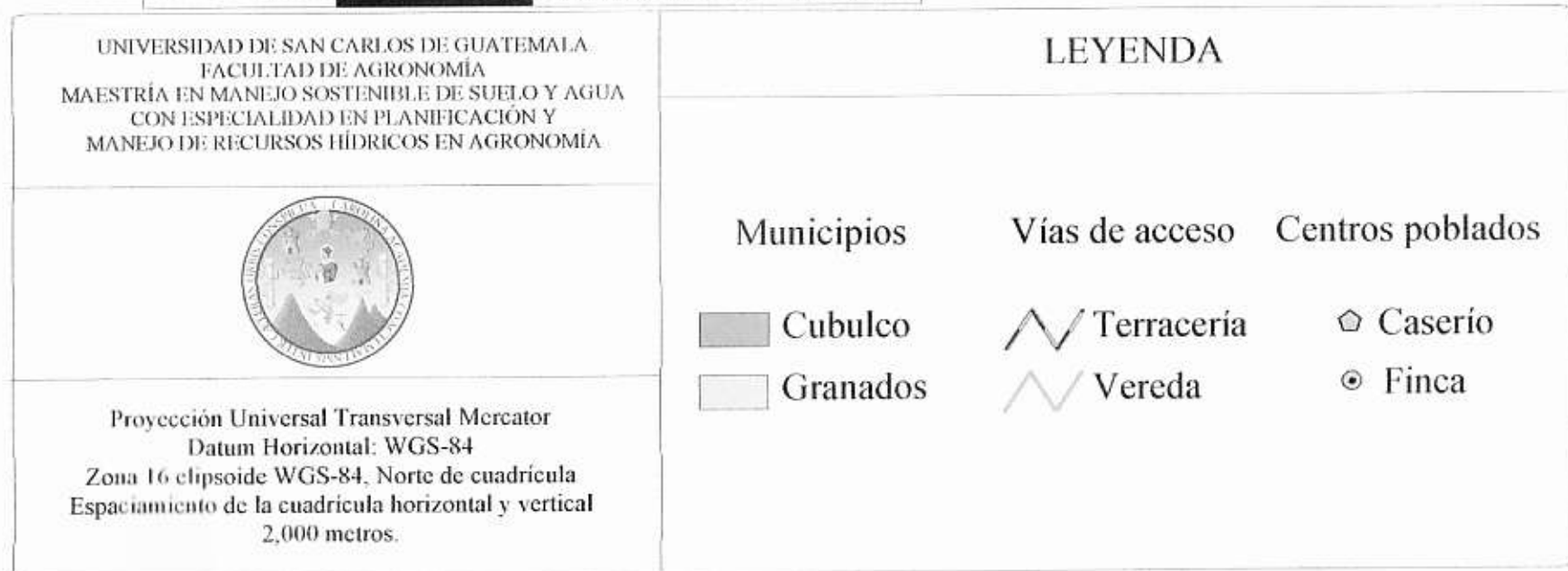
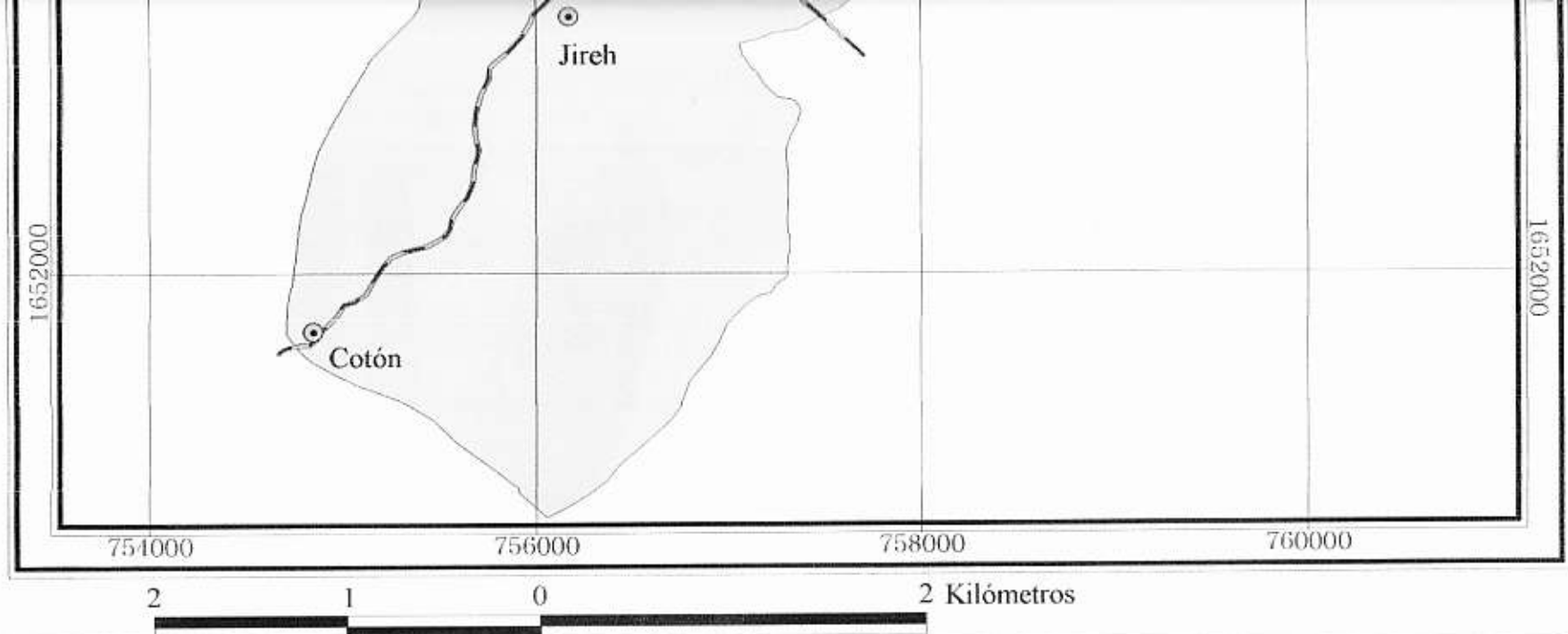


FIGURA 2. CENTROS POBLADOS Y VÍAS DE ACCESO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO COTÓN, BAJA VERAPAZ.

El caudal en el punto de aforo aumenta considerablemente en la época de invierno, ya que dada las condiciones de intensidad de la precipitación, relieve y baja velocidad de infiltración de los suelos, hace que la mayor parte de la precipitación escurra sobre la superficie del suelo, ocasionando alta erosión. Esto ocurre principalmente en el área de la microcuenca comprendida entre los 1,100 a 1,600 msnm, donde la velocidad de infiltración de los suelos es muy baja, encontrándose en algunos casos valores hasta de 0.005 m/día.

El relieve de la microcuenca es muy quebrado, con pendientes en las partes media y alta mayores de 50%. La mayoría de corrientes se originan en la parte alta (2,000 msnm – 2,400 msnm) arriba de los 2,200 msnm. al llegar a los 2,000 msnm sufren un cambio abrupto de pendiente, pasando de moderado a fuerte, hasta los 1,400 msnm, zona donde se presentan caídas de aproximadamente 10 a 20 m de altura. En este trayecto del cauce principal, el suelo se encuentra cubierto con bosques densos de coníferas en donde el amortiguamiento del bosque a la lluvia, disminuye la erosión. Por ello se considera que el arrastre de materiales proviene de la parte alta, principalmente en el área de cultivos anuales en donde las prácticas de conservación de suelos que se utilizan son mínimas.

En la parte baja de la microcuenca (1,100 msnm – 1,500 msnm) la pendiente del cauce principal es suave, formándose un valle relativamente pequeño. (Figura 3)

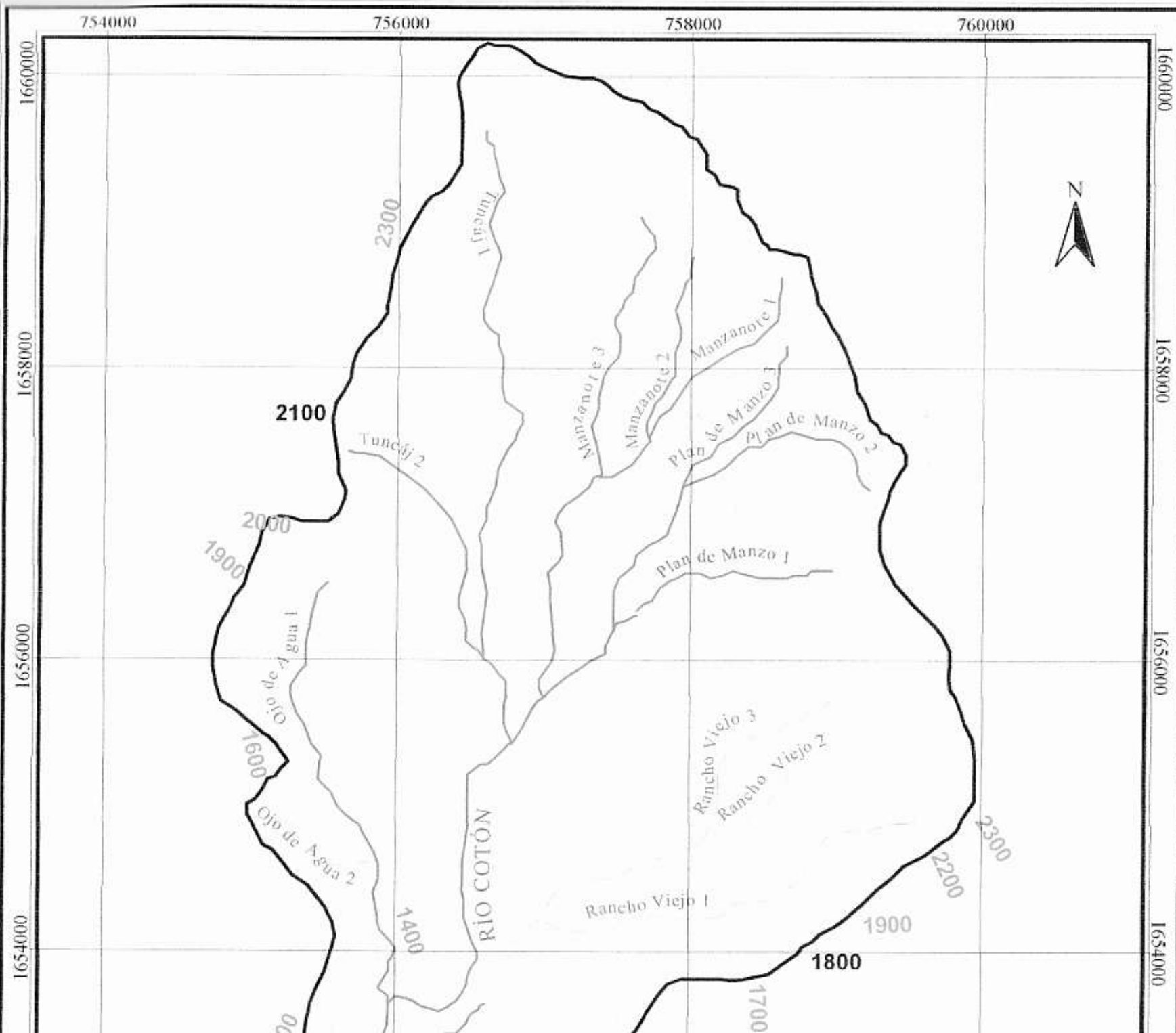
1.6 SUELOS

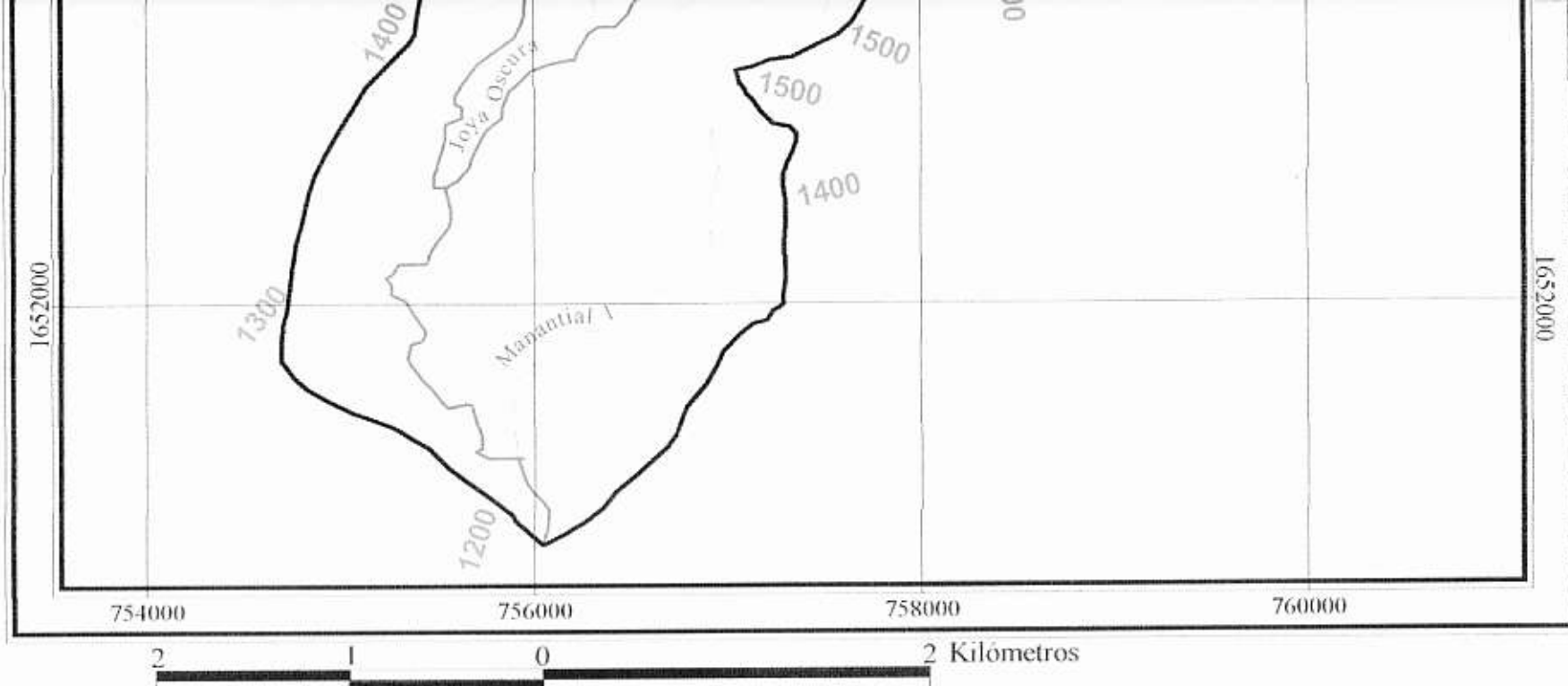
Según la clasificación de Simmons (1959), las series de suelos que se encuentran en la microcuenca del río Cotón son las siguientes:

1.6.1 Civijá

Son suelos profundos, bien drenados, desarrollados sobre esquistos en un clima húmedo. Se encuentran en relieves de ondulados a fuertemente inclinados en altitudes que oscilan entre 900 y 1,900 msnm. En la microcuenca se localizan en altitudes desde los 1,500 a 2,400 msnm ocupando un área de 14.05 km², principalmente en la parte alta.

El material parental es esquisto arcilloso y esquisto, relieve fuertemente ondulado a escarpado, drenaje interno bueno. El suelo superficial es de color café oscuro, textura franco limosa, consistencia friable, con un espesor aproximado de 0.30 m. El subsuelo es de color café rojizo, consistencia friable, textura franco arcillo limosa, con espesor aproximado de 1 m o más.





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
MAESTRÍA EN MANEJO SOSTENIBLE DE SUELO Y AGUA
CON ESPECIALIDAD EN PLANIFICACIÓN Y
MANEJO DE RECURSOS HÍDRICOS EN AGRONOMÍA



Proyección Universal Transversal Mercator
Datum Horizontal: WGS-84
Zona 16 elipsoide WGS-84, Norte de cuadrícula
Espaciamiento de la cuadrícula horizontal y vertical
2,000 metros.

LEYENDA

 Parteaguas

Tipo de corriente

 Permanente

 Efímera

Curvas a nivel con intervalo
de distancia de 100 m.

FIGURA 3. HIPSOMETRÍA E HIDROGRAFÍA DE LA
MICROCUEENCA DEL RÍO COTÓN, BAJA VERAPAZ.

1.6.2 Acasaguastlán

Estos suelos se encuentran en sitios semiáridos o húmedo secos, en altitudes que oscilan entre 300 y 900 msnm. En la microcuenca se localizan desde el punto de aforo (1,112 msnm) hasta altitudes de 2,400 msnm ocupando un área de 14.42 km², principalmente en las partes baja y media.

El material parental es serpentina, relieve inclinado a escarpado, con drenaje interno bueno. El suelo superficial es de color café rojizo oscuro, textura franco arcillosa, consistencia friable, con espesor aproximado de 0.10 a 0.15 m. El subsuelo es de color café rojizo a rojo, consistencia friable, textura arcillosa o franco arcillosa, con un espesor aproximado de 0.15 a 0.25 m. La distribución de las series de suelos en la microcuenca del río Cotón se muestra en la figura 4.

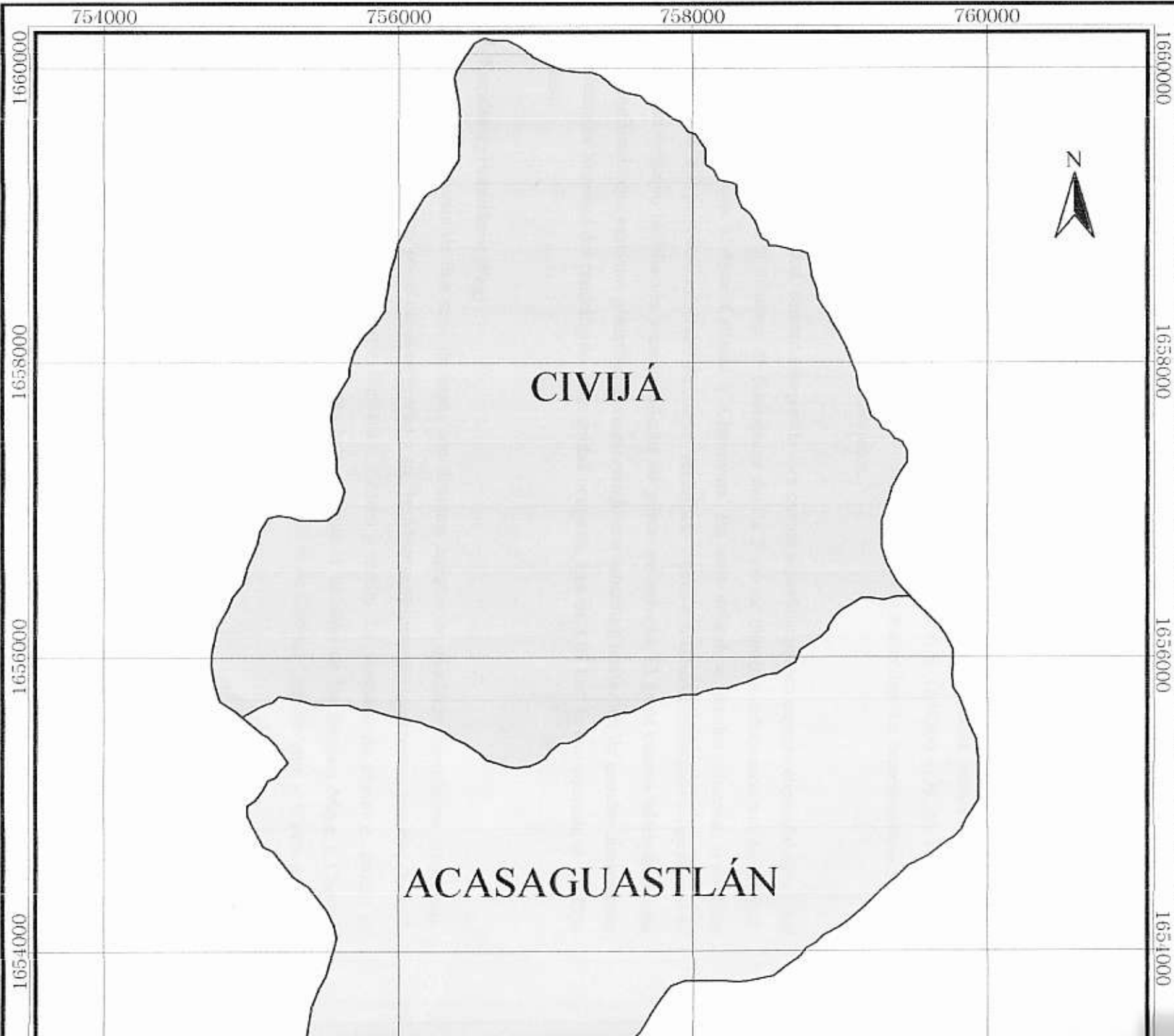
1.7 GEOLOGÍA

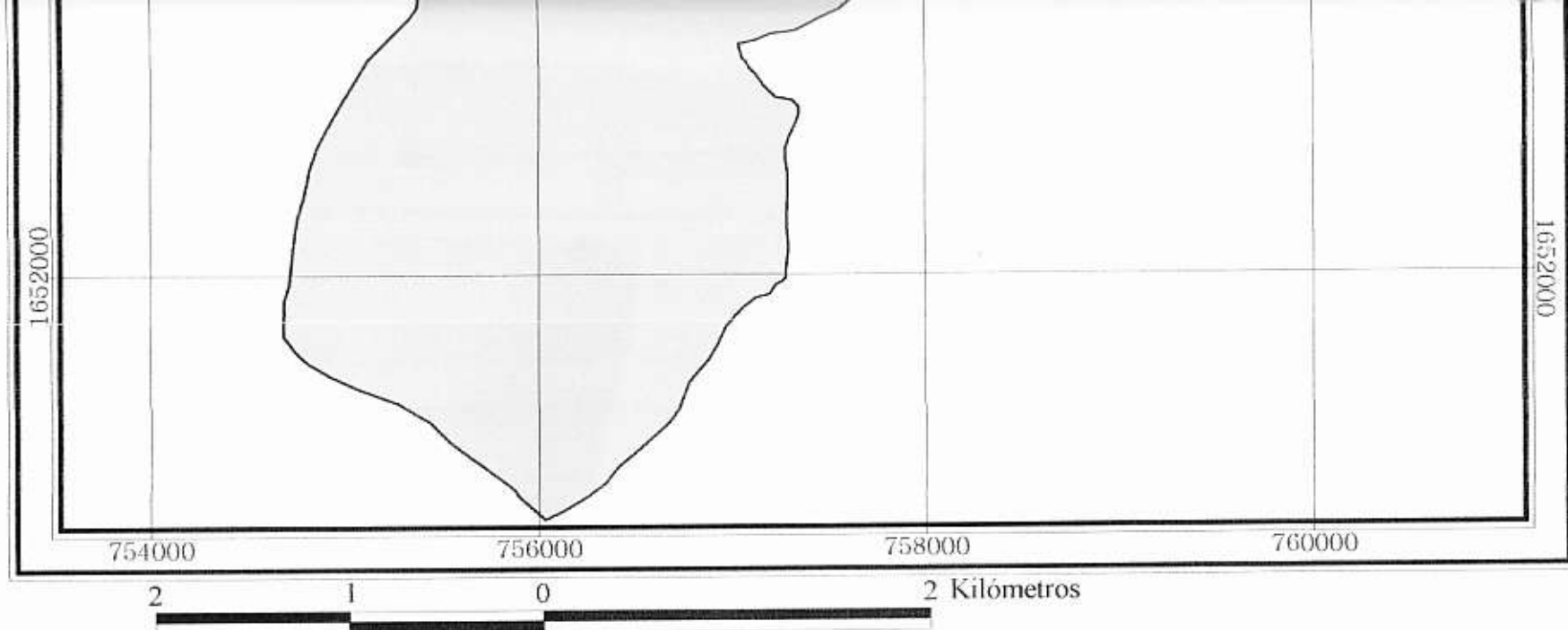
1.7.1 Regional

El sistema tectónico de América Central está definido por la conjunción de las placas de Norteamérica, Caribe y la de Cocos. Las placas de Norteamérica y del Caribe que se desplazan en el sentido horizontal una con respecto a la otra, definen en Guatemala dos terrenos geológicos distintos: al Norte las rocas sedimentarias del Paleozoico y Mesozoico; y al Sur principalmente rocas ígneas recientes del Terciario y Cuaternario. Estas dos placas están separadas por la ocurrencia de los principales sistemas de fallas transcurrentes con desplazamiento sinistral (con orientación aproximada Este - Oeste), conocido como el sistema de fallas de Motagua, Chixoy-Polochic, Jocotán y de Jalpatagua; correspondiendo esta región, al cinturón plegado metamórfico. (INSIVUMEH-BRGM, 1997)

En la parte sur centroamericana, la Placa de Cocos se dispone en forma paralela frente a las costas del Pacífico, entre los 110 a 150 km de distancia de la línea de costa y define la Fosa Mesoamericana, conocida como la zona de subducción, que es el lugar de choque de una placa oceánica (placa de Cocos) con una continental (porción Oeste de la placa del Caribe), donde la placa de Cocos se introduce debajo de la placa del Caribe, alcanzando frente a la costa de Guatemala la mayor profundidad (6,700 m) y una sismicidad intermedia. (Fisher 1961, citado por Herrera 1998)

El proceso de subducción se realiza principalmente por la mayor densidad de la placa oceánica que presenta valores de 3 g/cc que se sumerge bajo la placa del Caribe, la cual posee menor densidad (2.5 a 2.7 g/cc) y cabalga sobre la corteza oceánica. Este choque y subducción entre placas trae como consecuencia el apareamiento de sismicidad y vulcanismo. (Herrera, 2002)





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE AGRONOMÍA MAESTRÍA EN MANEJO SOSTENIBLE DE SUELO Y AGUA CON ESPECIALIDAD EN PLANIFICACIÓN Y MANEJO DE RECURSOS HÍDRICOS EN AGRONOMÍA	SERIE DE SUELOS	ÁREA % km²
	□ Acasaguastlán	50.65 14.42
	■ Civijá	49.35 14.05
Proyección Universal Transversal Mercator Datum Horizontal: WGS-84 Zona 16 elipsoide WGS-84, Norte de cuadrícula Espaciamiento de la cuadrícula horizontal y vertical 2,000 metros.	TOTAL	28.47

FIGURA 4. SERIES DE SUELOS SEGÚN SIMMONS, DE LA MICROCUENCA DEL RÍO COTÓN, BAJA VERAPAZ.

1.7.2 Local

Basado en el estudio realizado por Chiquín y Requena (2001), en la microcuenca del río Cotón, se determinaron las siguientes unidades geológicas:

A. Gneis cuarzo-feldespato-microclina (Pgcfm)

Esta unidad aflora en la esquina NW y al Norte de Saltán y Granados. Macroscópicamente se observa cuarzo, feldespato y mica blanca dispuestas en bandas, conformando un excelente bandeo composicional de 0.2 cm a 1 cm. el tamaño de los granos minerales oscila de 0.1 cm a 0.4 cm de textura media-gruesa. Análisis por DRX, a una muestra tomada en las coordenadas 765300 m E, 1654200 m N, dio el siguiente resultado mineralógico: cuarzo, alófana, albita, muscovita, biotita y microclina. La presencia de la mineral alófana, se debe a la meteorización de los feldespatos.

Dentro de esta unidad, ocurren cuerpos de roca que en superficie poseen aspecto elipsoidal de textura granoblástica con cristales tubulares de feldespatos de 1 a 3 cm de diámetro, tales casos son los cuerpos localizados cercanos a Agua Caliente y Chumunus. En esta unidad se pueden observar pegmatitas metamórficas, que presentan minerales de cuarzo, feldespato y mica o solamente feldespato y cuarzo, que se encuentran cortando la foliación y como rellenos de grietas en *echelón*. El gneis cuarzo-feldespático esta interestratificado con esquistos granatíferos constituyendo una estructura antiformal, de grandes dimensiones en la esquina Noroeste del cuadrángulo. Esta unidad ocupa un área de 3.08 km² lo que equivale al 10.82% del total.

B. Esquistos granatíferos (Peg)

Está compuesta de una serie de capas con distintos arreglos de esquistos fuertemente crenulados, cuarcitas, mármol, y muy pocas capas de grafito y arcilla. Macroscópicamente se observan granates (hasta 3 cm de diámetro), mica blanca, cuarzo, feldespato, distena y clorita. La presencia de clorita es debido al metamorfismo retrogrado que sufrieron estas rocas durante la colisión de los bloques Maya y Chortís, durante el Cretácico Superior. El área que ocupa esta unidad es de 2.66 km², equivalente al 9.34% del área total.

C. Peridotitas serpentinizadas (Kps)

Franja de peridotitas serpentinizadas que se extiende a lo largo del valle del río Motagua y ciertos cuerpos esparcidos cabalgantes, que se localizan a ambos lados del mismo río. Como cuerpos cabalgantes existen tres, uno al Norte del río Motagua, exactamente formando las partes más altas del Cerro Tuncáj y los

otros dos afloran en pequeños cuerpos dispersos en Las Escobas y en el entronque del río Chicaix y Xequibelyquiej.

Las rocas ultramáficas que afloran en el cerro Tuncáj, son rocas de color verdoso de textura fina a media en ocasiones bien masivas a foliadas. Estas incluyen cuerpos de anfibolitas de color verdoso y de textura media a gruesa con minerales rojizos posiblemente granates. Una muestra obtenida de esta zona y analizada por DRX, dio el siguiente contenido mineralógico: magnesiohornblenda, ferroactinolita, albita y cuarzo. Los suelos desarrollados sobre estas rocas son arcillosos de color rojizo a amarillento y muy potentes. La superficie de esta unidad en la microcuenca del río Cotón es de 18.28 km^2 lo que equivale al 64.21% del área total.

D. Gneis cuarzo-feldespático-biotita (Pcfb)

Machorro (1993), menciona que esta unidad consiste de un gneis de grano grueso con capas de anfibolita interfoliada. Este muestra una buena interestratificación, debido generalmente a una alternancia de capas ricas milimétricas a centimétricas de espesor de mica biotita y gruesas bandas de cuarzo y feldespato de 0.3 a 2 cm de espesor, con gradación entre ellos. El carácter bien estratificado y los ligeros cambios texturales y composicionales frecuentes de capa a capa, sugieren que los gneis fueron originalmente sedimentos clásticos, probablemente grawacas y/o arcosas. Esta unidad ocupa un área de 1.48 km^2 lo que equivale al 5.20% del área total.

E. Rocas volcánicas (QTV)

La distribución de estas rocas es irregular, formando cuerpos dispersos, son de color gris a claro, de textura afánítica, encontrándose en algunos afloramientos cristales de plagioclasa dentro de una matriz de grano muy fino y con vacuolas formadas por el escape de los gases. Algunas de estas vacuolas están rellenas por calcita y zeolitas.

Existe una variedad de tobas, tales como biotíticas, vitriocrystalinas, silicificadas, y liticas. La toba biotítica, macroscópicamente presenta cristales hexagonales de biotita, segmentados en una matriz de material piroclástico que presenta tonalidades blanquecinas, de grano fino a medio. Por otra parte, la toba vitriocrystalina se encuentra compacta y entre los minerales observados están, cuarzo, feldespato y biotita, sin una orientación preferencial y dentro de una matriz fina de color café a verdoso. La toba silicificada es compacta y de gran dureza, puede corresponder a cierto efecto de fluidos hidrotermales que ascendieron a través de fallas, ya que se encuentran a lo largo de las trazas de fallas locales que cortan estos depósitos.

Depósitos pomáceos inconsolidados de color blanco a rosado se encuentran cubriendo algunas zonas, estos incluyen clastos de pómez en diferentes diámetros. Donde estos depósitos se encuentran meteorizados, se desarrollan suelos útiles para la agricultura. Esta unidad es la que menor área ocupa dentro de la microcuenca, siendo 0.53 km^2 representando solamente el 1.86%.

F. Aluviones y coluviones (Qac)

Los aluviones están restringidos a los bordes de las quebradas y ríos, constituidos por partículas centimétricas a métricas de los distintos tipos de roca que afloran en el área. Su disposición es en forma horizontal, constituyendo terrazas útiles para la agricultura.

Los coluviones se observan en varias zonas, ocupando dimensiones variables, el de mayor dimensión (8 km^2), se localiza en las aldeas Pachojob y El Rodeo. Está constituido por bloques métricos y decamétricos de peridotitas y rocas metamórficas que se encuentran dentro de una matriz areno-arcillosa de color rojizo a amarillento. Por sus dimensiones y constitución, se asume que proviene de un evento catastrófico ocurrido en el área. Por su forma y disposición, este pertenece a un antiguo deslave o deslizamiento tipo *debris flow*, que posiblemente obstaculizó el cauce del río Saltán, al momento de ocurrir. Los aluviones y coluviones ocupan un área de 2.44 km^2 , equivalente al 8.57% del área total.

Por lo que en la microcuenca del río Cotón existe un ambiente metamórfico, indicando Machorro (2000), que las rocas metamórficas tienen porosidades menores de 3% y frecuentemente de 1%, los escasos poros que están presentes son pequeños y generalmente no están interconectados, debido a esto las permeabilidades son tan pequeñas que en casi todas las situaciones prácticas puede considerarse cero. Sin embargo, se puede desarrollar considerable porosidad y permeabilidad por medio del intemperismo y fracturamiento de la roca. La distribución de las unidades geológicas en la microcuenca del río Cotón se muestra en la figura 5.

1.7.3 Tectonismo

El fallamiento juega un rol importante en la estructura del área del cuadrángulo de Granados, donde la zona de Falla del Motagua, es el rasgo dominante, que forma una depresión y alineamiento topográfico E-O muy relevantes, siendo considerado como el límite entre los bloques Maya y Chortís, pertenecientes a las placas norteamericana y caribeña, respectivamente. Las fallas mapeadas se clasificaron como de rumbo (sinestrales y destrales), inversas y normales, que controlan los contactos y distribución de los distintos bloques litológicos en el área.

Las fallas de rumbo sinestrales son las que se encuentran bien desarrolladas y poseen una orientación de sus planos E-O. A menudo estas fallas ponen en contacto a las rocas del grupo Chuacús con las ofiolitas del valle del Motagua. Los planos de las fallas normales poseen direcciones que varían entre N35°E y N45°E. Estas son las que cortan a las rocas metamórficas y ofiolitas en las localidades de Concuá, Ixchel, Plan de Manzo (parte media de la microcuenca del río Cotón), y a las tobas en Chipastor. Otras fallas normales, observadas en depósitos aluvionales cerca de Pachalúm, poseen dos orientaciones: S35°E (inclinación de 60°) y N34°O (inclinación de 70°) formando planos conjugados. Fallas inversas suelen tener una orientación de S20°O (inclinación de 50°), con componente sinistral, fallas de tipo cabalgamiento son las que limitan a las ofiolitas, tanto los que afloran en el Cerro Tuncáj como al SO del área. (Chiquín y Requena, 2001)

1.8 FISIOGRAFÍA

1.8.1 Región

La microcuenca del río Cotón se ubica en la región fisiográfica Tierras Altas Cristalinas, según el Instituto Geográfico Nacional citado por Alvarado y Herrera (2000), está constituida por serpentinitas, gneisses metamórficos y esquistos, apareciendo algunas pequeñas áreas de material plutónico, principalmente, granito, que forman una región distinta tanto de los estratos sedimentarios del Norte, como las regiones volcánicas del Sur. Esta área se ubica entre los dos principales sistemas de fallas que han estado en evolución desde el Paleozoico. El patrón de drenaje a través de la región es muy ilustrativo, ya que los cursos de los ríos Chixoy o Negro y Motagua, están controlados por las diversas fallas existentes.

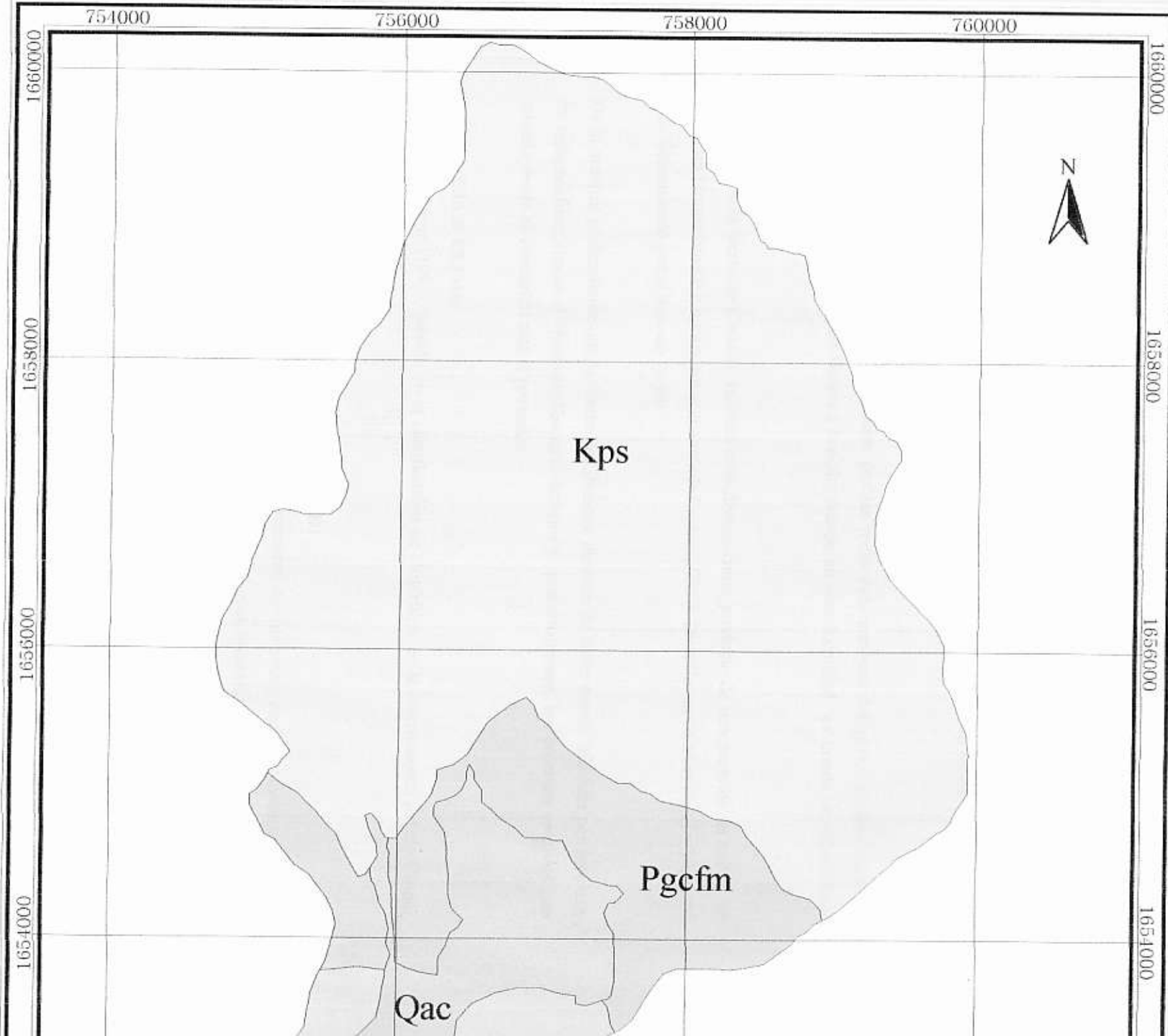
1.8.2 Subregión

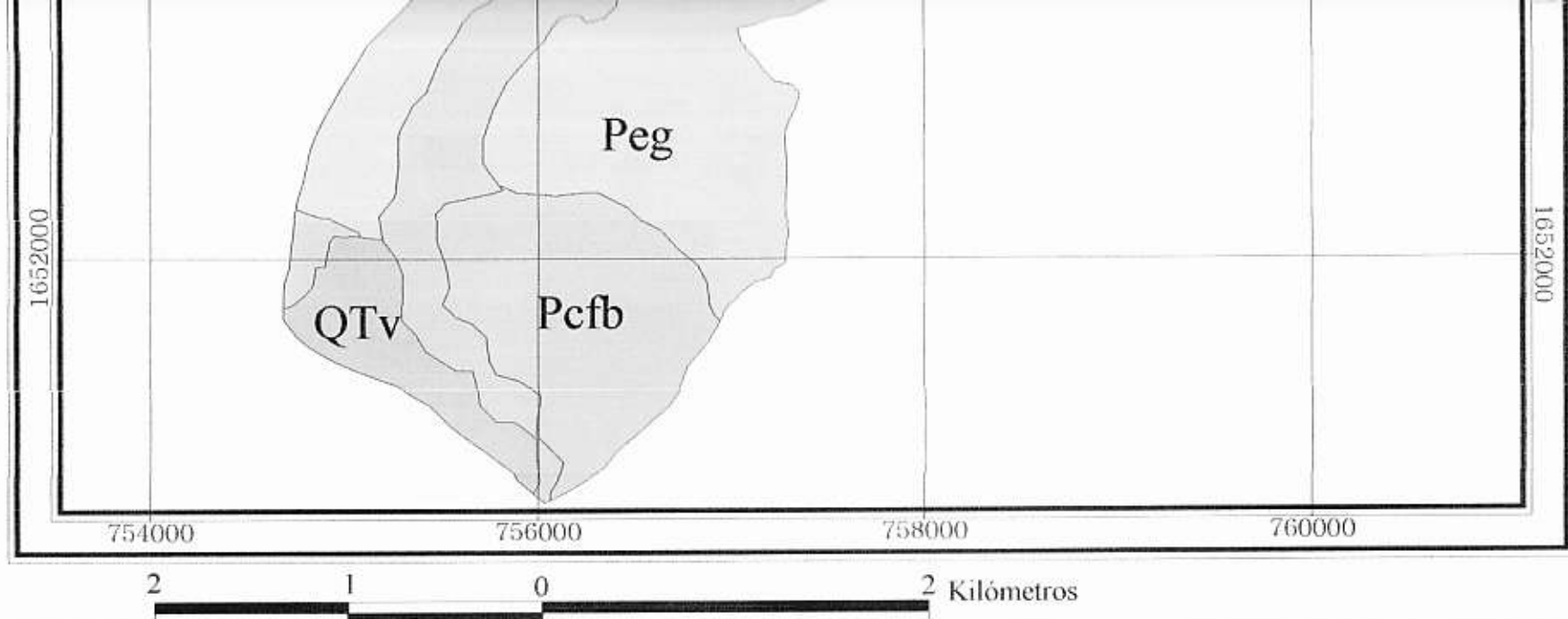
De acuerdo con el mapa fisiográfico-geomorfológico de la república de Guatemala, realizado por Alvarado y Herrera (2000), la microcuenca del río Cotón se ubica en la siguiente subregión:

A. Sierra de Chuacús

Esta subregión se localiza a partir de los municipios de Cunén, San Andrés Sajcabajá del departamento de Quiché, hasta Purulhá, Salamá y Rabinal del departamento de Baja Verapaz y parte del departamento de El Progreso; tiene alturas que oscilan entre 800 y 2,500 msnm.

Se observa un drenaje superficial subdendrítico, paralelo y subparalelo; hay presencia de rocas más antiguas (del Paleozoico); otras intrusivas, metamórficas, sedimentarias y carbonatos. En algunas partes hay depósitos pomáceos del cuaternario, aunque su edad geológica se atribuye al Terciario.





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE AGRONOMÍA MAESTRÍA EN MANEJO SOSTENIBLE DE SUELO Y AGUA CON ESPECIALIDAD EN PLANIFICACIÓN Y MANEJO DE RECURSOS HÍDRICOS EN AGRONOMÍA	UNIDAD		ÁREA	
			%	km ²
		Kps Peridotitas serpentinizadas	64.21	18.28
		Pcfb Gneis cuarzo-feldespático-biotita	5.20	1.48
		Peg Esquistos granatíferos	9.34	2.66
		Pgcfm Gneis cuarzo-feldespato-microclina	10.82	3.08
		Qac Aluviones y coluviones	8.57	2.44
		QTv Rocas volcánicas	1.86	0.53
Proyección Universal Transversal Mercator Datum Horizontal: WGS-84 Zona 16 elipsoide WGS-84, Norte de cuadrícula Espaciamiento de la cuadrícula horizontal y vertical 2,000 metros.	TOTAL		28.47	

FIGURA 5. UNIDADES GEOLÓGICAS DE LA MICROCUENCA DEL RÍO COTÓN, BAJA VERAPAZ.

Dentro de esta subregión se localiza el gran paisaje Sierra de Chuacús, que se caracteriza por lo siguiente:

- ❑ Constituye el eje central del país conjuntamente con la Sierra de las Minas, comprende la mayor parte del departamento de Baja Verapaz, la parte Sur del departamento de Quiché y la parte Noroeste del departamento de El Progreso.
- ❑ Ocupa gran parte del territorio que se orienta de Este a Oeste, con una longitud de aproximadamente 100 km de largo y de 20 a 30 km de ancho, siendo su máxima elevación, el cerro Tzimatzatz con 2.519 msnm al Sureste de San Andrés Sajcabajá en Quiché.
- ❑ Gran parte del territorio está compuesta por las rocas más antiguas del país, pertenecientes al periodo Paleozoico, llamado Grupo Chuacús, siendo en esta localidad es donde se describieron inicialmente.
- ❑ El origen de la sierra de Chuacús ha sido considerado como producto de una parte de un cratón, es decir, un bloque litosférico muy antiguo con edad entre $1,075 \pm 25$ millones de años (m.a) a 345 ± 20 m.a. determinado por el método U- Pb.
- ❑ De lo anterior se desprende que la Sierra de Chuacús, después de haber estado afectada por procesos de metamorfismo hasta el periodo Terciario Inferior y, posteriormente, los procesos erosivos han actuado desde el Terciario hasta el presente.

1.9 ZONA DE VIDA Y CLIMA

Según De la Cruz (1982), basado en la clasificación de Holdridge, en la microcuenca del río Cotón, existen las siguientes zonas de vida:

1.9.1 Bosque húmedo montano bajo subtropical (bh – MB)

Comprende una faja que va desde Mixco en el departamento de Guatemala hacia el Noroeste del país, pasando por San Juan Sacatepéquez, San Pedro Sacatepéquez, San Lucas Sacatepéquez, Chimaltenango, San Martín Jilotepeque, Zaragoza, Santa Cruz Balanyá, San José Poaquil, Chichicastenango, Santa Cruz del Quiché, Momostenango, Huchuetenango, hasta la frontera con México, se encuentra una pequeña franja que rodea el lago de Atitlán.

El patrón de lluvias varía entre 1,057 mm y 1,588 mm con un promedio de 1,344 mm de precipitación anual. Las biotemperaturas oscilan de 15 a 23 °C, y la evapotranspiración potencial puede estimarse en promedio de 0.75.

1.9.2 Bosque húmedo subtropical (templado) bh – S(t)

Esta zona de vida inicia en Joyabáj, Quiché, en el Noroeste de Guatemala, pasando por San Raymundo, hasta llegar a la meseta central.

El período en que las lluvias son más frecuentes corresponde a los meses de mayo a noviembre, variando en intensidad, según la situación orográfica que ocupan las áreas de la zona. La precipitación oscila entre 1,100 a 1,349 mm como promedio total anual. La biotemperatura media anual para esta zona oscila entre 20 °C y 26 °C. La relación de evapotranspiración potencial es alrededor de 1.0.

Según la clasificación climatológica de Thornthwaite, en la microcuenca del río Cotón, el clima característico es semicálido semiseco. (MAGA, 2000)

1.10 USO DE LA TIERRA

1.10.1 Actual

De acuerdo con información obtenida de fotografías aéreas a escala 1:30,000, tomadas en el año 2,003, por el Instituto Geográfico Nacional, y su posterior verificación en el campo, en la microcuenca del río Cotón se delimitaron los siguientes usos de la tierra:

Cuadro 1. Uso actual de la tierra en la microcuenca del río Cotón.

Uso actual	Área km ²	%
Bosque denso de coníferas	9.88	34.70
Bosque denso latifoliado	0.44	1.55
Bosque mixto denso	1.36	4.78
Bosque mixto ralo	0.49	1.72
Bosque secundario	4.80	16.86
Cultivos anuales	9.49	33.33
Pastos (<50%)	0.26	0.91
Pastos (>75%)	1.58	5.55
Urbano	0.17	0.60
Total	28.47	100.00

El área predominante en la microcuenca, esta cubierta con bosques de pino (*Pinus* sp.), debido a que constituye una importante fuente de ingresos, principalmente en el aprovechamiento de productos secundarios, como lo son la resina y el ocote. Montejo (2003), menciona que en áreas donde se encuentra *Pinus oocarpa*, el método de resinación que se utiliza es el de la *pileta*, proceso que hace que los árboles sean susceptibles a plagas, enfermedades e incendios forestales, además de daños físicos al árbol, por ejemplo, el colapso por fuertes vientos, situación que con frecuencia se observa en la microcuenca. Los bosques densos de pino ocupan el 34.70% de la superficie total.

La agricultura constituye otra actividad de suma importancia, principalmente en la parte alta de la microcuenca, existiendo en su mayoría cultivos tradicionales en asocio, como maíz y frijol, siendo una agricultura de subsistencia, destinando un excedente para la comercialización. Es importante hacer notar que en los últimos 4 años, se han introducido cultivos no tradicionales como arveja y brócoli, principalmente. El área destinada a cultivos agrícolas es de 9.49 km², o sea un 33.33% del área total.

Respecto a la tenencia de la tierra, González (2003), menciona que la región se caracteriza por minifundios, que oscilan entre 0.5 y 1 ha. a excepción de fincas grandes, como por ejemplo, Tuncáj y Cotón.

La ganadería, principalmente extensiva, se desarrolla en la parte baja de la microcuenca, en la finca Cotón, en donde el pasto que se cultiva es zacate estrella (*Cynodon* sp.), sometiéndose el ganado en un sistema de rotación continua. Dentro de los potreros existen especies, de sombra y forraje, como pito (*Erythrina* sp.), ixcanal (*Acacia* sp.), madrecaao (*Gliricidia sepium*), jocote (*Spondia lutea*), principalmente. Las áreas cubiertas con pastos representan el 6.46% (1.84 km²) del área total.

El bosque denso latifoliado, ubicado en el límite Norte ocupa un área de 0.44 km² donde predomina una especie de roble llamado huité (*Quercus* sp.) distinto al que se encuentra en el resto de la microcuenca, ya que este es de mayor altura. En este bosque se forman los suelos más profundos y con altos contenidos de materia orgánica, hasta de 20%.

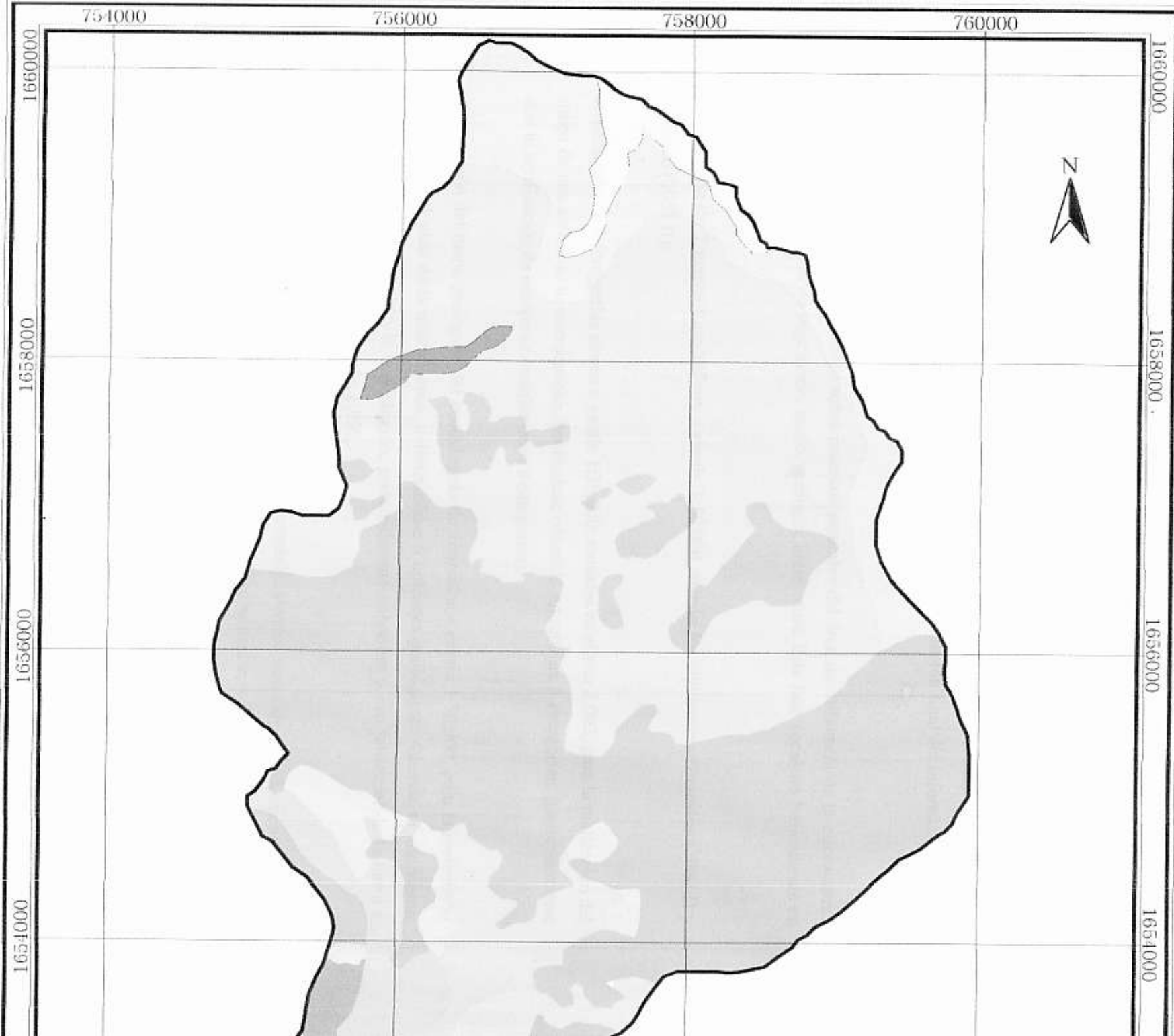
El bosque secundario, está formado principalmente por especies de pino (*Pinus* sp.), roble (*Quercus* sp.) y encino (*Quercus* sp.), se encuentra principalmente en la parte baja y en las proximidades del cerro Las Burras. En el caso del bosque secundario localizado en la parte alta de la microcuenca, esta compuesto principalmente por *Alnus acuminata* y especies arbustivas como laurel (*Cordia alliodora*), zarzaparrilla (*Smilax* sp.) y mora (*Morus* sp.). Este bosque ocupa un área de 4.80 km², o sea un 16.86% del total.

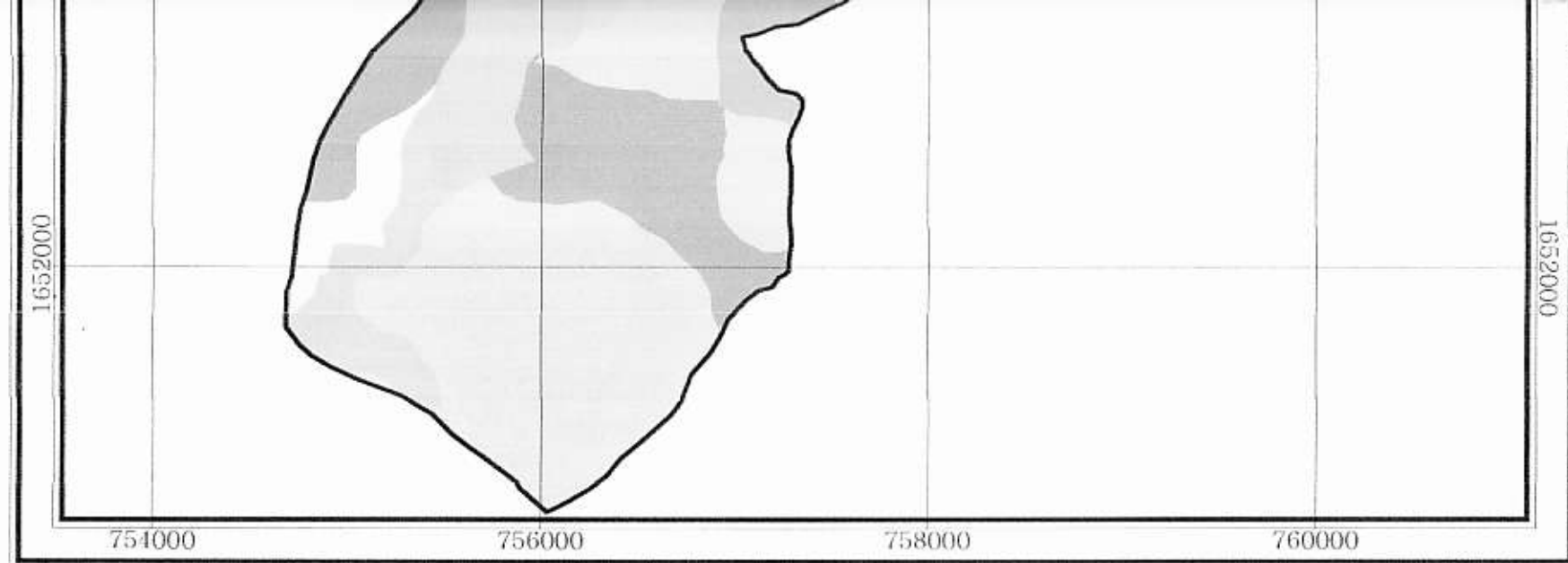
El bosque mixto denso esta compuesto por especies de pino (*Pinus* sp.) y encino (*Quercus* sp.), ocupando el 4.78% del área total. El bosque mixto ralo esta compuesto por las especies determinadas en el bosque secundario y especies frutales del área, como guayaba (*Psidium guajava*) y jocote (*Spondia lutea*). En el caso del bosque mixto ralo que se localiza en el sur del cerro *Las Burras*, fue debido a ataques de plagas forestales, principalmente gorgojo de pino (*Dendroctonus* sp.).

El área urbana posee menos del 1% del área total, siendo una microcuenca con una densidad poblacional baja (40 habitantes/km²), concentrados en su mayoría, en la parte alta. En la figura 6 se muestra la distribución del uso actual de la tierra.

1.10.2 Potencial

Según el estudio realizado por APESA – GEOINFORMÁTICA (1992), a escala 1:50,000, basado en el sistema de clasificación del departamento de agricultura de los Estados Unidos, en la microcuenca del río Coton se delimitaron las siguientes clases agrológicas: IV, VI y VII.





2 1 0 2 Kilómetros

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
MAESTRÍA EN MANEJO SOSTENIBLE DE SUELO Y AGUA
CON ESPECIALIDAD EN PLANIFICACIÓN Y
MANEJO DE RECURSOS HÍDRICOS EN AGRONOMÍA



Proyección Universal Transversal Mercator
Datum Horizontal: WGS-84
Zona 16 elipsoide WGS-84, Norte de cuadrícula
Espaciamiento de la cuadrícula horizontal y vertical
2,000 metros.

CATEGORÍA

- Bosque denso de coníferas
- Bosque denso latifoliado
- Bosque mixto denso
- Bosque mixto ralo
- Bosque secundario
- Cultivos anuales
- Pastos (<50%)
- Pastos (>75%)
- Urbano

ÁREA
% km²

34.70	9.88
1.55	0.44
4.78	1.36
1.72	0.49
16.86	4.80
33.33	9.49
0.91	0.26
5.55	1.58
0.60	0.17

TOTAL

28.47

FIGURA 6. USO ACTUAL DE LA TIERRA EN LA
MICROCUEENCA DEL RÍO COTÓN, BAJA VERAPAZ.

CAPÍTULO 2

MÉTODOS

En este capítulo se menciona de forma general el procedimiento que se utilizó para la realización de la presente investigación, la cual consistió en 3 fases, una fase preliminar realizada con el objetivo de recopilar información de interés del área de estudio, una fase de campo que se basó principalmente en la verificación de la cobertura vegetal, recolección de datos de aforos, muestreos para calidad del agua y datos necesarios para realizar el balance hídrico de suelos, como infiltración básica, pendiente, cobertura, entre otros. Por último la fase de procesamiento y análisis de la información, para la elaboración final del informe.

2.1 FASE PRELIMINAR

Se recopiló información existente sobre recursos naturales del área de influencia de la microcuenca del río Cotón, como estudios de vegetación, suelo, geología, entre otros. Esta fase consistió básicamente en las siguientes actividades:

- ❑ Adquisición de 2 mapas topográficos a escala 1:50,000, siendo los siguientes: Granados (2060 I) y Cubulco (2061 II).
- ❑ Adquisición de 4 fotografías aéreas a escala 1:30,000, tomadas en el año 2,003, para la realización del mapa de uso actual de la microcuenca, habiéndose obtenido un total de 5 categorías, (posteriormente con la verificación de campo se establecieron 9 categorías).
- ❑ Adquisición del mapa geológico del cuadrángulo de Granados a escala 1:50,000, para la realización del mapa geológico de la microcuenca, delimitándose 6 unidades geológicas. Además se obtuvieron otros estudios realizados en el cuadrángulo, principalmente cobertura y uso potencial de la tierra a escala 1:50,000, realizados en el año 1,992.
- ❑ Consulta de mapas temáticos de la república de Guatemala, siendo: series de suelos, cuencas, zonas de vida, clima, uso potencial, estaciones meteorológicas, principalmente.
- ❑ Obtención de información climática, de estaciones dentro y fuera de la microcuenca. Debido a la escasez de información, únicamente se tabularon datos medios mensuales de temperatura (máxima y mínima) y precipitación pluvial.

- Elaboración de los mapas de ubicación, centros poblados y vías de acceso, hidrografía, orografía, suelos, geología, uso actual y unidades de mapeo, para lo cual se utilizó el software ArcView GIS versión 3.2.
- Para la delimitación de las unidades de mapeo, se superpusieron los mapas temáticos de suelos, geología y uso actual (según fotointerpretación), y se obtuvo un total de 22 unidades de mapeo (posteriormente con el caminamiento de campo para la verificación del uso el total de unidades se elevó a 28), con el objetivo de obtener áreas lo más homogéneas posible. Las unidades de mapeo que se obtuvieron se muestran en la figura 7.

2.2 FASE DE CAMPO

La fase de campo, consistió en la obtención de la siguiente información:

2.2.1 Hidrología de superficie

- Ubicación y georeferenciación de los manantiales captados y no. Los manantiales captados corresponden a las cajas de captación de proyectos de conducción de agua para consumo humano.
- Realización de aforos de los manantiales en época seca (Marzo) y lluviosa (Agosto), para determinar el potencial hídrico de la microcuenca. Además se determinó el caudal en el punto de aforo.
- Realización de aforos diferenciales (en época seca) en las partes baja, media y alta de la microcuenca, para determinar si el cauce principal y corrientes tributarias son influentes o efluentes.
- Determinación de la velocidad de infiltración básica del suelo por cada unidad de mapeo, utilizando el método de Porchet o *cilindro invertido*, georeferenciando cada lugar en donde se realizaron las pruebas.
- Toma de muestras de suelos en los lugares donde se efectuaron las pruebas de infiltración, para su posterior análisis en el laboratorio de Suelo-Agua-Planta de la Facultad de Agronomía, determinando partículas primarias (textura), materia orgánica, densidad aparente, capacidad de campo y punto de marchites permanente.

754000

756000

758000

760000

24

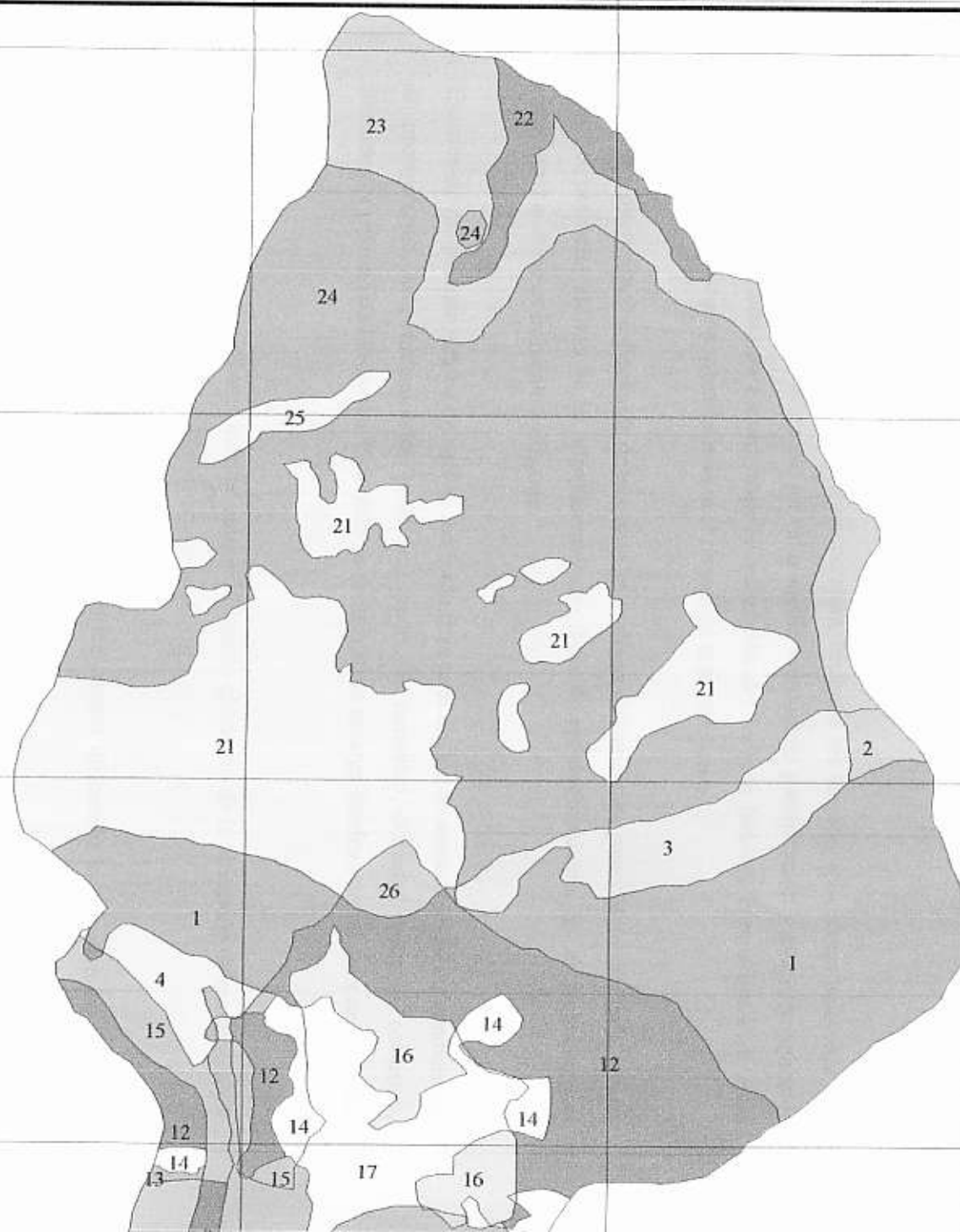
0000991
16600000008991
16580000009991
16560000004991
1654000

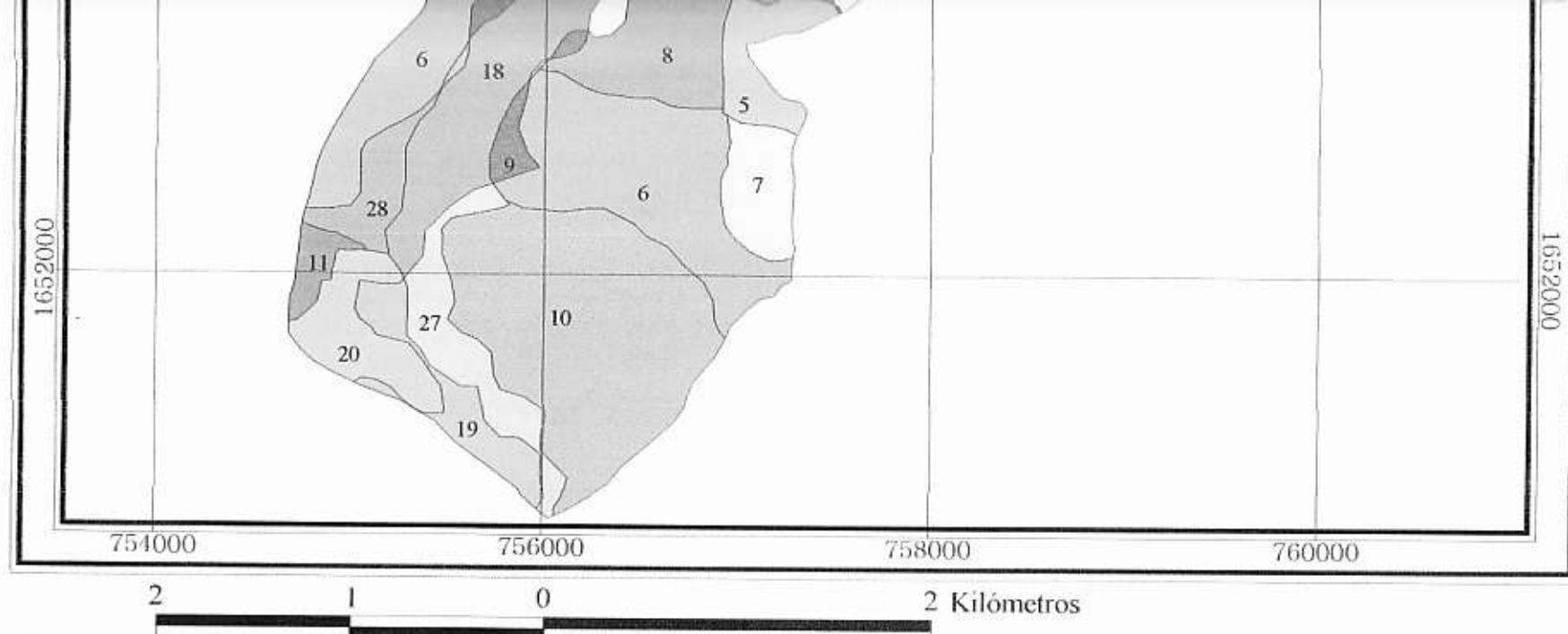
1660000

1658000

1656000

1654000





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
MAESTRÍA EN MANEJO SOSTENIBLE DE SUELO Y AGUA
CON ESPECIALIDAD EN PLANIFICACIÓN Y
MANEJO DE RECURSOS HÍDRICOS EN AGRONOMÍA



Proyección Universal Transversal Mercator
Datum Horizontal: WGS-84
Zona 16 elipsoide WGS-84, Norte de cuadrícula
Espaciamiento de la cuadrícula horizontal y vertical
2,000 metros.

UNIDAD

No.	Unidad de mapeo	Área (km ²)	No.	Unidad de mapeo	Área (km ²)
1	Ac - Kps - Bosque denso de coníferas	3.24	15	Ac - Pgefm - Pastos (>75%)	0.37
2	Ac - Kps - Bosque secundario	0.10	16	Ac - Qac - Bosque denso de coníferas	0.54
3	Ac - Kps - Cultivos anuales	0.76	17	Ac - Qac - Cultivos anuales	0.82
4	Ac - Kps - Bosque mixto ralo	0.26	18	Ac - Qac - Pastos (>75%)	0.77
5	Ac - Peg - Bosque denso de coníferas	0.23	19	Ac - QTV - Bosque secundario	0.23
6	Ac - Peg - Bosque mixto denso	1.35	20	Ac - QTV - Pastos (>75%)	0.29
7	Ac - Peg - Bosque mixto ralo	0.23	21	Ci - Kps - Bosque denso coníferas	3.54
8	Ac - Peg - Bosque secundario	0.53	22	Ci - Kps - Bosque denso latifoliado	0.44
9	Ac - Peg - Pastos (>75%)	0.16	23	Ci - Kps - Bosque secundario	1.85
10	Ac - Petb - Bosque secundario	1.39	24	Ci - Kps - Cultivos anuales	7.91
11	Ac - Petb - Pastos (<50%)	0.08	25	Ci - Kps - Área urbana	0.17
12	Ac - Pgefm - Bosque denso de coníferas	2.19	26	Ci - Pgefm - Bosque denso de coníferas	0.14
13	Ac - Pgefm - Bosque mixto denso	0.02	27	Ac - Qac - Bosque secundario	0.32
14	Ac - Pgefm - Bosque secundario	0.37	28	Ac - Peg - Pastos (<50%)	0.17

FIGURA 7. UNIDADES DE MAPEO DE LA
MICROCUCNEN DEL RÍO COTÓN, BAJA VERAPAZ.

- ❑ Determinación de la pendiente promedio de cada unidad de mapeo, utilizándose para ello un clinómetro. Además en cada unidad de mapeo, se determinó la profundidad efectiva mediante barrenamientos.

2.2.2 Calidad del agua

- ❑ Toma de muestras de agua en la época seca, en 17 fuentes de la microcuenca del río Cotón, incluyendo manantiales (captados y no) y cauce natural. Para su posterior análisis en el laboratorio, determinando su calidad microbiológica y fisicoquímica para consumo humano y/o riego.

2.3 FASE DE ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS

- ❑ Análisis de los datos de precipitación y temperatura, trazando las isoyetas e isoplecias para cada mes del año, con la finalidad de asignarle un valor medio mensual de precipitación y evapotranspiración potencial a cada unidad de mapeo, para la realización del balance hídrico. Para el trazo de estas curvas, se tomó en cuenta principalmente el relieve de la microcuenca.
- ❑ Cálculo e interpretación de aforos de manantiales y aforos diferenciales, para determinar en el primer caso, el potencial hídrico de la microcuenca para fines de aprovechamiento. En el segundo, para determinar si el río es influente o efluente.
- ❑ Calculando del balance hídrico de suelos, realizado para cada unidad de mapeo, según las condiciones de precipitación, evapotranspiración potencial, grados de humedad, densidad aparente, cobertura, pendiente y profundidad radicular. Con esto se determinó la recarga hídrica natural para cada unidad de mapeo.
- ❑ Clasificación de áreas de recarga hídrica natural utilizando el criterio de la ubicación de manantiales y la metodología de Herrera (2004).
- ❑ Determinación de las áreas críticas de recarga hídrica natural utilizando la metodología de Cook (2000), modificada por Orozco *et al.* (2003).
- ❑ Análisis de los resultados de calidad del agua, para determinar su aptitud, para consumo humano y/o riego. Para consumo humano los resultados se compararon con la norma COGUANOR 29001 y para

riego se utilizaron las metodologías del laboratorio de salinidad del departamento de agricultura de los Estados Unidos (USDA) y la de FAO.

- ❑ Realización de diagramas de Piper para la clasificación fisicoquímica de las aguas, utilizando el programa AquaChem versión 3.7.
- ❑ Estimación de la demanda actual y futura de agua para consumo humano de las comunidades de la microcuenca del río Cotón, basado en criterios básicos para el diseño de proyectos de agua por gravedad en comunidades rurales. Además se estimó de la demanda de agua para riego.
- ❑ Análisis de la situación de los recursos naturales.
- ❑ Realización de un análisis FODA, con el objetivo de determinar las problemática existente, principalmente sobre el recurso hídrico.

2.4 ELABORACIÓN FINAL DEL INFORME

- ❑ La información obtenida se ordenó y analizó según la metodología que se propuso.
- ❑ Se procedió a un análisis de los resultados con el objetivo de establecer conclusiones finales de la investigación de acuerdo a los objetivos, además se plantearon las recomendaciones del caso.
- ❑ Se elaboró el documento final, incluyendo: aspectos generales de la microcuenca, balance hídrico de suelos, delimitación de áreas críticas de recarga hídrica natural, calidad del agua y lineamientos de manejo.
- ❑ Se consideraron aspectos generales de manejo en la microcuenca relacionado con el manejo de los recursos naturales, especialmente el recurso hídrico.

CAPÍTULO 3

HIDROLOGÍA SUPERFICIAL

En este capítulo se analizan los componentes del ciclo hidrológico, estimando la precipitación pluvial y evapotranspiración potencial en 2 estaciones meteorológicas situadas dentro de la microcuenca, así como también la escorrentía superficial, mostrando los datos de aforos de todos los manantiales y aforos diferenciales. Basándose en estos componentes y al conocimiento de la infiltración básica y aspectos, como pendiente y cobertura, entre otros, se determinó la precipitación que infiltra, con la cual se realizó el balance hídrico de suelos, estimando la recarga hídrica natural por cada unidad de mapeo.

3.1 CICLO HIDROLÓGICO

Como todo ciclo, no tiene principio ni fin, y su descripción puede comenzar en cualquier punto. El agua que se encuentra sobre la superficie terrestre o muy cerca de ella se evapora bajo el efecto de la radiación solar y el viento. El vapor de agua, que así se forma, se eleva y se transporta por la atmósfera en forma de nubes hasta que se condensa y cae hacia la tierra en forma de precipitación. Durante su trayecto hacia la superficie de la tierra, el agua precipitada puede volver a evaporarse o ser interceptada por las plantas o las construcciones, luego fluye por la superficie o se infiltra, el agua interceptada y una parte del agua infiltrada y de la que se escurre se evapora nuevamente. De la precipitación que llega a las corrientes, una parte se infiltra y otra llega hasta los océanos y otros grandes cuerpos de agua, como presas y lagos. Del agua infiltrada, una parte es absorbida por las plantas y posteriormente es transpirada, casi en su totalidad, hacia la atmósfera y otra parte fluye bajo la superficie de la tierra hacia las corrientes, el mar u otros cuerpos de agua, o bien hacia zonas profundas del suelo (percolación) para ser almacenada como agua subterránea y después aflorar en manantiales, ríos o el mar. (Aparicio, 2001)

La acción del hombre va introduciendo cambios progresivamente importantes en el ciclo hidrológico de algunas regiones. Por ejemplo, los drenajes extensivos han hecho descender el nivel de la zona saturada y, paralelamente, ha descendido la evapotranspiración y ha aumentado la aportación de la escorrentía subterránea a los ríos; la deforestación o la repoblación forestal pueden también modificar el régimen de crecidas de los ríos, pero no parece haber datos que permitan asegurar una modificación sustancial en su aportación media anual. La construcción de presas y canales de derivación constituye hoy en día la forma más extendida e importante de modificar el ciclo hidrológico. (Custodio y Llamas, 2001)

3.1.1 Precipitación pluvial

La precipitación es uno de los componentes primarios del ciclo hidrológico, puede calificarse de factor esencial, ya que constituye la materia prima del referido ciclo. Cuando el agua, en estado líquido o sólido, llega a la superficie de la tierra se dice que ha precipitado. El vapor de agua contenido en la masa de aire, a consecuencia de los cambios de presión y temperatura y del movimiento de estas masas, ayudado, en ocasiones, por minúsculos núcleos de condensación y material sólido en suspensión, se reúne en gotas de agua o cristales de hielo y cae venciendo las resistencias que se le oponen, hasta llegar a la superficie terrestre. (Custodio y Llamas, 2001)

La precipitación se puede clasificar de acuerdo con las condiciones que producen movimiento vertical del aire, en convectivas, orográficas (de relieve) y de convergencia. (Monsalve, 1999)

Para la determinación de la precipitación pluvial, se utilizaron los datos de las estaciones meteorológicas tipo "C", instaladas y monitoreadas por el Instituto Nacional de Bosques. Siendo las estaciones Tuncáj y Medio Monte, ubicadas en la parte alta y media de la microcuenca respectivamente, en ambas se mide la precipitación pluvial, temperatura máxima y mínima diaria. La ubicación de las estaciones se muestra en el cuadro 2:

Cuadro 2. Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas situadas en la microcuenca del río Cotón.

Estación	Coordenadas UTM (m)		Altitud msnm	Municipio
	Este	Norte		
Tuncáj	756153	1657732	2,100	Cubulco
Medio Monte	757276	1654719	1,540	Granados

La falta de información climática en el área es una limitante, ya que no existen registros históricos de estaciones cercanas. Del INSIVUMEH que cuenta con registros históricos, la estación más cercana es la de Cubulco, pero tiene la desventaja de que se localiza en otra vertiente y otra zona de vida, por lo que su uso se consideró no recomendable. La World Meteorological Organization (1970), recomienda que lo ideal para zonas montañosas, es 1 pluviómetro cada 100 - 250 km².

Es importante mencionar, que dada la problemática en el área, así como en muchas otras en el país, la falta de información climática constituye un obstáculo para este tipo de investigaciones, por lo que los resultados que se obtendrán, serán únicamente de 1 año de información climática, recomendándose seguir registrando la información así como la instalación de nuevas estaciones meteorológicas, en donde tendrán

que intervenir el INAB y las municipalidades aledañas de Pachalúm, El Chól, Rabinal, Cubulco y Granados principalmente.

Las estaciones Tuncáj y Medio Monte, fueron instaladas en el mes de Abril de 2,003 y su monitoreo inició en Mayo del mismo año. Los datos de precipitación pluvial se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 3. Precipitación pluvial mensual (mm) de las estaciones situadas en la microcuenca del río Cotón.

Estación	Año 2,003								Año 2,004				Total
	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	
Tuncáj	282.4	370.2	215.5	141.6	325.9	141.4	126.4	11.8	29.3	8.1	33.9	29.2	1,715.7
Medio Monte	142.2	420.6	248.7	46.7	332.2	76.0	39.8	0.0	5.5	1.8	48.3	30.0	1,391.8

Por lo que la precipitación anual, de las estaciones Tuncáj y Medio Monte es de 1,716 y 1,392 mm anuales respectivamente. Obviamente, existiendo mayor precipitación en Tuncáj, debido al comportamiento orográfico de la misma.

3.1.2 Evapotranspiración

La evapotranspiración llamada también *uso consuntivo* del cultivo, es la suma de los fenómenos de evaporación del suelo y transpiración de las plantas. Ambas causas son de orígenes totalmente diferentes: físico el primero y biológico el segundo, pero tanto uno como el otro conducen al mismo resultado, pérdida de humedad por el suelo arable, por eso se les estudia conjuntamente con el nombre de evapotranspiración. (Herrera, 2002)

La influencia de estos fenómenos sobre el ciclo hidrológico, es evidentemente importante, si se considera que en muchos lugares del mundo, el 70% de la precipitación que llega a la tierra es devuelta a la atmósfera por evapotranspiración y en algunos otros, esta alcanza el 90%. Desde el punto de vista hidrológico, la evapotranspiración en el balance hídrico, es considerado como pérdida. (Custodio y Llamas, 2001)

La evapotranspiración potencial es igual a la pérdida de agua que ocurrirá si en ningún momento existe deficiencia de agua en el suelo para ser utilizada por la vegetación. Existe un límite superior a la cantidad de agua que un ecosistema puede perder por evapotranspiración, la mayor parte de la cual es perdida en verano. Debido a que frecuentemente no existe suficiente agua disponible en el suelo, se utiliza el término evapotranspiración real para describir la cantidad de evapotranspiración que ocurre en condiciones de campo.

Bajo estas condiciones la evapotranspiración real es mucho menor que la potencial, especialmente si la capacidad de almacenamiento de humedad del suelo es limitada. (Machorro, 2001)

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial, se cuenta con datos de temperatura máxima, mínima y media, tal como se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. Temperatura máxima, mínima y media (°C) promedio mensual de las estaciones situadas en la microcuenca del río Cotón.

Estación		Año 2,003								Año 2,004			
		May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
Tuncáj	T° max	24.35	21.97	22.43	24.10	25.57	22.74	21.20	20.10	20.55	23.66	21.97	24.07
	T° min	13.00	13.50	12.83	12.27	12.30	12.61	11.40	8.23	8.84	8.55	10.03	10.13
	T° med	18.68	17.74	17.63	18.19	18.94	17.68	16.30	14.17	14.70	16.11	16.00	17.10
Medio Monte	T° max	30.32	27.67	26.65	28.29	28.13	26.55	26.53	26.74	27.61	28.97	28.71	29.23
	T° min	16.06	16.37	16.00	17.84	16.87	17.10	15.97	18.48	17.71	18.59	16.71	22.23
	T° med	23.19	22.02	21.33	23.07	22.50	21.83	21.25	22.61	22.66	23.78	22.71	25.73

El método que se utilizó para calcular la evapotranspiración potencial fue el de Hargreaves (1970), recomendado por el INSIVUMEH por presentar buen ajuste a las variaciones climáticas del país. Los resultados se muestran en los siguientes cuadros:

Cuadro 5. Evapotranspiración potencial (mm) en la estación meteorológica Tuncáj situada en la parte alta de la microcuenca del río Cotón.

Mes	Días	Temperatura		Radiación extraterrestre		Brillo solar horas/día	Brillo medio mensual (%)	Radiación solar mensual (mm)	ETP	
		°C	°F	mm/día	mm/mes				mm/día	mm/mes
Ene	31	14.70	58.46	12.20	378.20	11.30	47.08	194.63	2.75	85.34
Feb	28	16.11	61.00	13.45	376.60	11.60	48.33	196.37	3.21	89.83
Mar	31	16.00	60.80	14.80	458.80	12.00	50.00	243.32	3.58	110.95
Abr	30	17.10	62.78	15.65	469.50	12.50	52.08	254.12	3.99	119.65
May	31	18.68	65.62	15.95	494.45	12.80	53.33	270.82	4.30	133.29
Jun	30	17.74	63.93	15.80	474.00	13.00	54.17	261.64	4.18	125.45
Jul	31	17.63	63.73	15.80	489.80	12.90	53.75	269.32	4.15	128.74
Ago	31	18.19	64.74	15.70	486.70	12.60	52.50	264.49	4.14	128.43
Sep	30	18.94	66.09	15.05	451.50	12.20	50.83	241.43	3.99	119.68
Oct	31	17.68	63.82	14.00	434.00	11.80	49.17	228.24	3.52	109.25
Nov	30	16.30	61.34	12.60	378.00	11.40	47.50	195.39	3.00	89.89
Dic	31	14.17	57.51	11.80	365.80	11.20	46.67	187.42	2.61	80.83

Cuadro 6. Evapotranspiración potencial (mm) en la estación meteorológica Medio Monte situada en la parte media de la microcuenca del río Cotón.

Mes	Días	Temperatura		Radiación extraterrestre		Brillo solar	Brillo medio	Radiación solar	ETP	
		°C	°F	mm/día	mm/mes	horas/día	mensual (%)	mensual (mm)	mm/día	mm/mes
Ene	31	22.66	72.79	12.21	378.51	11.30	47.08	194.79	3.43	106.34
Feb	28	23.78	74.80	13.46	376.88	11.60	48.33	196.51	3.94	110.25
Mar	31	22.71	72.88	14.81	459.11	12.00	50.00	243.48	4.29	133.08
Abr	30	25.73	78.31	15.65	469.50	12.50	52.08	254.12	4.98	149.26
May	31	23.19	73.74	15.95	494.45	12.80	53.33	270.82	4.83	149.78
Jun	30	22.02	71.64	15.80	474.00	13.00	54.17	261.64	4.69	140.57
Jul	31	21.33	70.39	15.80	489.80	12.90	53.75	269.32	4.59	142.19
Ago	31	23.07	73.53	15.70	486.70	12.60	52.50	264.49	4.70	145.85
Sep	30	22.50	72.50	15.05	451.50	12.20	50.83	241.43	4.38	131.28
Oct	31	21.83	71.29	14.01	434.31	11.80	49.17	228.40	3.94	122.13
Nov	30	21.25	70.25	12.61	378.30	11.40	47.50	195.54	3.43	103.03
Dic	31	22.61	72.70	11.81	366.11	11.20	46.67	187.58	3.30	102.27

La evapotranspiración anual en las estaciones de Tuncáj y Medio Monte es de 1,321 y 1,536 mm respectivamente, siendo mayor en Medio Monte, debido principalmente a las condiciones climáticas.

De acuerdo con Cabrera (1997), la evapotranspiración potencial varía entre 1 a 3 mm/día en climas templados y de 5 a 8 mm/día en trópicos húmedos, por lo que el método sobreestima ligeramente la evapotranspiración potencial, ya que en la estación Tuncáj los valores oscilan entre 2.61 y 4.3 mm/día, en donde el clima prevaleciente es templado. En el caso de la estación Medio Monte los valores oscilan entre 3.3 y 4.98 mm/día, considerándose aceptables, ya que el clima en esta localidad es templado-cálido.

3.1.3 Escorrentía superficial

La escorrentía superficial es el fenómeno más importante desde el punto de vista de ingeniería, y consiste en la ocurrencia y el transporte de agua en la superficie terrestre. Comprende el exceso de la precipitación que ocurre después de una lluvia intensa y se mueve libremente por la superficie del terreno, y la escorrentía de una corriente de agua, que puede ser alimentada tanto por el exceso de precipitación como por las aguas subterráneas. (Monsalve, 1999)

Aparicio (2001), define los siguientes tipos de escurrimiento:

- ❑ Superficial: flujo sobre el terreno, junto con el escurrimiento en corrientes, es el que llega más rápido hasta la salida de la cuenca, por ello está relacionado directamente con una tormenta particular y entonces se dice que proviene de la precipitación en exceso o efectiva y que constituye el escurrimiento directo.
- ❑ Subsuperficial: parte de la precipitación que infiltra y escurre cerca de la superficie del suelo, en forma paralela a este, puede ser casi tan rápido como el superficial o casi tan lento como el subterráneo, dependiendo de la permeabilidad de los estratos superiores del suelo, por lo que resulta difícil distinguirlo entre los dos.
- ❑ Subterráneo: parte de la precipitación que se infiltra hasta niveles inferiores al freático, debido a que se produce bajo el nivel freático, es el único que alimenta a las corrientes cuando no hay lluvias y por eso se dice que forma el escurrimiento base.

A. Aforo de manantiales

Ante la creciente demanda de agua los manantiales constituyen fuentes naturales de agua de buena calidad que surgen a la superficie de manera natural, sin necesidad de bombeo, lo cual representa ahorro de energía y recursos económicos. Los manantiales representan descargas de aguas subterráneas que salen a la superficie del terreno, en el lugar donde el nivel de saturación del agua en el acuífero corta la superficie topográfica y se forman debido a cambios verticales u horizontales en la conductividad hidráulica de los materiales geológicos. (Vargas, A. 2002)

El aforo de todos los manantiales de la microcuenca del río Cotón, se realizó con el objetivo de determinar el potencial y/o disponibilidad de agua subterránea que drena dentro de la microcuenca, los cuales se aforaron en época seca y lluviosa.

En la microcuenca existen manantiales captados y no, los captados corresponden a los proyectos de conducción y distribución de agua para consumo humano, que abastecen comunidades de los municipios de Pachalúm, Granados y Cubulco. Siendo los más importantes, por la población que sirve, los manantiales que abastecen los proyectos de agua para consumo humano de la cabecera municipal de Pachalúm. Todos los manantiales fueron georeferenciados mediante un sistema de posicionamiento global.

En los manantiales captados, se aforó volumétricamente, así también en algunos manantiales no captados construyéndose una pequeña caída de agua. En el caso de manantiales como el de Joya Oscura y otros de la parte alta de la microcuenca, el método que se utilizó fue el de sección-velocidad, determinando la velocidad en cada tramo de la sección del cauce con un minimolinet marca *SEBA GmbH*, aplicando, según sea el caso, una de las siguientes ecuaciones:

$$V = 1.23 + 24.73n \quad \Leftrightarrow \quad n < 1.74$$

$$V = -0.42 + 25.68n \quad \Leftrightarrow \quad 1.74 < n < 10$$

Donde:

v = Velocidad de la corriente. (m/s)

n = Número de revoluciones por segundo.

La velocidad de la corriente, se midió en 2 puntos, a 0.2 y a 0.8 del tirante de agua, para obtener un dato más representativo de la velocidad media de la sección. En el caso donde no se pudo medir la velocidad a estas profundidades, se midió la velocidad superficial y se multiplicó por un factor para obtener la velocidad media, que fue de 0.85. El tiempo que se utilizó para determinar el valor de n fue de 60 segundos, realizándose 3 veces, para posteriormente obtener un promedio.

Conociendo la velocidad media y el área parcial de cada tramo, se calculó el caudal total, aplicando la ecuación de continuidad $Q = A \times V$. Para la estimación del caudal total se utilizó una hoja electrónica del programa Excel.

La ubicación de los manantiales no captados se muestra en el mapa de hipsometría e hidrografía, identificándose numéricamente, debido a que la mayoría no posee un nombre común, se nombraron arbitrariamente.

En el caso de los manantiales captados, estos se muestran en el mapa de ubicación de fuentes de muestreo de agua, ya que se les realizó análisis de calidad (físicoquímica y bacteriológica) para consumo humano y riego. El caudal que se midió en todos los manantiales en época seca se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 7. Ubicación y caudal del cauce principal y manantiales aforados en el mes de Marzo en la microcuenca del río Cotón.

No.	Fuente	Coordenadas UTM (m)		Altitud msnm	Método de aforo	Caudal	
		Este	Norte			L/s	m ³ /día
1	Punto de aforo	755949	1650748	1,112	Sección-velocidad	104.66	9,042.62
2	Manantial 1	756180	1651893	1,183	Volumétrico	0.15	12.96
3	Manantial Joya Oscura	756551	1653647	1,336	Sección-velocidad	44.74	3,865.54
4	Rancho Viejo 1	759010	1654883	1,977	-	0.00	0.00
5	Rancho Viejo 2	758466	1655005	1,755	-	0.00	0.00
6	Rancho Viejo 3	758659	1655616	2,013	-	0.00	0.00
7	Plan de Manzo 1	758328	1656623	2,097	Volumétrico	0.13	11.23
8	Plan de Manzo 2	758619	1657609	2,189	Volumétrico	0.17	14.69
9	Plan de Manzo 3	758455	1657789	2,168	Sección-velocidad	3.12	269.57
10	Manzanote 1	758364	1658254	2,033	Volumétrico	0.14	12.10
11	Manzanote 2	757861	1658288	2,019	Volumétrico	0.20	17.28
12	Manzanote 3	757804	1657811	2,090	Sección-velocidad	8.63	745.63
13	Tuncáj 1	756496	1658496	2,166	Sección-velocidad	20.59	1,778.98
14	Tuncáj 2	755827	1657443	2,019	Volumétrico	0.19	16.42
15	Ojo de Agua 1	755489	1655228	1,487	Volumétrico	0.12	10.37
16	Ojo de Agua 2	755101	1655003	1,535	-	0.00	0.00
17	Altos-Piedras Blancas	758045	1654547	1,594	Volumétrico	6.73	581.47
18	Altos-Toro Seco	758102	1654643	1,622	Volumétrico	2.50	216.00
19	Pachalúm captación 1	758081	1654694	1,611	Volumétrico	4.57	394.85
20	Pachalúm captación 2	757949	1654509	1,685	Volumétrico	5.07	438.05
21	Tuncáj captación 1	756270	1658511	2,240	Volumétrico	0.95	82.08
22	Tuncáj captación 2	757655	1658996	2,324	Volumétrico	0.35	30.24
23	Ojo de Agua captación 1	756325	1657777	2,068	Volumétrico	0.61	52.70
24	Ojo de Agua captación 2	757553	1658325	2,189	Volumétrico	1.07	92.45
25	Manzanote	758014	1657934	2,155	Volumétrico	0.48	41.47
26	Joya de la Vega	758768	1657704	2,209	Volumétrico	2.88	248.83
27	El Aviadero	758966	1657994	2,246	Volumétrico	0.70	60.48

En total, existe una descarga de 6,755 m³/día en la época de estiaje en los manantiales no captados. El manantial de Joya Oscura ubicado en la parte baja de la microcuenca es el más productivo, aportando un 57.23 % del potencial total.

Los manantiales Rancho Viejo 1, 2, y 3, son corrientes efímeras, igual que el manantial Ojo de Agua 2 y manantial 1.

La mayoría de manantiales se ubican en la parte alta de la microcuenca, siendo los más productivos el manantial Tuncáj 1, Manzanote 3 y Plan de Manzo 3, por lo mismo, ambos abastecen los proyectos de riego por aspersión-gravedad de los caseríos Tuncáj-San José El Rodeo, Sector 2 Manzanote y Asociación Ali Ajuu respectivamente, realizando el aforo en las presas de derivación. En el resto de manantiales, el caudal oscila entre 10 y 17 m³/día.

La descarga total que se determinó en los manantiales captados fue de 2,239 m³/día siendo los más productivos, los manantiales que abastecen los proyectos de las comunidades de Los Altos, Piedras Blancas, Toro Seco y la cabecera municipal de Pachalúm, con un total 72.83% de la descarga en manantiales captados. Estos manantiales poseen la mayor demanda, ya que abastecen de agua para consumo humano al 75% de la población total que extrae agua de la microcuenca.

El resto de manantiales captados abastece las comunidades de la parte alta de la microcuenca y la comunidad de Ojo de Agua, ubicada en la parte media, con caudales que oscilan entre 30 y 249 m³/día. En un capítulo posterior se realiza un análisis de la demanda actual y futura de agua para consumo humano de las poblaciones que se abastecen de la microcuenca del río Cotón.

La descarga total de todos los manantiales en la época de estiaje es de 8,993 m³/día muy ligeramente inferior al caudal que se determinó en el punto de aforo, que fue de 9,043 m³/día.

Los resultados de los aforos realizados en los mismos puntos de los manantiales en el mes de Agosto, se muestran en el cuadro 8:

Cuadro 8. Caudal del cauce principal y manantiales aforados en el mes de Agosto en la microcuenca del río Cotón.

No.	Fuente	Caudal época seca		Caudal época lluviosa		Aumento %
		L/s	m ³ /día	L/s	m ³ /día	
1	Punto de aforo	104.66	9,042.62	398.15	34,400.16	280.42
2	Manantial 1	0.15	12.96	0.17	14.69	13.35
3	Manantial Joya Oscura	44.74	3,865.54	55.26	4,774.46	23.51
4	Rancho Viejo 1	0.00	0.00	0.00	0.00	-
5	Rancho Viejo 2	0.00	0.00	0.00	0.00	-
6	Rancho Viejo 3	0.00	0.00	0.00	0.00	-
7	Plan de Manzo 1	0.13	11.23	0.27	23.33	107.75
8	Plan de Manzo 2	0.17	14.69	0.41	35.42	141.12
9	Plan de Manzo 3	3.12	269.57	8.36	722.30	167.95
10	Manzanote 1	0.14	12.10	0.36	31.10	157.02
11	Manzanote 2	0.20	17.28	0.43	37.15	114.99
12	Manzanote 3	8.63	745.63	17.29	1,493.86	100.35
13	Tuncáj 1	20.59	1,778.98	53.42	4,615.49	159.45
14	Tuncáj 2	0.19	16.42	0.41	35.42	115.71
15	Ojo de Agua 1	0.12	10.37	0.14	12.10	16.68
16	Ojo de Agua 2	0.00	0.00	0.08	6.91	-
17	Altos-Piedras Blancas	6.73	581.47	8.40	725.76	24.81
18	Altos-Toro Seco	2.50	216.00	2.95	254.88	18.00
19	Pachalúm 1	4.57	394.85	5.56	480.38	21.66
20	Pachalúm 2	5.07	438.05	6.02	520.13	18.74
21	Tuncáj captación 1	0.95	82.08	3.05	263.52	221.05
22	Tuncáj captación 2	0.35	30.24	1.22	105.41	248.58
23	Ojo de Agua captación 1	0.61	52.70	0.72	62.21	18.05
24	Ojo de Agua captación 2	1.07	92.45	1.55	133.92	44.86
25	Manzanote	0.48	41.47	0.72	62.21	50.01
26	Joya de la Vega	2.88	248.83	3.42	295.45	18.74
27	El Aviadero	0.70	60.48	0.84	72.58	20.01

En términos generales el caudal en la mayoría de manantiales no captados aumenta más del 100% en la época de lluvias, existiendo una respuesta inmediata a la precipitación. En el caso de los manantiales Joya Oscura, Manantial 1 y Ojo de Agua 1, los aumentos son leves, siendo de 24, 13 y 17% respectivamente, debido a que están localizados en áreas donde los suelos son *poco permeables*, no existiendo recarga hídrica natural.

En el caso de los manantiales captados el caudal aumenta aproximadamente entre 18 y 50%, presentando un aumento significativamente mayor los manantiales que abastecen el proyecto Tuncáj, siendo de 221 y 249% respectivamente.

En el punto de aforo del cauce principal, el caudal fue de 34,400 m³/día, aumentando el 280%, obviamente presenta el mayor aumento. Es importante mencionar, que el caudal en el punto de aforo aumenta significativamente, durante un evento de lluvia, debido a la baja permeabilidad de los suelos ubicados a partir de la parte media de la microcuenca.

B. Aforos diferenciales

Los aforos diferenciales fueron realizados tanto en el cauce principal como en las corrientes tributarias, con el propósito de determinar cambios en el caudal que transportan los ríos en la microcuenca. Estos se realizaron en la época de estiaje, con el objetivo de determinar si el río aporta agua al acuífero o este último se la proporciona, es decir definir si es influente o efluente. De esta manera se conoce la descarga del acuífero o existencia de recarga hídrica por este factor.

Los aforos diferenciales son de utilidad para determinar los sectores en los cuales la precipitación pluvial constituye una recarga potencial al acuífero (precipitación efectiva), después de los efectos de suelo, vegetación, topografía, etc. Parte de ella, es posible que emerja como manantiales (corrientes secundarias) o directamente alimente a la corriente superficial principal de la microcuenca (río efluente). Por lo tanto haciendo medidas de caudal en intervalos relativamente pequeños sobre la longitud del cauce, se pueden detectar los sectores en los que el río se comporta como efluente o bien a través de infiltración de agua dentro de su cauce pasa a constituir también una recarga al acuífero.

Este criterio es de vital importancia en un estudio hidrogeológico completo, sirve para tener una idea cuantitativa de que fracción de la precipitación efectiva contribuye al caudal de la corriente principal, siendo esta siempre menor que la cantidad de recarga potencial. Uniendo el conocimiento de la recarga potencial en cada una de las unidades de mapeo definidas y los caudales aforados, es posible realzar la importancia de los aportes de las partes altas de una cuenca principalmente. (Orozco *et al.* 2003)

El método que se utilizó para realizar los aforos diferenciales fue el de sección-velocidad, descrito anteriormente.

Los resultados obtenidos en la parte baja del cauce principal se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 9. Aforos diferenciales realizados en el mes de Marzo en la parte baja de la microcuenca del río Cotón.

Aforo diferencial	Fuente	Punto	Coordenadas UTM (m)		Altitud msnm	Caudal		Clasificación
			Este	Norte		L/s	m ³ /día	
1	Cauce principal	1	755949	1650748	1,112	104.66	9,042.62	Efluente
		2	755890	1651195	1,131	103.26	8,921.66	
2	Cauce principal	1	755461	1652667	1,197	16.77	1,448.93	Efluente
		2	755901	1653691	1,289	13.42	1,159.49	
3	Cauce principal	1	756451	1654776	1,377	52.78	4,560.19	Efluente
		2	756721	1655411	1,499	36.65	3,166.56	
4	Manantial Ojo de Agua	1	755901	1653691	1,289	13.42	1,159.49	Efluente
		2	755489	1655228	1,487	0.12	10.37	

En la parte baja, la corriente principal de la microcuenca, *gana* caudal en todos los tramos que se aforaron, es decir es una corriente efluente.

En el aforo diferencial 1, existe una ligera diferencia, por lo que para fines prácticos se considera que en este tramo, el caudal del río se mantiene constante, no así, en los demás tramos que se aforaron, en donde existe una marcada diferencia del caudal que aumenta la corriente en su trayecto.

En el punto 2 del aforo diferencial 2, el caudal que se midió es principalmente el que aporta el manantial Ojo de Agua 1, ya que este tramo del río principal no tiene agua (aguas arriba se le extrae todo el caudal) por lo que la corriente Ojo de Agua 1, se comporta de la misma manera que la corriente principal, siendo una corriente efluente.

La mayor diferencia de caudal, se determinó en el aforo diferencial 3, detectándose que el cauce principal *gana* 1,394 m³/día. Este aumento es debido a que este tramo está localizado en un área de recarga hídrica natural.

En la parte media y alta de la microcuenca, los aforos diferenciales se realizaron en cada corriente tributaria, mostrándose los resultados en el siguiente cuadro:

Cuadro 10. Aforos diferenciales realizados en el mes de Abril en la parte alta y media de la microcuenca del río Cotón.

Aforo diferencial	Fuente	Punto	Coordenadas UTM (m)		Altitud msnm	Caudal		Clasificación
			Este	Norte		L/s	m ³ /día	
1	Plan de Manzo 1	1	757485	1656297	1,837	0.42	36.29	Efluente
		2	758328	1656623	2,097	0.13	11.23	
2	Plan de Manzo 2	1	757981	1657276	2,041	0.56	48.38	Efluente
		2	758619	1657609	2,189	0.17	14.69	
3	Plan de Manzo 3	1	757926	1657305	2,039	8.15	704.16	Efluente
		2	758455	1657789	2,168	3.12	269.57	
4	Manzanote 1	1	757779	1657707	2,077	1.53	132.19	Efluente
		2	758364	1658254	2,233	0.14	12.10	
5	Manzanote 2	1	757701	1657748	2,075	9.54	824.26	Efluente
		2	757861	1658288	2,241	0.20	17.28	
6	Manzanote 3	1	757309	1657429	2,008	23.70	2,047.68	Efluente
		2	757581	1657661	2,219	8.63	745.63	
7	Tuncáj 1	1	756551	1656326	1,837	4.95	427.68	Efluente
		2	756496	1658496	2,166	0.19	16.42	
8	Tuncáj 2	1	756401	1656381	2,226	39.89	3,446.50	Efluente
		2	755827	1657443	2,019	20.59	1,778.98	

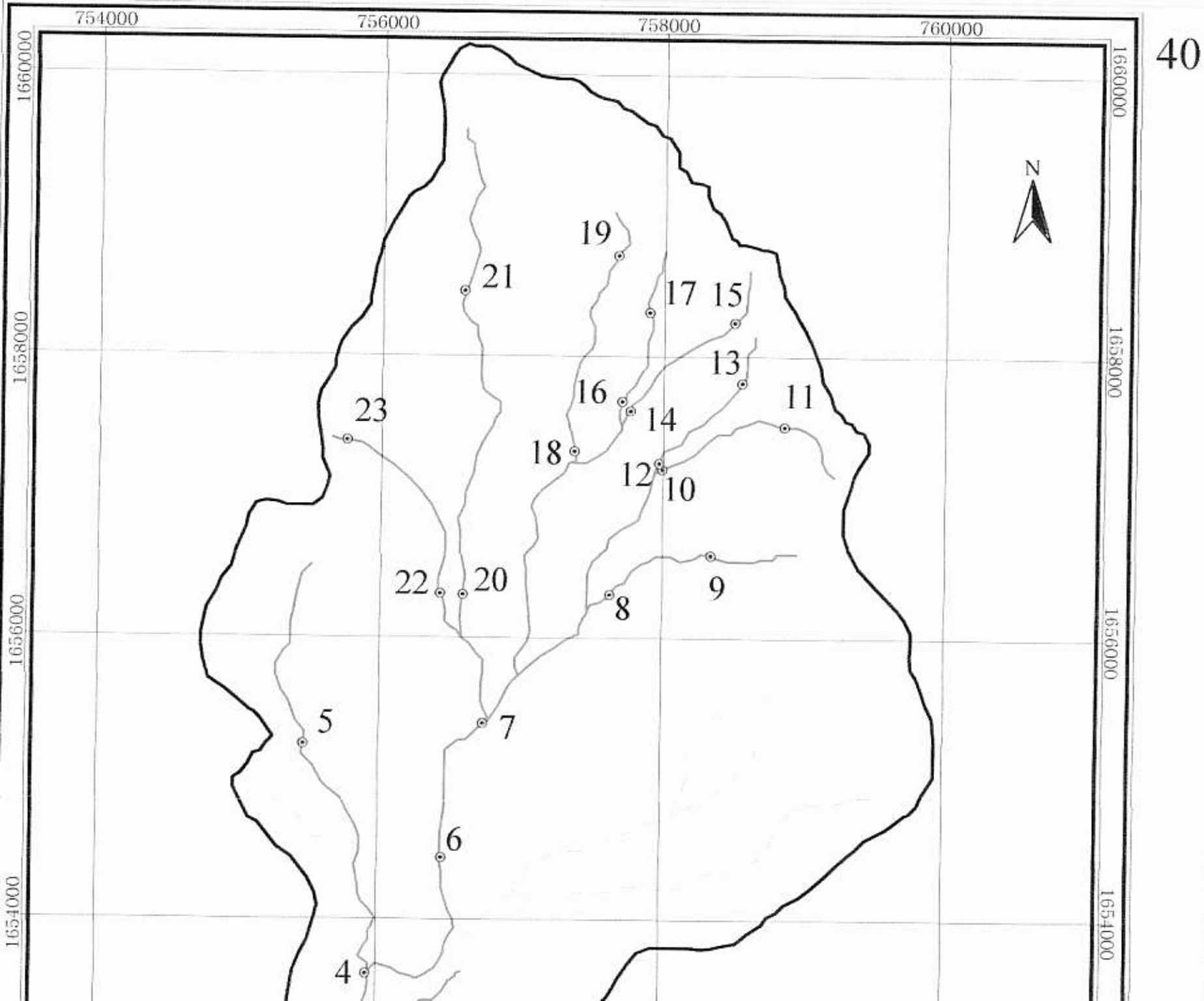
Todos las corrientes de la parte alta y media de la microcuenca del río Cotón, aumentan su caudal en el recorrido, por lo que se clasifican como efluentes. Los resultados son los esperados, ya que en esta área es donde se produce el 97.35% de la recarga hídrica natural.

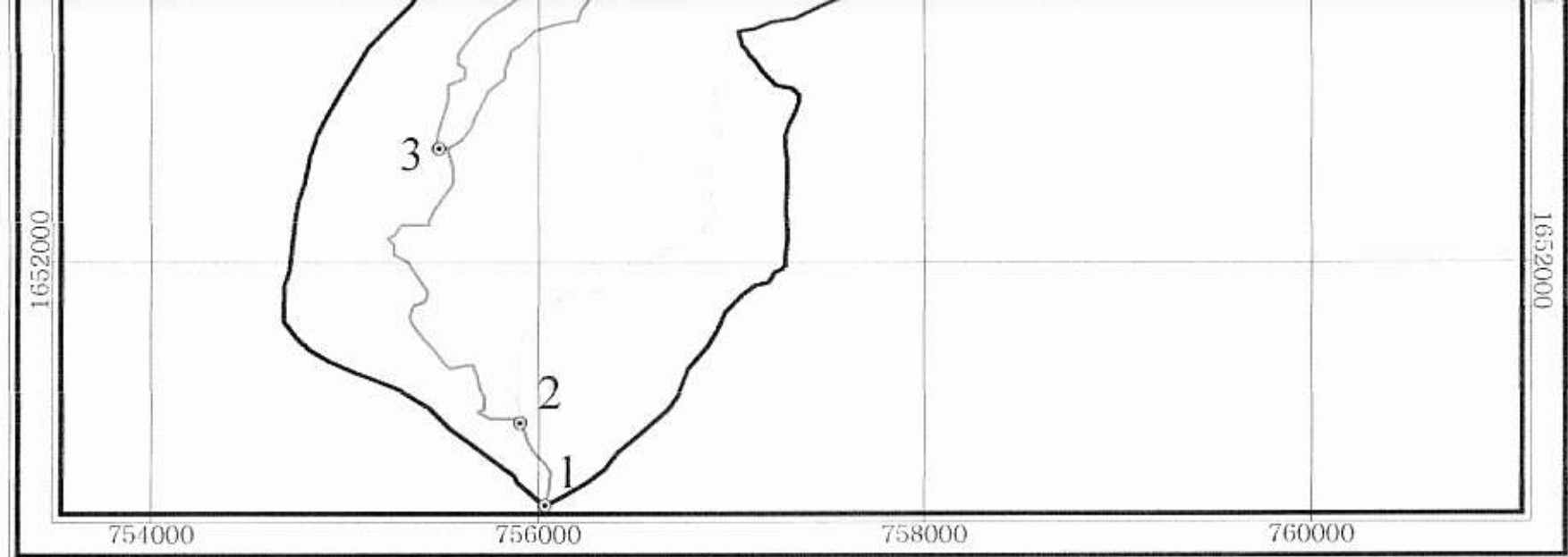
En ningún tramo de la corriente principal y tributarios de la microcuenca del río Cotón, se determinó que las corrientes aportan agua al acuífero, tal como se muestra en el mapa de isofréaticas (preliminar), en donde existe un flujo hacia el cauce principal (Figura 9). Es importante mencionar, que el lecho del río es un basamento metamórfico impermeable, constituido por los distintos tipos de roca que afloran en la zona, dispuestas en forma horizontal. La ubicación de los sitios en donde se realizaron los aforos diferenciales se muestra en la figura 8.

3.2 RECARGA HÍDRICA

3.2.1 Definición e importancia

Recarga natural es el volumen de agua que entra en un embalse subterráneo durante un periodo de tiempo, a causa de la infiltración de las precipitaciones o de un curso de agua, lo que es equivalente a la infiltración eficaz, además se define como el proceso que implica un incremento de agua hasta la zona de





2 1 0 2 Kilómetros

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
MAESTRÍA EN MANEJO SOSTENIBLE DE SUELO Y AGUA
CON ESPECIALIDAD EN PLANIFICACIÓN Y
MANEJO DE RECURSOS HÍDRICOS EN AGRONOMÍA

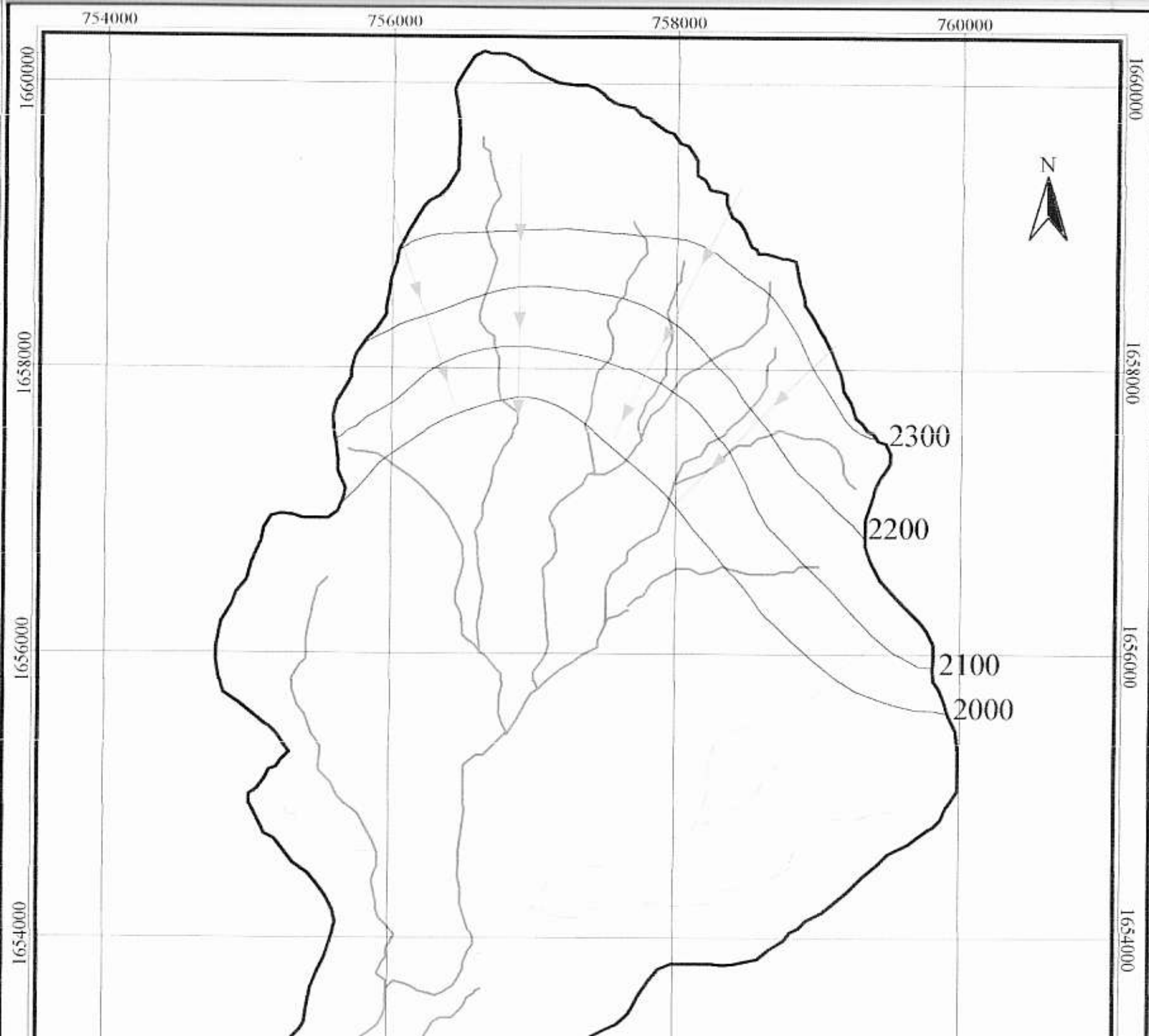


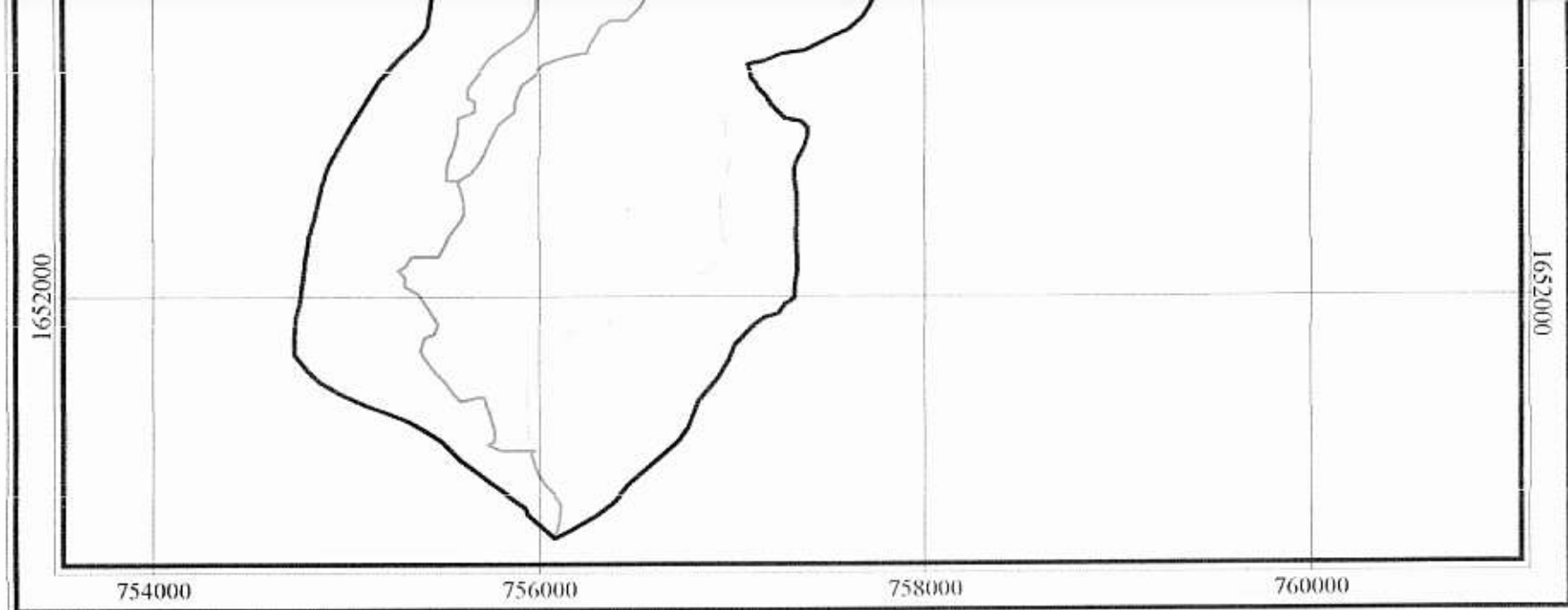
Proyección Universal Transversal Mercator
Datum Horizontal: WGS-84
Zona 16 clipsoide WGS-84, Norte de cuadrícula
Espaciamiento de la cuadrícula horizontal y vertical
2,000 metros.

LEYENDA

- Parteaguas
- Sitios de aforo
- Tipos de corriente
- Permanente
- - - Efímera

FIGURA 8. UBICACIÓN DE SITIOS DE AFOROS DIFERENCIALES
EN LA MICROCUENCA DEL RÍO COTÓN, BAJA VERAPAZ.





2 1 0 2 Kilómetros

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
MAESTRÍA EN MANEJO SOSTENIBLE DE SUELO Y AGUA
CON ESPECIALIDAD EN PLANIFICACIÓN Y
MANEJO DE RECURSOS HÍDRICOS EN AGRONOMÍA



Proyección Universal Transversal Mercator
Datum Horizontal: WGS-84
Zona 16 clipsoide WGS-84, Norte de cuadrícula
Espaciamiento de la cuadrícula horizontal y vertical
2,000 metros.

LEYENDA

Parteaguas

Tipos de corriente

Permanente

Efímera

Líneas de flujo

Isolíneas (msnm)

FIGURA 9. ISOLÍNEAS Y DIRECCIÓN DE FLUJO EN LA MICROCUENCA DEL RÍO COTÓN, BAJA VERAPAZ.

saturación, donde se encuentra el nivel de las aguas subterráneas. Es decir, es la cantidad de agua adicionada a través de pozos de inyección principalmente (recarga artificial) o absorbida a través del suelo y percolada hasta llegar a un acuífero (recarga natural). Esta puede ser directa (infiltración de lluvia) y lateral (aporte de otras áreas o cuencas). (Custodio y Llamas, 2001)

Por lo tanto, la recarga hídrica es importante, como fuente de abastecimiento al manto freático, permitiendo la sostenibilidad del recurso.

3.2.2 Factores que afectan la recarga hídrica

A. Clima

Entre los factores climáticos que afectan la recarga hídrica natural, se encuentran los siguientes:

a. Precipitación pluvial

Una lluvia moderada de larga duración favorece la infiltración, las lluvias intensas saturan muy rápidamente el suelo, perdiéndose gran parte en escorrentía superficial, además compactan el suelo reduciendo su habilidad para absorber el agua. (Johnson, 1975)

La precipitación efectiva es la porción de la precipitación que puede infiltrarse en el perfil del suelo y estar de forma disponible para ser aprovechada por las raíces de las plantas o, bien, alcanzar estratos más profundos como los acuíferos. (Linsley, 1988)

La precipitación efectiva es uno de los principales procesos de transferencia del ciclo hidrológico de una cuenca, conjuntamente con la escorrentía, evapotranspiración e infiltración, considerándose dentro del balance hídrico como el principal aporte para cuantificar la recarga al acuífero.

b. Evapotranspiración

Monsalve (1999), define la evapotranspiración como la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y por la transpiración de las plantas. El mismo autor define evapotranspiración potencial y real de la siguiente manera:

- ❏ Evapotranspiración potencial: pérdida de agua observada en una superficie líquida o sólida saturada, por evaporación y transpiración de las plantas, que ocurriría en el caso que hubiera un adecuado abastecimiento de humedad de agua al suelo en todo momento.

- Evapotranspiración real: pérdida de agua observada en una superficie líquida o sólida saturada, en las condiciones reinantes atmosféricas y de humedad del suelo, por fenómenos de evaporación y transpiración de las plantas.

Dadas las definiciones anteriores, al realizar el balance hídrico, se estima la evapotranspiración potencial y real, considerándose como pérdidas.

B. Suelo

a. Textura

Custodio y Llamas (2001), indica que la textura del suelo influye por si y por la influencia en la estabilidad de la estructura, tanto menor cuanto mayor sea la proporción de materiales finos que contenga, un suelo con gran cantidad de limos y arcillas está expuesto a la disgregación y arrastre de estos materiales por el agua, con el consiguiente llenado de poros más profundos.

Sandoval (1989), establece que la importancia de la textura radica en que determina en gran parte la capacidad de retención de agua, el movimiento en el suelo y la cantidad disponible para las plantas.

Sin embargo, no hay que olvidar que la materia orgánica, tiene gran influencia en la retención de humedad de un suelo, ya que suelos con igual textura, pueden retener diferente contenido de humedad, dependiendo del contenido de materia orgánica, razón por la cual en el análisis físico de suelos, se determinó dicha propiedad.

Un suelo con textura gruesa (arenosa), favorece la recarga hídrica, debido a la alta velocidad de infiltración que presenta, ya que como menciona Machorro (2000), las condiciones que favorecen un ritmo alto de infiltración son: suelos de textura gruesa, alta densidad vegetal, humedad baja del suelo y una capa superior de suelo porosa.

b. Estructura

Sandoval (1989), menciona que la estructura es importante porque afecta básicamente la velocidad de infiltración del agua. La estructura define el tamaño de los poros, la existencia de poros grandes reduce la tensión capilar pero favorece directamente la entrada de agua, de acuerdo con Custodio y Llamas (2001), razón por la cual un suelo arenoso, a pesar de poseer menor porcentaje de espacio poroso que un suelo arcilloso, favorece la infiltración, debido a que sus poros son mayores.

Es necesario mencionar como afecta el tipo de estructura en la recarga hídrica, se disminuye en un suelo con estructura laminar, y por el contrario se aumenta en un suelo con estructura granular. En la microcuenca del río Cotón, la estructura predominante es laminar.

c. Densidad aparente

La densidad aparente depende básicamente de la textura del suelo, pero puede ser modificada por la compactación, cuando se compacta un suelo aumenta su densidad aparente porque se reduce el espacio entre las partículas del suelo disminuyendo el volumen del espacio poroso. (Sandoval, 1989)

Por lo tanto, suelos con altas densidades aparentes (muy compactados), presentan baja velocidad de infiltración, disminuyendo la recarga hídrica.

d. Grados de saturación

Los grados de saturación de un suelo, son muy importantes para la determinación de la recarga hídrica, porque de ellos depende la capacidad que pueda tener un suelo para retener el agua infiltrada, a menor capacidad de retención, mayores serán las posibilidades de que esta agua pase a formar parte de la humedad de estratos inferiores, hasta alcanzar la zona saturada (acuíferos). Los grados de saturación o contenidos de humedad que se determinaron fueron los siguientes:

- Capacidad de campo: cantidad de agua que un suelo bien drenado puede retener contra las fuerzas de gravedad, y representa para fines prácticos, el límite superior de agua que puede estar disponible para las plantas. (Grassi, 1989)
- Johnson (1975), menciona que una vez superada la capacidad de campo del suelo, el agua desciende por la acción conjunta de las fuerzas capilares y de la gravedad, siendo el agua gravitacional.
- Punto de marchitamiento permanente: contenido de agua en el suelo al cual las hojas muestran síntomas de marchitamiento y no se recuperan cuando permanecen durante una noche en una atmósfera saturada de humedad. (Grassi, 1989)

El agua utilizable por las plantas puede considerarse únicamente, la diferencia entre los grados de humedad correspondientes a la capacidad de campo y al punto de marchites permanente. (Custodio y Llamas, 2001)

Para la determinación de la textura, densidad aparente, capacidad de campo, punto de marchitamiento permanente y materia orgánica, se envió una muestra de suelo representativa del perfil donde se perforó el cilindro para medir la infiltración básica, al laboratorio de Suelo-Agua-Planta de la FAUSAC. Los resultados obtenidos se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 11. Textura, densidad aparente, contenidos de humedad y materia orgánica de los suelos de la microcuenca del río Cotón.

Unidad de mapeo	Materia orgánica %	Contenidos de humedad (%)		Densidad aparente g/cc	Granulometría (%)			Textura
		CC 1/3 atm	PMP 15 atm		Arcilla	Limo	Arena	
1	2.46	12.65	9.12	1.14	19.07	14.11	66.82	Franco arenoso
2	4.59	106.49	84.81	0.82	3.02	30.16	66.82	Franco arenoso
3	2.95	33.09	17.00	0.21	30.32	36.46	33.22	Franco arcilloso
4	1.80	20.90	13.98	1.29	29.57	12.01	58.42	Franco arcillo-arenoso
5	1.13	13.23	7.61	1.18	19.07	14.11	66.82	Franco arenoso
6	0.20	10.33	5.46	1.21	12.94	15.29	71.78	Arcillo arenoso
7	1.20	21.68	11.77	0.91	27.47	22.51	50.02	Franco arcillo-arenoso
8	6.12	22.48	14.35	1.05	25.37	24.61	50.02	Franco arcillo-arenoso
9	2.73	27.30	17.61	1.14	42.17	12.01	45.82	Arcillo arenoso
10	0.87	12.15	7.59	1.05	14.87	16.21	68.92	Franco arenoso
11	3.06	26.45	17.66	1.18	42.34	11.09	46.58	Arcillo arenoso
12	0.60	12.01	7.24	1.14	16.97	28.81	54.22	Franco arenoso
13	0.33	12.45	6.31	1.18	12.94	19.49	67.58	Franco arenoso
14	1.07	12.96	6.46	1.33	12.77	26.71	60.52	Franco arenoso
15	2.06	18.07	12.89	1.29	27.47	12.01	60.52	Franco arcillo arenoso
16	5.92	22.57	15.17	1.08	23.27	28.81	47.92	Franco
17	3.00	15.71	8.09	1.05	16.97	18.31	64.72	Franco arenoso
18	3.73	22.63	15.18	1.11	29.57	18.31	52.12	Franco arcillo-arenoso
19	0.40	5.86	3.21	1.29	8.74	8.99	82.28	Arena franca
20	4.39	25.96	16.48	1.08	39.97	14.11	47.92	Arcillo arenoso
21	2.88	57.02	43.26	0.95	30.32	21.76	47.92	Franco arcillo arenoso
22	19.88	136.26	95.79	0.61	9.32	13.36	77.32	Franco arenoso
23	11.24	70.82	48.59	0.80	7.22	23.86	68.92	Franco arenoso
24	3.50	32.10	20.89	1.11	36.62	19.66	43.72	Franco arcilloso
25	2.67	46.60	38.85	0.98	42.92	15.46	41.62	Arcilloso
26	4.73	24.80	15.55	1.08	23.27	26.71	50.02	Franco arcillo-arenoso
27	0.40	12.28	8.02	1.05	19.07	14.11	66.82	Franco arenoso
28	3.86	33.29	23.06	1.18	40.24	15.29	44.48	Arcillo arenoso

Estas características son de vital importancia, ya que se puede estimar la cantidad de agua de precipitación pluvial, que luego de infiltrarse en el suelo, se pierde por fuerzas gravitacionales a estratos más profundos, es decir, el agua que recarga el acuífero.

Los mayores contenidos de materia orgánica, se determinaron en los suelos de las unidades de mapeo 22 y 23, el resto de unidades oscila entre bajo a aceptable, desde 0.2 % en la unidad 6 hasta 6.12 % en la unidad 8. El contenido de materia orgánica influye directamente sobre la capacidad de retención del suelo, lo cual se evidencia en los resultados, ya que las unidades 22 y 23, presentan altos porcentajes de retención de humedad. Suelos como los de la unidad 19, en donde la textura predominante es arena franca, poseen bajos porcentajes de retención de humedad, además de ser pobre en contenido de materia orgánica, siendo de 0.4%.

Las texturas predominantes de los suelos en la microcuenca, son francas, francas arenosas y franco arcillosas. Esto es debido a que existió una mezcla entre el estrato de suelo y el material parental, ya que a excepción de los suelos de las unidades 2, 21, 22, 23, 24 y 25, en todas las demás mediante barrenamientos se detectó la presencia de esta capa.

e. Infiltración

La diferencia entre el volumen de agua que llueve en una cuenca y el que escurre por su salida recibe el nombre de pérdidas. En general, las pérdidas están constituidas por la intercepción en el follaje de las plantas y en los techos de las construcciones, la retención en depresiones (que posteriormente se evapora o se infiltra), la evaporación y la infiltración. (Aparicio, 2001)

La velocidad de infiltración o su sinónimo: velocidad de entrada, se puede definir como la velocidad de penetración del agua en el perfil del suelo, cuando la superficie del terreno está cubierta por una capa de agua poco profunda. (Grassi, 1989)

Este proceso depende de las características físicas del suelo, tales como: textura, estructura, compactación y contenido de humedad. En este caso, los suelos con texturas gruesas, poco grado de saturación y compactación y con un bajo contenido de humedad, tienen mayor capacidad de infiltración que los suelos con características diferentes. Existen diferentes métodos para definir la tasa de infiltración básica de un suelo, siendo los más utilizados, los permeámetros, método de doble cilindro y método de Porchet. (Custodio y Llamas, 2001)

El método de Porchet, también se conoce como *cilindro invertido*, siendo de gran utilidad para determinar la conductividad hidráulica de un suelo por encima del nivel freático, considerándose un método *in situ* a pequeña escala, en donde el suelo no está saturado, por lo que para medir la conductividad hidráulica, se debe aplicar suficiente agua para obtener condiciones cerca de saturación. El método utiliza la relación entre el porcentaje de infiltración y la carga hidráulica para determinar el valor de K . (Ritzema, 1994)

Por lo tanto, la superficie a través de la cual se infiltra el agua en el cilindro 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:

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

Simplificando y separando variables:

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

Al integrar resulta:

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

Así pues, 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 entrar con ellos en la expresión. (Custodio y Llamas, 2001)

Cabe mencionar que si el suelo se encuentra en condiciones secas la velocidad de infiltración será mucho mayor que la obtenida en condiciones saturadas. Es decir que a medida que el suelo se satura, la velocidad de infiltración (f) disminuye hasta alcanzar un punto de equilibrio, cuyo valor se denomina capacidad de infiltración saturada o infiltración básica (f_c), la cual se considera cercana a la conductividad hidráulica o permeabilidad (K). (Orozco *et al.* 2003)

Se realizó por lo menos una prueba de velocidad de infiltración en las unidades de mapeo definidas en el estudio, utilizando el método de Porchet o *cilindro invertido*, perforando con un barreno holandés tipo cilíndrico marca *Eijkelkamp* de 0.06 m de diámetro externo. En las unidades de mayor área, principalmente en la parte alta y media de la microcuenca, se realizaron de 2 a 3 pruebas de infiltración.

En términos generales el procedimiento que se utilizó para la realización de las pruebas fue el siguiente:

- Se limpió previamente el área.
- Se perforó el cilindro de aproximadamente 0.07 m de diámetro, a una profundidad no menor de 0.60 m.
- Se agregó agua hasta alcanzar humedad cercana al punto de saturación del suelo, en las unidades de mapeo ubicadas en la parte alta de la microcuenca, el tiempo de saturación del suelo con columna constante fue de 3 horas, debido a que el suelo estaba completamente seco.
- Se colocó un nivel de referencia para la toma de las profundidades.
- Los datos de descenso del espejo del agua se tomaron a intervalos muy pequeños al inicio de la prueba.
- La profundidad del cilindro se registró cada vez que se agregaba agua al cilindro.
- Se georeferenció cada sitio donde se realizaron las pruebas de infiltración.

El análisis de las pruebas de infiltración, así como la gráfica infiltración básica vs. tiempo se realizaron en una hoja de cálculo del programa Excel, además se trazó la línea de tendencia. Los resultados se muestran en el Anexo 2.

En total se realizaron 44 pruebas de infiltración (en promedio 1 por cada 0.65 km²), mostrándose los resultados en el siguiente cuadro:

Cuadro 12. Velocidad de infiltración básica de los suelos de la microcuenca del río Cotón.

Unidad de mapeo	Número de pruebas	Coordenadas UTM (m)		Altitud msnm	Infiltración básica		Profundidad efectiva (m)
		Este	Norte		cm/h	m/día	
1	2	755666	1655316	1.538	0.70	0.17	0.55
		758747	1655161	1.891	0.82	0.20	0.50
2	1	758455	1655712	2.015	1.87	0.45	>0.60
3	1	758545	1655712	2.015	0.52	0.12	0.40
4	1	755630	1654829	1.426	0.08	0.02	0.30
5	2	756891	1653048	1.485	0.23	0.06	0.39
		757025	1653451	1.492	0.17	0.04	0.36
6	2	755271	1653069	1.316	0.19	0.05	0.30
		756580	1652626	1.337	0.25	0.06	0.33
7	1	757081	1652442	1.355	0.36	0.09	0.36
8	2	756670	1653288	1.465	0.08	0.02	0.33
		756370	1653095	1.341	0.05	0.01	0.28
9	1	756830	1652703	1.263	0.03	0.01	0.28
10	2	756242	1651359	1.251	0.18	0.04	0.34
		755880	1651769	1.187	0.12	0.03	0.31
11	2	754746	1652002	1.259	0.02	0.00	0.22
		754881	1652182	1.277	0.03	0.01	0.25
12	2	757798	1654480	1.561	0.22	0.05	0.39
		757269	1655005	1.592	0.28	0.07	0.34
13	1	755610	1652881	1.423	0.25	0.06	0.38
14	2	756279	1654130	1.390	0.04	0.01	0.31
		756298	1654481	1.405	0.04	0.01	0.28
15	1	755073	1655997	1.547	0.10	0.02	0.31
16	1	756727	1654723	1.545	0.11	0.03	0.32
17	1	756691	1654251	1.396	0.10	0.02	0.30
18	2	755395	1652445	1.198	0.29	0.07	0.42
		755629	1652871	1.228	0.31	0.07	0.45
19	2	755805	1651199	1.181	0.28	0.07	0.28
		755770	1651302	1.190	0.40	0.10	0.32
20	2	755124	1651581	1.222	0.10	0.02	0.35
		754791	1651811	1.239	0.19	0.05	0.31
21	2	755731	1656325	1.851	2.26	0.54	>0.60
		756441	1657478	2.097	1.94	0.47	>0.60
22	2	757391	1659229	2.365	2.42	0.58	>0.60
		757857	1659376	2.409	2.16	0.52	>0.60
23	2	757004	1659224	2.372	2.34	0.56	>0.60
		757526	1659221	2.383	1.94	0.47	>0.60
24	2	755553	1656803	1.999	0.67	0.16	>0.60
		757146	1658175	2.031	0.85	0.20	>0.60
		758676	1657296	2.184	0.71	0.17	>0.60
25	1	756120	1657881	2.080	0.35	0.08	>0.60
26	1	756821	1655431	1.533	0.04	0.01	0.27
27	1	755583	1651531	1.172	0.22	0.05	0.35
28	1	755099	1652320	1.269	0.05	0.01	0.28

En términos generales los valores de infiltración básica de los suelos de la microcuenca del río Cotón, son bajos, a excepción de los que se ubican en la parte alta, donde se obtuvieron valores hasta de 0.58 m/día. En los suelos ubicados en la parte baja y media los valores oscilan entre 0.00 y 0.10 m/día.

Según Smedema y Rycroft (1983), citados por Ritzema (1994), estos valores de infiltración básica corresponden a suelos arcillosos y franco arcillosos compactos y mal estructurados. Los análisis granulométricos indican que los suelos son de textura franca arcillosa a franca arenosa, por lo que las bajas velocidades de infiltración que se midieron se deben a la profundidad efectiva y a la estructura del suelo, ya que la estructura predominante es laminar, debido al ambiente metamórfico existente en el área.

En las unidades 2, 21, 22 y 23, se midieron las mayores velocidades de infiltración, oscilando entre 0.58 y 0.45 m/día, correspondiendo estos valores de acuerdo con Smedema y Rycroft (1983) a un suelo arcilloso muy fino. El análisis granulométrico indica que estos suelos son de textura franca arenosa y franca arcillo arenosa (en el caso de la unidad 21), sin embargo hay que tomar en cuenta que pequeños contenidos de arcilla pueden hacer variar mucho la permeabilidad de un suelo.

Según Denson *et al.* (1968) citados por Custodio y Llamas (2001), basta un 3% de montmorillonita para reducir la permeabilidad al agua dulce de una arena a la mitad y cantidades de caolinita superiores a un 16% en peso pueden reducir la permeabilidad casi a cero. Además en estos suelos la profundidad efectiva es mayor que en el resto de unidades, ya que están cubiertos por bosques densos de especies latifoliadas, y por lo que se pudo observar, tienen mayor capacidad de formación de suelo que los bosques de coníferas (en el caso de la unidad 21). Esto se ve reflejado en los contenidos de materia orgánica que se determinaron, siendo las unidades 22 y 23, en donde se obtuvieron los valores más altos (19.88 y 11.24% respectivamente), característica que también les confiere alta retención de humedad.

De acuerdo con Custodio y Llamas (2001), los suelos se clasifican como *poco y algo permeables*, lo que incluye materiales como, limo arenoso, limo, arcilla limosa, arena fina, arena limosa, caliza fracturada. Es importante mencionar que una característica muy importante de las rocas metamórficas, es la presencia de un material limoso (con sensación de talco), el cual al humedecerse ejerce una función sellante y cementante en los microporos del suelo, lo que también ayuda a explicar las bajas velocidades de infiltración que se midieron en los suelos de las distintas unidades de mapeo la microcuenca del río Cotón, principalmente en la parte baja. Por lo tanto, partiendo de esta clasificación, todos los suelos son *algo permeables (acuíferos pobres)*, a excepción de las unidades 9 y 11, que son *poco permeables (acuitardos)*.

Según Sandoval (1987), la conductividad hidráulica de los suelos se clasifica como *muy lenta a moderadamente lenta*, clasificándose como *moderada* únicamente las unidades 22 y 23.

La profundidad efectiva, determinada mediante barrenamientos, no fue mayor de 0.55 m encontrándose en todos los casos el material parental dispuesto en forma laminar, principalmente en los suelos de la parte baja y media de la microcuenca. La profundidad efectiva es de suma importancia a ser considerada en la recarga hídrica, ya que constituye una barrera impermeable, lo que da lugar a la formación de flujo subsuperficial. En los suelos de las unidades 2, 21, 22, 23, 24 y 25 no se detectó el material parental, por lo menos a 0.60 m, en el resto de unidades, la profundidad efectiva osciló entre 0.22 y 0.55 m.

f. Topografía

La pendiente del terreno influye en el sentido de mantener durante más o menos tiempo una lámina de agua de cierto espesor sobre él. (Custodio y Llamas, 2001)

La topografía es de gran influencia en la recarga hídrica, ya que a mayor pendiente del terreno, mayor es la escorrentía, por lo que la recarga hídrica disminuye.

g. Cobertura vegetal

Cuando el suelo está cubierto de vegetación las plantas protegen de la compactación por impacto de la lluvia, se frena el recorrido superficial del agua que está, así, más tiempo expuesta a su posible infiltración y las raíces de las plantas abren grietas en el suelo que facilitan la penetración del agua. (Custodio y Llamas, 2001)

López (1991), menciona que la vegetación también disminuye el volumen y la velocidad de la escorrentía, ya que a través de la transpiración remueve agua de los suelos, lo cual incrementa la capacidad de almacenamiento del agua en el mismo. Por lo que al haber menor escorrentía, aumenta la recarga hídrica natural.

Dentro de la cobertura vegetal, es importante tomar en cuenta la profundidad de las raíces, ya que a mayor profundidad, existirá mayor extracción de agua utilizable por las plantas, disminuyendo el volumen de agua que recarga el acuífero.

h. Retención vegetal

De la lluvia que llega a la superficie del suelo, una fracción de ella infiltra, otra escurre y una pequeña fracción queda en depresiones, que termina evaporándose o infiltrando. Sin embargo, la única fracción de lluvia con potencial a infiltrarse es la que llega a la superficie del suelo. Existe una fracción de lluvia a considerar, esta es la retenida en el follaje de las plantas. Estudios realizados en Costa Rica indican que al menos 5 mm de lluvia no infiltran ni escurren, es decir son retenidas por el follaje. (Schosinsky y Losilla, 2000)

De acuerdo con Linsley (1988), la capacidad de intercepción se reduce a mayor velocidad del viento, pero la tasa de evaporación aumenta. Se ha encontrado que un bosque de árboles maderables de gran tamaño intercepta hasta un 20% de la lluvia, en cultivos la intercepción para una lluvia de 25 mm, oscila de 3.2 % en maíz, 11.2% en tabaco, 16% en cereales, hasta 33% en alfalfa, en promedio se estima un 12% de intercepción debido a los cultivos agrícolas.

i. Estratigrafía geológica

Orozco *et al.* (2003), mencionan que es de gran importancia realizar un estudio de la estratigrafía de la zona, es decir conocer la disposición de los diferentes materiales geológicos, ya que estos pueden afectar grandemente la cantidad de recarga hídrica.

3.3 METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR RECARGA HÍDRICA

Todas las metodologías para estimar la recarga hídrica, se basan en la ecuación general del balance hídrico, la cual tiene la siguiente expresión:

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Cambio de almacenamiento}$$

Cuantificando las entradas (precipitación pluvial, aportes), las salidas (evapotranspiración real, escorrentía, retención), utilizando diferentes métodos para estimar cada uno de estos parámetros. Existen metodologías desarrolladas para condiciones de una región, como la que desarrolló Schosinsky y Losilla en Costa Rica (2000), y otras en las que se utilizan trazadores químicos ambientales.

3.3.1 Trazadores químicos

Petheram *et al.* (2000) citados por Ruiz, JM (2003), evaluaron las técnicas de estimación de la recarga hídrica empleadas en más de 60 estudios realizados en Australia de 1.970 a 2.000. Destacan que las más

utilizadas son las que utilizan el cloruro como trazador ambiental en la zona no saturada (un 60 % de los estudios).

Como menciona Allison *et al.* (1994) citados por Ruiz, JM (2003), de todas las técnicas de trazadores disponibles, la del balance de cloruros pasa por ser la más simple, más barata y de uso más universal para la estimación de la recarga. El ion cloruro ha sido el trazador ambiental más comúnmente utilizado porque es altamente soluble, no se absorbe, es químicamente conservativo y fácilmente medible y ha sido utilizado para la estimación de la recarga en zonas áridas y semiáridas durante las últimas décadas.

Allison y Hughes (1978) citados por Ruiz, JM (2003), modificaron las ecuaciones generales del balance de masa de cloruro en el agua subterránea de Eriksson y Khunakasem (1969) para utilizar el método en la zona no saturada. En lugar de medir directamente los flujos de agua los métodos de trazadores como el cloruro pueden usarse para realizar una estimación fiable de las tasas de recarga invirtiendo los perfiles de solutos obtenidos en el campo. Lo que se pretende es obtener un valor representativo para un determinado uso del suelo o para un tipo de suelo.

De acuerdo con Price (2003), el tritio ^3H es otro isótopo que se usa en estudios de agua subterránea, es un isótopo pesado del Hidrógeno. La concentración del ^3H se mide en unidades (UT), una unidad es la concentración de un átomo de ^3H en cada 1.018 átomos de ^1H . La vida media del ^3H es de 12.4 años, por lo que la presencia de concentraciones en el agua subterránea es más de 5 UT significa que esa agua en el acuífero se recargó después de que iniciaron las pruebas termonucleares en 1.952. Debido a las concentraciones presentes de ^3H su medición necesita de equipo muy sensible y caro, excepto por esto, el ^3H ha sido considerado por muchos investigadores como el trazador más cercano al ideal, debido a que forma parte de la molécula del agua.

Price (2003), también menciona que existen otros dos isótopos, llamados isótopos estables, que son muy útiles en estudios hidrológicos precisamente porque se fraccionan y porque no son radiactivos, y por lo tanto, no cambian con el tiempo, los cuales son el Oxígeno 18 y el Deuterio (un isótopo estable de Hidrógeno).

3.3.2 Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual

El método de Schosinsky y Losilla (2000), estima la precipitación efectiva basándose en la utilización de una ecuación resultante de correlación estadística en análisis de bandas de pluviógrafo. Además se

analizaron los coeficientes de escorrentía propuestos por otros autores, para así desarrollar una ecuación que estimará la infiltración, integrando la intercepción de lluvia por la cobertura, infiltración básica del suelo y la topografía.

Considera la velocidad de infiltración del suelo como el factor principal que condiciona la cantidad de precipitación pluvial que puede infiltrarse, es decir la precipitación efectiva. Los aspectos a considerar son los siguientes:

A. Relación entre la infiltración de agua en el suelo y la intensidad de lluvia (K_{fc}) (fracción que infiltra por efecto de la textura del suelo)

La ecuación que relaciona la capacidad de infiltración del agua en el suelo con la intensidad de lluvia es la siguiente:

$$K_{fc} = 0.267 \times \ln(f_c) - 0.000154 \times (f_c) - 0.723$$

Donde:

K_{fc} = Fracción que infiltra por efecto de la textura del suelo.

$\ln$ = Logaritmo natural.

f_c = Infiltración básica del suelo. (mm/día)

Esta ecuación tiene un rango de funcionamiento que es de $16 \leq f_c \leq 1.568$. Para un valor de 16 $K_{fc} = 0.0148$, valores menores son negativos, por lo que para valores de f_c , menores de 16 se utiliza la siguiente ecuación:

$$K_{fc} = 0.0148 \times f_c / 16$$

Esta situación se dio en suelos con velocidades de infiltración bajas, como los de las unidades 9, 11, 26 y 28, donde se determinaron valores < 0.01 m/día.

Es importante hacer notar que para valores de $f_c > 1.568$, los valores de K_{fc} serán inicialmente mayores que uno; luego, K_{fc} comienza a ser menor de uno, a partir de $K_{fc} > 1.910$, lo que no es posible. Por lo tanto, para valores de $f_c > 1.568$, $K_{fc} = 1$.