

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS**

**ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DE LA TIERRA EN EL COMPORTAMIENTO
DEL CICLO HIDROLÓGICO DE LA SUBCUENCA DEL RÍO QUISCAB, SOLOLÁ,
GUATEMALA.**



**POR
ONELIA ROSA MARÍA XICAY FRANCO**

GUATEMALA, AGOSTO DE 2011

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS**

**ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DE LA TIERRA EN EL COMPORTAMIENTO
DEL CICLO HIDROLÓGICO DE LA SUBCUENCA DEL RÍO QUISCAB, SOLOLÁ,
GUATEMALA.**

TESIS

**PRESENTADA A LA HONORABLE JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE
AGRONOMÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

POR

ONELIA ROSA MARÍA XICAY FRANCO

En el acto de investidura como

INGENIERA AGRÓNOMA

EN

RECURSOS NATURALES RENOVABLES

EN EL GRADO ACADÉMICO DE

LICENCIADO

GUATEMALA, AGOSTO DE 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**RECTOR MAGNÍFICO****LIC. CARLOS ESTUARDO GÁLVEZ BARRIOS****JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA**

DECANO	Dr.	Lauriano Figueroa Quiñonez
VOCAL I	Ing. Agr.	Ariel Abderraman Ortiz López
VOCAL II	Ing. Agr. Msc.	Marino Barrientos García
VOCAL III	Ing. Agr. Msc.	Oscar René Leiva Ruano
VOCAL IV	Br.	Lorena Carolina Flores Pineda
VOCAL V	Per. Agro.	Josué Antonio Martínez Roque
SECRETARIO	Ing. Agr.	Carlos Roberto Echeverría Escobedo

Guatemala, agosto de 2011

Guatemala, agosto de 2011

Honorable Junta Directiva
Honorable Tribunal Examinador
Facultad de Agronomía
Universidad de San Carlos de Guatemala

Distinguidos miembros:

De conformidad con las normas establecidas por la Ley Orgánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, tengo el honor de someter a vuestra consideración el trabajo de tesis titulado:

ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DE LA TIERRA EN EL COMPORTAMIENTO DEL CICLO HIDROLÓGICO DE LA SUBCUENCA DEL RÍO QUISCAB, SOLOLÁ, GUATEMALA.

Presentado como requisito previo a optar al título de Ingeniero Agrónomo en Recursos Naturales Renovables, en el grado académico de Licenciado.

Esperando que la presente investigación llene los requisitos para su aprobación, me suscribo de ustedes,

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

ONELIA ROSA MARÍA XICAY FRANCO

ACTO QUE DEDICO**A:****DIOS:** Por ser el creador y la luz de mi vida.**MIS PADRES:** Nicolás y Onelia. Como muestra de agradecimiento, que este triunfo sea su recompensa. Gracias por su amor, confianza y presencia en mi vida.**MIS HERMANAS:** Nicté (Q.E.P.D.) y Roselyn, por su amor, apoyo y confianza.**MIS TIAS:** Lily, Maribel y Ana, por sus enseñanzas, su apoyo y presencia en mi vida.**MI FAMILIA:** A todos, por el apoyo, confianza y motivación. También para demostrarles que las metas con voluntad propia, fe y confianza en Dios se pueden cumplir.**MIS AMIGAS Y AMIGOS:** Por ser parte importante de mi vida, por las experiencias, los logros y recuerdos, especialmente por su sincera e incondicional amistad. Por ayudarme a crecer y madurar como persona y por estar allí conmigo apoyándome en todas las circunstancias posibles, aún en la distancia.**MIS CATEDRÁTICOS:** A los que creen que el principio de la educación es, predicar con el ejemplo.**MI SUPERVISOR:** Dr. Silvel Elías, por el apoyo, confianza y motivación en la realización del EPS.**MI TIERRA:** Zacapa, tierra cálida que anida hombres y mujeres gentiles, valientes y de buen corazón.

TESIS QUE DEDICO

A:

DIOS

GUATEMALA

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

LOS EDUCADORES CRISTIANOS

TODA LA FAMILIA LASALLISTA

EL LAGO DE ATITLÁN

TODOS LOS QUE SE OCUPAN DE PROTEGER Y CONSERVAR LOS RECURSOS
NATURALES DE LA CUENCA DEL LAGO DE ATITLÁN.

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a las personas que colaboraron de alguna manera, en el desarrollo de la presente investigación.

A:

Mi asesor.

Dr. Marvin Salguero.

Por el indispensable apoyo, motivación y confianza, brindada en la realización de la presente investigación.

MSc. Ing. Agro. Tomás Padilla.

Por el apoyo, brindado en el trabajo de campo para llevar a cabo la presente investigación.

Ing. Agro. Hugo Tobías.

Por las enseñanzas, que sirvieron para el desarrollo de la presente investigación.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE CUADROS	x
RESUMEN	xii
1 INTRODUCCIÓN	1
2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
3 MARCO TEÓRICO.....	4
3.1 Marco conceptual	4
3.1.1 Cambio de uso de la tierra en Guatemala	4
3.1.2 Presión sobre el uso de la tierra.....	4
3.1.3 Impacto del sobreuso de la tierra	5
3.1.4 Impactos de la tormenta tropical Stan, sobre el recurso tierra en el altiplano occidental	6
3.1.5 Impacto del cambio de uso de la tierra en el recurso hídrico	6
3.1.6 Indicadores de la calidad de la tierra	7
3.1.7 Ciclo hidrológico	9
3.1.8 Recarga y descarga hídrica.....	10
3.1.9 Balance hídrico de suelos	25
3.1.10 Escurrimiento máximo esperado.....	27
3.2 Marco referencial	32
3.2.1 Antecedentes de la Reserva de Uso Múltiple Cuenca del Lago de Atitlán RUMCLA.....	32
3.2.2 Visión de la RUMCLA.....	33
3.2.3 Objetivos de la RUMCLA.....	34
3.2.4 Importancia natural de la RUMCLA	34
3.2.5 Importancia Social y Económica	35
3.2.6 Ubicación de la subcuenca del río Quiscab.....	40
3.2.7 Ubicación Político-Administrativa	40
3.2.8 Características socioeconómicas	44
3.2.9 Características biofísicas.....	45
4 OBJETIVOS	51
4.1 General.....	51
4.2 Específicos	51
5 METODOLOGÍA.....	52
5.1 Determinación de la escala de mapas.....	52
5.2 Establecimiento de escenarios para realizar la comparación	52
5.3 Definición de las unidades de mapeo	52

5.3.1	Elaboración del mapa de unidades fisiográficas	52
5.3.2	Elaboración del mapa de pendientes	53
5.3.3	Verificación de los límites de las unidades de mapeo	53
5.3.4	Determinación de profundidades de suelos y factores modificadores.....	53
5.4	Elaboración de escenarios	53
5.4.1	Mapa de uso de la tierra para 1991 (escenario 1).....	53
5.4.2	Mapa de uso de la tierra para 2009 (escenario 2).....	54
5.4.3	Determinación de la capacidad de uso de la tierra (escenario 3).....	54
5.5	Estimación de la recarga hídrica potencial	55
5.5.1	Monitoreo de la información climática	55
5.5.2	Medición de la información climática.....	56
5.5.3	Estimación de la infiltración básica de los suelos.....	57
5.5.4	Determinación de constantes de humedad y densidad aparente.....	57
5.5.5	Determinación de la evapotranspiración potencial.....	57
5.5.6	Determinación de precipitación efectiva.....	59
5.5.7	Cálculo de balances hídricos de los suelos.....	61
5.5.8	Cálculo de recarga hídrica potencial	61
5.5.9	Determinación de áreas críticas de recarga hídrica	62
5.6	Estimación de los caudales máximos de escorrentía	64
5.6.1	Método racional.....	64
5.7	Escorrentía superficial	64
5.7.1	Determinación del área de la sección.....	65
5.7.2	Determinación de la velocidad	65
5.8	Estimación de la cantidad del suelo perdido.....	65
5.8.1	Prueba de sedimentos.....	65
5.9	Proceso de la investigación	66
5.9.1	Flujograma del proceso de la información.....	66
6	RESULTADOS.....	68
6.1	Definición de las unidades de mapeo	68
6.1.1	Elaboración del mapa de unidades fisiográficas	68
6.1.2	Elaboración del mapa de pendientes	71
6.1.3	Elaboración del mapa de profundidad efectiva.....	71
6.2	Elaboración de escenarios	74
6.2.1	Escenarios 1991 y 2009.....	74
6.2.2	Capacidad de uso (Uso ideal)	80

6.3	Información climática	83
6.4	Estimación de la infiltración básica de los suelos	86
6.5	Balances hídricos de los suelos y la recarga hídrica potencial	90
6.5.1	Balances hídricos del escenario de uso de la tierra para 1991	91
6.5.2	Balances hídricos de suelos para el escenario de uso de la tierra para 2009.....	94
6.5.3	Balances hídricos de suelos para el escenario de capacidad de uso de la tierra.....	97
6.6	Identificación de áreas críticas de recarga hídrica.....	99
6.7	Estimación de los caudales máximos de escorrentía	105
6.7.1	Método racional.....	105
6.7.2	Coeficiente de escorrentía para el escenario de uso de la tierra para 1991.....	105
6.7.3	Coeficientes de escorrentía para el escenario de uso de la tierra para 2009.....	106
6.7.4	Coeficientes de escorrentía para la capacidad de uso de la tierra	107
6.7.5	Caudales máximos de los tres escenarios evaluados	108
6.8	Escorrentía superficial observada.....	112
6.9	Estimación de la cantidad del suelo perdido.....	115
6.9.1	Prueba de sedimentos.....	115
6.9.2	Lineamientos de manejo para minimizar el deterioro de la calidad de agua superficial	120
7	CONCLUSIONES.....	122
8	RECOMENDACIONES	123
9	BIBLIOGRAFÍA	126
10	ANEXOS	129
10.1	Aspectos lineales.....	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de ubicación geográfica de la cuenca del lago de Atitlán... ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 2 Mapa base de la subcuenca del río Quiscab.....	43
Figura 3 Mapa de zonas de vida de la subcuenca del río Quiscab. ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 4 Mapa hidrológico de la subcuenca del río Quiscab. ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 5 Flujograma del proceso de la información.	67
Figura 6 Mapa Fisiográfico de la subcuenca del río Quiscab. ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 7 Mapa de pendientes de la subcuenca del río Quiscab . ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 8 Mapa de profundidad efectiva de la subcuenca del río Quiscab.....	73
Figura 9 Extensión en porcentaje de las categorías bajo las condiciones de uso de la tierra para 1991.....	75
Figura 10 Extensión en porcentaje de las categorías bajo las condiciones de uso de la tierra para 2009	76
Figura 11 Mapa de uso de la tierra para 1991, subcuenca del río Quiscab.....	79
Figura 12 Mapa de uso de la tierra para 2009, subcuenca del río Quiscab.....	79
Figura 13 Extensión en porcentaje de las categorías bajo las condiciones de capacidad de uso de la tierra.....	81
Figura 14. Mapa de capacidad de uso de la tierra de la subcuenca del río Quiscab ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 15. Comportamiento del clima según datos de la estación meteorológica Panajachel.....	85
Figura 16. Comportamiento del clima según datos de la estación meteorológica El Tablón.....	85
Figura 17. Comportamiento del clima según datos de la estación meteorológica EFA.....	86
Figura 18. Comportamiento del clima según datos de la estación meteorológica El Novillero.	86
Figura 19 Porcentaje de área para las categorías de recarga hídrica potencial anual bajo las condiciones de uso de la tierra para 1991.	91
Figura 20 Porcentaje de área para las categorías de recarga hídrica potencial anual bajo las condiciones de uso de la tierra para 2009.	95
Figura 21 Porcentaje de área para las categorías de recarga hídrica potencial anual bajo las condiciones de capacidad de uso de la tierra.....	97
Figura 22. Comparación del porcentaje de extensión de áreas críticas de recarga hídrica potencial para los tres diferentes escenarios evaluados.....	104
Figura 23 Comparación de los caudales máximos para diferentes períodos de retorno en los tres escenarios evaluados.	111
Figura 24 Caudales de los puntos de aforo medidos en el período de septiembre del 2007 al mes de agosto del 2008.....	113
Figura 25 Suelo perdido en Ton/ha/año en cada uno de los puntos muestreo.	119
Figura 26. Gráfica Log Nu vrs. Número de corrientes.	130

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1 Valores de coeficientes de escorrentía C	30
Cuadro 2 Valores del coeficiente C de la escorrentía	31
Cuadro 3 Coordenadas UTM del cuadrante donde se localiza la subcuenca del río Quiscab.	40
Cuadro 4 Departamentos y áreas municipales comprendidas dentro de la subcuenca río Quiscab.	41
Cuadro 5 Proyecciones de Poblaciones totales para los municipios Sololá, San José Chacayá, Santa Lucía Utatlán y Totonicapán.	44
Cuadro 6. Ubicación geográfica y equipo de las estaciones meteorológicas situadas en la subcuenca del río Quiscab.	56
Cuadro 7 Valores medios mensuales de radiación solar extraterrestre (mm/día).	58
Cuadro 8 Duración máxima, media y diaria de horas de brillo solar para diferentes meses y latitudes.	59
Cuadro 9 Valores de Infiltración básica por efecto de la pendiente (Kp).....	60
Cuadro 10 Valores de Infiltración básica por efecto de la cobertura vegetal (Kv).....	61
Cuadro 11 Matriz de criterios de geología para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural	62
Cuadro 12 Matriz de criterios de infiltración básica para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural.....	62
Cuadro 13 Matriz de criterios de recarga anual para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural.....	63
Cuadro 14 Matriz de criterios de pendiente para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural.....	63
Cuadro 15 Criterios de susceptibilidad de áreas a ser consideradas áreas críticas de recarga hídrica natural	63
Cuadro 16 Leyenda Fisiográfica de la subcuenca del río Quiscab, Sololá.	69
Cuadro 17 Extensión de cada una de las categorías bajo las condiciones de uso de la tierra para 1991.	75
Cuadro 18 Extensión de cada una de las categorías bajo las condiciones de uso de la tierra para 2009.	77
Cuadro 19 Comparación de las áreas de los usos de la tierra 1991 y 2009.....	78
Cuadro 20 Categorías de capacidad de uso de la tierra de la subcuenca del río Quiscab.	81
Cuadro 21 Precipitación media mensual (mm) de las estaciones monitoreadas	83
Cuadro 22 Evapotranspiración media mensual (mm) de las estaciones monitoreadas.	83
Cuadro 23 Temperaturas mínima, máxima y media mensual (°C) de las estaciones monitoreadas.	84
Cuadro 24 Localización de las pruebas de infiltración.....	88

Cuadro 25 Infiltración básica y propiedades físicas de los suelos de las diferentes pruebas de infiltración.	90
Cuadro 26 Resumen de los balances hídricos de suelos para las diferentes condiciones de uso de la tierra para 1991.	93
Cuadro 27 Resumen de los balances hídricos de suelos para las diferentes condiciones de uso de la tierra para 2009.	96
Cuadro 28 Resumen de los balances hídricos de suelos para las diferentes condiciones de capacidad de uso de la tierra.	98
Cuadro 29 Identificación de áreas críticas de recarga hídrica para el uso de la tierra para 1991.	99
Cuadro 30 Identificación de áreas críticas de recarga hídrica para el uso de la tierra 2009.	101
Cuadro 31 Identificación de las áreas de recarga hídrica para la capacidad de uso de la tierra.	102
Cuadro 32 Comparación de áreas críticas de recarga hídrica potencial para los tres diferentes escenarios evaluados.	103
Cuadro 33. Coeficientes de escurrimiento de las diferentes categorías de uso de tierra para 1991.	105
Cuadro 34 Coeficientes de escurrimiento para las diferentes categorías de uso de la tierra para 2009.	106
Cuadro 35 Coeficientes de escurrimiento para las diferentes categorías de capacidad de uso de la tierra.	107
Cuadro 36. Intensidad de lluvia en mm/h para los diferentes períodos de retorno.	109
Cuadro 37. Caudal máximo esperado para los períodos de retorno en cada escenario de uso de la tierra evaluado.	110
Cuadro 38 Caudal promedio mensual de los aforos realizados en los cauces de la subcuenca del río Quiscab (m ³ /seg).	113
Cuadro 39 Sedimento arrastrado por los principales cauces de la subcuenca del río Quiscab (Ton/año).	116
Cuadro 40 Sedimento arrastrado por los principales cauces de la subcuenca del río Quiscab (Ton/año).	117
Cuadro 41 Resumen de los resultados obtenidos en el monitoreo del río Quiscab.	118
Cuadro 42 Clase de corrientes de la subcuenca del río Quiscab.	129
Cuadro 43 Orden de corrientes.	129
Cuadro 44 Elevación media de la cuenca.	132

**ANÁLISIS DEL IMPACTO DE CAMBIO DE USO DE LA TIERRA EN EL COMPORTAMIENTO
DEL CICLO HIDROLÓGICO DE LA SUBCUENCA DEL RÍO QUISCAB, SOLOLÁ,
GUATEMALA.**

**ANALYSIS OF THE IMPACT OF CHANGE OF LAND USE IN THE HYDROLOGICAL
CYCLE BEHAVIOR OF QUISCAB SUBWATERSHED, SOLOLÁ, GUATEMALA**

RESUMEN

El acelerado crecimiento demográfico en el país, hace que el uso de la tierra sufra un cambio brusco, aumentando la urbanización y la explotación de los recursos naturales, apresurando el proceso de degradación de los suelos; La subcuenca del río Quiscab abarca dos departamentos, Totonicapán y Sololá. Del primero únicamente lo conforma el municipio de Totonicapán en la parte alta de la subcuenca. La mayor parte del área está conformada por los municipios de Sololá, San José Chacayá, Santa Lucía Utatlán y Nahualá; dichos municipios no han sido la excepción en cuanto al crecimiento descontrolado de la población.

La subcuenca en estudio, es de relevancia en cuanto a la realización de investigación y manejo de la cuenca del lago de Atitlán, pues es la mayor tributaria en cuanto a contaminación hacia el lago; por ello el objetivo de la investigación, nace de la necesidad de determinar el cambio del uso de la tierra y el comportamiento del ciclo hidrológico de la subcuenca del río Quiscab, Sololá; los escenarios necesarios en la comparación realizada fueron tres, uso de la tierra para 1991 (escenario anterior), uso de la tierra para 2009 (escenario actual) y capacidad de uso de la tierra (escenario ideal).

A través de la técnica de interpretación cartográfica y fotointerpretación, se elaboró el mapa fisiográfico, mapa de uso de la tierra para 1991, 2009 y el de capacidad de uso de la tierra; el uso de la tierra del 2009 se verificó en campo y el de capacidad de uso de la tierra se llevó a cabo con la metodología del Instituto Nacional de Bosques (INAB).

Para la generación de la información climática se monitorearon las estaciones meteorológicas de El Tablón, Panajachel, EFA y El Novillero; las tres zonas de vida que abarca la subcuenca según el sistema de Clasificación de Holdrige y modificado por De la Cruz (1982) son: Bosque muy Húmedo Montano Subtropical, Bosque Muy Húmedo Montano Bajo Subtropical y Bosque Húmedo Montano Bajo Subtropical; luego se revisó la memoria técnica de la fisiografía de

la república, en la cual se encontró que la región fisiográfica tierras altas volcánicas es en la que encuentra la subcuenca del río Quiscab, abarcando únicamente la subregión fisiográfica Zona Montañosa Occidental (Tacaná-Tecpán), la cual está conformada por un ambiente volcánico por excelencia.

En comparación de la cobertura vegetal entre 1991 y 2009, se presenta el 54% y 52%, en cobertura forestal dentro de la subcuenca respectivamente; quedando distribuido el bosque mixto en la parte baja y media con alturas de 1,600 a 2,100 msnm y el bosque de conífera en la parte alta con alturas de hasta 3,100 msnm. En cuanto a la capacidad de uso de la tierra la subcuenca posee un 50.67% para actividades forestales, mientras que el resto tiene aptitud para el desarrollo de cultivos agrícolas desde agricultura con mejoras hasta agroforestería con cultivos permanentes.

Los balances hídricos se realizaron para los tres escenarios evaluados, respecto al año 1991 la lámina de recarga potencial es de 277.16 mm anuales; para el 2009 la lámina es de 273.7 mm anuales. En el escenario de capacidad de uso de la tierra se incrementa el área con mayor capacidad de recarga hídrica siendo el 61% de categoría muy alta en donde existe una distribución adecuada de los sistemas forestales, agroforestales y agrícolas, para este escenario la lámina de recarga hídrica promedio aumenta siendo de 301.18 mm anuales.

Respecto a la escorrentía, se realizaron cálculos de caudales máximos en cada escenario evaluado para diferentes períodos de retorno, en esta comparación se concluye que entre el uso de la tierra para 1991 y 2009 no se encuentra establecida una diferencia significativa entre los caudales máximos esperados para los períodos de 2, 5, 10, 25 y 100 años, se debe a que no existe un cambio a gran escala en cuanto al uso de la tierra que se encontró en 1991 y el que se presenta en el 2009. Por otra parte, se encontró que referente a los caudales máximos esperados en el uso de la tierra a su capacidad, disminuyen en comparación con los usos de la tierra de 1991 y 2009; siendo los caudales máximos esperados 426.94, 556.87, 646.26, 680.94 y 701.59 m³/s, para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 100 años respectivamente.

Para la medición de caudales se muestrearon doce puntos de aforo, los cuales reflejan que el aumento de los caudales inician en el mes de mayo, y los mayores caudales registrados fueron de 4.13 y 4.14 m³ /s, que pertenecen a los meses de julio y octubre respectivamente; el aumento y disminución de los caudales está ligado a la época lluviosa y seca de ésta área.

Al realizar el análisis de la información en cuanto a los sedimentos perdidos se te determinó que el punto de muestreo del río Quiscab pierde aproximadamente 77.6 Ton/ha/año, lo cual es muy alto para un área pequeña (1422 ha), debido a que en este punto se toma todo el sedimento perdido en la parte alta y media de la subcuenca; de esta misma área se estima que el total de sedimentos que ingresa al lago de Atitlán es de 110,398 Ton/año, el cálculo de ésta pérdida de sedimento por hectárea es de 6.92 Ton/año.

Al finalizar ésta investigación se recomienda priorizar las acciones y proyectos, orientados a la eliminación de entradas de agroquímicos, conservación de suelos, aguas residuales, educación ambiental y sistemas de control, monitoreo e investigación enfocados a los problemas ambientales debido al florecimiento de la cianobacteria en el lago; realizar un estudio para evaluar el impacto que provoca la gran cantidad de sedimentos que son arrastrados por el caudal del río hacia el lago de Atitlán para evitar su degradación que puede llegar a puntos críticos; promover mejores condiciones para mejorar la gobernabilidad del agua a través de la Política y Estrategia Nacional de Gestión Integrada del Agua, GIRH y accionar el Plan Maestro de la Reserva de Uso Múltiple La Cuenca del lago de Atitlán -RUMCLA-, en el que se fundamenta la acción de saneamiento y en la que se tienen que coordinar los esfuerzos públicos y privados.

1 INTRODUCCIÓN

Los cambios de uso de la tierra, tienen consecuencias acumulativas significativas a nivel global, estas se extienden más allá de la hidrología hasta en los procesos climáticos que también alteran los ecosistemas de la biosfera. La necesidad de satisfacer los servicios que requiere la humanidad, es la causa principal que ha llevado al hombre al uso incorrecto de la tierra y a la explotación del recurso hídrico y forestal; los cambios de uso de la tierra mayoritariamente son afectados por la acción humana que se ejerce directamente en el ciclo hidrológico. En Guatemala los principales problemas ambientales están asociados al cambio de uso y principalmente al uso incorrecto de la tierra, asimismo las condiciones hidrogeológicas de algunas cuencas en el país son vulnerables a la ocurrencia de diversos desastres naturales. El último fenómeno natural que afectó en gran medida al país fue, la tormenta Stan en el 2005; dentro de los departamentos más afectados se encuentra Sololá, desviando y desbordando los cauces de los ríos de ésta área. En 2009 el país estuvo en la expectativa internacional con el problema ambiental causado por la presencia de cianobacterias en el lago de Atitlán, Sololá.

Ésta investigación surge de la necesidad de conocer en qué grado afecta el cambio de uso de la tierra en la subcuenca del río Quiscab, la más grande que conforman a la cuenca del lago de Atitlán; el crecimiento demográfico y con ello la presión de la población local tanto como la turística aumenta el requerimiento del uso de los recursos naturales disponibles dentro del área. Para evaluar el impacto que ha tenido el cambio de uso de la tierra en el ciclo hidrológico, fueron determinados y analizados los elementos de este ciclo, como la recarga hídrica potencial a través de el cálculo de los balance hídricos con la cobertura de tres escenarios, la cobertura con el que contaba la subcuenca en 1991, la cobertura que tiene en el 2009, contrastándolos con el escenario hipotético en donde a la tierra se la da un uso según su aptitud; también se evaluó la parte de caudales máximos esperado con diferentes períodos de retorno, esto para los tres escenarios en estudio.

Los balances hídricos se realizaron para los tres escenarios evaluados, respecto a 1991 la lámina de recarga potencial es de 277.16 mm anuales, para el 2009 la lámina es de 273.7 mm anuales. En el escenario de capacidad de uso de la tierra se incrementa el área con mayor capacidad de recarga hídrica siendo el 61% de categoría muy alta en donde existe una

distribución adecuada de los sistemas forestales, agroforestales y agrícolas, para este escenario la lámina de recarga hídrica promedio aumenta siendo de 301.18 mm anuales.

Paralelo al monitoreo climático, también se realizó un monitoreo del caudal del río Quiscab, de donde se estimó la cantidad de sedimentos perdidos, a través de muestras de agua, a las que posteriormente se realizaron pruebas de sedimentos para relacionarlos con la escorrentía superficial y el área que drena cada uno de los ríos de acuerdo al punto de muestreo, ambos aspectos fueron evaluadas en el período de un año; el análisis de éstos factores se realizó comparando los resultados entre cada uno de los escenarios y relacionándolo con el área de cada unidad en la que se trabajo. Al concluir se estima que el total de partículas de suelo perdidas en la subcuenca y que ingresa al lago de Atitlán es de 110,398 Ton/año.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El crecimiento poblacional en el país hace que el uso de la tierra sufra un cambio brusco, aumentando la urbanización y la explotación de los recursos naturales, alterando los ciclos naturales de la tierra y acelerando la degradación del recurso suelo, agua y bosque; siendo éstos parámetros los que determinan en gran parte la susceptibilidad de los mismos ante estos cambios, en lugares de alta susceptibilidad se eleva el proceso de degradación de los suelos.

La subcuenca del río Quiscab abarca dos departamentos: Totonicapán y Sololá; el municipio de Totonicapán se ubica en la parte en la parte alta, la mayor parte del área está conformada por los municipios de Sololá, San José Chacayá, Santa Lucía Utatlán y Nahualá. Dichos municipios no han sido la excepción en cuanto al crecimiento descontrolado de la población, además ésta área es una zona turística muy importante en el país.

La subcuenca del río Quiscab es de relevancia, en cuanto a la realización de investigación y manejo de la cuenca del lago de Atitlán, pues es la mayor tributaria en cuanto a contaminación hacia el lago, que en el 2009 fue un tema polémico concerniente a la contaminación y presencia de cianobacterias, debido al incremento de niveles de nitrógeno y fósforo contenidos en los desechos que van a parar al lago, tanto de hoteles, restaurantes, residencias y sobre todo el uso de productos agroquímicos en la producción de diversas hortalizas alrededor del lago, porque cuando llueve arrastran los componentes de los fertilizantes, asimismo la cantidad de fosfatos naturales de la región es muy alta, a lo cual se debe sumar también el arrastre de sedimentos, nutrientes y contaminación hacia el agua en el 2005, ya que la tormenta Stan afectó fuertemente en ésta área, alterando también el ciclo hidrológico. Otra causa es el aumento de la temperatura debido al cambio ambiental, lo que ha provocado que aumente la flora del lago.

La urbanización aumenta la escorrentía superficial, al crear superficies más impermeables, como pavimento y edificios, por tanto se reduce la recarga hídrica natural potencial, baja así el nivel de la capa freática y aumenta las sequías, sobre todo para los agricultores y quienes dependen de pozos y nacimientos de agua.

Cuando hay contaminantes disueltos o suspendidos en la escorrentía, el impacto humano se amplía. Esta carga de contaminantes puede alcanzar a diversas aguas receptoras, en éste caso al lago de Atitlán.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Marco conceptual

3.1.1 Cambio de uso de la tierra en Guatemala

El uso de la tierra en Guatemala, está históricamente ligado a las formas de tenencia del recurso, caracterizadas éstas por importantes desigualdades en el acceso. Fenómenos como el crecimiento urbano (desmedido y poco planificado) y la importante dependencia de los hogares rurales para con los productos del bosque y la producción agrícola, han provocado durante décadas la ocupación de tierras para estos fines, reduciendo la cubierta boscosa y aumentando el espacio territorial de asentamientos humanos. La ocupación del territorio presenta, entonces, un ordenamiento caracterizado principalmente por la demanda de tierras para diversos usos que, frecuentemente, sobrepasan la capacidad de carga de los suelos (URL, 2004).

Considerando que los cambios en el uso de la tierra representa una amenaza para la riqueza natural de Guatemala, es evidente que se necesitan políticas e instrumentos eficaces que permitan ordenar y administrar este recurso sosteniblemente. No obstante, este tema ha sido objeto de escasa atención gubernamental a través de los años, especialmente en materia de regulaciones de uso, manejo y conservación, lo que ha favorecido el deterioro del recurso con sus respectivas implicaciones sociales, económicas y ecológicas adversas, difíciles de calcular y valorar (URL, 2004).

3.1.2 Presión sobre el uso de la tierra

3.1.2.1 Características sociales y económicas

El país cuenta con una población total de aproximadamente 12 millones de habitantes, (proyección a 2005 de 12,700,611 millones de habitantes) con una densidad de población promedio de 103 hab/km² a 106 hab/km². Los departamentos con mayor densidad de población son Guatemala (1,196 hab/km²), Sacatepéquez (533 hab/km²), Quetzaltenango (320 hab/km²), Totonicapán (320 hab/km²), Sololá (289 hab/km²), Chimaltenango (225 hab/km²) y el departamento con menor densidad de población es Petén con 10 hab/km² (URL, 2004).

La composición por sexo es del 48.9% mujeres y de 51.1% para hombres. Desde el punto de vista de la división político administrativa se organiza en 22 departamentos y 332 municipios. La población económicamente activa es el 40% del total de población; algo importante es el

incremento del porcentaje de población femenina a 20% comparado con 1981 que era del 14%. En cuanto a la rama de actividad la agricultura, ganadería y caza (42.1%) favoreciendo al avance de la frontera agrícola el comercio mayor y menor, hoteles y restaurantes (16.5%), industria (13.4%, textil y alimenticia); éstas son las actividades que concentran la mayor actividad de ocupación, algo que es preocupante por los efectos causados al Ambiente (URL, 2004). Bajo estas condiciones, las presiones sobre el uso de tierras para distintos fines tienen una fuerte relación con el crecimiento demográfico, más aún cuando la mayoría encuentra en la tierra y recursos asociados medios de vida (URL, 2004).

Con el incremento del porcentaje de la población humana también aumentan las actividades agropecuarias, comerciales e industriales favoreciendo al avance de la frontera agrícola y a la contaminación de los recursos naturales por el incremento de los desechos sólidos y líquidos. Dicha situación ocurre en la mayoría de cuencas de nuestro país, no siendo excepción la cuenca del lago de Atitlán.

3.1.2.2 Capacidad de uso de la tierra

La capacidad de uso de la tierra está condicionada primordialmente por características intrínsecas del recurso, asociadas a factores como el clima, el material de origen, las formas de la tierra (relieve y posición) y la edad de los materiales. Sin embargo, se ubica como un elemento de presión en virtud de que los parámetros para juzgarla están relacionados a patrones de comportamiento de los usuarios del recurso tierra. De esa cuenta, se identifican distintas aptitudes de uso (posibles usos que las tierras están en capacidad de soportar) dentro del concepto de usos mayores de la tierra: i) cultivos (anuales y perennes), ii) tierras para protección y/o conservación de la agrodiversidad y iii) tierras para crecimiento urbano (URL, 2004).

3.1.3 Impacto del sobreuso de la tierra

3.1.3.1 Índice de deterioro de tierras

El índice de deterioro, a partir de la interacción de las variables sobreuso de la tierra, la pérdida en superficie de calidad física de los suelos por efecto de la recurrencia de incendios forestales y el grado de protección hidrológica de la vegetación al suelo. Este análisis se hizo de manera especializada, asumiendo una presentación de estas variables de manera homogénea a

nivel del municipio. En términos de daños y pérdidas económicas por pérdida de tierras y suelos, en el 2005 se hizo un ejercicio de cuantificación en función de la ocurrencia de la tormenta tropical Stan (URL, 2004).

3.1.4 Impactos de la tormenta tropical Stan, sobre el recurso tierra en el altiplano occidental

En los desastres de octubre de 2005, los daños ambientales surgen de los cambios en el medio ambiente causados por los deslizamientos, derrumbes, e inundaciones que se produjeron en muchas partes del país. Los efectos físicos resultan en cambios en los flujos de servicios del capital natural y, por tanto, afectan el bienestar de las personas. En lo que se refiere al medio natural, los movimientos de masa han producido pérdida de suelos agrícolas y forestales, pérdida de vegetación arbórea y cultivos, arrastre de sedimentos y escombros a cuerpos de agua, alteración de los sistemas de drenaje natural y cambios en el paisaje (URL, 2004).

Se estima una superficie afectada cercana a las 800,000 ha, ascendiendo la pérdida de sedimentos a 9 millones de toneladas, con un valor económico de 308 millones de quetzales, es decir un 4% del total de daños. Vale mencionar que dentro de este cálculo únicamente se consideraron tierras de las partes altas de las cuencas, no así las de valles y otras zonas. Adicionalmente no fueron consideradas todas las áreas de daño, por lo que se presume que el impacto fue mayor. La composición territorial o geográfica del impacto, su distribución entre estratos económicos, sociales y su concentración en zonas con un porcentaje elevado de población indígena hace evidente que más allá del monto económico de los daños y pérdidas, el efecto de Stan es sobre todo en el ámbito social, con consecuencias difíciles de cuantificar en el estado social, en las redes comunitarias con consecuencias diferenciadas entre hombres y mujeres, respecto de los diversos grupos étnicos y culturales que definen el carácter multicultural del país (URL, 2004).

3.1.5 Impacto del cambio de uso de la tierra en el recurso hídrico

El agua, es un recurso vital para el ser humano. Su disponibilidad y calidad durante las distintas etapas del año dependen de diversas condiciones meteorológicas y de las interrelaciones

que mantiene con otros recursos naturales, condiciones que comprometen, entre otros, la salud sobre la tierra, la productividad agrícola y la vida misma de los seres humanos (URL, 2004).

En Guatemala, el agua es un bien demandado para distintos usos, entre los cuales se puede mencionar agua potable, riego, producción de energía y procesos industriales. Constituyéndose en un bien tan indispensable e imprescindible para la vida como para el desarrollo de un país, es evidente que la utilización y conservación del recurso debieran estar regulados de manera tal que el aprovechamiento actual no comprometiera la disponibilidad y calidad para las generaciones venideras. Sin embargo la realidad para Guatemala es otra. La falta de normativas y leyes específicas y de políticas consensuadas que promuevan un manejo sostenible del recurso ha generado las condiciones ideales para la aparición de graves problemas en torno al mismo. Realidades como: el descenso del nivel de aguas subterráneas y la contaminación de la mayoría de cuerpos superficiales, evidencian que la gestión de los recursos hídricos ha sido muy poco eficiente. Ante esta situación y frente a la posible irreversibilidad de la problemática resulta apremiante tomar acciones decididas y eficaces (URL, 2004).

3.1.6 Indicadores de la calidad de la tierra

La supervisión y seguimiento de los amplios cambios que ocurren en el uso de la tierra y en general, en las condiciones de la tierra, permitirán a los gobiernos informar sobre el mejoramiento o deterioro general del estado de los recursos naturales en sus países usando métodos estandarizados que permitan hacer comparaciones entre países y entre distintos años. Sin embargo, tales indicadores amplios y altamente agregados no serán útiles para apoyar el desarrollo de políticas tanto a nivel nacional como a escala más detallada.

Para los fines prácticos de asesoramiento sobre políticas o sobre manejo, serán necesarios indicadores desagregados y más detallados. De hecho, cuanto más detallados y específicos son los requerimientos de información, tiene menos sentido el concepto de indicadores de calidad de la tierra y es más evidente la necesidad para observaciones reales sobre cambios específicos en el uso de la tierra y en aspectos particulares de su condición, de las condiciones físicas, biológicas y químicas del suelo y del abastecimiento de nutrimentos y su disponibilidad en los suelos. (FAO, 1976).

3.1.6.1 Uso de la tierra

Los cambios de uso de la tierra son generalmente conscientes, respuestas volitivas de los seres o sociedades humanas a los cambios en las condiciones biofísicas o de la sociedad. Es, por lo tanto, un indicador de respuesta el que refleja cómo y en qué medida la sociedad responde a esos cambios o como se adapta a las condiciones ambientales cambiantes. Esto no excluye la posibilidad de que algunos cambios de uso de la tierra puedan a su vez constituir una presión para los cambios en el estado del ambiente. Esto está implícito en la naturaleza de la compleja red de las causas -que no es una cadena casual- incluyendo un cierto número de elementos de retroalimentación, o sea, la relación de la sociedad con su ambiente.

Es virtualmente imposible reunir los cambios de uso de la tierra en un solo indicador o escala. La tasa de extensión del cambio de uso de la tierra puede ser representada bajo la forma de una matriz de transición de usos de la tierra, mostrando la transición entre cada par de usos como extensión o proporción del área por unidad de tiempo (FAO, 1995).

3.1.6.2 Tierra

Como en el caso del cambio de uso de la tierra, es dudoso que sea posible tener una sola medida agregada de cambio de la condición de la tierra. Sin embargo, lo que parece ser posible, en principio, es una estimación del cambio en diferentes calidades de la tierra que tienen influencia sobre su adecuación para uno u otro uso, o para la conservación, por ejemplo, de la biodiversidad (FAO, 1976).

Los datos necesarios para la interpretación de los cambios en las calidades de la tierra pueden ser derivados, en parte, de los sensores remotos, complementados por observaciones terrestres. Estas deberían ser combinadas con más frecuencia y por medio de supervisión en lugares seleccionados permanentes y en lugares de ensayos a largo plazo sobre la productividad de la tierra. La información necesaria cubre aspectos tales como la naturaleza y la densidad de la vegetación o la naturaleza y la productividad de los cultivos -lo que se sobrepone parcialmente con datos de uso de la tierra; condiciones de la superficie de la tierra -pendiente, tasas de erosión y escorrentía, transporte de sedimentos por el viento, salinidad de la superficie; condiciones hidrológicas -incidencia de las inundaciones, dinámica del agua subterránea; y condiciones físicas,

biológicas y químicas- toxinas, nutrientes- del suelo. Tal información para la supervisión, superpuesta a una base de datos sobre los suelos y los terrenos, permitirá la estimación de los cambios potenciales de productividad tales como la conservación de la vegetación nativa o las poblaciones animales. El marco institucional que haga posible tal supervisión en forma sistemática y repetitiva no existe aún en muchos países (FAO, 1976).

3.1.6.3 Suelo

El suelo, como mayor subsistema de la tierra, cambia con el tiempo a consecuencia de los cambios en el ambiente -por ejemplo, la lluvia- o en el manejo -por ejemplo, la intensidad de pastoreo, los cultivos, la irrigación, los insumos, etc. Las decisiones sobre uso o manejo de la tierra que se toman a cualquier escala, ya sea a nivel individual o familiar o de un país, necesitan información acerca del sistema de suelos y sus relaciones con el ambiente y con las opciones de manejo. Estas relaciones, como en el caso del uso de la tierra, son complejas, con una retroalimentación que proporciona situaciones de poca estabilidad y no lineares de respuestas al cambio, algunas veces demoradas. Esto implica que algunos cambios en las condiciones externas pueden no causar un cambio perceptible en la condición del suelo, mientras que otros pueden ser responsables por una degradación o un mejoramiento agudos o graduales (FAO, 1976).

3.1.7 Ciclo hidrológico

Los recursos hídricos tienen como referencia al ciclo hidrológico, el cual consiste en la continua circulación de agua sobre nuestro planeta. El ciclo hidrológico inicia con la evaporación del agua en los océanos transportándose hacia los continentes a través de masa móviles de aire que bajo condiciones adecuadas se condensan y forma nubes o también pueden transformarse en precipitación. La precipitación se dispersa, parte es retenida por el suelo regresando a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas. Otra porción viaja por la superficie en forma de escorrentía y una pequeña parte llega a los acuíferos en forma de agua subterránea. Por gravedad, tanto el agua superficial como la subterránea llegan en algún momento a ser parte de los océanos aunque hay pérdidas por evaporación, transpiración y escorrentía superficial y subterránea. (Johnson 1975)

Según Aparicio (2001), es un ciclo que al describirlo se puede partir del punto en que el agua se evapora de los océanos (en mayor proporción) y de la superficie terrestre por efecto de la radiación solar y el viento. Este vapor se transporta y eleva por la atmósfera en forma de nubes hasta condensarse y precipitarse nuevamente a la tierra.

Custodio & Llamas (2001), menciona que, el ciclo hidrológico es un proceso continuo en el que una partícula de agua evaporada del océano, vuelve a él después de pasar por las etapas de precipitación y escorrentía superficial o subterránea. A lo largo del ciclo, existen múltiples cortos circuitos o ciclos menores. También hay que tener en cuenta que el movimiento del agua en el ciclo hidrológico se caracteriza por la irregularidad, tanto en el espacio como en el tiempo.

Las fases principales del ciclo hidrológico son:

Evaporación.

Formación y desplazamiento de nubes y niebla.

Condensación del agua y precipitación en forma de lluvia, granizo, etc.

Escorrentía superficial, sobre el suelo.

Infiltración, en el perfil del suelo.

Percolación a estratos más profundos.

Flujo subterráneo y retorno a la superficie. (manantiales y pozos)

Formación de corrientes superficiales como ríos y arroyos.

Descarga en lagos, océanos y mares.

Los principales componentes del ciclo hidrológico dentro de una cuenca para la estimación del balance hídrico están: las precipitaciones, la escorrentía, la infiltración y la evapotranspiración.

3.1.8 Recarga y descarga hídrica

3.1.8.1 Recarga hídrica

El proceso donde el flujo de agua desciende en el suelo, hasta alcanzar el nivel freático, incrementando el agua almacenada. La recarga puede ser: natural cuando se produce por infiltración de la precipitación pluvial o de un curso de agua (ríos y lagos), e inducida debido a las actividades del hombre, como riego y urbanización (Lerner, 1990).

También se divide según el tipo de estimación en: recarga actual, que es el volumen de agua que alcanza el nivel freático; y recarga potencial, que hace referencia al volumen de agua,

que puede tomar diferentes destinos como: evapotranspiración, cambio de humedad en la zona insaturada del suelo, descarga a cursos de agua y alcanzar reservorios de agua subterránea (Lerner, 1990).

Las fuentes de recarga para un acuífero pueden ser las siguientes: precipitación pluvial o recarga directa, recarga de río (incluye corrientes efímeras, intermitentes y permanentes), flujos interacuíferos, irrigación (canales y campos) y recarga urbana, donde cada tipo de recarga debe ser cuantificada por diferentes métodos (Lerner, 1990).

A. Zona de recarga natural

Las áreas ubicadas en topografías elevadas y en suelos permeables, que facilitan la infiltración y descenso del agua hacia los reservorios de agua subterránea (acuíferos). Y ésta infiltración puede producirse no sólo por las aguas de lluvia, sino también por las aguas que circulan a través de los arroyos o corrientes (corrientes influentes) (Lerner, 1990).

B. Acuíferos

El acuífero, es la capa o formación geológica donde el agua circula y se almacena, y que puede ser utilizada por el hombre en cantidades económicamente significativas (Custodio y Llamas, 2001). (Lesser, 2001) agrega que esta agua en la mayoría de casos sólo puede ser aprovechada a través de pozos.

Los diferentes acuíferos conocidos según el tipo de flujo, la presión del agua, la extensión y continuidad de saturación, son:

- Por el tipo de flujo: acuíferos en medios porosos (flujo en medios porosos) y acuíferos en medios fracturados o consolidados (flujo fisural).
- En base a la presión del agua y relaciones de conductividad hidráulica del acuífero (capa sobreyacente): acuífero libre o freático (no tienen capa confinante sobreyacente), acuífero semilibre (se presentan capas o lentes confinantes en algunas partes), acuífero semiconfinado (tiene un acuitardo como capa sobreyacente), y acuífero confinado (tiene dos capas confinantes, superior e inferior).
- Y según la extensión y continuidad de saturación, se mencionan: acuífero colgado y acuífero regional o principal (Herrera, 2002)

C. Descarga natural

La descarga hídrica, es el volumen de agua que en un determinado tiempo sale de la zona de almacenamiento a través de los manantiales cuando la zona saturada queda cerca de la superficie terrestre. La descarga natural de los acuíferos, además de realizarse por los manantiales, se efectúa por las corrientes del río (corriente efluente) (Custodio y Llamas, 2001).

a. Manantiales

El manantial, es una fuente natural de agua, que surge a la superficie del terreno, en donde el nivel de saturación del agua corta la superficie topográfica. Los manantiales son los desagües o aliviaderos por los cuales sale la infiltración o recarga que reciben las zonas de almacenamiento de agua y representan ahorro de recursos económicos, cuando no se utiliza equipo de bombeo (Vargas, 2002).

3.1.8.2 El proceso de la recarga hídrica

El agua proveniente de las precipitaciones después de saturar los espacios vacíos (poros y/o fisuras) del suelo y las pequeñas depresiones superficiales, da inicio a los siguientes tipos de movimiento: a) superficial, que sigue las líneas de máximo gradiente de energía e b) infiltración, a través de los espacios vacíos del suelo y subsuelo según el gradiente piezométrico y la permeabilidad del medio (Muñoz, 1998).

El agua que se infiltra a través de la superficie del suelo y no es retenida como humedad del suelo, se mueve hacia los cauces como corriente subsuperficial o penetra a la capa freática y alcanza eventualmente el cauce, como agua subterránea (Linsley, 1988).

3.1.8.3 Factores que intervienen la recarga hídrica

A. Precipitación

La precipitación son todas las formas de humedad que caen a la tierra, entiéndase: llovizna, lluvia, escarcha, granizo y nieve. También menciona varios tipos de precipitación como: la precipitación orográfica, que resulta del ascenso del aire cuando en su camino se interponen barreras debido a la forma de la tierra (montañas), esta influencia orográfica es tan marcada en

terrenos quebrados que los patrones de las tormentas tienden a parecerse a aquellos de la precipitación media anual (Herrera, 2002).

Según (Custodio y Llamas, 2001) es necesario conocer la precipitación media sobre una cuenca ya que la cantidad de lluvia recibida en un sitio dado, difiere de la que cae en los alrededores y para ello se puede utilizar los siguientes métodos:

- Promedio Aritmético, toma la media aritmética de las medidas obtenidas en los pluviómetros y puede ser útil en trabajos donde no se requiere mucha precisión, siempre que la zona tenga características de homogeneidad climática y física.
- Polígonos de Thiessen, asigna como dominio un polígono a cada pluviómetro por tanto, es un método que proporciona resultados bastantes precisos particularmente en planicies, siempre que los pluviómetros estén distribuidos homogéneamente en la zona.
- Curvas isoyetas, consiste en interpolar líneas de igual precipitación y es la que proporciona los resultados más precisos en zonas montañosas, cuando el investigador posee un buen conocimiento de las características climáticas y físicas de la zona.

a. Precipitación efectiva

Desde el punto de vista de recarga a los acuíferos, la precipitación efectiva se considera como la porción de la precipitación pluvial que logra infiltrarse en el suelo y que se encuentra disponible para ser utilizada por las raíces de las plantas y/o para recargar al acuífero (Padilla, 2003).

Existen varios factores que intervienen en la determinación de la precipitación efectiva, entre ellos se mencionan los siguientes: intensidad de la precipitación, velocidad de infiltración en el suelo, la cobertura vegetal y la topografía. A partir de estos factores, existen varios métodos que han sido desarrollados por diversos autores, especialmente para ser utilizados en distritos de riego. Entre ellos, se pueden mencionar los métodos: de la FAO, de Blaney y Criddle, Colegio de Postgraduados, Palacios Vélez y Schosinsky y Losilla (Herrera, 1995).

B. Evapotranspiración

Al estudiar el balance hídrico de un área de drenaje, el interés principal radica en la determinación de las pérdidas de agua total o evapotranspiración (Linsley, 1988). Consta de dos procesos, evaporación y transpiración, que por la dificultad de separar la medición en el campo y

debido a que tienen el mismo impacto neto en el rendimiento de agua en una cuenca, usualmente son definidos y medidos en conjunto (Nittler y Barahona, 1993).

La evaporación, es el proceso de cambio de agua del estado líquido a gaseoso, donde el suelo juega el papel de reservorio en la cuenca. Esta toma lugar en la superficie, debido al movimiento del agua dentro del suelo hacia la misma e influye mucho en los niveles de evaporación (Custodio y Llamas, 2001).

La transpiración, es básicamente un producto del proceso de respiración por parte de las plantas. Las plantas absorben agua del suelo y a través de sus procesos internos, trasladan el agua hacia la superficie de las hojas y corteza, donde el agua se evapora. Son varios los factores que influyen en los distintos niveles de transpiración como lo son: las formas de la vegetación, densidad vegetal, especies, condiciones climáticas, disponibilidad del agua en el suelo, etc. (Custodio y Llamas, 2001). Thornthwaite en 1948, introduce para propósitos prácticos las siguientes divisiones:

- Evapotranspiración potencial: es la pérdida de agua cuando se supone que el desarrollo de las plantas es óptimo y el suelo permanece a capacidad de campo.
- Evapotranspiración real: es el agua pérdida en determinada área, al satisfacer total o parcialmente la demanda de la cobertura vegetal en función del desarrollo y condiciones de humedad del suelo.

Los valores típicos de evapotranspiración potencial varían entre 1 a 3 mm/d para los climas templados, de 5 a 8 mm/d en los trópicos húmedos y de 10 a 12 mm/d en regiones áridas (Cabrera, 1997).

C. Suelo

a. Textura y estructura

La textura y estructura intervienen básicamente en la infiltración del agua, el movimiento del agua dentro del suelo y la cantidad de agua disponible para las plantas (Sandoval, 1989). La textura del suelo influye mucho en la infiltración, por ello los suelos arenosos son mucho más permeables que los suelos arcillosos. En los suelos arenosos, los poros son más grandes e interconectados por lo que facilitan la infiltración. Y las diferentes estructuras de los suelos influyen

en la configuración de los poros y espacios dentro del suelo, por lo que incrementan o afectan la infiltración (Nittler y Barahona, 1993).

b. Densidad aparente y porosidad

La densidad aparente depende de la textura del suelo y que está relacionada con el volumen del espacio poroso, por ello se modifica cuando los suelos se compactan. La densidad aparente de los suelos no cultivados oscila entre 1.0 y 1.6 gr/cc y su importancia radica en que permite calcular la lámina de agua para las diferentes unidades de suelos, al conocer las constantes de humedad y la profundidad radicular. La porosidad se estima en base a la densidad de los suelos e influye en la infiltración del agua, movimiento del aire y agua y en el crecimiento radicular de las plantas (Sandoval, 1989).

c. Contenido de humedad

El contenido de humedad de los suelos, es una característica muy importante en el balance hídrico, porque según su comportamiento interviene en la infiltración, en la cantidad de agua que toman las plantas y en la recarga de agua a estratos profundos. Por ello, se determinan contenidos de humedad como capacidad de campo, punto de marchites permanente y humedad aprovechable (Padilla et al. 2003).

d. Infiltración

Es el porcentaje de agua de la precipitación pluvial que penetra por la superficie del suelo en un determinado tiempo. La infiltración es importante en los procesos de escorrentía como respuesta a una precipitación dada y también en el estudio de recarga hídrica. Existen varios factores que condicionan la infiltración en un área determinada, por lo que su estimación precisa es difícil de obtener (Custodio y Llamas, 2001)

La infiltración inicial, es la cantidad de agua infiltrada durante las primeras dos horas de lluvia cuando los suelos no están saturados. En esta etapa, la infiltración es más rápida, dado que los poros están vacíos y que existe una atracción entre las partículas del suelo y el agua. Y la infiltración básica, es cuando los suelos superficiales ya están saturados y los valores de infiltración se vuelven más o menos constantes (Nittler y Barahona, 1993).

e. Estratigrafía geológica

Con fines hidrogeológicos, se definen tres estratos o capas: permeable, semipermeable e impermeable. Una capa es permeable cuando sus propiedades de transmitir agua son favorables en comparación con los estratos superiores o inferiores, en ésta la resistencia al flujo vertical es pequeña, así que sólo se toman en cuenta las pérdidas de energía causada por el flujo horizontal. En cambio en la capa semipermeable, sus propiedades transmisoras de agua son relativamente desfavorables en el flujo horizontal, pero el flujo vertical debe ser considerado ya que la resistencia al flujo es mínima, debido al espesor relativamente pequeño de las capas. Y en la capa impermeable las propiedades transmisoras de agua son tan desfavorables que sólo fluyen a través de ella, vertical u horizontalmente, cantidades mínimas de agua (Ridder, 1994).

Existen capas o estratos en donde predominan materiales granulares gruesos (gravas y arenas) que por su granulometría y su mayor diámetro medio comparado con materiales finos (arcillas y limos), presentan una mayor permeabilidad y transmisividad por tanto en estos estratos, se pueden encontrar los mejores acuíferos. La estratigrafía o secuencia de rocas que han sufrido deformaciones por la acción de fuerzas de compresión y tensión, presentan diferentes grados de fracturamiento, que modifican sus condiciones originales de porosidad y permeabilidad. Es por ello que muchas rocas que originalmente presentaban condiciones poco favorables para la transmisión y almacenamiento del agua subterránea, se convierten en las zonas de mayor permeabilidad y llegan a constituir buenos acuíferos (Herrera, 2002).

Es de gran importancia realizar un estudio de la estratigrafía de la zona, para conocer la disposición de los diferentes materiales geológicos, ya que estos pueden afectar la cantidad de recarga hídrica, porque si existe una capa impermeable, no permitirá el paso del agua a mayor profundidad y se generará un flujo subsuperficial que alimentará un cauce cercano o bien emergerá en manantiales (Padilla et al. 2003).

D. Cobertura vegetal

a. Profundidad radicular

La profundidad radicular determina la lámina de agua que es utilizada por las plantas para su desarrollo y depende del tipo de planta, condiciones del suelo y clima. También menciona que las raíces de las plantas que absorben mayor cantidad de agua del suelo, son las que se

encuentran en la parte superior de la zona radicular. La profundidad radicular de las plantas puede oscilar hasta 2.50 m (Sandoval, 1989).

b. intercepción

Es el proceso de retención de la precipitación en los estratos de vegetación y brosa, limitando la cantidad de agua que llega al suelo. La intercepción puede captar y guardar hasta 30% de la precipitación en bosques húmedos tropicales. En áreas áridas, con menos vegetación, la intercepción disminuye, sin embargo áreas de pastos y arbustos oscila entre 10 y 20% (Nittler y Barahona, 1993). El agua retenida en los estratos de vegetación y brosa puede evaporarse antes de llegar al suelo; o llegar hasta el suelo por goteo o escurrimiento (movimiento de agua por debajo y a través de las ramas y troncos). Si esto último ocurre, la lluvia llega hasta el suelo durante un período más largo ocasionando mejores posibilidades para que el agua se infiltre y no forme parte de la escorrentía superficial (Nittler y Barahona, 1993).

La cantidad de agua que llega hasta el suelo a través del goteo, versus la cantidad que se evapora varía mucho debido a las diferentes condiciones climáticas, físicas y de la vegetación. Se puede considerar que la intercepción aparentemente roba agua de la cuenca y del sistema hidrológico; dado que en áreas de alta intercepción (bosques densos con varios estratos de vegetación y un estrato profundo de broza), se puede perder hasta 30% de la precipitación en forma de evaporación (Nittler y Barahona, 1993).

En otras latitudes, que un bosque de árboles maderables de 50 años de edad intercepta hasta un 20% de lluvia y que la capacidad de intercepción se reduce a mayor velocidad del viento, pero la tasa de evaporación aumenta (Linsley 1988).

E. Escurrimiento

Existen tres caminos principales: escorrentía superficial, escorrentía subsuperficial y escurrimiento subterráneo (Linsley 1988).

F. Variabilidad espacial y temporal

Las variaciones de recarga hídrica en el espacio y tiempo son una consecuencia directa de la diferencia por factores como precipitación, propiedades del suelo, vegetación, relieve y uso de

la tierra. La escala de tiempo puede ser instantánea, eventual, temporal, anual, histórica y geológica. Pero se debe considerar que al trabajar con largos intervalos temporales puede sobreestimarse o subestimarse la recarga hídrica (Lerner, 1990).

El intervalo temporal diario, respecto al mensual y anual, es más preciso debido a que toma en cuenta los cambios de humedad del suelo y de evapotranspiración de forma detallada (Herrera, 1998).

El área de trabajo debe ser pequeña para intervalos temporales cortos cuando se utiliza un nivel de estudio detallado y deberá ser grande para estudios a nivel de reconocimiento, con intervalos temporales largos. También, reporta que la menor variabilidad espacial se obtiene al estimar la recarga en puntos específicos de interés, pero multiplicar estos puntos es inviable para grandes áreas por el tiempo y elevado costo. Por tanto recomienda extrapolar valores de recarga donde los suelos y aspectos hidrológicos, sean representativos del área circundante (Lerner, 1990).

3.1.8.4 Áreas principales de recarga hídrica natural

De acuerdo al Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA, 1991), basado en un estudio a escala regional, establece que para evaluar cuantitativamente la recarga potencial de los Depósitos Fluviales Cuaternarios, en zonas que no tienen datos validados, se puede adoptar un valor de recarga del 10% de la precipitación media anual, considerando estudios de balance hídrico realizados en la zona de la Costa del Pacífico, donde se ha calculado un recarga del 14% de las precipitaciones medias anuales.

Para la unidad Depósitos Piroclásticos del Cuaternario, se puede adoptar un 15% considerando válido lo que se ha determinado en estudios hidrogeológicos del Valle de Guatemala, donde sobre la base de balances hídricos detallados, ha sido calculada una recarga media variable de entre el 8% (en la subcuenca norte) y el 22% (en la subcuenca Sur), de las precipitaciones anuales medias. Y en el caso de la unidad Rocas Ígneas y Metamórficas a escala regional todo el conjunto es considerado impermeable (MAGA, 1991).

Para regiones donde predominan rocas ácidas cristalinas se pueden encontrar recargas altas, arriba del 15% de la precipitación promedio anual, cuando influye la composición química y fractura de las rocas (Lerner, 1990).

3.1.8.5 Áreas críticas de recarga hídrica natural

Son aquellas áreas que se consideran susceptibles a disminuir su recarga potencial al ser sometidas a un manejo inadecuado, y se determinan a partir de las áreas principales de recarga hídrica natural, por tanto deben ser objeto de un manejo especial que permita mantener y/o manejar sus características. Las áreas críticas se reconocen considerando básicamente los siguientes aspectos: geología, infiltración básica, recarga anual (lámina) y pendiente (Padilla et al. 2003).

3.1.8.6 El proceso erosivo

El proceso erosivo se presenta desde el nacimiento de los ríos cuando fluyen aguas abajo, disminuyendo progresivamente su altitud respecto del nivel del mar, obviamente dado a que las aguas siguen una dirección bajando sobre los cauces por acción de la fuerza de gravedad. Desde "aguas arriba" hacia "aguas abajo" el tamaño promedio de las partículas del fondo de los cursos de agua se van reduciendo desde los grandes bolones o rocas mayores de los arroyos de montaña, pasando por piedras bochas y cantos rodados de mediano tamaño y gravas menores llegando hasta los finos sedimentos arenosos y arcillosos de los grandes ríos (Inzunza, 2001).

En términos hidrológicos, los estudios y experiencias realizadas determinan que en los ríos ocurre el transporte de materiales de origen erosivo que tiene diversas formas y estas son:

Suspensión: Los materiales son arrastrados por la corriente sin tocar el fondo

Saltación: Los materiales avanzan a saltos sucesivos, describiendo trayectorias discontinuas tanto en el espacio como en el tiempo.

Acarreo: Los materiales ruedan o se deslizan sobre el fondo.

Los materiales transportados por los cursos de agua están formados por una mezcla de partículas de varios tamaños (Inzunza, 2001).

3.1.8.7 Acción de las precipitaciones

La acción de las precipitaciones produce erosión por salpicadura. Cuando la gota de agua cae a través de la atmósfera, sufre cambios en su tamaño aumentando o disminuyendo por condensación o evaporación (Inzunza, 2001).

Al llegar al suelo, la precipitación puede evaporarse, infiltrarse o quedar en la superficie. Descontando la parte evaporada, la permeabilidad del suelo regula en todo momento la distribución de lo precipitado, entre el agua que penetra en el interior y el agua que queda detenida o bien fluye en la superficie. La formación del escurrido superficial depende del régimen de precipitaciones y de las características hidrológicas del suelo. Si la permeabilidad del suelo permite en todo momento la infiltración de una cantidad de agua mayor o igual a la que aporta la precipitación, no se producirá ninguna corriente superficial. En caso contrario, se formará en la superficie una lámina de agua que puede llegar a ponerse en movimiento por acción de la pendiente del terreno (Inzunza, 2001).

La acción del escurrido en el proceso erosivo se manifiesta en un doble aspecto: disgrega a los elementos terrosos y, al mismo tiempo, transporta a otros lugares aquellas partículas de tierra que por su tamaño y forma son susceptibles de arrastre. La acción del escurrido en cuanto a transportar partículas de tierra, encierra una mayor importancia. Los frotamientos y choques de la corriente de agua con la superficie rugosa del suelo, hacen rodar, deslizar o dar pequeños saltos a los granos de tierra. Tales tensiones serán causa de la formación de una turbulencia en la corriente, originándose torbellinos que al contener vectores de fuerza de trayectoria helicoidal, con zonas circulantes de suficiente velocidad de ascenso, pueden llegar a poner en suspensión a las partículas de tierra más pequeñas (Inzunza, 2001).

A. Intensidad, duración y frecuencia de los aguaceros

Al considerar a la precipitación en el espacio y tiempo de ocurrencia, surge como unidad natural el aguacero. La intensidad, duración y frecuencia de los aguaceros son características de la precipitación de gran significado en la erosión. El producto de la intensidad y duración define la abundancia. Cuando la intensidad es superior a la penetración del agua en el suelo, se formará en escurrido superficial promotor fundamental de que se produzcan erosiones, siendo evidente que los efectos revestirán una mayor o menor importancia según el tiempo de duración del fenómeno. Así como las gotas de lluvia tienen mayores efectos erosivos para lluvias violentas y de velocidades elevadas (Inzunza, 2001).

La frecuencia de los aguaceros ejerce influencia en el fenómeno erosivo debido a sus repercusiones en el estado de humedad del suelo en el tiempo. Si los intervalos son cortos, el

contenido de humedad del suelo es elevado al iniciarse un nuevo aguacero, incidiendo en la generación de escorrentías superficiales, aunque su intensidad sea baja. Si los citados intervalos son largos en cambio, el suelo llegará prácticamente a secarse, retardándose la formación de escorrentías superficiales e incluso, puede que no lleguen a existir si la intensidad de la lluvia es baja. Los principios racionales expuestos han sido corroborados en multitud de experiencias (Inzunza, 2001).

3.1.8.8 Factores determinantes del fenómeno erosivo

Determinan al fenómeno erosivo:

- A. El suelo:** La cantidad de tierra desplazada por la percusión de las gotas de lluvia es tanto más grande cuanto más susceptibles sean las partículas a disgregarse. En lo que concierne al escurrido, debe primero señalarse que su existencia está condicionada por el poder de infiltración del suelo, y para que las partículas sean arrastradas deben tener cierto tamaño, en lo que influye fundamentalmente la composición granulométrica y las propiedades físico-químicas del suelo (Inzunza, 2001).
- B. El relieve:** La erosión hídrica acelerada, prácticamente no existe en las zonas llanas, siendo posible únicamente en suelos de pendiente suficiente, donde la percusión de las gotas de lluvia y la acción del flujo superficial llegan a ejercer efectos considerables. Cuando el terreno es más o menos horizontal, el desplazamiento de las partículas de tierra por el impacto de las gotas se hace en todos los sentidos, existiendo así una compensación mutua. Por el contrario, si el terreno es inclinado predominarán los desplazamientos hacia las partes más bajas. La influencia del relieve en la acción del escurrido encierra una mayor importancia. La potencia erosiva del flujo superficial y su capacidad de transporte depende de la densidad de las aguas y de la velocidad con que éstas se mueven. A su vez la velocidad es mayor cuanto más grande sean la altura del flujo y el grado de pendiente del terreno (Inzunza, 2001).

La longitud de la pendiente es también un determinante de gran significado en los fenómenos erosivos. Su influencia aparece manifiesta al considerar que cada zona de una ladera está sometida a la escorrentía de zonas de mayor altitud, y que la altura del flujo en cada punto debe ser mayor a medida que aumenta su distancia a la cumbre, y por

consiguiente es de esperar que en las zonas bajas los fenómenos erosivos revestirán mayor intensidad. De esto se deduce que los desplazamientos de tierra en las laderas, por unidad de superficie, deben ser mayores cuanto mayores sean la inclinación y la longitud de la pendiente (Inzunza, 2001).

C. La vegetación: La influencia de la vegetación en el fenómeno de la erosión obedece a diferentes causas:

- Protege el suelo de la percusión de las gotas de agua
- Aumenta el poder de infiltración del suelo, disminuyendo el volumen de agua de escorrentía
- En las zonas boscosas los troncos y ramas caídas obstaculizan el escurrimiento reduciendo su velocidad hasta su cuarta parte. Esto significa que la energía erosiva se reduce enormemente respecto de la que resultaría en terreno desnudo.

- Brinda mayor consistencia del suelo a consecuencia del entrelazamiento de las raíces. Esta consecuencia afecta a mayor o menor profundidad, según sea la naturaleza de la vegetación: pequeña cuando se trate de hierbas y mucho mayor cuando se trata de árboles o arbustos.

De lo anterior se deduce que en las zonas forestales con cierta densidad de cubierta vegetal, se reduce el fenómeno de la erosión al mínimo (Inzunza, 2001).

El mecanismo mencionado en síntesis consiste: primero en una disgregación de los elementos terrosos y, luego en un transporte de las partículas individualizadas, por las aguas que corren en la superficie del suelo. Esta es la manifestación más frecuente de erosión hídrica aunque existen otras formas no tan generalizadas y que obedecen a mecanismos distintos. A veces la actuación de las aguas crea condiciones propicias en el suelo para que éste se desplace por la acción de la gravedad, como en el caso de los desplazamientos en masa (Inzunza, 2001).

3.1.8.9 Clasificación de los sedimentos

La carga total de sedimentos que transporta una corriente natural es la suma de tres componentes que son: Carga de fondo, Sedimentos en suspensión, sedimentos en saltación. (Silva, 2003).

3.1.8.10 Procesos erosivos en la cuenca.

La cuenca vertiente contribuye con sedimentos a la carga total de una corriente natural de dos maneras: Remoción en masa y erosión hídrica.

3.1.8.11 Remoción en masa.

Este fenómeno está asociado con deslizamientos de grandes masas de material sólido que se han concentrado en sitios inestables. La inestabilidad es causada por factores geotécnicos que tienen que ver con las pendientes de los taludes, el manejo inadecuado del suelo, la tala de árboles y el almacenamiento de agua lluvia en los suelos. Las masas de material permanecen por algún tiempo en un equilibrio precario en los sitios inestables, pero basta la presencia de un factor detonante para que se produzca el deslizamiento. Este factor detonante puede ser un sismo, un período prolongado de lluvias intensas o la pérdida de soporte en la pata de un talud (Silva, 2003).

Cuando el deslizamiento se produce directamente sobre una de las márgenes de una corriente natural el material deslizado se deposita sobre el lecho obstruyendo el paso libre del agua, pero a medida que pasa el tiempo el mismo flujo de agua se encarga de transportar el material hacia aguas abajo, parte como carga de fondo y parte en suspensión. Si los deslizamientos se producen lejos de las corrientes de agua, entonces solamente una parte del material puede llegar a las corrientes por erosión hídrica (Silva, 2003).

3.1.8.12 Erosión hídrica.

La erosión hídrica se genera cuando las gotas de lluvia que caen sobre un suelo tienen suficiente energía para remover partículas del mismo, dejándolas libres para que puedan ser transportadas por la escorrentía superficial hacia las corrientes de drenaje. En la actualidad la magnitud de la erosión hídrica se mide por medio de la pérdida de suelo. Esta pérdida es un índice medio anual del potencial erosivo de la cuenca; se calcula por medio de fórmulas semiempíricas y se expresa en milímetros por año (mm/año). Los estudios semiempíricos que existen sobre el tema consideran que solamente un pequeño porcentaje de la pérdida de suelo llega hasta la corriente de drenaje y puede entrar a formar parte de la carga en suspensión (Silva, 2003).

3.1.8.13 Capacidad de las corrientes naturales para transportar sedimentos.

Existen dos procedimientos para determinar cuál es la capacidad que tienen las corrientes naturales para transportar los sedimentos de fondo y en suspensión. Uno es el método analítico por medio de fórmulas empíricas y otro el de mediciones con aparatos normalizados.

Las fórmulas empíricas permiten calcular las capacidades máximas de transporte si las corrientes tuvieran suficientes sedimentos disponibles. Estas tienen muchas limitaciones porque por lo general las fórmulas son desarrolladas en condiciones de laboratorio. Desde el punto de vista analítico las fórmulas empíricas para cálculo de carga de fondo han tenido un desarrollo más completo que las de sedimentos en suspensión. Sin embargo, los resultados prácticos siguen siendo inciertos (Silva, 2003).

Los medidores normalizados de sedimentos en suspensión para realizar aforos sólidos son ampliamente utilizados en el mundo y su confiabilidad es adecuada para obtener información aceptable en estudios hidrométricos. No se ha tenido la misma fortuna con los medidores de carga de fondo y por esta razón es de uso corriente medir solamente los sedimentos en suspensión y asignar a la carga de fondo un porcentaje de lo que se obtuvo en suspensión (Silva, 2003).

3.1.8.14 Análisis de la carga en suspensión.

Aceptando que la carga en suspensión es alimentada por la erosión pluvial en la cuenca, surge la dificultad de estimar qué volumen de sedimentos transporta realmente el río en suspensión, y qué ocurre con los sedimentos que el río no acarrea. La capacidad de un río para transportar sedimentos en suspensión depende de las fuerzas de sustentación que se generan como componentes verticales de la velocidad del flujo. La magnitud de estas fuerzas de sustentación depende de la magnitud de la velocidad de flujo y, por tanto, del caudal. Mientras la componente vertical que sostiene una partícula de sedimento sea mayor que el peso de esta, la partícula se mantiene en suspensión; de esta forma, el caudal clasifica las partículas que el río puede transportar, tanto en tamaño como en número (Silva, 2003).

Cuando se presenta una creciente la capacidad de transporte del río aumenta, pero el transporte real depende de la duración de la escorrentía superficial directa, del área donde se haya producido el aguacero causante de la creciente y de las características del sedimento que alcance a llegar hasta el río. Esto implica que la carga en suspensión no es función única del caudal sino

que depende además de la erosión pluvial en la cuenca. A medida que el caudal disminuye en el río también disminuye su capacidad de transporte; esto hace que las partículas que no se pueden sostener en suspensión se sedimenten. Posteriormente, cuando las velocidades se incrementen por aumento del caudal, parte de estos sedimentos serán puestos en estado de saltación temporal y algunos de ellos volverán a formar parte de la carga en suspensión. (Asturias, 2006).

Como se aprecia por los anteriores comentarios, la tarea de estimar analíticamente la carga de sedimentos en suspensión con una aproximación razonable no es fácil. Actualmente, la mejor manera que existe para determinar la carga real en suspensión consiste en la medición de esa carga, utilizando medidores normalizados. Los procedimientos de toma de datos y procesamiento de los mismos tropiezan, sin embargo, con una serie de inconvenientes derivados de las simplificaciones que deben hacerse para que el método resulte práctico (Silva, 2003).

Dentro de esas simplificaciones está, por ejemplo, la de suponer que existe una relación única entre los caudales líquido y sólido, lo cual es cierto solamente en contadas ocasiones. Los pares de puntos que se obtienen a partir de series de aforos líquidos y sólidos simultáneos presentan siempre una gran dispersión alrededor de las curvas teóricas de ajuste que se calculan por métodos numéricos. Para poder explicar la causa de esa dispersión es necesario tener en cuenta otras variables que se derivan de los procesos erosivos en la cuenca y del régimen de transporte del río, lo cual implica necesariamente la investigación, punto por punto, de la procedencia de los caudales sólidos medidos (Asturias, 2006)

A pesar de sus deficiencias, el método de medición directa es el más aceptado para estimar la carga en suspensión y para elaborar las curvas de duración del caudal sólido. Desafortunadamente, son pocos los ríos en los cuales se efectúan estas mediciones en forma sistemática. (Silva, 2003)

3.1.9 Balance hídrico de suelos

El balance hídrico, cuantifica la situación hidrológica de un área en un período de tiempo determinado tomando en cuenta factores como el clima, suelo, cobertura vegetal y topografía, también permite comprobar el cálculo de recarga del acuífero (Padilla et al. 2003). El Balance Hidrológico, va estar determinado por: $Entrada (E) - Salidas (S) = Cambio de Almacenamiento (\Delta S)$.

La recarga directa al acuífero se puede estimar y comprobar en base al balance hídrico de suelos ya que integra todos los valores en los cuales se divide la precipitación que cae sobre una determinada zona. (Padilla et al. 2003). El balance hídrico de suelos se define de la siguiente manera:

$$P = ETR + Es + Ret + Rec$$

Donde:

P = Precipitación

ETR = Evapotranspiración

Es = Escorrentía superficial

Ret = Retención (vegetal y techos)

Rec = Recarga al acuífero

El balance hídrico de suelos se puede expresar en unidades de longitud (mm) y en unidades de caudal (m³/año) (Padilla et al. 2003).

A. Determinación de la evapotranspiración potencial

Para el cálculo de la evapotranspiración puede utilizarse métodos directos e indirectos. En los métodos indirectos existen varias formulas empíricas que permiten obtener la evapotranspiración potencial. Los factores que determinan la evapotranspiración son tan complejos que es muy difícil considerarlos todos en una expresión matemática, por lo que algunos autores se basan en la temperatura, mientras que otros procuran acercarse mas a la realidad incluyendo otros factores físicos y biológicos. Los métodos se utilizan dependiendo de la información meteorológica disponible para el área de estudio. (Custodio y Llamas, 2001).

La evapotranspiración es el resultado de la suma de los fenómenos de la evaporación del suelo y de la transpiración de las plantas, pero solo es aplicable en un área de terreno que contenga cubierta vegetal. En términos generales la evapotranspiración depende de dos factores muy variables y difíciles de medir: el contenido de humedad del suelo y del desarrollo vegetal de la planta (Orozco, 2004).

La dificultad de medición de dichos factores hacen que, para efectos de cálculo de la recarga al acuífero en un balance hídrico de suelos, se considere el concepto de evapotranspiración potencial definida como la pérdida de agua por vapor en un cultivo, generalmente de poca altura, con desarrollo vegetal óptimo y con un determinado suministro de agua. Sin embargo existe un límite superior de la cantidad de agua que realmente vuelve a la atmósfera por evaporación y transpiración de la planta, lo que se conoce como evaporación real (Orozco, 2004).

Con fines prácticos la evapotranspiración representa toda el agua que desaparece de cualquier área (con o sin cobertura vegetal) por efecto del clima y por lo tanto es muy importante, ya que reduce relativamente grandes cantidades de agua para la recarga de un acuífero. A la evapotranspiración también se le llama uso consuntivo y es la suma de los fenómenos de la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas (Orozco, 2004).

Los valores típicos de la evapotranspiración potencial varían entre 1 a 3 mm/día para los climas templados, de 5 a 8 mm/día en los trópicos húmedos y de 10 a 12 mm/día en regiones áridas. La evapotranspiración en general se considera como el 80 % de la evaporación medida en el evaporímetro tipo A, aunque algunos investigadores como Penman (1984) considera que este factor debe ser 0.75 en Guatemala, se utiliza el valor 0.80 principalmente para época seca, por ser la estación en la cual se aplica riego (Padilla et al. 2003).

3.1.10 Esguerrimiento máximo esperado

3.1.10.1 El método racional

Este modelo hidrológico determinístico se usa ampliamente en nuestro medio, debido a su aparente simplicidad, aunque no siempre con buenos resultados, ya que pocos ingenieros entienden bien el significado de cada uno de los parámetros involucrados en la expresión. Los efectos de la lluvia y del tamaño de la cuenca son considerados en la expresión explícitamente; otros procesos son considerados implícitamente en el tiempo de concentración y el coeficiente de escurruentía. El almacenamiento temporal y las variaciones espaciotemporales de la lluvia no son tenidos en cuenta. Debido a esto, el método debe dar buenos resultados, solo en cuencas pequeñas no mayores de 50 km².

Método desarrollado en 1889, pero por su sencillez todavía se sigue utilizando. La hipótesis fundamental de esta fórmula es de que una lluvia constante y uniforme que cae sobre la cuenca de estudio, producirá un gasto de descarga el cual alcanza su valor máximo cuando todos los puntos de la cuenca está contribuyendo al mismo tiempo en el punto de diseño. La hipótesis se satisface para un lapso de tiempo, denominado tiempo de concentración t_c , definido como el tiempo que tarda el agua en fluir desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de aforo o de estudio. (Aparicio, 2001)

Las limitaciones más importantes que tiene esta metodología son:

Proporciona solamente un caudal pico, no el hidrograma de creciente.

Asume que la escorrentía es directamente proporcional a la precipitación (si duplica la precipitación, la escorrentía se duplica también). En la realidad, esto no es cierto, pues la escorrentía depende también de otros factores, tales como precipitaciones antecedentes, condiciones de humedad del suelo, etc.

Asume que el período de retorno de la precipitación y el de la escorrentía son los mismos, lo que no es cierto. La precipitación es filtrada por la cuenca para producir escorrentía, y ese filtro no es lineal. La transformación de precipitación en escorrentía se ve afectada por las características de la cuenca, el estado de la cuenca al momento de la lluvia y otros factores. Precipitaciones, por ejemplo, con períodos de retorno pequeños pueden producir caudales con períodos de retorno mayores, debido a las condiciones de humedad de la cuenca en el momento en que ocurra la tormenta (Aparicio, 2001).

A. Supuestos de la fórmula del método racional

El valor máximo de escurrimiento para una intensidad particular de lluvia, ocurre si la duración de la lluvia es igual o mayor que el tiempo de concentración.

El tiempo de concentración se define como el tiempo requerido para que corra el agua desde el punto más alejado de la cuenca, hasta el punto de descarga del caudal

El valor máximo de escurrimiento para una intensidad específica de lluvia, la cual tiene una duración igual o mayor que el tiempo de concentración, es directamente proporcional a la intensidad de la lluvia.

La frecuencia de la ocurrencia de la descarga máxima, es la misma que la de la intensidad de la lluvia con la cual se calculó.

La descarga máxima por área unitaria disminuye conforme aumenta el área de drenaje y la intensidad de la lluvia disminuye conforme aumenta la duración (Aparicio, 2001).

En la fórmula racional, la estimación del coeficiente de escorrentía es la mayor fuente de incertidumbre. Los valores de este coeficiente se obtienen normalmente de tablas. En realidad, el coeficiente de escorrentía depende en gran medida de las condiciones de humedad antecedente de la cuenca, que a su vez dependen de las tormentas ocurridas antes. Una interpretación probabilística del método racional fue hecha en 1936 por Horner y Flynt; en ella los coeficientes de escorrentía variaban con el período de retorno de la tormenta (Aparicio, 2001).

El gasto pico o máximo se define con la expresión: $Q_p = 0.278 C i A$

Donde:

Q_p = gasto máximo (m³/s)

C = coeficiente de escurrimiento

i = intensidad media de la lluvia para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca (mm/h)

A = área de la cuenca drenada (km²)

Secuencia de aplicación del método racional A. Estimación del tiempo de concentración (t_c)

Ahora bien, existen varios métodos para estimar el tiempo de concentración en las superficies naturales (t_c), para lo cual se utilizaron las siguientes formulas (Aparicio, 2001):

Según Kirpich: $t_c = 0.0078 (L^{0.77} / S^{0.38})$

Según Bransby Williams: $t_c = 21.3 (L / 1610) (1/A^{0.1} S^{0.2})$

Donde:

t_c = tiempo de concentración sobre la superficie natural (min)

L = Longitud del cauce principal (m)

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

Según Chow: $t_c = 0.01 (L / (S)^{0.5})^{0.64}$

Donde:

t_c = tiempo de concentración (h)

L = Longitud del cauce principal (m)

S = pendiente media del cauce (%) (Aparicio, 2001).

B. Evaluación del coeficiente de escurrimiento

Tradicionalmente, se ha determinado con el auxilio de valores estimados para diferentes tipos de áreas por drenar, con el auxilio de tablas. Si la cuenca de estudio está integrada por diferentes tipos de superficie, se calcula un coeficiente de escuetamente promedio (Aparicio, 2001).

C. Estimación de la intensidad de la lluvia

La intensidad media de la lluvia para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca y asociada al periodo de retorno de diseño, se puede estimar con alguno de los métodos descritos, métodos probabilísticos o de regresión lineal múltiple (Aparicio, 2001).

Cuadro 1 Valores de coeficientes de escorrentía C

Tipo de área	Coficiente
Residencial	
Áreas unifamiliares	0.30 - 0.50
Unidades múltiples separadas	0.40 - 0.60
Unidades múltiples conectadas	0.60 - 0.75
Áreas departamentales	0.50 - 0.70
Techos	0.75 - 0.95
Casas de habitación	0.50 - 0.70
Comercial	
Centro de la ciudad	0.70 - 0.95
Fuera del centro de la ciudad	0.50 - 0.70
Techos	0.75 - 0.95
Cementerios y parques	0.10 - 0.25
Campos de juego	0.20 - 0.35

Patios de ferrocarril y terrenos sin construir	0.20 - 0.40
Zonas suburbanas	0.10 - 0.30
Industrial	
Ligera	0.50 - 0.80
Pesada	0.60 - 0.90
Techos	0.75 - 0.95
Calles	
Asfalto	0.70 - 0.95
Concreto	0.80 - 0.95
Adoquín	0.70 - 0.75
Aceras y andadores	0.75 - 0.75
Terracerías	0.25 - 0.060
Parques, jardines y prados	
Suelo arenoso plano < 2%	0.05 - 0.10
Suelo arenoso pendiente de 2 a 7%	0.10 - 0.15
Suelo arenoso pendiente de 7% o mayor	0.15 - 0.20
Suelo arcilloso plano < 0 = a 2%	0.13 - 0.17
Suelo arcilloso pendiente de 2 a 7%	0.18 - 0.22
Suelo arcilloso pendiente de 7% o mayor	0.25 - 0.35
Áreas no urbanizadas	0.10 - 0.30
Áreas agrícolas	
Planas arcillosas cultivadas	0.50
Planas arcillosas bosque	0.40
Planas arenosas cultivadas	0.20
Planas arenosas bosque	0.10
Colinas arcillosas cultivadas	0.50
Colinas arcillosas bosque	0.40
Colinas arenosas cultivadas	0.40
Colinas arenosas bosque	0.30

Tomado de fundamentos de Hidrología de superficie. Francisco Javier Aparicio Mijares. México. 2001, editorial Limusa.

Cuadro 2 Valores del coeficiente C de la escorrentía

Topografía y vegetación	Textura del suelo		
	Arenosa	Franca	Arcillosa
Bosques			
Llano, 0-5% de pendiente	0.10	0.30	0.40
Ondulado, 5-10% de pendiente	0.25	0.35	0.50
Montañoso, 10-30% de pendiente	0.30	0.50	0.60
Pastizales			

Llanos	0.10	0.30	0.40
Ondulados	0.16	0.36	0.55
Montañosas	0.22	0.42	0.6
Tierras cultivadas			
Llanas	0.30	0.50	0.60
Onduladas	0.40	0.60	0.70
Montañosas	0.52	0.72	0.82
Zonas urbanas	30% impermeable	50% impermeable	70% impermeable
Llanas	0.40	0.55	0.65
Onduladas	0.30	0.65	0.80

Tomado de: Hudson. 1997. Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y la escorrentía (en línea). Italia (boletín de suelos de la FAO – 68). FAO. Por Asturias

3.2 Marco referencial

3.2.1 Antecedentes de la Reserva de Uso Múltiple Cuenca del Lago de Atitlán RUMCLA

El área protegida Atitlán fue declarada como Parque Nacional en 1955. Luego a través de un estudio técnico de recategorización, su categoría cambió a una Reserva de Uso Múltiple en 1997. Bajo este esquema, en 1999 se implementa la Unidad Técnica de Atitlán, por parte del CONAP.

En términos de planificación del manejo del área protegida, en el 2000 la Asociación de Amigos del Lago de Atitlán, Asesorías Basterrechea y Grupo Kukulcán, elaboraron conjuntamente para el CONAP el Plan Maestro 2000-2004, el cual nunca fue aprobado.

En el 2002, The Nature Conservancy como parte del Proyecto Parques en Peligro (TNC), en forma conjunta con la Universidad del Valle, CONAP y la Asociación Vivamos Mejor, facilitaron el desarrollo del Plan de Conservación de la Cadena Volcánica de Atitlán. En ese mismo año se elaboraron los planes de manejo para los parques municipales Chuwanimajuyú de San Pedro La Laguna y Chuiraxamoló de Santa Clara La Laguna.

Entre 2003 y 2004 se elaboraron 9 planes de manejo para igual número de reservas naturales privadas en la región de Atitlán. El Plan de Monitoreo de la RUMCLA que ha sido

implementado por la Universidad del Valle y Vivamos Mejor y cuyos resultados fueron la base de información para el planteamiento de nuevas estrategias.

De igual forma se han llevado a cabo otros proyectos importantes de planificación para el departamento de Sololá, entre ellos destacan la Estrategia para Reducción de la Pobreza en el 2003, el Plan de Ordenamiento Territorial para 10 municipios del Noroeste de Sololá, elaborado por Consultores Integrados y financiado por SINAFIP en el 2003, y finalmente la iniciativa de SEGEPLAN para elaborar el Plan de Ordenamiento Territorial del departamento y que utilizará los resultados de este Plan como base para su formulación.

Los procesos previos de planificación y la institucionalidad local evidencian que área no necesita otro proceso de planificación convencional, sino un plan efectivo y realista de coordinación institucional y política para que cada actor defina con claridad su rol, y aporte lo propio para el desarrollo sostenible y la conservación de la RUMCLA (CONAP, 2007).

El CONAP consciente de la urgente necesidad de contar con el Plan Maestro como un instrumento estratégico y sólido que le permita dirigir con mayor eficacia el manejo y conservación de la RUMCLA, solicitó apoyo a The Nature Conservancy para la elaboración del mismo.

A partir de dicha solicitud, The Nature Conservancy, en consulta con CONAP, Vivamos Mejor y SEGEPLAN desarrolló un Plan de Trabajo que se fundamentó en el acopio de todas las iniciativas de planificación de conservación y desarrollo sostenible para el área, con el fin de capitalizar los esfuerzos ya realizados y catalizar un proceso coherente que dé como producto un plan que guíe y catalice los esfuerzos de todos en la gestión de la RUMCLA (CONAP, 2007).

3.2.2 Visión de la RUMCLA

La Reserva de Usos Múltiples de la Cuenca del Lago de Atitlán, localizada en la cadena volcánica occidental de Guatemala, es un área protegida compuesta por parques municipales, reservas naturales privadas y otras unidades de manejo, poseedoras de una gran riqueza de recursos naturales, culturales y económico-productivos, que se conservan y manejan sosteniblemente, con la participación coordinada y descentralizada del gobierno y la sociedad civil, para el beneficio y desarrollo regional y la satisfacción de sus visitantes (CONAP, 2007).

3.2.3 Objetivos de la RUMCLA

3.2.3.1 Objetivos primarios

- Fomentar el uso integral y sostenido de los recursos naturales renovables del área.
- Fortalecer las formas de vida y tradiciones culturales de los grupos mayas.
- Promover la educación ambiental en el área.
- Promover actividades de asistencia técnica.
- Conservación de la cuenca hidrológica del lago de Atitlán.
- Proteger la belleza escénica del área.
- Proteger sitios y objetos del patrimonio cultural, histórico y arqueológico del área.
- Fomentar el aprovechamiento forestal sostenible en el área (CONAP, 2007).

3.2.3.2 Objetivos secundarios

- Promover y fomentar la investigación sobre el medio natural y cultural del área.
- Suministrar servicios de recreación y turismo ecológico en el área.
- Mantener la diversidad biológica en el área.
- Conservar los ecosistemas del área en su estado natural (CONAP, 2007).

3.2.3.3 Objetivos terciarios

- Conservación de recursos genéticos.
- Fomentar el uso sostenible de los recursos pesqueros en el lago (CONAP, 2007).

3.2.4 Importancia natural de la RUMCLA

El área planificada abarca toda la cuenca del lago de Atitlán y parte de las cuencas del río Madre Vieja y río Nahualate. La cuenca del lago de Atitlán tiene un área de 541 km², el cuerpo de agua mide 130 km² y tiene una profundidad máxima de 324m, con una profundidad promedio de 188m. Las cuencas de los ríos Nahualate y Madre Vieja forman los límites oeste y este de la cuenca del lago, respectivamente, Estos ríos se alimentan de muchos tributarios tales como el río

Mocá y el río Bravo que fluyen desde los volcanes. Solo dos ríos de tamaño apreciable, Quiscab y Panajachel, depositan sus aguas en el lago de Atitlán.

Las dos principales sub-cuencas de ríos permanentes son el río Quiscab de 22.25 km de largo, cubriendo un área de 100 km² y el río Panajachel de 15.6 km de largo y un área de 75 km² (IGN, 1976 en parte). A excepción de la catarata todos los demás ríos que descargan al lago son temporales. Según el informe técnico 02-82 del INDE, el caudal medio anual del río Quiscab es de 1.91m³/seg y el del río Panajachel es de 0.53 m³/seg. Según este mismo informe, el volumen anual de escurrimiento es de aproximadamente 76.94 millones de m³. Se calcula que el lago contiene un volumen de agua de 24.4 km³.

Con relación a la hidrogeología, la dirección del agua subterránea es de norte a sur, existiendo recarga de tipo local. Los acuíferos locales contribuyen a la recarga del acuífero regional, el cual se estima tiene su descarga en la partes sur y sureste del lago, dando origen a los manantiales de esa zona.

Con base en las características químicas del agua se ha demostrado que el agua del lago percola lentamente hacia el río Madre Vieja. El río Nahualate es un río rápido que desde su nacimiento recibe agua contaminada de centros poblados, tales como Nahualá, Santa Catarina Ixtahuacán y Santo Tomás la Unión. La contaminación del río Madre Vieja es menor en las partes altas hasta llegar a San Bernardino y Pochuta. En el área de estudio ambos son alimentados por escurrimiento de los volcanes y del altiplano (CONAP, 2007).

La región del lago de Atitlán tiene una larga historia volcánica. Su rasgo dominante es un volcanismo que a través de su historia generó edificios volcánicos y varias calderas. Estos eventos dictan el entorno geográfico actual y la configuración de las cuencas hidrográficas. El actual lago de Atitlán y su entorno volcánico se han formado en tiempo geológicamente reciente, dentro del período del último ciclo volcánico que ha estado en proceso en los últimos ciento cincuenta mil años (CONAP, 2007).

3.2.5 Importancia Social y Económica

Según el XI Censo Nacional de Población se estableció que para el 2002, el departamento de Sololá tenía 307,661 habitantes, que representaban el 2.74 % del país. Los municipios del departamento que poseen mayor población son: Sololá con 20.79% (63,973 habitantes), Nahualá 16.88 % (51,939 habitantes), Santa Catarina Ixtahuacán 13.39% (41,208 habitantes) y Santiago

Atilán 10.48% (32,254 habitantes). Estos cuatro municipios contienen el 61.54 % de la población total del departamento (CONAP, 2007).

Por otro lado los municipios con menos población son Santa Catarina Palopó 0.93% (2,869 habitantes), San Marcos La Laguna con 0.73% (2,238 habitantes) y Santa María Visitación con 0.62% (1,919 habitantes). En el anexo 3 encontrará los datos de población del departamento de Sololá y sus municipios (CONAP, 2007).

A pesar de la riqueza natural y cultural del departamento, existen altos niveles de pobreza, ya que la misma alcanza el 76 % y la pobreza extrema es de 33%. Los municipios de Sololá con mayor porcentaje de pobreza general son en su orden: Santa Catarina Ixtahuacán con 90.44%, Santa Clara La Laguna con 87.58%, Concepción 87.03%, Sololá con 83.44 %, San Antonio Palopó con 83.43%, Nahualá con 82.25% y San Marcos La Laguna con 82.27%. Los municipios con mayor pobreza extrema son Sololá con 55.94% y Santa Catarina Ixtahuacán con 42.73%.

Sololá es uno de los departamentos de la República con mayor proporción de población indígena. Su índice es de 96.44%, que se considera alta, si se compara con el índice del país que es del 41%. El municipio con mayor población indígena es Concepción que registra un índice del 100%, mientras que Panajachel es el municipio con mayor índice de población no indígena. Las tres comunidades lingüísticas presentes en la RUMCLA son la Kaqchiquel, K'iche y Tz'utujil (CONAP, 2007).

Los niveles de migración externa del departamento de Sololá, causan problema de una reducción en la fuerza obrera, que afecta sectores importantes del sector agrícola de la región. Los datos de la migración e inmigración reflejan que más personas salen del departamento que las que entran. Se calcula que el total de población emigrante es de 1801, mayor que el de la inmigración (1,489). Las escasas fuentes de empleo obligan a esta población a desplazarse a la costa Sur o al extranjero, enviando un importante flujo de remesas para sus familias, lo cual fortalece la economía en general (CONAP, 2007).

La PEA es el grupo de población mayor de 7 años que suministran mano de obra necesaria para la producción de bienes y servicios en el departamento y que contribuyen al funcionamiento de la economía. Según el censo del 2002, Sololá cuenta con una PEA de 82,944 personas que representa un 2.38% de la PEA del país (CONAP, 2007).

En cuanto a los usos actuales de los recursos, se encontraron 112 especies de plantas útiles tanto nativas como exóticas que son utilizadas por los pueblos indígenas de la cuenca del lago de Atitlán. Entre los usos más importantes destacan las medicinales (35%) y las comestibles (32%). Es evidente que las comunidades indígenas del área guardan una estrecha sintonía con su entorno y aprovechan los recursos (CONAP, 2007).

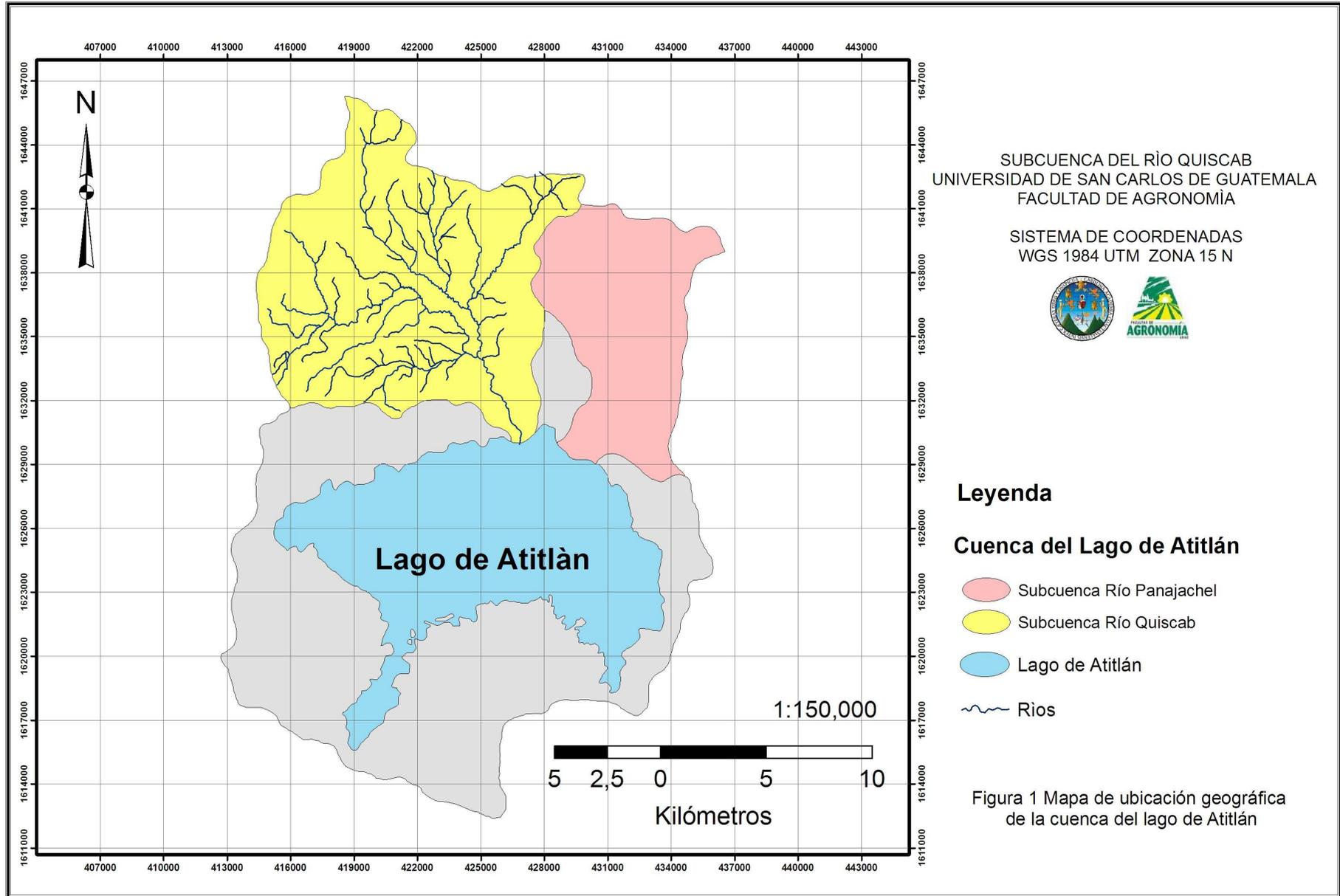
Hay variedad de plantas medicinales y alimenticias que son consumidas de forma cotidiana en toda la región. Las plantas son recolectadas, las tienen sembradas y también son comercializadas en los mercados. El aguacate es abundante en la zona y grandes extensiones de árboles se encuentran tanto en fincas como pequeños terrenos de pobladores del área. Otras plantas de interés son el sauco (*Sambucus* spp) el macuy (*Solanum nigrescens*), la pitahaya, (*Hylocereus undatus*) y el amaranto, (*Amaranthus* spp). Es de hacer notar que los puestos de salud del área son escasos y la población en muchos casos recurre a la medicina tradicional para curar sus enfermedades. En todos los pueblos visitados principalmente en San Pedro La Laguna, San Juan La Laguna, Santiago Atitlán y San Lucas Tolimán se encuentran puestos de plantas medicinales en los mercados. Se especula que el uso tradicional de las plantas es rico en especies nativas como en el caso de Chichicastenango y muchos otros sitios en Guatemala (CONAP, 2007).

El uso de los recursos para leña es muy importante en esta área. Los árboles preferidos para estos son los encinos, (*Quercus* spp.) pinos (*Pinus* spp.) y alisos (*Alnus* spp.).

La presión sobre estos recursos es alta debido a que la población tradicionalmente utiliza leña para consumo diario en la cocina. La leña preferida por la población es de encino, porque arde durante más tiempo, pero su precio es el más alto entre las maderas para leña. En Santiago Atitlán oscila entre Q125.00 y Q150.00 por tarea, mientras otras cuestan Q.100.00. La leña más utilizada es de gravilea, la cual se encuentra con mayor facilidad por ser sombra común del café. Se acostumbra “desombrar” estos árboles una vez al año después del corte de café y las ramas se utilizan como leña (CONAP, 2007).

La madera más utilizada es de pino, principalmente para la producción de muebles. Además de este árbol, se utiliza el ciprés para producción de puertas y ventanas, taxisco para columnas, “canoj” para muebles, cayucos y ataúdes, cedro para artesanías, aguacate para

cayucos y otros. En la parte norte de Sololá es usado el Pino blanco (*Pinus ayacahuite*) y pinabete (*Abies guatemalensis*) para la elaboración de artesanías y mueblería de madera (CONAP, 2007).



3.2.6 Ubicación de la subcuenca del río Quiscab

La subcuenca del río Quiscab posee un área de 154.12 km², y la conforman dos microcuencas, que son: las del río Quiscab-Chuiscalera y la del río Xibalbay, a su vez, la subcuenca pertenece a la cuenca del lago Atitlán.

La subcuenca del río Quiscab es un área protegida por el Consejo Nacional de Áreas Protegidas (CONAP), a continuación se presentan las características del área:

Área protegida: Subcuenca del río Quiscab.

Código: RUM

Categoría de manejo: Reserva de uso múltiple

Tipo de categoría de manejo: Tipo III

Ubicación Sololá y Totonicapán,

Administrador: CONAP

Legal: Declaratoria: Acuerdo Gubernativo 05-55, Decreto de Ley.4-89.

Año de declaratoria: 1955

Cuadro 3 Coordenadas UTM del cuadrante donde se localiza la subcuenca del río Quiscab.

Ubicación	Latitud Norte (m)	Longitud Oeste (m)
Parte superior izquierdo	682639.86	1647291.70
Parte inferior izquierdo	682639.86	1629570.87
Parte superior derecha	700296.59	1647387.66
Parte inferior derecha	700296.59	1629586.99
Punto de aforo	695938.79	1630358.53

Fuente: Hojas topográficas de Chichicastenango (1960 I), Sololá (1960 II), Totonicapán (1960 IV) y Santa Catarina Ixtahuacán (1960 III).

3.2.7 Ubicación Político-Administrativa

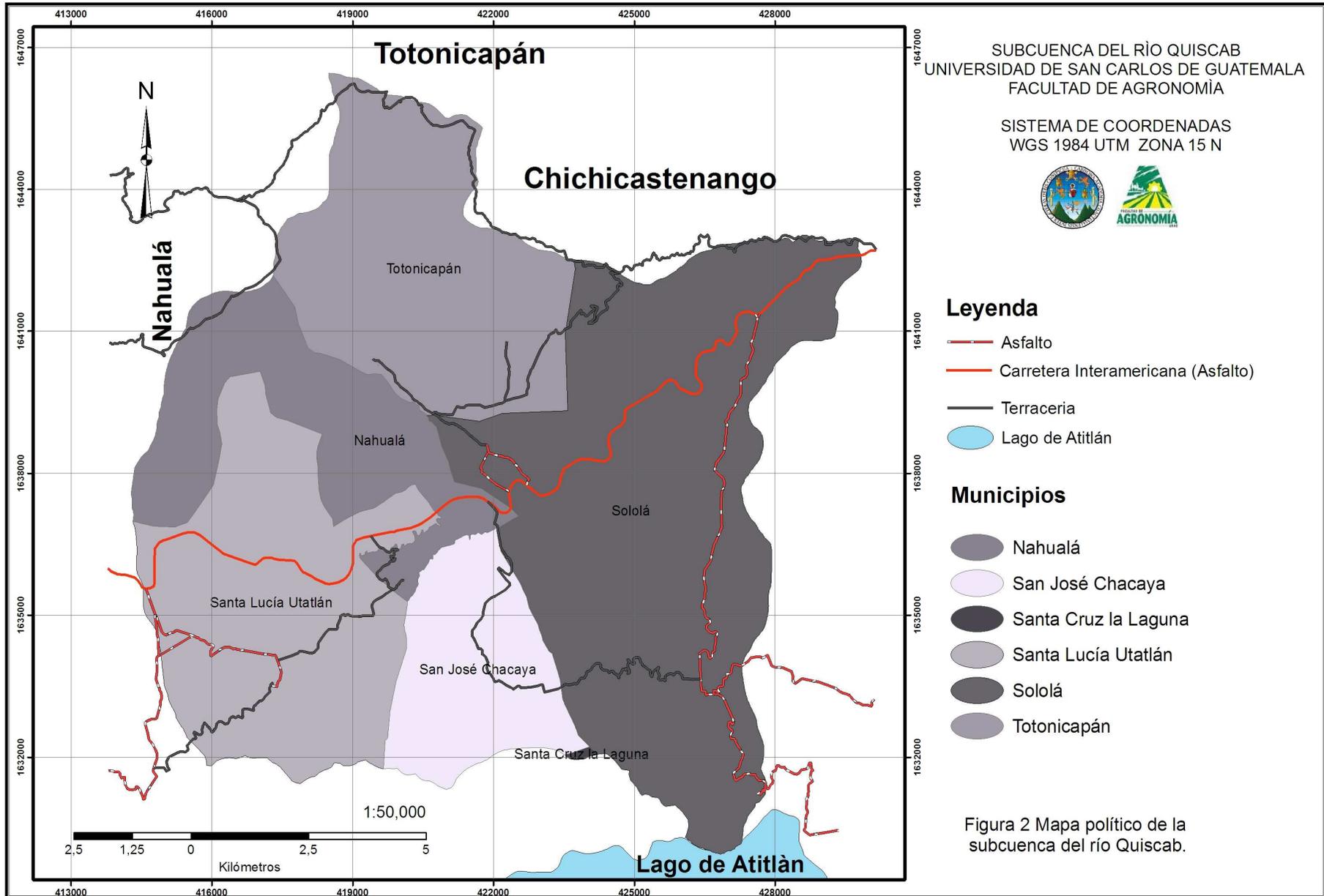
El área de estudio se encuentra en la región número VI Sur-Occidental y abarca 4 municipios y 47 poblados del departamento de Sololá y 1 municipio y 4 poblados el departamento de Totonicapán.

Cuadro 4 Departamentos y áreas municipales comprendidas dentro de la subcuenca río Quiscab.

Depto.	Municipio	Poblado	Categoría	Población	
SOLOLÁ	Sololá	1	Chuaxic	Aldea	1,444
		2	Chuiquel	Aldea	1,422
		3	El Jaibal	Finca	1,069
		4	La Ilusión Chuiquel	Caserío	1,089
		5	Sololá	Pueblo	13,490
		6	Argueta	Aldea	1,848
		7	El Tablón	Aldea	13,394
		8	Los Encuentros	Aldea	4,411
		9	María Tecún	Colonia	1,230
		10	San Jorge La Laguna	Aldea	2,084
		11	Xaquijyá	Aldea	330
		12	Xajaxac	Aldea	8,349
		13	Coxom	Caserío	721
		14	Cooperativa Xaquijyá	Caserío	1,173
		15	Panca	Caserío	1,334
	Santa Lucía Uatlán	1	Santa Lucía Uatlán	Pueblo	1,378
		2	Chuchexic	Aldea	1,078
		3	Chool	Caserío	792
		4	Chobé	Caserío	158
		5	Novillero	Aldea	926
		6	Pahaj	Aldea	1,743
		7	Pachacon	Caserío	190
		8	Payajut	Caserío	388
		9	Tzantinamit	Caserío	347
		10	Xetzampual	Caserío	435
		11	Chijcaja	Caserío	290
		12	Buena Vista	Caserío	691
		13	Chilojomche	Caserío	54
		14	Panicajquim	Caserío	450
		15	Chuitzam	Caserío	2,070
	San José Chacayá	16	Chiaj	Caserío	803
		17	Chuilajkacquix	Caserío	1,521
		18	Pachaj	Caserío	242
19		Cienaga Grande	Paraje	556	
20		Molino San Pedro	Paraje	628	
San José Chacayá	1	San José Chacayá	Pueblo	1,691	
	2	Las Minas	Caserío	411	
	3	Los Tablones	Cantón	1,305	
	4	Parromero	Caserío	393	
	5	Chomanzana	Caserío	299	

	Nahualá	1	Xeabaj	Caserío	1,100
		2	Paminajá	Caserío	543
		3	Chirijcaja	Aldea	1,395
		4	Pacoxom	Caserío	1,044
		5	San Lázaro	Caserío	123
		6	Tzamcoton ó Santa Rita	Cantón	243
		7	Santa Rita Xeabaj	Caserío	1,063
TOTONICAPÁN	Totonicapán	1	Barremeché	Aldea	2,965
		2	La Esperanza	Caserío	2,212
		3	La Concordia	Aldea	1,244
		4	Pamesebal	Caserío	1019
Población total dentro de la subcuenca del río Quiscab					85,180

Fuente: XI Censo de Población y VI de habitación, INE, 2002. Proyección 2008.



3.2.8 Características socioeconómicas

3.2.8.1 Demografía

De acuerdo al último censo del Instituto Nacional de Estadística (INE) del 2002, XI de Población y VI de Habitación y proyectado para el 2009, la subcuenca cuenta con un área de 154.12 km² y una población total de 185,180 habitantes, por consiguiente una densidad poblacional de 1,201 hab/km².

Debido a la falta de datos poblacionales específicos de cada aldea, paraje o caserío, que conforman a la subcuenca, se estimó la proyección de la población del área, con los datos de los municipios, para esto no se hizo la separación de los que conforman la subcuenca, por el contrario, se tomó la población total del municipio. Ello con el objetivo de comparar la tendencia del crecimiento demográfico del área en estudio.

Cuadro 5 Proyecciones de Poblaciones totales para los municipios de Sololá, San José Chacayá, Santa Lucía Utatlán y Totonicapán.

Municipio/Año	Sololá	San José Chacayá	Santa Lucía Utatlán	Nahualá	Totonicapán	Total
1994	37127	1399	13630	41310	79372	172838
2000	64086	2449	18043	52031	96374	232983
2005	83432	3210	20567	57907	110433	275549
2009	102411	3963	22720	62802	123697	315593
2015	136859	5343	25923	69702	145448	383275
2020	171088	6727	28406	74641	164006	444868

Fuente: XI Censo de Población y VI de habitación, INE, 2002. Proyecciones.

3.2.8.2 Idiomas y pertenencia étnica

Debido a que no se cuenta con datos específicos de cada poblado dentro de la subcuenca río Quiscab se procedió a analizar la pertenencia étnica de los municipios que conforman dicha subcuenca. En los municipios de San José Chacayá, Santa Lucía Utatlán, Nahualá, Sololá y Totonicapán la pertenencia étnica predominante es la K'iche, Kaqchiquel y Tzutujil (Censo Nacional Poblacional 2002).

En el municipio de Santa Lucía Utatlán el 95.56% de la población maya es del grupo étnico K'iche. Por otro lado el idioma en el Municipio de San José Chacayá el 66% es Kaqchiquel y el 27% es K'iche, el restante 7% es español. Siendo los idiomas más hablados en el departamento

de Sololá. En el municipio de Nahualá al igual que los poblados de Totonicapán la lengua predominante es K'iche (Planes de Desarrollo Integral de los Municipios pertenecientes a la subcuenca Quiscab).

3.2.8.3 Producción agrícola

En la subcuenca los cultivos principales son: maíz, frijol, hortalizas (rábano, remolacha, papa, zanahoria, repollo, coliflor, cebolla) y frutales (durazno, melocotón y aguacate). Estos productos son vendidos en los mercados locales de la región.

3.2.9 Características biofísicas

3.2.9.1 Zonas de vida

En la subcuenca del río Quiscab, se ubican tres zonas de vida según el sistema de clasificación de Holdrige y modificado por De la Cruz (1982), se ubico en la parte alta de la subcuenca la zona de vida de Bosque Muy Húmedo Montano Subtropical (bmh-M) 22.49% , en la parte media Bosque Muy Húmedo Montano bajo Subtropical (bmh-MB) 68.05% y en la parte baja el Bosque húmedo Montano Bajo Subtropical (bh-MB) 9.46%.

3.2.9.2 Clima

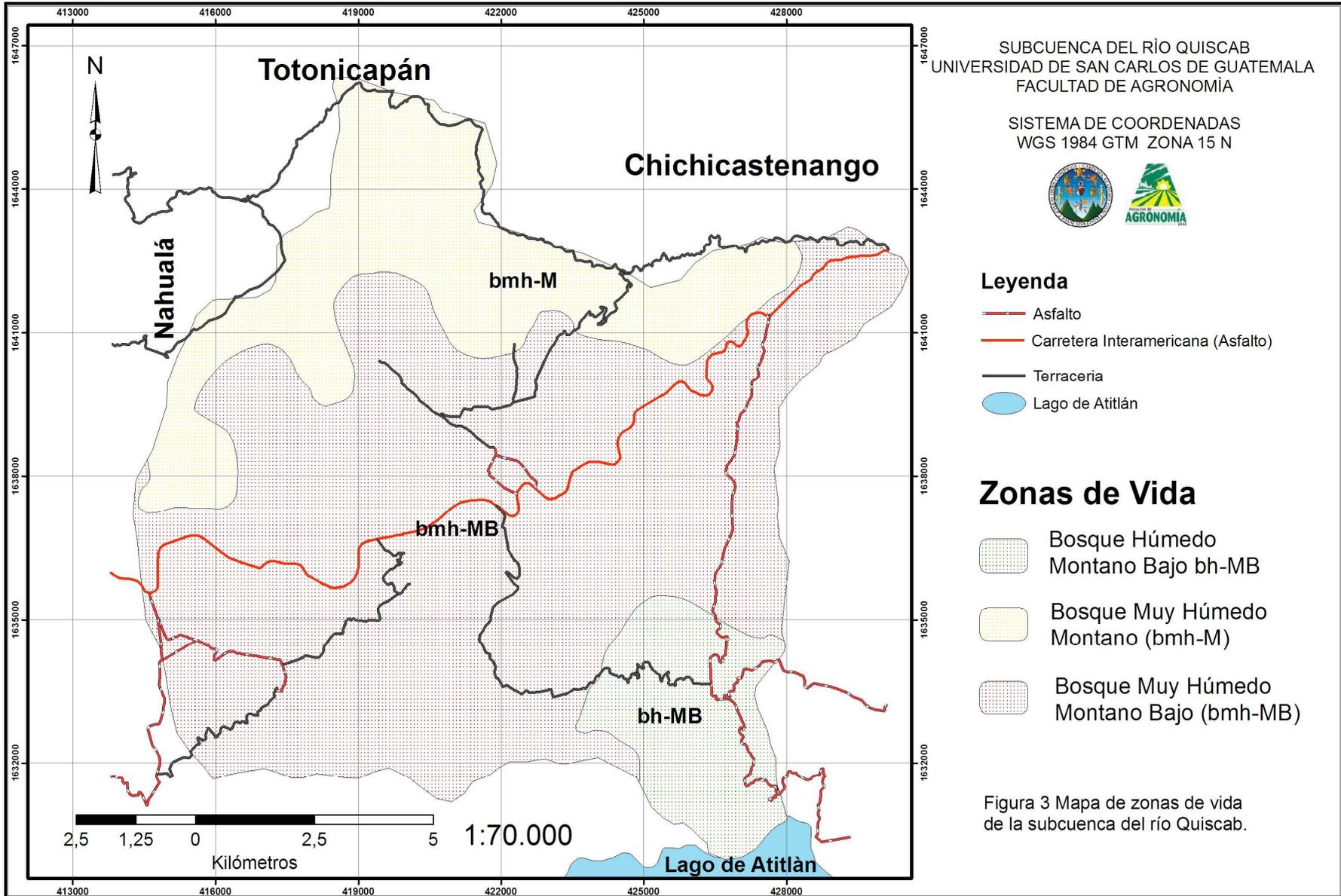
Según el sistema de clasificación climática de Thornthwaite, el área donde se localiza la subcuenca del río Quiscab enmarca su extensión en un solo tipo de clima, siendo este el Templado.

3.2.9.3 Temperatura

Se registro en el 2008 una temperatura mínima promedio de 8.2 °C, temperatura media promedio de 14.6 °C y una temperatura máxima promedio de 20.4 °C, según la estación meteorológica del INSIVUMEH del Tablón, Sololá..

3.2.9.4 Precipitación

La época lluviosa se presenta en los meses de mayo a octubre con precipitaciones promedio anuales entre 1153.78 mm a 1368.12 mm, registrado en el 2008, según la estación meteorológica del INSIVUMEH del Tablón, Panajachel, EFA, y el Novillero.



3.2.9.5 Recurso hídrico

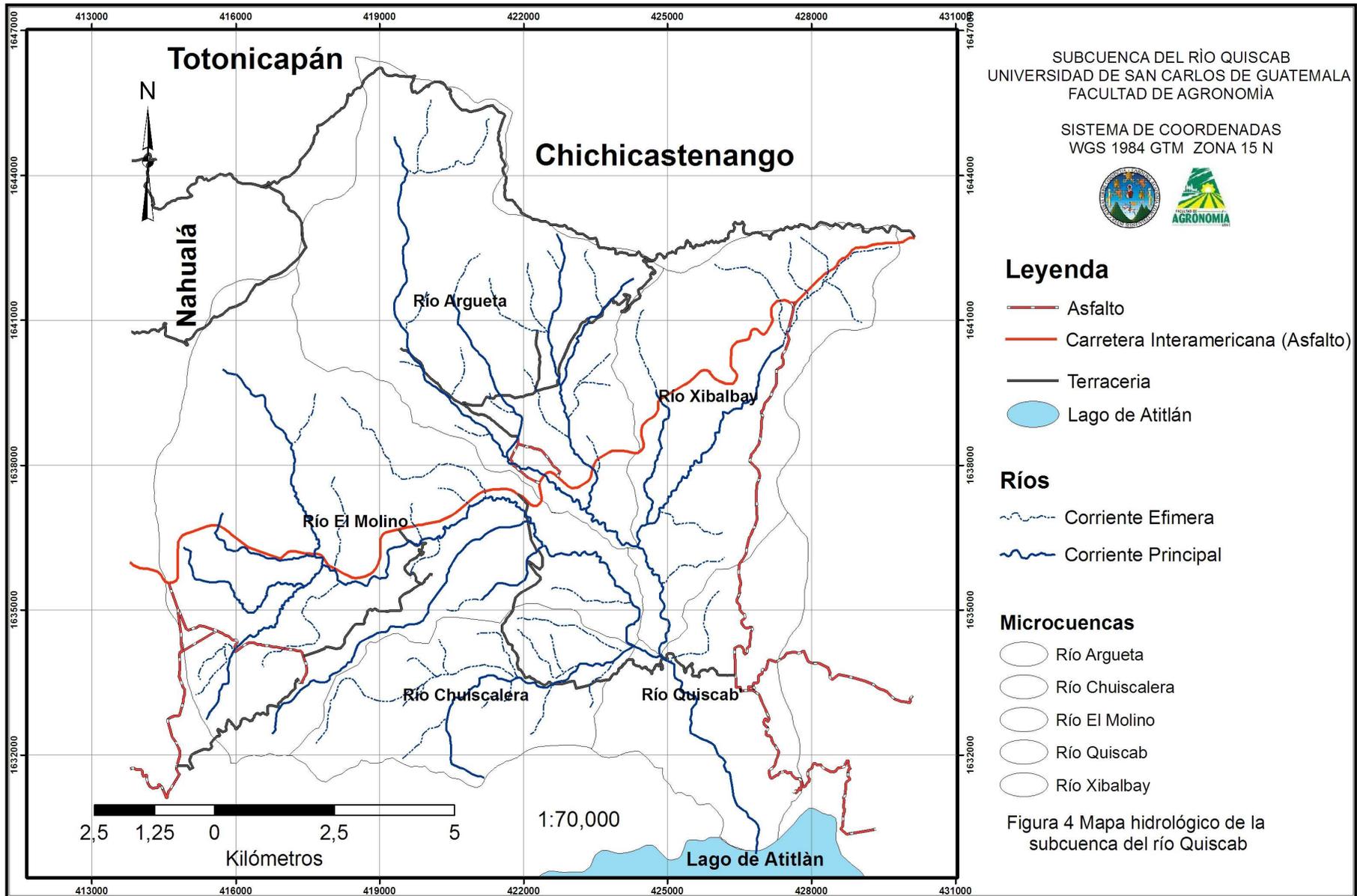
La subcuenca la conforman dos microcuencas: río Quiscab-Chuiscalera y la del río Xibalbay, a su vez, la subcuenca pertenece a la cuenca del lago Atitlán.

De acuerdo al criterio del grado de concentración de la red de drenaje la subcuenca es de orden 5, lo que indica que la ramificación del cauce principal es muy alta. La longitud media de corrientes es de 1.67 km. y el radio de longitud medio es de 0.51 km., estos datos dan a conocer que dentro de la subcuenca la mayoría de corrientes son longitudes cortas que presentan pendientes muy escarpadas principalmente en los cauces de los ríos Argueta, Xibalbay y Quiscab, el radio de longitud medio indica que el área de drenaje de estas corrientes será corto.

La subcuenca posee un área de 154.12 km² y de acuerdo al coeficiente de relación de forma posee una forma cuadrada con el punto de salida a un extremo, indicando que tiene retención de precipitación sin embargo es conveniente comparar esto con la infiltración del suelo, que en su mayoría son infiltraciones relativamente bajas y es moderadamente susceptible a inundaciones. El coeficiente de relación circular refleja que la forma de la subcuenca respecto a la forma circular se asemeja un 55%. Con el radio de elongación obtenido, se indica que el largo del cauce es un 80% del largo de la subcuenca.

La respuesta hidrológica de la subcuenca ante un evento de precipitación está dada por la densidad de drenaje, con un dato de 1.43 km² indica que la subcuenca posee drenaje moderado, suelos moderadamente erosionados o impermeables con pendientes fuertes e insuficiente cobertura vegetal en algunas áreas. La densidad y corriente es de 0.7 cauces / km², indicando que hay menos de una corriente /km² mostrando la baja deficiencia del moderado drenaje que existe.

La subcuenca presenta un relieve pronunciado pues la pendiente promedio es de 32%, con la alta pendiente también crece la velocidad del agua y su capacidad de erosión. La pendiente del cauce principal es ondulada, esto quiere decir que en ésta área la velocidad y capacidad de erosión disminuye, aunque es importante destacar que es la parte en la que hay menos cobertura, y por ello se eleva el contenido de sedimentos arrastrados en la parte baja de la subcuenca, principalmente en la playa fluvial y desembocadura del río Quiscab al lago de Atitlán. La elevación media de la subcuenca es de 2,500 msnm, lo que indica que existe un grado bajo de madurez de la misma, siendo una subcuenca joven, tomando en cuenta que tiene materiales de origen volcánico y su proceso de formación está ligado a la formación del lago de Atitlán.



3.2.9.6 Geología

Se ubicaron tres tipos de rocas predominantes en el área. En la parte media de la cuenca predominan rocas de tipo ígnea y metamórfica del periodo cuaternario, tendientes a formar rellenos y cubiertas gruesas de cenizas pómez de origen diverso (Qp). (MAGA, 2000)

En la parte alta y baja media, hay predominancia de rocas ígneas y metamórficas del periodo terciario. Son rocas volcánicas sin dividir, predominantemente del Mio-Plioceno, incluye Tobas, coladas de lava, material lahárico y sedimentos volcánicos (Tv). (MAGA, 2000). Hacia la parte final de desembocadura del cauce principal en un área bastante reducida predominan rocas sedimentarias, provenientes de aluviones cuaternarios (Qa). (MAGA, 2000).

3.2.9.7 Taxonomía de suelos

En cuanto a la taxonomía de suelos encontramos tres subórdenes:

a. Udands (Dd), presenta propiedades andicas, un régimen de humedad Udico, una fertilidad regular a alta, la presencia de humedad es bastante adecuada, alta presencia de materiales minerales, una regular a alta saturación de bases, contenido de materia orgánica medio – alto y sus principales limitantes radican en una alta retención de fosfatos y presencia de erodabilidad (MAGA, 2000).

b. Ustands (Ds), al igual que Udands presenta propiedades andicas, varia en su régimen de humedad ya que este posee un régimen Ustico, su fertilidad de regular a alta, esencialmente formado por materiales minerales, alta saturación de bases, regular a alto contenido de materia orgánica y posee factores limitantes tales como una deficiencia de humedad y la alta retención de fosfatos (MAGA, 2000).

c. Orthents (Eo), posee una fertilidad bastante baja, esencialmente constituido por materiales minerales, una saturación de bases muy variable, contenido de materia orgánica bastante bajo y sus principales limitantes la constituyen la pedregosidad y la escasa o nula profundidad (MAGA, 2000).

3.2.9.8 Cobertura forestal

a. Tipos de cobertura

Para el 2009, la subcuenca del río Quiscab presenta una extensión de 52.3 % de cobertura forestal, que incluye bosque mixto y de coníferas. Los bosques mixtos extendidos principalmente

en la parte baja de la cuenca donde se encuentran alturas de 1600 a 2100 msnm, y los bosques de coníferas están presentes primariamente en la parte alta de la cuenca donde se tienen altitudes hasta de 3,100 msnm. Seguido a los bosques se tienen las áreas agrícolas con 43.83%.

En la subcuenca del río Quiscab, existen cinco diferentes tipos de cobertura boscosa, los cuales son:

- Bosque ralo de pino,
- Bosque denso de pino,
- Bosque denso de pino con pinabete y
- Bosque ralo latifoliado con pino.

Por otro lado también se puede mencionar el área agrícola y el área urbana.

4 OBJETIVOS

4.1 General

Determinar el impacto del cambio del uso de la tierra en el comportamiento del ciclo hidrológico de la subcuenca del río Quiscab, Sololá.

4.2 Específicos

- Comparar la recarga hídrica anual que presenta la subcuenca del río Quiscab, en condiciones de capacidad de uso de la tierra, en las condiciones existentes de uso de la tierra de 1991 y 2009.
- Identificar las áreas críticas con mayor susceptibilidad a disminuir la recarga hídrica natural en la subcuenca del río Quiscab.
- Evaluar el impacto del cambio de uso y cobertura del suelo, en la magnitud de los caudales máximos de escorrentía para la subcuenca del río Quiscab, en condiciones de uso a capacidad, y en las condiciones existentes de uso de suelo para 1991 y 2009.
- Cuantificar los sedimentos en la escorrentía superficial a través de la medición de la pérdida de suelo en la subcuenca del río Quiscab.
- Generar lineamientos de manejo para minimizar el deterioro de la calidad del agua superficial de la subcuenca del río Quiscab.

5 METODOLOGÍA

Para el desarrollo del estudio, se llevó a cabo el siguiente proceso:

5.1 Determinación de la escala de mapas

El estudio se desarrolló con la elaboración de mapas a una escala de presentación de semidetalle (1:50,000), debido a que esta es la información cartográfica de más fácil acceso y manejo. Se necesitaron 5 mapas, 4 topográficos y 1 mapa geológico a escala 1:50,000, en el Instituto Geográfico Nacional IGN.

- Chichicastenango, Hoja 1960 I
- Sololá, Hoja 1960 II
- Santa Catarina Ixtahuacán, Hoja 1960 III
- Totonicapán, Hoja 1960 IV
- Mapa Geológicos, Hoja Sololá 1960 II

Los mapas temáticos elaborados de la subcuenca se realizaron utilizando el software ArcView GIS.

5.2 Establecimiento de escenarios para realizar la comparación

Para realizar este análisis del comportamiento de las áreas de recarga hídrica natural potencial en primera instancia se establecieron los escenarios bajo los cuales se realizó la comparación:

1. Uso de la tierra para 1991
2. Uso de la tierra para 2009
3. Uso correcto (Capacidad de uso de la tierra)

5.3 Definición de las unidades de mapeo

5.3.1 Elaboración del mapa de unidades fisiográficas

Mediante técnicas de interpretación cartográfica y fotointerpretación se definieron y delimitaron las unidades fisiográficas, paralelo a esto se realizó la leyenda fisiográfica respectiva. El análisis por el cual se definen las unidades fisiográficas, toma en cuenta los componentes de geología, clima, topografía, suelos e hidrografía, por ello las unidades fisiográficas definidas son válidas en esta investigación para tomarse como áreas de recarga hídrica ya que lo que se estudia

es el análisis de cambio de uso de la tierra en todo el ciclo hidrológico, no específicamente en la recarga hídrica potencial de la subcuenca.

5.3.2 Elaboración del mapa de pendientes

En este mapa se clasificaron las diferentes unidades por pendiente tomando como base las curvas a nivel de la hoja cartográfica a escala 1:50,000 correspondiente al área de estudio, esta se elaboró de forma manual con la separación visual y utilizando como herramienta la plantilla de círculos para pendientes perteneciente a la región fisiográfica "Tierras altas volcánicas. Con rangos de 0 a 11%, de 12 a 25%, de 26 a 35%, de 36 a 55% y mayores de 55%.

5.3.3 Verificación de los límites de las unidades de mapeo

En las visitas de campo se realizaron caminamientos, observaciones visuales especialmente en el relieve y se verificaron las distintas unidades fisiográficas que fueron delimitadas con anterioridad en base en criterios fisiográficos.

5.3.4 Determinación de profundidades de suelos y factores modificadores

Sobre el mapa de unidades fisiográficas y en observación directa de campo, se anotaron las profundidades efectivas de los suelos mediante barrenamientos y observación en los cortes de carretera en cada unidad fisiográfica previamente delimitada en gabinete y verificada en campo. Adicionalmente en cada unidad se observó el nivel en que se manifiestan los factores modificadores (pedregosidad y drenaje). La profundidad efectiva de suelos y los factores modificadores (pedregosidad y drenaje), se midieron y observaron sobre el mapa de unidades fisiográficas, áreas limitantes que posteriormente fueron utilizados en la asignación de categorías de capacidad de uso de la tierra.

5.4 Elaboración de escenarios

5.4.1 Mapa de uso de la tierra para 1991 (escenario 1)

Con la ayuda de las fotografías áreas análogas tomadas en 1991, escala 1:60,000 que corresponden al área de estudio, se delimitó el área y se obtuvo la información del uso de la tierra para esa época por medio de la fotointerpretación. Se utilizó la leyenda de uso de la tierra

propuesta por la Unión Geográfica Internacional (UGI), adecuada para el medio guatemalteco por el Ing. Agr. Gilberto Alvarado.

5.4.2 Mapa de uso de la tierra para 2009 (escenario 2)

Se realizó un mapa preliminar de uso de la tierra, en términos de cobertura, utilizando para el efecto la leyenda de uso de la tierra propuesta por la Unión Geográfica Internacional (UGI), adecuada para el medio guatemalteco por el Ing. Agr. Gilberto Alvarado. Dicho mapa incluye las siguientes categorías: Centros urbanos o poblados, tierras con cultivos (anuales o permanentes), Hortalizas, tierras con bosque (puro o mixto, de coníferas o latifoliadas), que serán las categorías de interés para el estudio. Como base para este mapa se utilizó el mosaico de fotografías georeferenciadas del 2006 en formato digital (Ortofotos), con las cuales se delimitó el uso de la tierra para 2006 para luego verificarlo en el campo mediante caminamientos y observaciones posteriores. Después al mapa de uso de la tierra para 2006 se verificó y se realizaron los cambios correspondientes para presentar un mapa de uso de la tierra para 2009.

5.4.3 Determinación de la capacidad de uso de la tierra (escenario 3)

Para la capacidad de uso de la tierra se utilizó la metodología del Instituto Nacional de Bosques (INAB), para la clasificación de tierras por Capacidad de Uso. A cada unidad fisiográfica identificada y verificada en campo, con base en los niveles adoptados por cada factor limitante (Pendiente y Profundidad efectiva), que se anotó en campo en el proceso de verificación de unidades, se le asignó una categoría de capacidad de uso de la tierra a cada unidad fisiográfica.

Posteriormente, esta categoría se analizó a la luz de los factores modificadores pedregosidad y drenaje, también tomados en campo por cada unidad fisiográfica; a efecto de determinar la categoría de capacidad de uso definitiva. El producto resultante fue el Mapa de Capacidad de Uso de la Tierra.

Las categorías propuestas por esta metodología son las siguientes:

- A: Agricultura sin limitaciones
- Aa: Agricultura con cultivos anuales.
- Am: Agricultura con mejoras.
- Ap: Agricultura con cultivos permanentes.
- F: Forestal de producción.

Fp: Forestal de protección.

Ss: Sistemas silvopastoriles.

Luego de haber elaborado los mapas de uso de la tierra para 1991 y 2009, así como el de Capacidad de uso de la tierra, se procedió a la realización de los balances hídricos de suelos.

5.5 Estimación de la recarga hídrica potencial

5.5.1 Monitoreo de la información climática

Para el monitoreo de las temperaturas máximas, mínimas y precipitación pluvial en las estaciones meteorológicas se realizó de la manera siguiente.

5.5.1.1 Estación Panajachel

La estación se localiza en el Municipio de Panajachel, es tipo “C” cuenta con un termómetro de máxima y mínima y un pluviómetro, realizando lecturas diarias por el propietario del lugar donde se instaló la estación y monitoreada por el estudiante del ejercicio profesional supervisado de Agronomía (EPSA).

5.5.1.2 Estación EFA.

En la Escuela de Formación Agrícola, se instaló una estación de tipo “C”, cuenta con termómetros de máxima y mínima y un pluviómetro, en la cual se realizan lecturas diarias por personal y estudiantes de la escuela.

5.5.1.3 Estación El Tablón.

Esta estación se ubica en la aldea El Tablón, municipio de Sololá, es una estación tipo “A”, y es monitoreada por personas del lugar y supervisados por técnicos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, (INSIVUMEH).

5.5.1.4 El Novillero

La estación se ubica en la parte oeste de la subcuenca del río Quiscab en la aldea El Novillero, Santa Lucía Utatlán, y es una estación de tipo “C”, cuenta con un termómetro de máxima y mínima y un pluviómetro, en el cual las lecturas son realizadas por los trabajadores del área.

Los datos climáticos generados, se tabularon en datos medios mensuales de precipitación pluvial y temperatura máxima y mínima.

Cuadro 6. Ubicación geográfica y equipo de las estaciones meteorológicas situadas en la subcuenca del río Quiscab.

Estación	Ubicación	Coordenadas		Altitud (msnm)	Equipo	Tipo
		N	W			
Panajachel	Panajachel	14°44'46.7"	91°9'5.2"	1590	- Pluviómetro - Termómetros de máx. y mín.	C
Corazón del Bosque	Aldea El Novillero, Santa Lucia Uatlán	14°47'31.4"	91°15'44"	2380	- Termómetros de máx. y mín. - Pluviómetro	C
El Tablón	Aldea El Tablon, Sololá	14°48'36"	91°10'40.4"	2400	- Pluviógrafo - Termómetro de máx. y mín.	A
EFA	Sololá	14°45'43.55"	91°10'6.15"	2060	- Pluviómetro - Termómetro de máx. y mín.	C

5.5.2 Medición de la información climática

5.5.2.1 Precipitación

Pluviómetros: El pluviómetro que se utiliza es uno estándar que tiene un colector con un diámetro de 20 cm. donde la lluvia pasa hacia un cilindro medidor o una probeta que se encuentra dentro del recipiente vertido. Según Herrera (1995), El tubo medidor tiene un área transversal que es un décimo de aquella del colector, de tal manera que 1 mm. de lluvia llenará el tubo en 1 cm. por lo tanto, 1 mm de altura de lluvia equivale a 1 l/m². La información generada se presenta en mm/mes y mm/año.

5.5.2.2 Temperatura

La temperatura fue tomada en el campo por medio de un termómetro que mide la temperatura máxima y mínima, la temperatura media se estimó realizando la suma de los valores de temperatura máxima y mínima y luego dividido dos.

5.5.2.3 Evapotranspiración

Para la determinación de la evapotranspiración, se utilizó el método de Hargreaves debido a que éste método está diseñado para la región centroamericana y por ser un método práctico y confiable.

5.5.3 Estimación de la infiltración básica de los suelos

Se realizaron pruebas de infiltración básica de los suelos, utilizando el método de Porchet o cilindro invertido. El procedimiento fue el siguiente:

- Para la realización de esta prueba fue necesario limpiar el área, hacer un agujero utilizando un barreno.
- Se excava un agujero con radio y altura conocida, se le agrega agua cerca del punto de saturación del suelo y se toman las lecturas en intervalos de tiempo conocidos.
- El radio del cilindro se conoce como R, la altura conocida h, y el cambio de tiempo dt para encontrar la capacidad de infiltración f.
- Para determinar f se utilizó la siguiente ecuación:

$$f = (R/2(t_2-t_1)) * \ln ((2h_1 + R)/(2h_2 + R))$$
- Y para determinar f, basto medir pares de valores (h₁, t₁), (h₂, t₂), de forma que t₂ y t₁ no difieran demasiado y entrar con ellos en la expresión dada.

5.5.4 Determinación de constantes de humedad y densidad aparente

- Se realizó muestreos de suelos y se llevo al laboratorio de análisis de suelo y agua "Salvador Castillo" de la Facultad de Agronomía para realizar los siguientes análisis:
- Densidad aparente
- Textura
- Constantes de humedad (capacidad de campo y punto de marchites permanente).

5.5.5 Determinación de la evapotranspiración potencial

Para la determinación de la evapotranspiración, se utilizó el método de Hargreaves debido a que éste método está diseñado para la región centroamericana y por ser un método práctico y confiable. La ecuación es la siguiente:

$$ETP = 0.0075 \times TMF \times RSM$$

Donde:

ETP: Evapotranspiración en mm/mes

TMF: Temperatura media mensual en grados Fahrenheit

RSM: Radiación solar incidente mensual

$$RSM = 0.075 \times RMM \times S^{1/2}$$

Donde:

RMM: Radiación mensual extraterrestre en mm/mes. (Cuadro 5)

S: Brillo medio mensual en (%)

$$RMM = RS \times \text{No. de días del mes}$$

Donde:

RS: Radiación solar (Cuadro 5)

$$S = K_s \times (100 - HR)^{1/2}$$

Donde:

Ks: Constante para Centroamérica igual a 12.5

HR: Humedad relativa media en %

En el área de estudio no se cuenta con datos de humedad media, el brillo medio mensual se calculó por medio de tablas y se aplica la siguiente fórmula:

$$S = \left(\frac{N}{24} \right) \times 100$$

Donde:

N: Número de horas de brillo solar

Cuadro 7 Valores medios mensuales de radiación solar extraterrestre (mm/día).

Latitud Norte	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	15.07	15.53	15.71	15.27	14.47	13.97	14.19	14.95	15.61	15.66	15.23	14.90
5	14.23	14.96	15.56	15.55	15.09	14.74	14.90	15.39	15.63	15.24	14.47	13.98
10	13.30	14.28	15.27	15.72	15.61	15.42	15.51	15.72	15.54	14.71	13.61	12.98
15	12.29	13.51	14.83	15.77	16.02	16.00	16.02	15.93	15.33	14.07	12.66	11.91
20	11.20	12.64	14.37	15.70	16.32	16.48	16.42	16.04	15.00	13.33	11.63	10.76

Fuente: Herrera. 2002

Cuadro 8 Duración máxima, media y diaria de horas de brillo solar para diferentes meses y latitudes.

Latitud Norte	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
5	11.8	11.9	12.0	12.2	12.3	12.4	12.3	12.3	12.1	12.0	11.9	11.8
10	11.6	11.8	12.0	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.8	11.6	11.5
15	11.3	11.6	12.0	12.5	12.8	13.0	12.9	12.6	12.2	11.8	11.4	11.2
20	11.0	11.5	12.0	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9

Fuente: Padilla, T; Salguero, M; Orozco, E. 2003.

5.5.6 Determinación de precipitación efectiva

Para la determinación de la precipitación media en el área de estudio, se utilizó el método de las isoyetas debido a que se adapta mejor a las características de la subcuenca del río Quiscab porque toma en cuenta los accidentes geográficos. Se utilizó la siguiente ecuación:

$$P_m = \frac{\sum (P_i \times A_i)}{A_t}$$

Donde:

P_m: Precipitación media

P_i: Precipitación media entre dos isoyetas.

A_i: Área entre dos isoyetas y el parte aguas de la cuenca.

A_t: Área total.

Para la determinación de la precipitación efectiva se utilizó el método de Schosinsky & Losilla (2003). La fórmula general generada por Schosinsky y Losilla (2003) para la determinación de la precipitación efectiva es la siguiente: $P_{ef} = (1 - K_i) \times C_i \times P$

Donde:

P_{ef}: Precipitación efectiva (precipitación que infiltra)

P: Precipitación mensual

C_i: Coeficiente de infiltración.

K_i: Valor de retención vegetal (para bosque es de 0.20; para cultivos en general 0.12 y para techos de casas, caminos y áreas construidas, es de 0.10 a 0.05)

La relación entre la infiltración y precipitación, la infiltración y pendiente y la infiltración y cobertura vegetal, estos aspectos proporcionan el coeficiente de infiltración para un determinado suelo e indica la capacidad de infiltración del mismo.

$$Ci = K_{fc} + K_p + K_v$$

Donde:

Ci: Coeficiente de infiltración

K_{fc}: Factor de infiltración por efecto del suelo

K_p: Factor de infiltración por efecto de la pendiente

K_v: Factor de infiltración por efecto de la cobertura vegetal.

Schosinsky G. (2007), obtuvo una ecuación que relaciona la capacidad de infiltración de agua en el suelo (infiltración básica) con la intensidad de la lluvia, y es la siguiente:

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

Donde:

K_{fc}: Factor de infiltración de agua en el suelo e intensidad de lluvia.

Ln: Logaritmo neperiano (natural)

fc: Valor de infiltración básica en mm/día

Los valores del factor de infiltración por efecto de la pendiente (K_p) y el factor de infiltración por efecto de la cobertura vegetal (K_v) propuestos por Schosinsky (2007), se presentan a continuación:

Cuadro 9 Valores de Infiltración básica por efecto de la pendiente (K_p)

Pendiente	%	Coeficiente
Muy plana	0.02 – 0.06	0.30
Plana	0.3 – 0.4	0.20
Algo plana	1 – 2	0.15
Promedio	2 – 7	0.10
Fuerte	> 7	0.06

Fuente: Schosinsky 2007

Cuadro 10 Valores de Infiltración básica por efecto de la cobertura vegetal (Kv)

Cobertura vegetal	Coefficiente
Zacate (< 50%)	0.09
Terrenos cultivados	0.10
Con pastizales	0.18
Bosques	0.20
Zacate (> 75%)	0.21

Fuente: Schosinsky 2007

El factor Kv, se obtuvo mediante el mapa de cobertura vegetal de la subcuenca del río Quiscab.

5.5.7 Cálculo de balances hídricos de los suelos

Se realizaron los balances hídricos de suelos en cada área de recarga hídrica (unidad fisiográfica) para los tres escenarios que se establecieron anteriormente, que son:

Escenario 1: Uso a capacidad

Escenario 2: Uso de la tierra para 1991

Escenario 3: Uso de la tierra para 2009

Actualmente se cuenta con diferentes métodos para el cálculo de balances hídricos, de suelos, este proceso es muy laborioso y mecánico por lo que se estimó el balance hídrico del suelo, utilizando una hoja de cálculo en Excel, elaborado por Schosinsky, G (2007), en la cual se ingresaron las variables: características físicas del suelo (textura, densidad aparente), infiltración básica, constantes de humedad (CC y PMP), clima (precipitación y ETP), cobertura y profundidad radicular. Luego de tener los balances hídricos por cada una de las áreas, se realizaron cuadros comparativos que muestran las diferentes características de los balances hídricos correspondientes a los diferentes escenarios.

5.5.8 Cálculo de recarga hídrica potencial

Se realizaron los cálculos para la estimación de la recarga hídrica potencial en mm/año y m³/año en cada área de recarga hídrica (unidad fisiográfica) para los tres escenarios que se establecieron anteriormente; luego se elaboraron cuadros comparativos de estos datos.

5.5.9 Determinación de áreas críticas de recarga hídrica

Se evaluaron las recargas hídricas potenciales de los tres escenarios en estudio realizando cuadros comparativos para clasificar y analizar la susceptibilidad de áreas a ser consideradas áreas críticas de recarga hídrica.

Las áreas críticas se establecieron considerando aspectos geológicos, infiltración, recarga anual y pendiente. Para determinar las áreas críticas de recarga hídrica se utilizaron ciertos criterios que se identificaron en el manual de recarga hídrica, donde para cada uno de estos aspectos se utilizan criterios o categorías, los cuales fueron evaluadas en cada uno de los aspectos y luego la sumatoria de todos los códigos dio como resultado la categoría de cada área. (Padilla, et al. 2003). Las categorías a considerar serán las siguientes:

Cuadro 11 Matriz de criterios de geología para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural

Geología	Código
Rocas ígneas o metamórficas no fracturadas	0
Rocas ígneas o metamórficas fracturadas	1
Arenas finas, basaltos permeables, karst	2
Arenas gruesas y gravas	3

Fuente: Padilla, et al. 2003.

Cuadro 12 Matriz de criterios de infiltración básica para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural

Tasa de Infiltración Básica (cm/hr)	Código
< 0.15	0
0.15 – 1.5	1
>1.5 – 15	2
>15	3

Fuente: Padilla, et al. 2003.

La tasa de infiltración tiene influencia en la velocidad con la cual el agua penetra en las primeras capas del suelo, mientras mayor sea esa tasa de infiltración mayor será la oportunidad de las precipitaciones de infiltrar en el perfil del suelo, los valores más bajos de tasas de infiltración son para suelos de granulometría fina los cuales causan mayor escorrentía al momento de intensidades de lluvia altas. (Padilla, 2003).

Cuadro 13 Matriz de criterios de recarga anual para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural

Recarga anual (mm/año)	Código
0 – 50	0
50 – 100	1
100 – 150	2
150 – 200	3
>200	4

Fuente: Padilla, et al. 2003.

Cuadro 14 Matriz de criterios de pendiente para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural

Pendiente (%)	Código
0 – 12	0
12 – 26	1
26 – 36	2
36 – 55	3
> 55	4

Fuente: Padilla, et al. 2003.

La pendiente es un factor importante pues es determinante al momento de la escorrentía y sus efectos al suelo, los suelos con relieves más planos no favorecen la escorrentía del agua y permiten un mayor tiempo de contacto del agua con el suelo favoreciendo la infiltración, mientras que suelos de altas pendientes aumentan la velocidad de la escorrentía, por lo tanto se consideran críticas las áreas que tienen altas pendientes por el grado de degradación que pueden causar y la alteración de las condiciones actuales de recarga de estas áreas. (Padilla, 2003)

Cuadro 15 Criterios de susceptibilidad de áreas a ser consideradas áreas críticas de recarga hídrica natural

Categoría	Rango
Baja	0 – 5
Moderada	6 – 9
Alto	10 – 12
Muy alta	13 – 14

Fuente: Padilla, et al. 2003.

5.6 Estimación de los caudales máximos de escorrentía

5.6.1 Método racional

Esta metodología se utilizó para calcular caudales máximos esperados en función de características de suelo y cobertura e intensidad de lluvia. Según este método el caudal pico o máximo se define con la expresión:

$$Q_p = 0.278 CiA$$

Donde:

Q_p = gasto o caudal máximo (m^3/s)

C = coeficiente de escurrimiento;

I = intensidad media de la lluvia para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca, en mm/h;

A = es el área de la cuenca drenada, en km^2 .

La intensidad de lluvia se calculó para un periodo igual al tiempo de concentración de la cuenca, por lo que se realizó una estimación del tiempo de concentración de la cuenca. Estos métodos de estimación se basan fundamentalmente en la pendiente y longitud del cauce principal, para obtener un dato promedio de tiempo de concentración se efectuó el cálculo con ayuda de las fórmulas de Kirpich, Bransby Williams y de Chow, las cuales son ampliamente utilizadas y el dato final utilizado fue el promedio del resultado de estos tres métodos.

La intensidad de lluvia se obtuvo de las ecuaciones correspondientes a las curvas de intensidad-duración-Frecuencia (Curvas IDF) de la estación Santiago Atitlán, elaboradas por el INSIVUMEH, dentro del estudio de intensidades de precipitación en la república de Guatemala en el 2004; lo cual se tomó de base para el cálculo de la intensidad probable para la duración estimada de concentración de la cuenca y en diferentes periodos de tiempo o periodos de retorno.

Los coeficientes de escorrentía se obtuvieron a partir de valores de tablas, descritas en el marco conceptual (Cuadro 1 y 2).

5.7 Escorrentía superficial

Para la realización de los aforos se utilizó el método de sección velocidad, en cada uno de los puntos de aforo se realizó la medición del caudal de manera mensual en m^3/s .

Los puntos de aforo ubicados fueron 12, siendo éstos: Hierbabuena, Xibalbay, Chuiscalera, Chuiscalera San José, Xiquel, Novillero Puente, Novillero, Argueta, Maria Tecún, Xaquijya, Xibalbay La Cuchilla y Quiscab. Los aforos fueron realizados de manera mensual durante el período de septiembre del 2007 al mes de agosto del 2008.

5.7.1 Determinación del área de la sección

Esta fue determinada por mediciones de ancho y profundidad del cauce. Las profundidades, y el ancho del cauce fue dividido en tramos o secciones con distancias conocidas, en el cual se tomaron las profundidades de inicio y al final del tramo, para luego obtener la media de profundidad y multiplicarlo por el ancho de la sección, así se obtuvo el área en metros cuadrados.

5.7.2 Determinación de la velocidad

La determinación de la velocidad se efectuó por medio de flotadores, para lo cual se escogió un tramo recto dentro del cauce, libre de obstáculos, luego se dividió en tres secciones, las cuales son las orillas y el centro del río, para obtener la velocidad se tomo el tiempo que tardo en recorrer el tramo de longitud conocida, siendo la velocidad distancia recorrida por el tiempo que tardo. El valor obtenido en la velocidad (m/seg) al multiplicarlo por el área (m²), dará el caudal del río (m³/seg)

5.8 Estimación de la cantidad del suelo perdido

5.8.1 Prueba de sedimentos

Para la determinación de los sedimentos contenidos en el caudal, en cada aforo realizado se tomaron muestras de agua de 1 litro. Luego en el laboratorio se tomaron 100 ml de cada una de las muestras que se pasó por un papel filtro tarado previamente, colocado en un embudo, para obtener el total de la materia en suspensión. Cuándo el papel filtro se secaba, después se taraba y se les resto el peso del papel filtro para obtener la cantidad de sedimentos suspendidos en los 100 ml para luego hacer la relación de un litro de agua del cauce.

Esta cantidad de sedimentos se relacionó con el caudal del cauce principal y así se logro una estimación de los sedimentos arrastrados por hectárea, como el total de sedimentos que llegan al lago de Atitlán.

Las partículas de suelo obtenidas se relacionaron con el volumen total de escurrimiento y el área de drenaje de cada punto de aforo para determinar cantidad de suelo perdido por unidad de área y unidad de tiempo, TM/ha/año; relacionando la cobertura y uso del suelo con esas pérdidas.

5.9 Proceso de la investigación

5.9.1 Flujograma del proceso de la información

El proceso de la presente investigación se representa a través del siguiente flujograma, en donde se manifiesta la dinámica de las actividades realizadas.

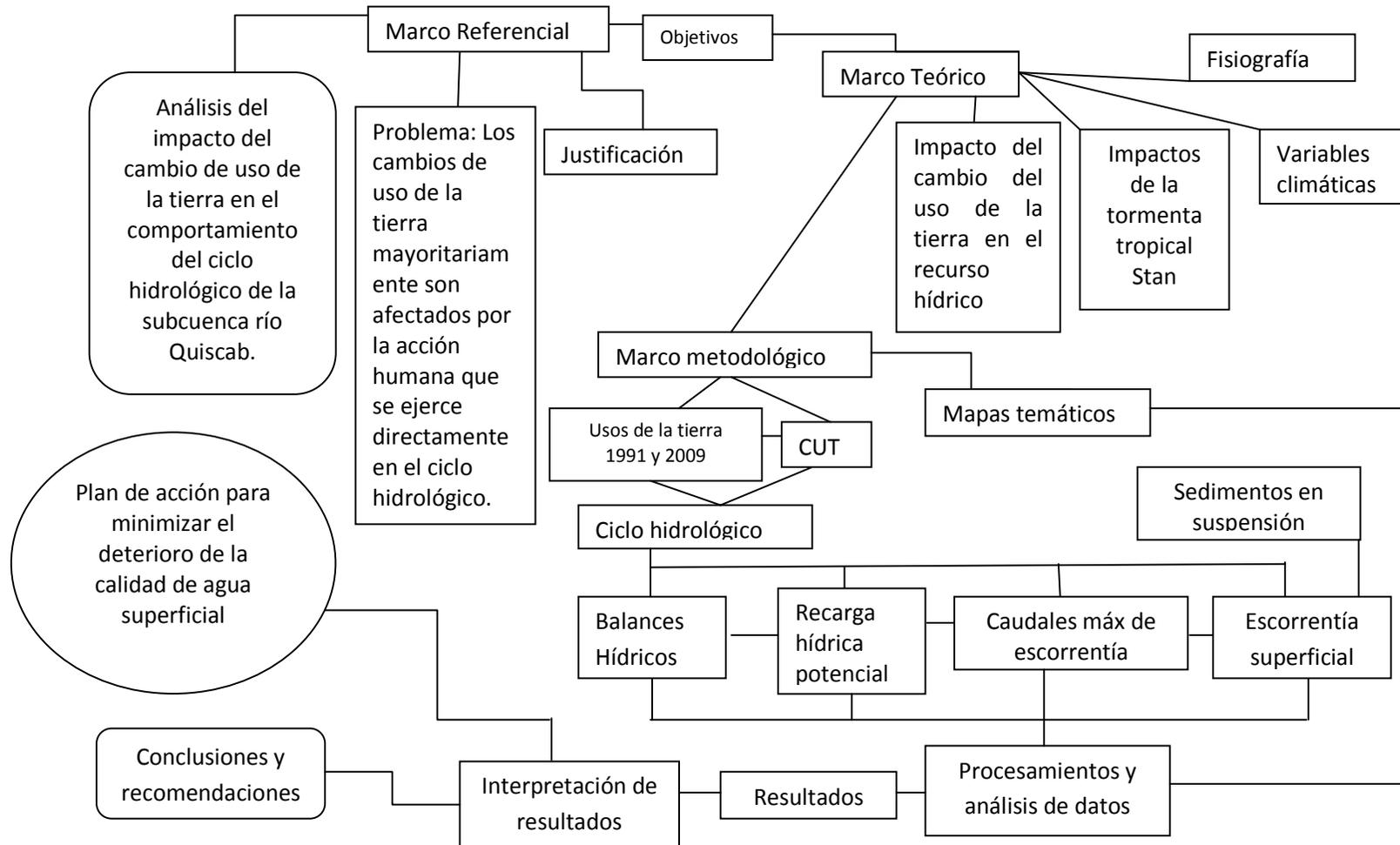


Figura 1 Flujo del proceso de la información.

6 RESULTADOS

6.1 Definición de las unidades de mapeo

6.1.1 Elaboración del mapa de unidades fisiográficas

EL mapa de unidades fisiográficas se realizó interpretando la fisiografía del lugar las montañas, altiplanicies, planicies, etc. Por medio de la fotointerpretación se definieron las unidades. Primero se examinaron las zonas de vida que abarca la subcuenca, se encuentran tres zonas de vida que según el sistema de Clasificación de Holdrige y modificado por De la Cruz (1982) son: Bosque muy Húmedo Montano Subtropical, Bosque Muy Húmedo Montano Bajo Subtropical y Bosque Húmedo Montano Bajo Subtropical; luego se revisó la memoria técnica de la fisiografía de la república, en la cual se encontró que la región fisiográfica tierras altas volcánicas es en la que encuentra la subcuenca del río Quiscab, abarcando únicamente la subregión fisiográfica Zona Montañosa Occidental (Tacaná-Tecpán), la cual está conformada por un ambiente volcánico por excelencia. Los principales materiales geológicos son rocas volcánicas, lavas, brechas, conglomerados y cenizas volcánicas; coladas de lava, lapilli, andecitas, basaltos, materiales piroclásticas, sedimentos aluviales. En este ambiente hay geoformas; Terciario Superior, Cuaternario Tardío y Cuaternario.

La geología y fisiografía esta región es muy peculiar debido a los procesos de formación de los mismos, los cuales dieron origen a unidades de grandes paisajes que abarcan la subcuenca, siendo éstos, Montañas Volcánicas Altas del Occidente, Relleno Piroclástico alrededor de la caldera de Atitlán, Montañas y Laderas alrededor de la caldera de Atitlán y Caldera de lago de Atitlán. Para la elaboración del mapa fisiográfico de la subcuenca se establecieron 28 elementos del paisaje, los cuales son las 28 unidades fisiográficas que se usaron como base para la elaboración del mapa de pendientes, de profundida efectiva, el de capacidad de uso de la tierra y también para el balance hídrico de los suelos.

Los elementos del paisaje se describen en la leyenda fisiográfica que no es más que el resultado del análisis geomorfológico realizado.

Cuadro 16. Leyenda Fisiográfica de la subcuenca del río Quiscab, Sololá.

Región Fisiográfica	Subregión	Gran Paisaje	Paisaje	Subpaisaje	Elementos Del paisaje	Código	
Tierras Altas Volcánicas	Zona Montañosa Occidental (Tacaná-Tecpán)	Montañas Volcánicas Altas del Occidente A	Zona Alta	Cima y Ladera	Ladera Escarpada del Cerro María Tecún	A.1.1.1	
					Cima y ladera del Cerro Tzampual	A.1.1.2	
					Ladera Poco escarpada del Cerro María Tecún	A.1.1.3	
				Altiplanicie	Altiplanicie María Tecún	A.1.2.1	
					Altiplanicie Pajaj	A.1.2.2	
			Zona Media	Escarpes	Escarpes del Río Argueta	A.2.1.1	
				Talud y cauce	Talud y cauce del Río Parracana	A.2.2.1	
			Relleno Piroclástico alrededor de la caldera de Atitlán B	Zona Media	Planicies	Planicie Chuiquel	B.1.1.1
						Planicie Ondulada Chijcajá	B.1.1.2
						Planicie Ondulada Cuchexic	B.1.1.3
		Planicie Chacayá				B.1.1.4	
		Escarpes		Escarpes del Río Xibalbay	B.1.2.1		
				Escarpes del Río Santa Rita	B.1.2.2		
		Zona Media		Talud y cauce	Talud y cauce del Río Argueta	B.1.3.1	
					Talud y cauce del Río Chuiscalera	B.1.3.2	
					Talud y cauce del Río Novillero	B.1.3.3	
					Talud y cauce del Río Pamacha	B.1.3.4	
					Talud y cauce del Río Barreneché	B.1.3.5	
					Talud y cauce del Río Las Flores	B.1.3.6	
		Montañas y Laderas alrededor de la caldera de Atitlán C		Zona Media	Colinas	Colina del Cerro Saquilak	C.1.1.1
			Colina del Cerro San Marcos			C.1.1.2	
			Colina del Cerro Chichimuch			C.1.1.3	
			Colina del Cerro de las Minas			C.1.1.4	
			Colina del Cerro Xucujá			C.1.1.5	
			Altiplanicie	Altiplanicie Ondulada Sololá	C.1.2.1		
		Altiplanicie El tablón		C.1.2.1			
		Caldera de Lago de Atitlán	Zona Baja	EsCARPE	Escarpes del Río Quiscab	D.1.1.1	
Playa	Playa aluvial del Río Quiscab			D.1.2.1			

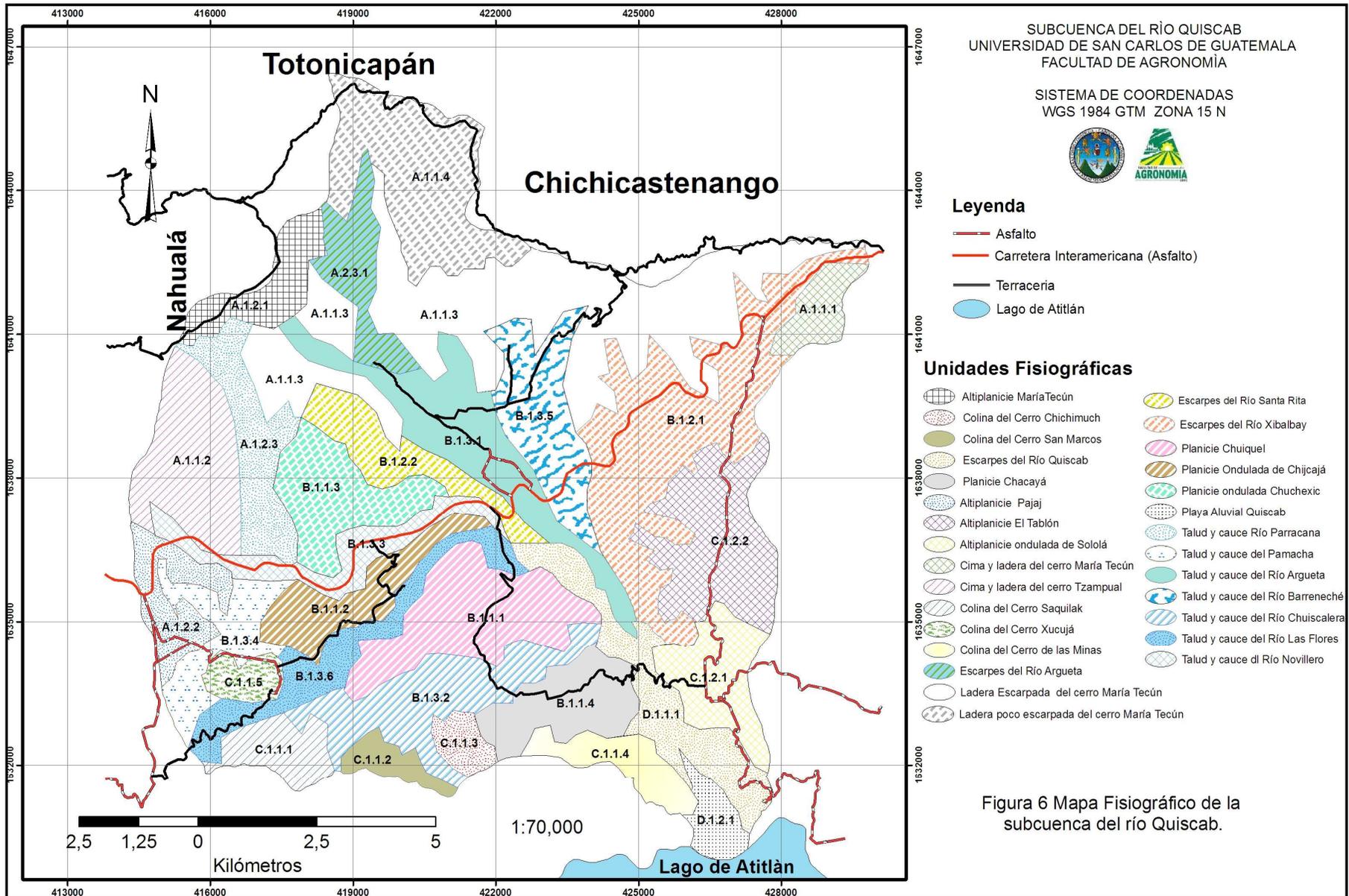


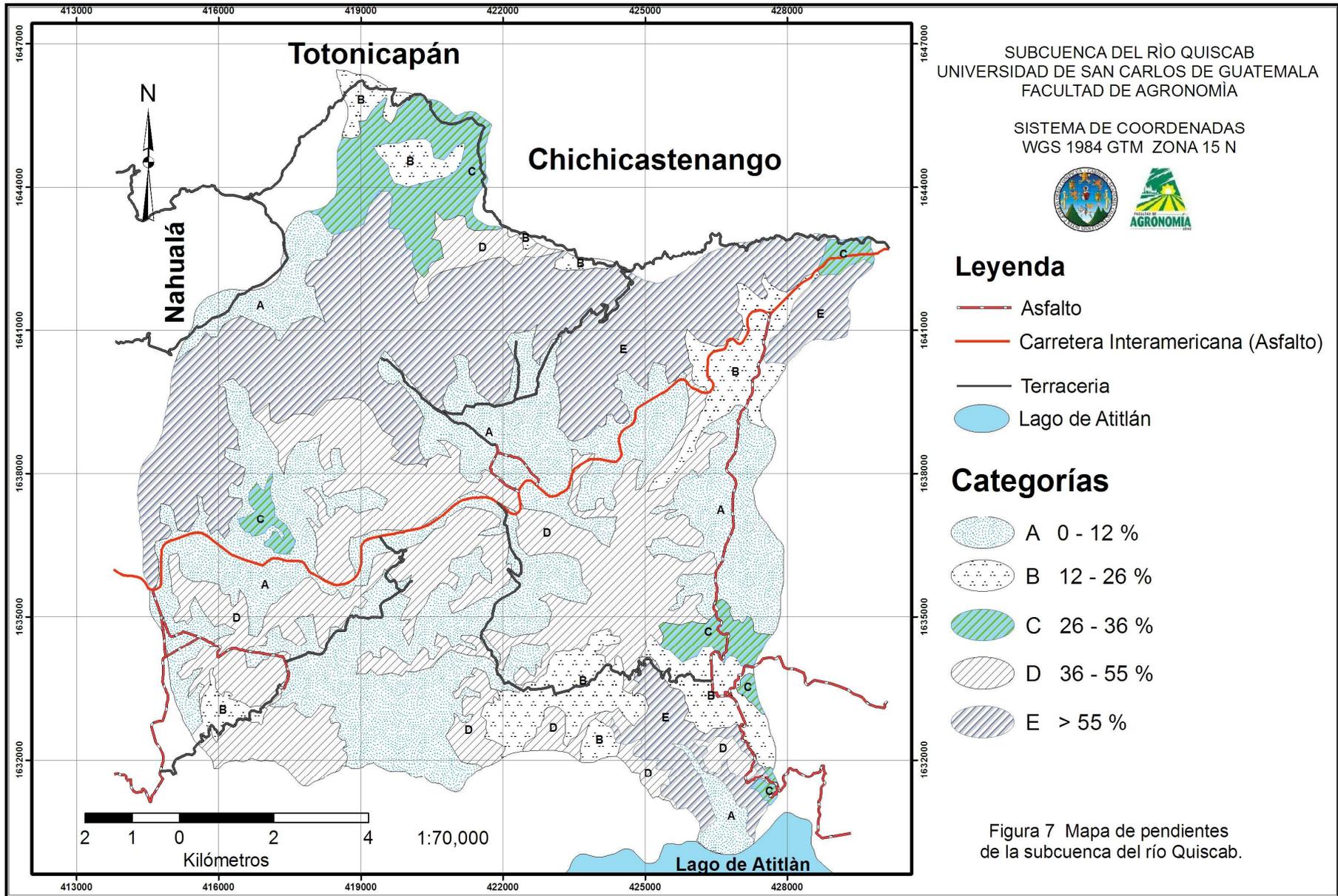
Figura 6 Mapa Fisiográfico de la subcuenca del río Quiscab.

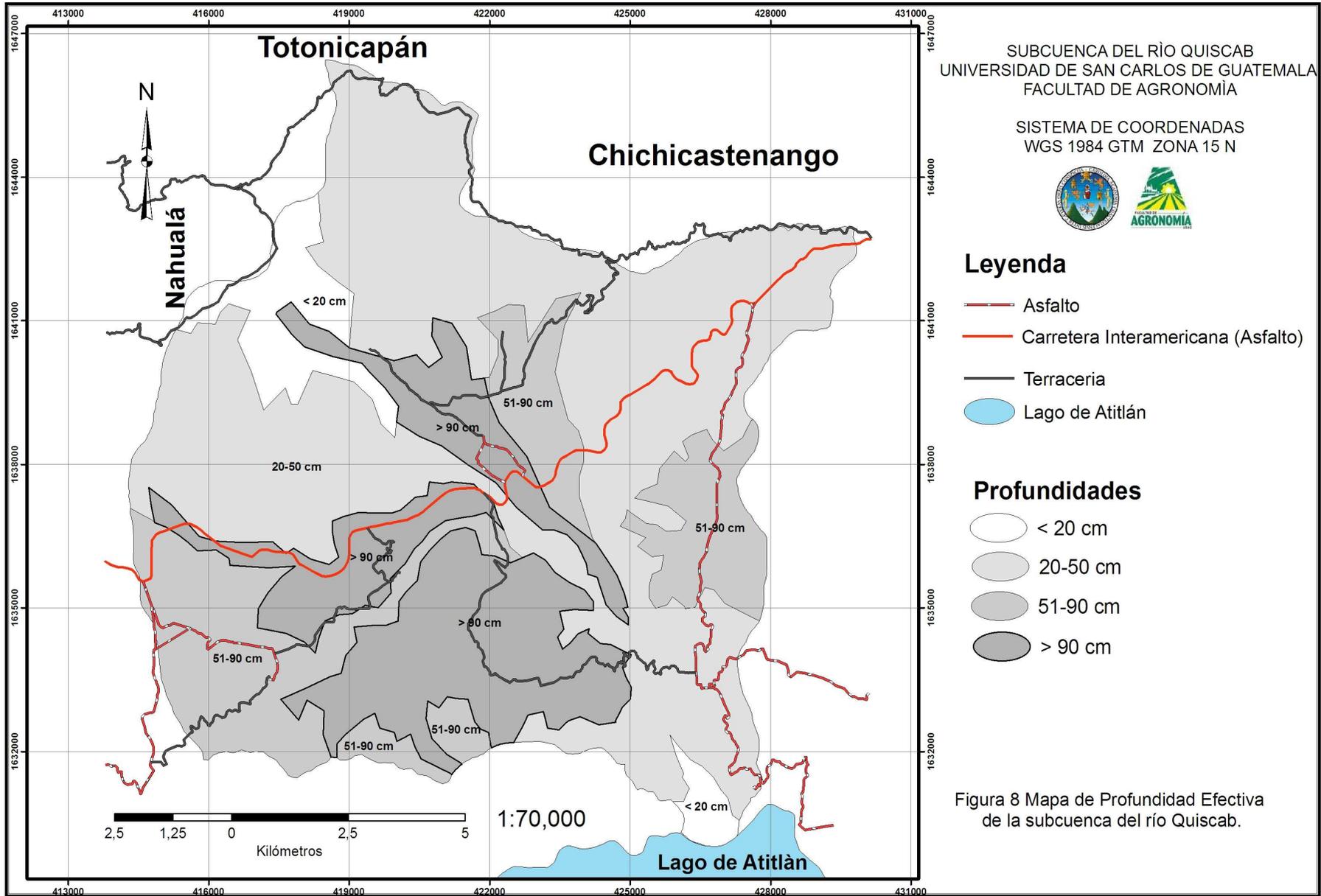
6.1.2 Elaboración del mapa de pendientes

En el área que abarca el sistema montañoso de la cumbre María Tecún se encuentran las pendientes más altas con un porcentaje $> 55 \%$; en la zona media se ubican áreas moderadamente escarpadas con pendientes que van de 36-55% y en el área de relleno de la caldera del lago de Atitlán existen planicies un tanto onduladas, la subcuenca del río Quiscab también posee áreas montañosas muy escarpadas, específicamente en áreas aledañas a los ríos Quiscab, Xibalbay, Santa Rita y Argueta.

6.1.3 Elaboración del mapa de profundidad efectiva

La profundidad efectiva se determinó a través de barrenaminetos y observaciones en los cortes de carretera dentro de cada unidad fisiográfica. Los suelos de la subcuenca del río Quiscab en su mayoría no son muy profundos, la profundidad efectiva que predomina en el área se encuentra en el rango de 20-50 cm. Los suelos con profundidad efectiva $< a 20$ cm, se encuentran en la altiplanicie María Tecún y en la playa fluvial. Los suelos más profundos dentro del área se localizan en el la zona de rellenos de la caldera de Atitlán.





6.2 Elaboración de escenarios

Se determinaron los escenarios sobre los cuales se realizó el análisis del comportamiento del uso de la tierra los cuales son:

- Capacidad de uso de la tierra: Es el uso que la subcuenca del río Quiscab, es capaz de soportar, sin que la tierra se degrade.
- Uso de la tierra para 1991: Son las categorías de uso que existía dentro de la subcuenca en un escenario anterior, en donde fue menor la explotación de los recursos naturales por parte de la población existente.
- Uso de la tierra para 2009: Es el uso de la tierra que presenta la subcuenca en un escenario reciente. Resultado del aprovechamiento y explotación de la tierra por parte de la presión ambiental ejercida por la población habitante en éste año.

6.2.1 Escenarios 1991 y 2009

La mayor cobertura que posee la tierra para el escenario 1991, es la cobertura forestal con 54.18%, seguido de las áreas agrícolas con 44.38% que incluyen principalmente hortalizas, maíz y café. Los centros poblados tienen un 0.74% del área total de la subcuenca constituidos por los poblados del municipio de Sololá, Santa Lucía Utatlán, y Totonicapán. Para el escenario 1991 no se encuentra ningún poblado rural que abarque un área considerable.

Para 2009 se tiene nuevamente a la cobertura forestal como la de mayor extensión con 50.4 % que incluye bosque mixto y de coníferas, los bosques mixtos extendidos principalmente en la parte baja de la cuenca donde se encuentran alturas de 1600 a 2100m, y los bosques de coníferas están presentes primariamente en la parte alta de la cuenca donde se tienen altitudes hasta de 3,100 msnm. Seguido a los bosques se tienen las áreas agrícolas con 45.78%. En este escenario los centros poblados alcanzan 2 %.

La mayor parte de la subcuenca del río Quiscab posee una cobertura forestal con un 54.18% y 50.4% para 1991 y 2009 respectivamente, esto indica que la diferencia de 4% no es significativa si se toma en cuenta que la diferencia de años entre los dos escenarios es de 18 años.

En los cuadros 17 y 18 se muestran sintetizadas las categorías de uso de la tierra para los escenarios 1991-2009 y los cambios que ha sufrido la cobertura en este lapso de 18 años,

además se muestra que las áreas agrícolas han aumentado un 3 % y los centros poblados también han aumentado en un 1.08 %.

En 1991 se tenía que el área de cultivos anuales presentaba la mayor parte del área total, seguidamente el bosque de coníferas presentaba 33 % de extensión y el bosque de coníferas un 22 % , otros usos de la tierra como poblados, SAF de café y playa fluvial únicamente presentan el 1 % cada uno.

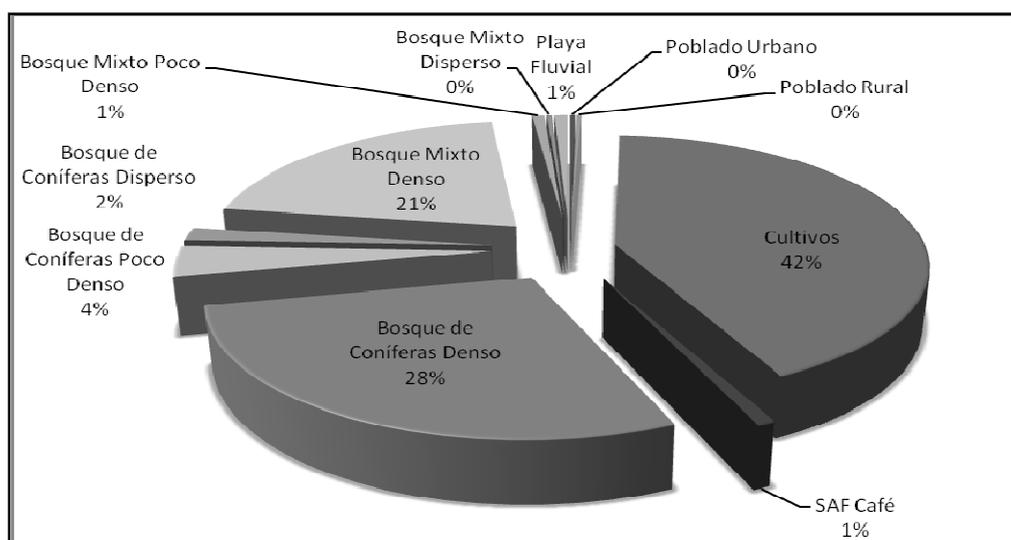


Figura 2 Extensión en porcentaje de las categorías bajo las condiciones de uso de la tierra para 1991.

Cuadro 17 Extensión de cada una de las categorías bajo las condiciones de uso de la tierra para 1991.

Categoría	Área (km ²)	Área %
Poblado Urbano	0,48	0,31
Poblado Rural	0,47	0,30
Cultivos	64,91	42,12
SAF Café	1,23	0,80
Bosque de Coníferas Denso	43,69	28,35
Bosque de Coníferas Poco Denso	5,79	3,76
Bosque de Coníferas Disperso	2,58	1,67

Bosque Mixto Denso	32,06	20,80
Bosque Mixto Poco Denso	1,17	0,76
Bosque Mixto Disperso	0,49	0,32
Playa Fluvial	1,26	0,82
Total	154,12	100,00

En el 2009 se presenta un leve descenso en el área para cultivos anuales, debido a la existencia de hortalizas y áreas degradadas, éstas no están presentes para 1991 por el nivel de detalle de trabajo para la obtención de cada una de éstos mapas. También existe un pequeño descenso en el bosque de coníferas debido al incremento de la frontera agrícola, aprovechamiento sostenible, explotación, plagas y enfermedades. Las áreas de hortalizas principalmente se cultiva papa, zanahoria y cebolla, están localizadas a los alrededores de los principales cauces, generalmente en área planas en la parte baja de la cuenca pero también en áreas onduladas en donde se aplican prácticas de conservación de suelo. Las áreas degradadas aparecen con escasa vegetación y con pendientes fuertes.

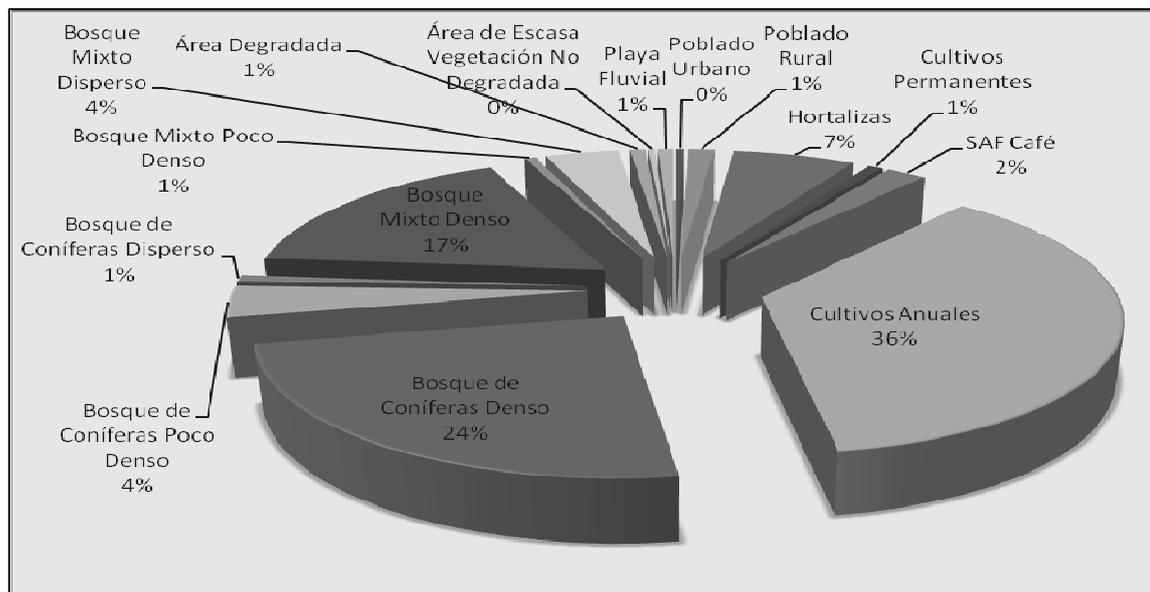


Figura 3 Extensión en porcentaje de las categorías bajo las condiciones de uso de la tierra para 2009.

Cuadro 18 Extensión de cada una de las categorías bajo las condiciones de uso de la tierra para 2009.

Categoría	Área (km²)	Área %
Poblado Urbano	0,58	0,38
Poblado Rural	2,19	1,42
Hortalizas	10,03	6,51
Cultivos Permanentes	1,19	0,77
SAF Café	3,26	2,12
Cultivos Anuales	56,07	36,38
Bosque de Coníferas Denso	37,45	24,30
Bosque de Coníferas Poco Denso	5,78	3,75
Bosque de Coníferas Disperso	1,24	0,80
Bosque Mixto Denso	26,28	17,05
Bosque Mixto Poco Denso	0,9	0,58
Bosque Mixto Disperso	6,02	3,91
Área Degradada	1,3	0,84
Área de Escasa Vegetación No Degradada	0,53	0,34
Playa Fluvial	1,3	0,84
Total	154,12	100,00

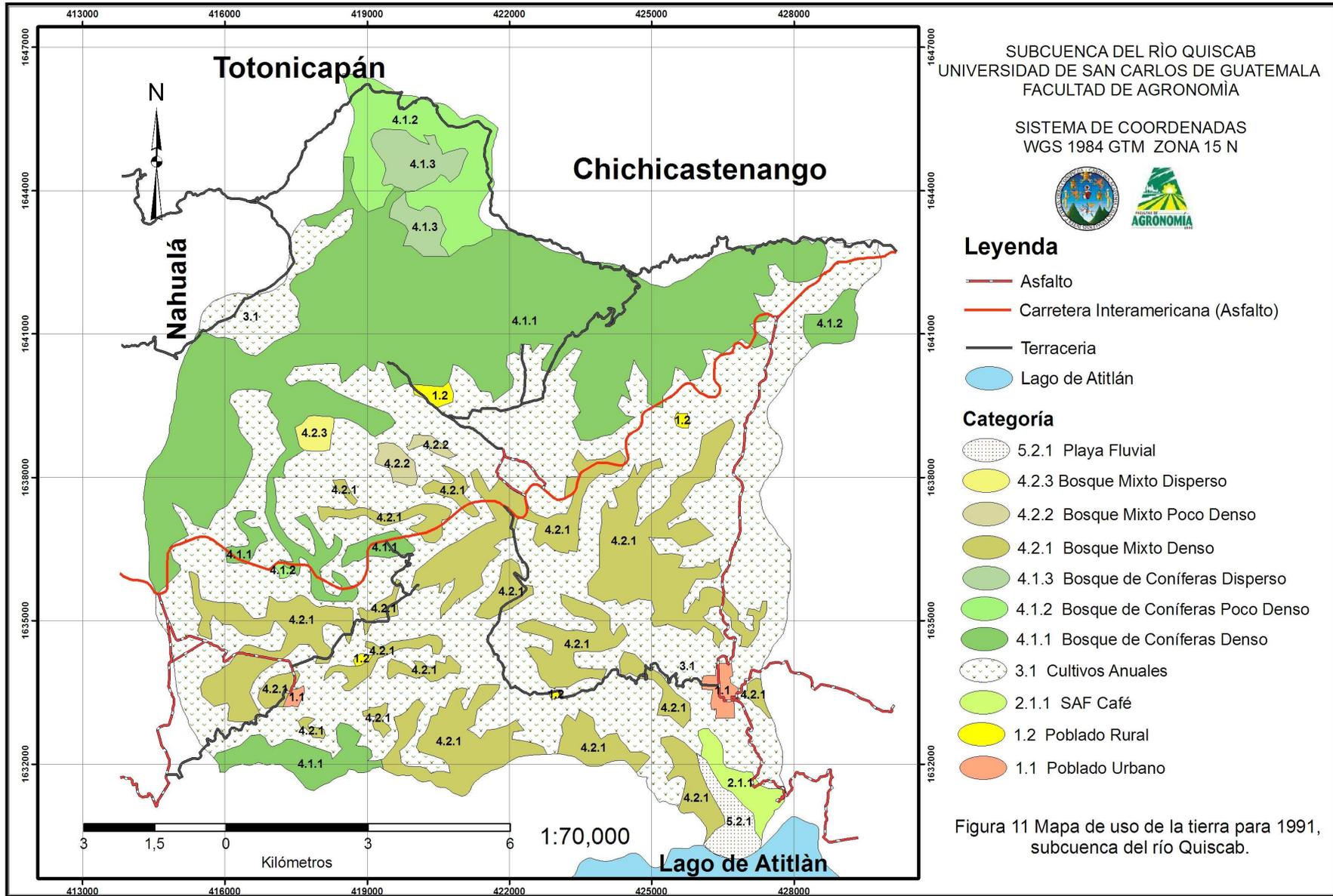
En otras categorías se incluyen las áreas degradadas, que no existían para 1991 pero si se presentan para 2009, y playas fluviales, que son áreas improductivas. Las áreas degradadas posiblemente son consecuencia de los deslaves, inundaciones, crecidas y desvío del río por la tormenta tropical Stan, en el 2005. Los poblados rurales han aumentado en el número de habitantes, por ende tienen que extenderse en área (1.72 km²), como se presenta en el cuadro de comparación de categorías de uso de la tierra. Las categorías correspondientes a bosques han disminuido, primordialmente en bosque de coníferas denso (6.48 km²) y bosque mixto denso (5.78 km²). Debido a la disminución de bosques densos, existe, por el contrario, aumento de los bosques dispersos, como el bosque mixto disperso (5.53 km²).

Los sistemas agroforestales de café, presentan un aumento de 2.03 km², se debe a la diferencia de instrumentos y procesos de realización de ambos escenarios (1991 y 2009). Hay que considerar que para el uso de la tierra de 1991, se contó únicamente con las fotografías aéreas y mapas existentes. Además de utilizar ortofotos y mapas para el uso de la tierra del 2009, se

realizaron visitas de campo, muy valiosas para la corrección y verificación de las categorías de uso de éste año. Lo expuesto anteriormente se debe considerar en las áreas de uso de la tierra de 1991.

Cuadro 19 Comparación de las áreas de los usos de la tierra 1991 y 2009.

Categoría	Área (km²) año 1991	Área (km²) año 2009
Poblado Urbano	0,48	0,58
Poblado Rural	0,47	2,19
Cultivos	64,91	67,29
SAF Café	1,23	3,26
Bosque de Coníferas Denso	43,69	37,45
Bosque de Coníferas Poco Denso	5,79	5,78
Bosque de Coníferas Disperso	2,58	1,24
Bosque Mixto Denso	32,06	26,28
Bosque Mixto Poco Denso	1,17	0,9
Bosque Mixto Disperso	0,49	6,02
Área Degradada	0	1,3
Área de Escasa Vegetación No Degradada	0	0,53
Playa Fluvial	1,26	1,3
Total	154,12	154,12



6.2.2 Capacidad de uso (Uso ideal)

Se utilizaron las categorías de uso que propone el INAB, en su metodología para la clasificación de tierras por capacidad de uso, utilizando como base las unidades fisiográficas y para los factores limitantes se tomaron los mapas de pendientes y de profundidades, mientras que los factores modificadores de pedregosidad y drenaje se no se tienen como limitantes de importancia en la mayoría de las unidades. Las categorías establecidas se pueden observar en el cuadro 19, que corresponde al mapa de capacidad de uso de la tierra de la subcuenca en estudio.

La categoría de uso que predomina en la cuenca es la de tierras para agroforestería con cultivos permanentes (Ap) y las tierras forestales de producción (F) con un 27.15%, situándose en mayor proporción en el centro de la cuenca, principalmente en las orillas de los ríos Xibalbay, Chuiscalera, las Flores y el Novillero. Con una extensión de 23.42 % tiene la capacidad de uso para la categoría de tierras forestales de producción (F) o forestales de protección (Fp) con un 23.42 % y un 5.11 % está estrictamente restringido para la categoría de forestales de protección (Fp) ubicada únicamente en la parte alta situada en la parte norte, en el área de la cumbre María Tecún, por la razón de que, en ésta área éstos suelos no son poco profundos cabe mencionar también que en ésta área se encuentran los bosques comunales de Totonicapán que éstas son zonas protegidas por los comunitarios. Por otro lado se encuentra la categoría de agricultura sin limitaciones (A) con un 17.86 % de extensión, localizada en la zona de relleno de la caldera de Atitlán, área en la que se localizan los suelos más profundos y planos dentro de la subcuenca. Seguido de ésta se encuentra la categoría de Agricultura con mejoras (Am), ésta ultima a diferencia de la agricultura sin limitaciones, consiste en llevar a cabo prácticas de conservación de suelo.

La categoría de sistemas silvopastoriles cuenta con un 13.87 % del área total de la cuenca y están ubicados en áreas moderadamente escarpadas y con moderada profundidad efectiva.

En total la subcuenca del río Quiscab posee un 50.67% del total de su área con capacidad de uso para actividades forestales, mientras que el resto tiene aptitud para el desarrollo de cultivos agrícolas, desde agricultura con mejoras hasta la agroforestería con cultivos permanentes.

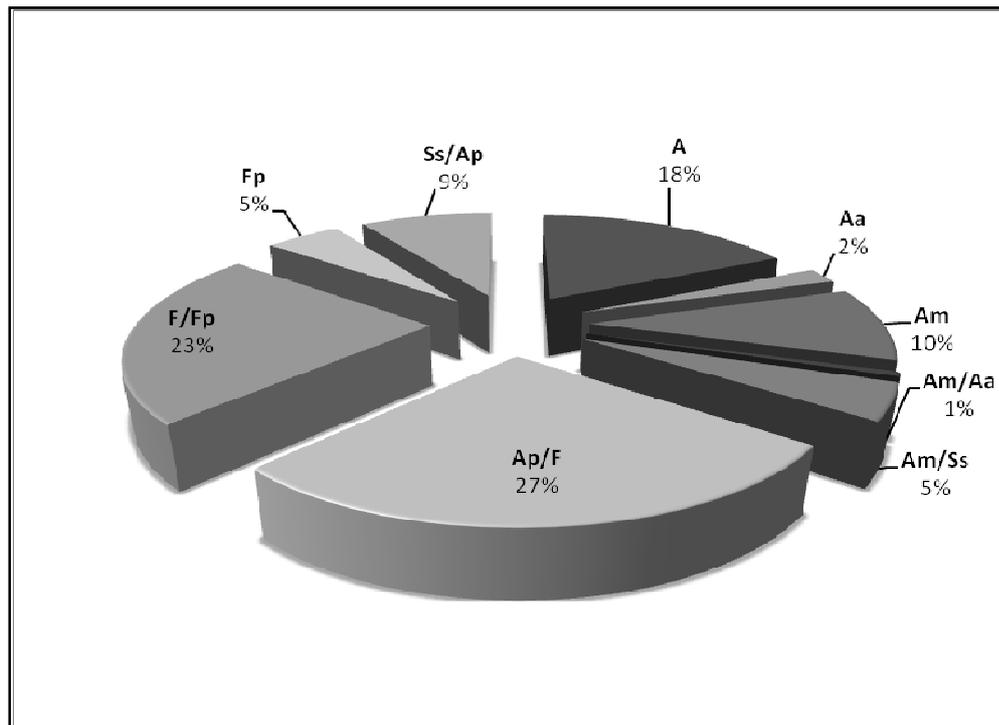
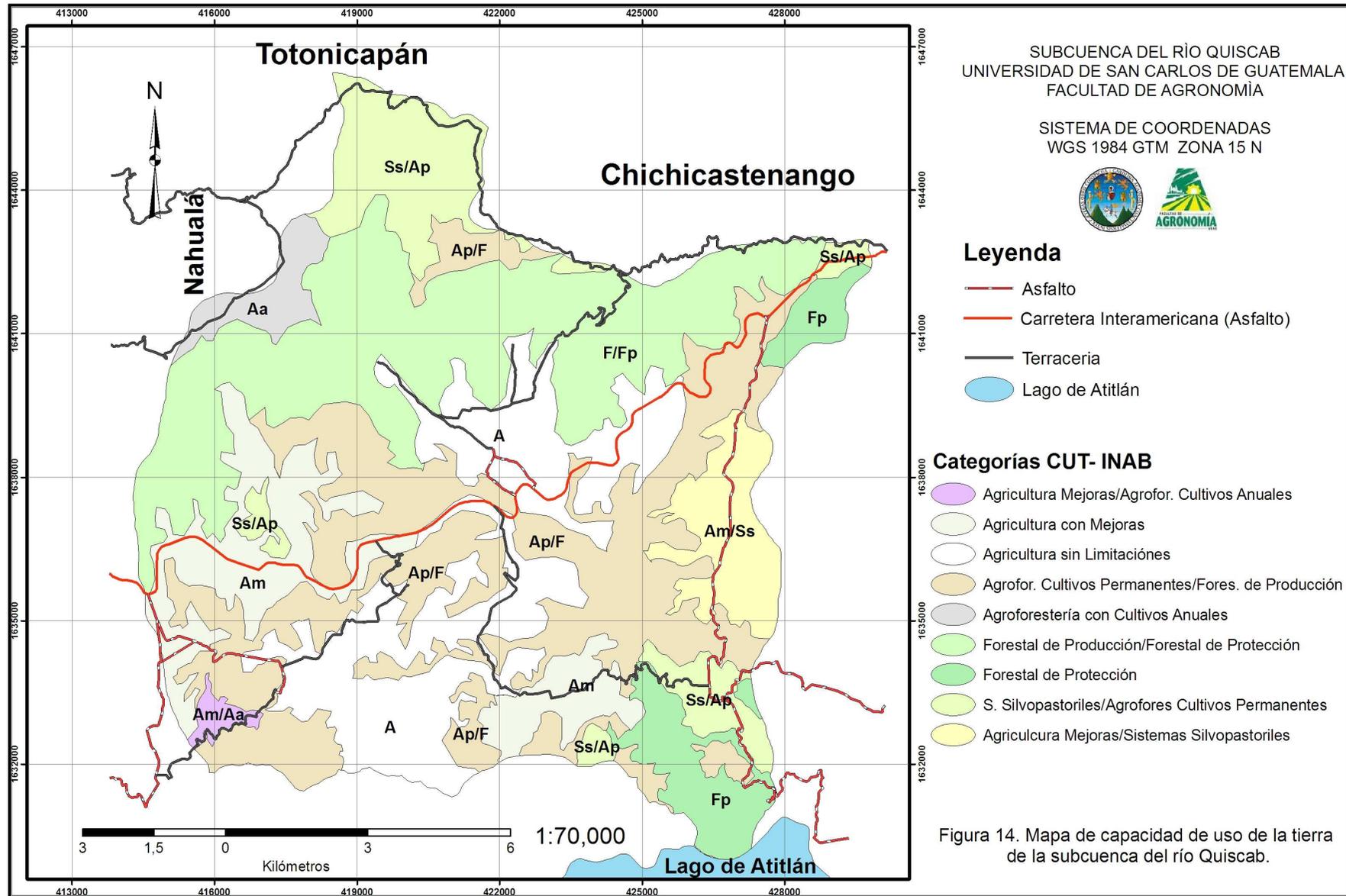


Figura 4 Extensión en porcentaje de las categorías bajo las condiciones de capacidad de uso de la tierra.

Cuadro 20 Categorías de capacidad de uso de la tierra de la subcuenca del río Quiscab.

Código	Categoría	Área	Área %
A	Agricultura sin limitaciones	27,52	17,86
Aa	Agroforestería con cultivos anuales	3,3	2,14
Am	Agricultura con Mejoras	15,21	9,87
Am/Aa	Agricultura con mejoras/ Agroforestería con cultivos anuales	0,9	0,58
Am/Ss	Agricultura con mejoras/Sistemas Silvopastoriles	7,16	4,65
Ap/F	Agroforestería con cultivos permanentes/Forestales de producción	41,84	27,15
F/Fp	Forestal para producción/Forestal para protección	36,1	23,42
Fp	Forestal para protección	7,88	5,11
Ss/Ap	Sistemas Silvopastoriles/Agroforestería con cultivos permanentes	14,21	9,22
		154,12	100,00



6.3 Información climática

Los datos climáticos obtenidos en el monitoreo de las estaciones meteorológicas, se agrupan de la siguiente manera:

Cuadro 21 Precipitación media mensual (mm) de las estaciones monitoreadas

Estación	Año 2007					Año 2008							Anual
	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	
Panajachel	164.06	219.27	180.02	28.27	0.00	0.00	14.06	0.93	20.72	122.47	196.80	207.18	1,153.78
EFA	190.70	250.56	183.26	0.00	0.00	3.24	31.62	0.00	15.44	116.74	225.59	224.26	1,241.40
Novillero	166.14	287.98	186.34	34.08	1.15	1.64	10.71	2.53	17.15	129.95	244.87	240.77	1,323.31
El Tablón	165.86	306.23	185.36	62.56	17.65	2.75	3.23	5.16	37.66	147.79	255.03	178.84	1,368.12

Cuadro 22 Evapotranspiración media mensual (mm) de las estaciones monitoreadas.

Estación	Año 2007					Año 2008							Anual
	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	
EFA	131.32	122.87	109.98	95.69	89.89	90.87	93.45	115.30	123.44	134.89	130.20	135.48	1373.37
Novillero	116.07	104.39	99.45	85.80	84.29	85.97	94.85	116.26	140.77	131.62	122.84	122.16	1304.47
Panajachel	138.29	124.71	119.48	99.78	97.66	101.85	105.71	127.53	149.99	142.95	136.79	140.57	1485.31
El Tablón	122.61	103.62	102.77	93.71	91.88	94.98	101.02	117.44	124.31	123.81	113.62	124.53	1314.31

Cuadro 23 Temperaturas mínima, máxima y media mensual (°C) de las estaciones monitoreadas.

Estación		Año 2007					Año 2008						
		Agos	Spt	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
EFA	T° min	12.67	11.12	10.53	9.57	8.36	6.69	5.90	7.03	9.87	9.90	10.27	10.23
	T° max	25.33	28.72	25.30	27.43	27.14	26.92	26.62	27.61	28.04	28.33	27.90	28.74
	T° med	19.00	19.92	17.92	18.50	17.75	16.81	16.26	17.32	14.53	19.12	19.08	19.48
Novillero	T° min	3.96	3.70	4.16	4.63	5.93	3.12	2.60	4.86	6.86	4.56	4.63	5.36
	T° max	25.50	24.80	24.84	24.88	25.14	26.76	30.93	30.29	31.29	31.89	29.38	26.29
	T° med	14.73	14.25	14.50	14.75	15.54	14.94	16.77	17.62	19.07	18.22	17.00	15.82
Panajachel	T° min	14.00	14.10	14.00	11.47	12.65	11.48	10.97	11.94	12.90	12.77	12.43	12.57
	T° max	27.90	26.87	28.00	28.63	29.00	30.48	30.48	30.16	30.07	29.87	29.47	29.20
	T° med	20.95	20.48	21.00	20.05	20.82	20.98	20.72	21.05	21.48	21.32	20.95	20.88
El Tablon	T° min	10.22	9.98	9.73	8.70	7.29	6.07	6.05	6.56	8.72	10.82	10.58	10.28
	T° max	20.70	19.97	20.17	20.18	20.15	19.93	20.55	20.60	20.84	20.38	20.29	20.41
	T° med	15.47	14.77	14.79	14.20	13.63	13.00	13.44	14.19	15.34	15.34	15.21	15.36

De acuerdo al análisis de datos se logró determinar que la mayor precipitación en el área se presenta en el mes septiembre para las cuatro estaciones monitoreadas presentando una mayor precipitación la estación de El Tablón con 306.23 mm/mes, y el mes de menor precipitación fue el de diciembre, con un valor de 0.00 mm/mes, para las estaciones ubicadas en Panajachel y en la Escuela de Formación Agrícola. La menor precipitación media anual se presentó en la estación de Panajachel con 1153.78 mm/año. La estación que presentó la temperatura máxima fue la ubicada en el Novillero con un valor de 30.9°C en el mes de febrero y la mínima de 2.6°C para el mismo mes. En cuanto a la evapotranspiración la estación que presenta la mayor ETP, es la ubicada en Panajachel con 1485.31 mm/año.

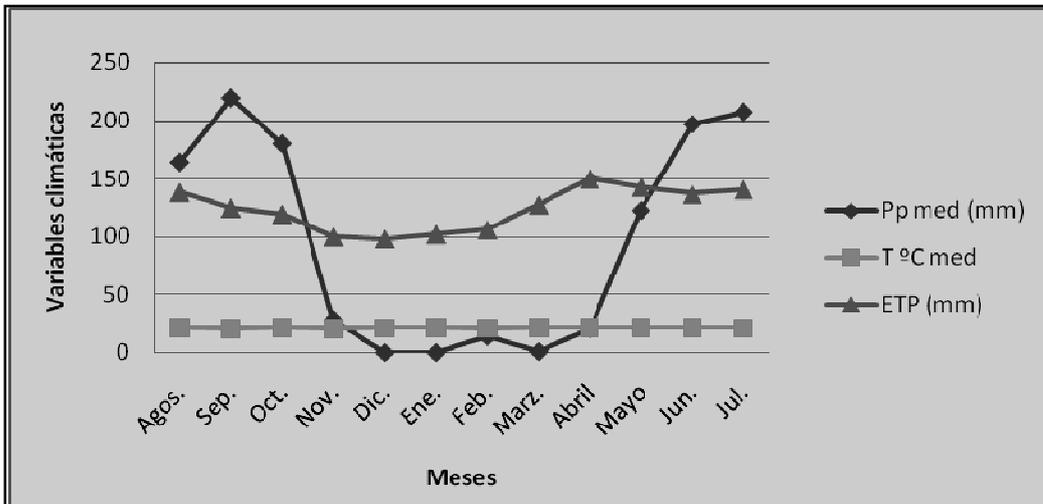


Figura 5. Comportamiento del clima según datos de la estación meteorológica Panajachel.

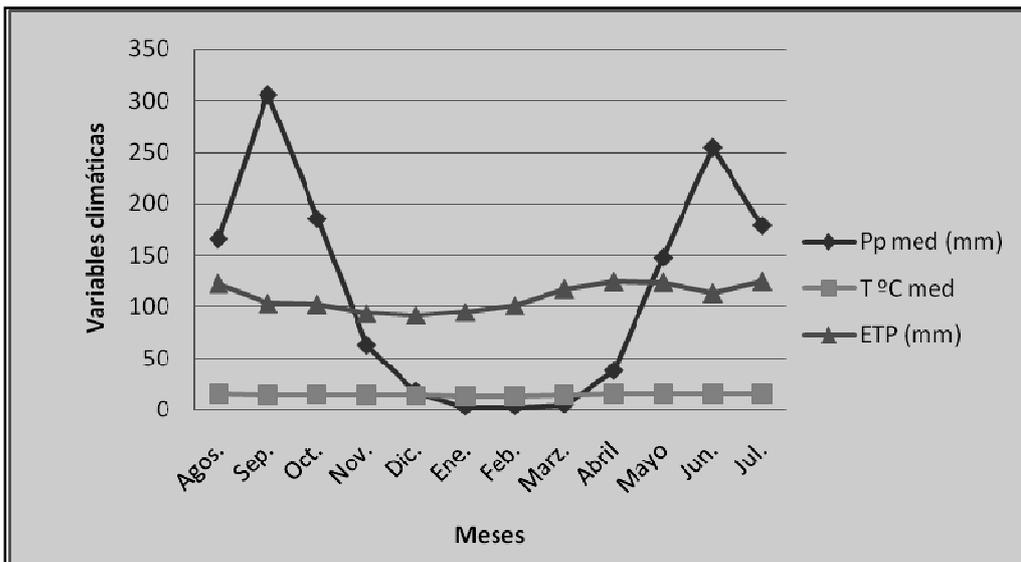


Figura 6. Comportamiento del clima según datos de la estación meteorológica el Tablón.

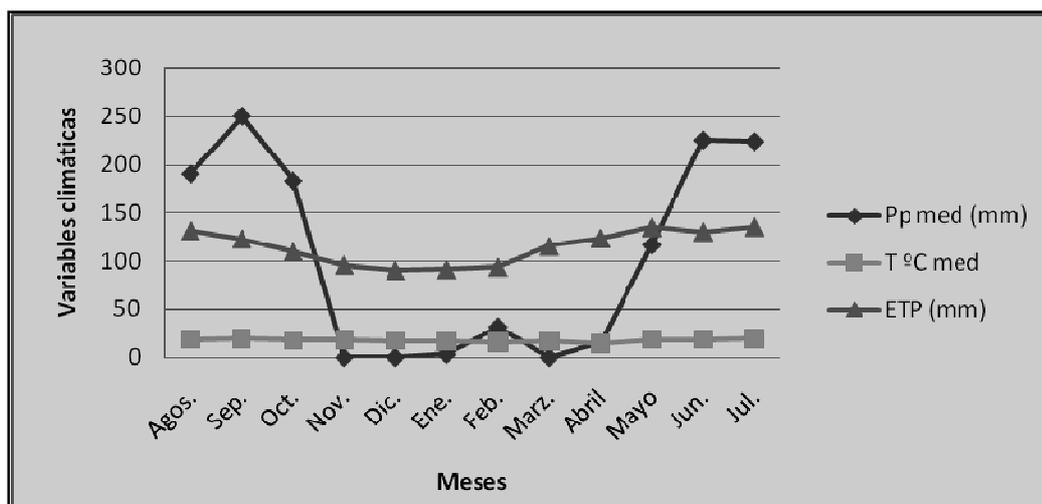


Figura 7. Comportamiento del clima según datos de la estación meteorológica EFA.

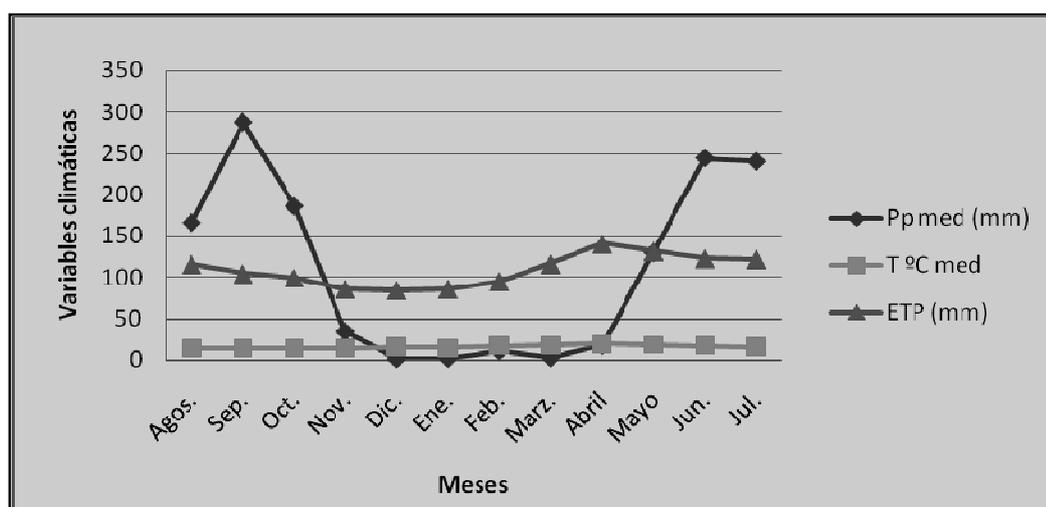


Figura 8. Comportamiento del clima según datos de la estación meteorológica el Novillero.

6.4 Estimación de la infiltración básica de los suelos

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 poca profunda (Aparicio, 2001).

Este proceso depende de las características físicas del suelo, tales como: textura, estructura, compactación y contenido de humedad. En este caso, los suelos con textura gruesa, poco grado de saturación y compactación y 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).

Para la estimación de la infiltración en la subcuenca del río Quiscab se utilizó el método de Porchet o cilindro invertido. En el cual se toman en cuenta diferentes variables para su análisis, los cuales son: el tiempo, altura del agua, profundidad del agujero y diámetro.

El análisis de las pruebas de infiltración, así como la gráfica de infiltración básica vs tiempo se realizó en una hoja Excel, además se trazo una línea de tendencia. En total se realizaron 17 pruebas de infiltración, es importante mencionar que nos se realizó una prueba por cada área de recarga, en las áreas donde no se realizaron pruebas se utilizó los resultados de alguna de las pruebas que se encontraban cerca y se tomó como criterio que tuvieran las mismas características físicas como la altitud, textura y vegetación.

La localización y distribución de las pruebas de infiltración se muestran en el cuadro 23. La infiltración básica y propiedades físicas de los suelos de las diferentes pruebas de infiltración se describen en el cuadro 24.

Cuadro 24 Localización de las pruebas de infiltración.

Unidad de Muestreo	CÓDIGO	Prueba de	Referencia de	ÁREA	ÁREA	Coordenadas		Altitud msnm	Infiltración Básica	
		Infiltración	Prueba	(km2)	%	N	W		cm/h	m/día
Ladera Escarpada del Cerro María Tecún	A.1.1.1	1	Panimaju Bosque	23,22	15,07	14,834256	- 91,263814	2680	3,28	0,79
Cima y ladera del Cerro Tzampual	A.1.1.2	1	Panimaju Bosque	6,76	4,39	14,834256	- 91,263814	2680	3,28	0,79
Ladera Poco escarpada del Cerro María Tecún	A.1.1.3	2	Los Encuentro Vista	9,35	6,07	14,857050	- 91,162587	2600	1,60	0,38
Altiplanicie María Tecún	A.1.2.1	2	Los Encuentro Vista	3,12	2,02	14,857050	- 91,162587	2600	1,60	0,38
Altiplanicie Pajaj	A.1.2.2	3	Corazón del bosque	3,24	2,10	14,790402	- 91,263428	2420	4,40	1,06
Escarpes del Río Argueta	A.2.1.1	4	Panimaju Cultivo	3,51	2,28	14,831966	- 91,253451	2510	1,18	0,28
Talún y cauce del Río Parracana	A.2.2.1	5	La Esperanza Santa Lucia	4,69	3,04	14,782767	- 91,238108	2400	2,38	0,57
Planicie Chuiquel	B.1.1.1	6	El tablón	7,62	4,94	14,816048	- 91,177994	2400	1,80	0,43
Planicie Ondulada Chijcajá	B.1.1.2	7	Novillero Aforo	3,93	2,55	14,807206	- 91,224933	2320	1,51	0,36
Planicie Ondulada Cuchexic	B.1.1.3	5	La Esperanza Sta Lucia	5,26	3,41	14,782767	- 91,238108	2400	2,38	0,57
Planicie Chacayá	B.1.14	8	Bosque Chojolomatie	4,52	2,93	14,763782	- 91,211929	2280	1,86	0,45
Escarpes del Río Xibalbay	B.1.2.1	9	Xajaxaq	14,03	9,10	14,827037	- 91,172533	2415	0,90	0,22
Escarpes del Río Santa Rita	B.1.2.2	5	La Esperanza Sta Lucia	3,87	2,51	14,782767	- 91,238108	2400	2,38	0,57
Talud y cauce del Río Argueta	B.1.3.1	10	Panca	7,67	4,98	14,782855	- 91,191131	2140	0,35	0,08
Talud y cauce del Río Chuiscalera	B.1.3.2	8	Bosque Chojolomatie	6,78	4,40	14,763782	- 91,211929	2280	1,86	0,45
Talud y cauce del Río Novillero	B.1.3.3	7	Novillero Aforo	3,79	2,46	14,807206	- 91,224933	2320	1,51	0,36
Talud y cauce del Río Pamacha	B.1.3.4	3	Corazón del Bosque	3,74	2,43	14,790402	- 91,263428	2420	4,40	1,06

Talud y cauce del Río Barreneché	B.1.3.5	11	Cultivo Barreneche	5,81	3,77	14,835916	- 91,215250	2480	2,60	0,62
Talud y cauce del Río Las Flores	B.1.3.6	12	ENRO	4,69	3,04	14,779364	- 91,258707	2480	2,86	0,69
Colina del Cerro Saquilak	C.1.1.1	8	Bosque Chojolomatie	2,52	1,64	14,763782	- 91,211929	2280	1,86	0,45
Colina del Cerro San Marcos	C.1.1.2	8	Bosque Chojolomatie	1,35	0,88	14,763782	- 91,211929	2280	1,86	0,45
Colina del Cerro Chichimuch	C.1.1.3	8	Bosque Chojolomatie	1,24	0,80	14,763782	- 91,211929	2280	1,86	0,45
Colina del Cerro de las Minas	C.1.1.4	13	Bosque 134	2,64	1,71	14,836470	- 91,181223	2480	0,40	0,10
Colina del Cerro Xucujá	C.1.1.5	12	ENRO	1,41	0,91	14,779364	- 91,258707	2480	2,86	0,69
Altiplanicie Ondulada Sololá	C.1.2.1	14	Barrio San Antonio	4,32	2,80	14,777533	- 91,194189	2020	1,95	0,47
Altiplanicie El Tablón	C.1.2.1	15	Poblado	7,34	4,76	14,775474	- 91,185429	2150	0,85	0,20
Escarpes del Río Quiscab	D.1.1.1	16	Bosque Chunimanzana	6,04	3,92	14,767704	- 91,229010	2350	1,17	0,28
Playa aluvial del Río Quiscab	D.1.2.1	17	Playa	1,64	1,06	14,844295	- 91,204805	2740	0,45	0,11
Total				154,1	100,00					

Cuadro 25 Infiltración básica y propiedades físicas de los suelos de las diferentes pruebas de infiltración.

Número de Prueba	Referencia prueba de infiltración	Inf. cm/h	Da	Humedad		%			Clase Estructural
			Gr/cc	CC	PPM	Arcilla	Limo	Arena	
1	Panimaju Bosque	3,28	1,0256	35,42	28,00	15,79	26,54	57,06	Franco Arenoso
2	Los Encuentro Vista Hermosa	1,60	0,9091	46,26	53,08	16,17	19,87	63,96	Franco Arenoso
3	Corazón del Bosque	4,40	1,0256	29,68	25,39	32,59	18,14	49,26	Franco Arcilloso Arenoso
4	Panimaju Cultivo	1,18	1,1429	17,35	12,72	13,69	20,24	66,06	Franco Arenoso
5	La Esperanza Santa Lucia	2,38	1,0256	36,78	27,70	16,17	26,54	57,26	Franco Arenoso
6	El Tablón	1,80	0,9091	36,02	29,87	15,79	30,74	53,46	Franco Arenoso
7	Novillero Aforo	1,51	1,1111	19,11	12,05	18,27	20,62	61,11	Franco Arenoso
8	Bosque Chojolomatie	1,86	1,0000	35,74	27,48	11,97	26,17	61,86	Franco Arenoso
9	Xajaxaq	0,90	1,0811	27,98	19,92	19,89	30,74	51,36	Franco Arenoso
10	Panca	0,35	0,9091	28,30	21,55	19,99	20,24	59,79	Franco Arenoso
11	Cultivo Barreneche	2,60	1,0526	30,72	23,87	19,99	20,24	59,76	Franco Arenoso
12	ENRO	2,86	1,1111	18,71	13,63	18,27	26,92	54,81	Franco Arenoso
13	Bosque 134	0,40	1,0000	30,64	24,11	20,75	23,69	55,56	Franco Arcilloso Arenoso
14	Barrio San Antonio papa	1,95	0,9756	40,90	24,66	32,97	19,87	47,16	Franco Arcilloso
15	Poblado	0,85	1,0000	29,26	23,86	28,39	28,11	42,96	Franco Arcilloso Arenoso
16	Bosque Chunimanzana	1,17	1,1429	11,33	7,16	9,87	20,24	69,89	Franco Arenoso
17	Bosque Barreneche	0,45	1,1250	55,40	46,62	11,59	26,54	61,86	Franco Arenoso

6.5 Balances hídricos de los suelos y la recarga hídrica potencial

Se realizaron los balances hídricos de suelos en cada área de recarga hídrica (unidad fisiográfica) para los tres escenarios que se establecieron anteriormente, que son:

Escenario 1: Uso de la tierra para 1991

Escenario 2: Uso de la tierra para 2009

Escenario 3: Uso a capacidad

6.5.1 Balances hídricos del escenario de uso de la tierra para 1991

Los resultados obtenidos en los balances hídricos de suelos para las condiciones de uso de la tierra para 1991 se presentan en el cuadro 25. La lamina de recarga potencial promedio es de 277.16 mm anuales para las diferentes áreas, tomando en cuenta que existe una diferencia significativa éntrelas recargas hídricas calculadas, el área con mayor potencial de recarga es el del área Altiplanicie María Tecún con 525.65 mm/año que tienen cultivo de maíz localizado a 2900 msnm, por el contrario el área de colina del cerro de las Minas tienen un potencial de recarga nula y presenta pendientes pronunciadas, la infiltración baja y clase textural franco arcillo arenosa, además tiene una cobertura forestal lo cual va en contra de la lógica de que, una cobertura boscosa admite una mayor recarga al compararla con un área con menor cobertura del suelo, como lo sería un área con cultivos, este dato puede ser el reflejo de una combinación de tipo de suelo y características climáticas que favorezcan enteramente la infiltración. Las áreas urbanas se presentan como zonas con alto grado de impermeabilización, lo que provoca que las áreas en las que éstas se localizan no se presente recarga; lo cual provoca que las laminas de escorrentía superficial aumente en las áreas pobladas específicamente en los poblados urbanos.

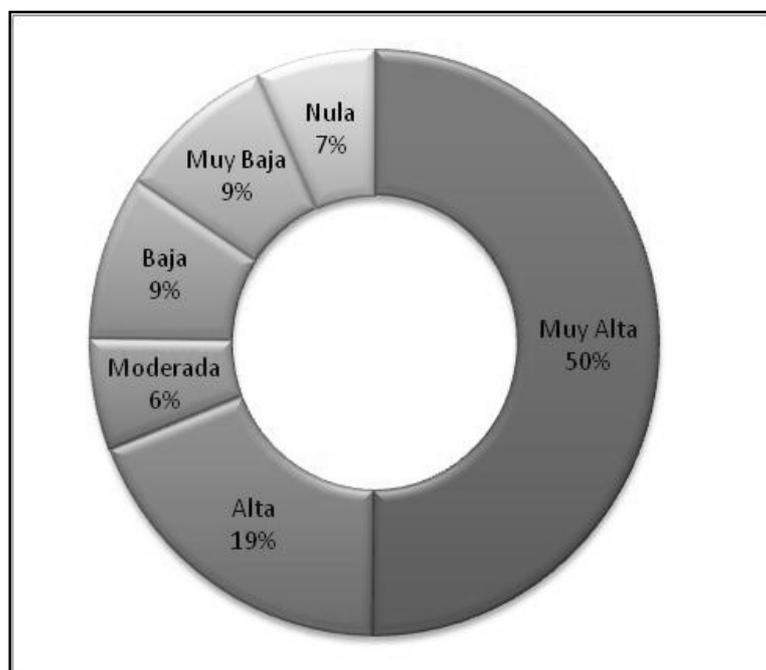


Figura 9 Porcentaje de área para las categorías de recarga hídrica potencial anual bajo las condiciones de uso de la tierra para 1991.

Las áreas que presentan mayor capacidad de recarga hídrica son de categoría muy alta y alta, los cuales tienen una extensión de 77.27 y 29.16 km² respectivamente, éstas áreas presentan características favorables para lograr la eficiencia en la infiltración de agua, en general tienen las mayores valores en cuanto a la velocidad de infiltración y son suelos blandos con una clase textural franco arenosa; algunas presentan pendientes altas aunque la mayoría son planicies.

La unidad de planicie Chacayá tiene muy baja capacidad de recarga debido al poblado de esa área, siendo éste San José Chacayá, la unidad de escarpes del río Xibalbay tiene baja capacidad de recarga hídrica con un área de 14.03 km², muestra pendientes altas, con baja velocidad de infiltración y con uso forestal. La categoría nula tiene velocidades de infiltración que varían de 1.86 cm/h hasta 0.4 cm/hora, si a esto se agrega que son áreas de pendiente fuerte y que tienen un uso forestal se concluye que estos son los motivos por los cuales no se provee suficiente para la recarga hídrica potencial.

Cuadro 26 Resumen de los balances hídricos de suelos para las diferentes condiciones de uso de la tierra para 1991.

Unidad	Descripción	Precipitación (mm)	Precipitación (m³)	(km²)	Recarga hídrica natural (anual)			Recarga Hídrica %	Categoría
					mm	m³	m³/km²		
A.1.1.1	Ladera Escarpada del Cerro María Tecún	1530,47	35537513,4	23,22	384,91	8937610,20	384910,00	25,15	Muy Alta
A.1.1.2	Cima y ladera del Cerro Tzampual	1530,47	10345977,2	6,76	384,91	2601991,60	384910,00	25,15	Muy Alta
A.1.1.3	Ladera Poco escarpada del Cerro Ma. Tecún	1462,01	13669793,5	9,35	406,43	3800120,50	406430,00	27,80	Muy Alta
A.1.2.1	Altiplanicie María Tecún	1462,01	4561471,2	3,12	525,65	1640013,44	525645,33	35,95	Muy Alta
A.1.2.2	Altiplanicie Pajaj	1376,77	4460734,8	3,24	449,00	1454760,00	449000,00	32,61	Muy Alta
A.2.1.1	Escarpes del Río Argueta	1424,59	5000310,9	3,51	322,71	1132698,92	322706,24	22,65	Alta
A.2.2.1	Talún y cauce del Río Parracana	1387,02	6505123,8	4,69	409,12	1918772,80	409120,00	29,50	Muy Alta
B.1.1.1	Planicie Chuiquel	1352,71	10307650,2	7,62	306,72	2337206,40	306720,00	22,67	Alta
B.1.1.2	Planicie Ondulada Chijcajá	1359,54	5342992,2	3,93	326,98	1285031,40	326980,00	24,05	Alta
B.1.1.3	Planicie Ondulada Cuchexic	1387,02	7295725,2	5,26	396,56	2085905,60	396560,00	28,59	Muy Alta
B.1.14	Planicie Chacayá	1342,46	6067919,2	4,52	97,45	440474,00	97450,00	7,26	Muy Baja
B.1.2.1	Escarpes del Río Xibalbay	1368,08	19194162,4	14,03	175,79	2466333,70	175790,00	12,85	Baja
B.1.2.2	Escarpes del Río Santa Rita	1445,08	5592459,6	3,87	69,75	269932,50	69750,00	4,83	Nula
B.1.3.1	Talud y cauce del Río Argueta	1445,08	11083763,6	7,67	75,79	581309,30	75790,00	5,24	Muy Baja
B.1.3.2	Talud y cauce del Río Chuiscalera	1342,46	9101878,8	6,78	209,78	1422308,40	209780,00	15,63	Moderada
B.1.3.3	Talud y cauce del Río Novillero	1387,02	5256805,8	3,79	450,75	1708342,50	450750,00	32,50	Muy Alta
B.1.3.4	Talud y cauce del Río Pamacha	1376,77	5149119,8	3,74	292,99	1095782,60	292990,00	21,28	Alta
B.1.3.5	Talud y cauce del Río Barreneché	1470,7	8544767	5,81	522,33	3034737,30	522330,00	35,52	Muy Alta
B.1.3.6	Talud y cauce del Río Las Flores	1410,93	6617261,7	4,69	372,93	1749041,70	372930,00	26,43	Muy Alta
C.1.1.1	Colina del Cerro Saquilak	1342,46	3382999,2	2,52	17,15	43218,00	17150,00	1,28	Nula
C.1.1.2	Colina del Cerro San Marcos	1342,46	1812321	1,35	17,15	23152,50	17150,00	1,28	Nula
C.1.1.3	Colina del Cerro Chichimuch	1342,46	1664650,4	1,24	209,78	260127,20	209780,00	15,63	Moderada
C.1.1.4	Colina del Cerro de las Minas	1137,52	3003052,8	2,64	0,00	0,00	0,00	0,00	Nula
C.1.1.5	Colina del Cerro Xucujá	1410,93	1989411,3	1,41	280,45	395434,50	280450,00	19,88	Moderada
C.1.2.1	Altiplanicie Ondulada Sololá	1274,3	5504976	4,32	308,78	1333916,18	308776,89	24,23	Alta
C.1.2.1	Altiplanicie El tablón	1342,46	9853656,4	7,34	404,65	2970123,18	404648,93	30,14	Muy Alta
D.1.1.1	Escarpes del Río Quiscab	1248,68	7542027,2	6,04	275,88	1666315,20	275880,00	22,09	Alta
D.1.2.1	Playa aluvial del Río Quiscab	1120,45	1837538	1,64	66,37	108846,80	66370,00	5,92	Muy Baja
	Total	38422,91	216226062,6	154,1	7760,75	46763506,41	7760747,40		

6.5.2 Balances hídricos de suelos para el escenario de uso de la tierra para 2009

Los resultados obtenidos en el balance hídrico de suelos para las condiciones de uso de la tierra para 2009 se presentan en el cuadro 26. La lamina de recarga potencial promedio es de 273.7 mm anuales, el área con mayor potencial de recarga al igual que para el uso de la tierra para 1991 es el del área Altiplanicie María Tecún con 525.65 mm/año que tienen como cobertura el cultivo de maíz localizado a 2900 msnm, por el contrario el área de colina del cerro de las Minas tienen un potencial de recarga nulo.

Los cambios que ha sufrido el uso de la tierra no tienen un impacto considerable en la recarga potencial y la escorrentía superficial, ya que únicamente 96.9 mm/año es la diferencia de recarga entre el uso de la tierra que existía para 1991 y el que existe para 2009. El ligero cambio en la recarga hídrica potencial anual, responde a la impermeabilización de las áreas ocasionado por aparición y crecimiento de los centros poblados, asociado a la ligera disminución de las masas boscosas.

En cuanto a los volúmenes de recarga hídrica existe un cambio, disminuyen para 1991 al 2009 un volumen de 83,330.15 m³ anuales. Los volúmenes de recarga disminuyen en un 1.36 % en el uso de la tierra para 1991 al compararla con las condiciones de capacidad de la tierra; y disminuyen en un 7.10 % cuando se compara la capacidad de uso de la tierra con el uso de la tierra para el año 2009

En resumen podemos observar como el uso de la tierra a capacidad favorece la infiltración y por ende la recarga profunda y disminuye la escorrentía; mientras que los escenarios del uso de la tierra para 1991 y 2009 al contrario disminuyen la recarga potencial de los acuíferos del área.

Referente a las recargas hídricas, éstas fueron clasificadas de tal manera que la categoría muy alta, no es que tengan las mayores recargas dentro de la subcuenca sino que es en relación a su capacidad. El área que presenta muy alta la recarga hídrica tienen una extensión de 57.97 km². Le sigue la categoría de recarga hídrica alta con un área de 45.94 km²., las áreas de recarga hídrica moderada tiene una extensión de 25.98 km². Estas categorías representan la mayor parte extensión dentro de la subcuenca, a pesar de que en éstas unidades existen diferentes usos de la tierra, algunas de ellas tienen en común características físicas del suelo que favorecen la infiltración otras en cambio les favorece la pendiente y en otros casos el sistema radicular de la vegetación existente en cada área.

En el cuadro 27 se presentan las categorías de menor capacidad para la recarga hídrica, baja, muy baja y nula, teniendo áreas de 7.67, 6.16 y 10.38 km², respectivamente; es de importancia mencionar que en las áreas que no existe recarga hídrica o es muy limitada, se debe a los procesos geomorfológicos y por ende a las propiedades del suelo, ya que pertenecen a las áreas del Gran Paisaje de Montañas y Laderas alrededor de la caldera de Atitlán, el cerro Chichimuch, San Marcos, Saquilak y cerro de las minas, a esto agregamos que son áreas con uso de la tierra forestal, esto no favorece a la recarga hídrica ya que los árboles presentan mayor evapotranspiración.

Las áreas de muy alta recarga hídrica tienen un descenso del 13 % y la categoría alta tiene un incremento de 11 % para 1991 al 2009. En cuanto a las categorías de menor capacidad de recarga hídrica, baja, muy baja y nula se tenía para 1991 un 25 % de la extensión total de la subcuenca y para 2009 la extensión de éstas categorías disminuyen a 16 %, se debe esto a un leve cambio de uso de la tierra, en donde existía bosque ahora existen hortalizas y maíz, los cuales tienen un sistema radicular que favorece a la infiltración y es vegetación que presenta menos evapotranspiración que las especies forestales.

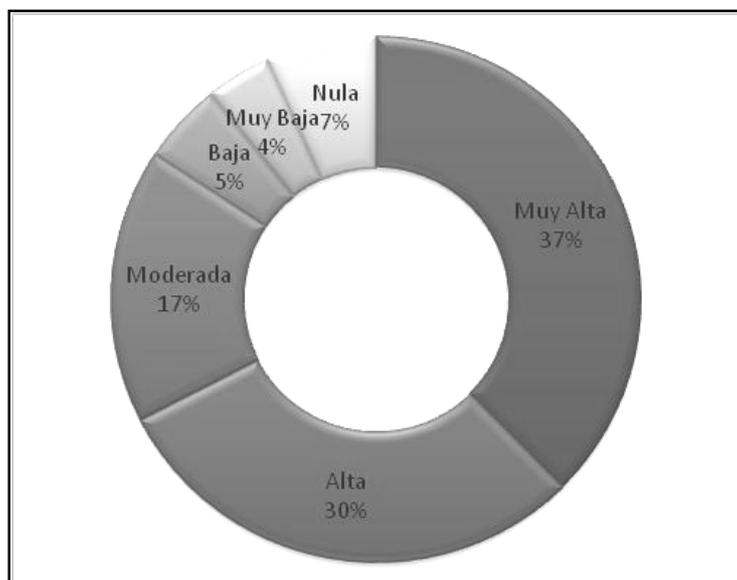


Figura 10 Porcentaje de área para las categorías de recarga hídrica potencial anual bajo las condiciones de capacidad de uso de la tierra.

Cuadro 27 Resumen de los balances hídricos de suelos para las diferentes condiciones de uso de la tierra para 2009.

Unidad	Descripción	Precipitación	Precipitación	(km ²)	Recarga hídrica natural (anual)			Recarga	Categoría
		(mm)	(m ³)		mm	m ³	m ³ /km ²	Hídrica %	
A.1.1.1	Ladera Escarpada del Cerro María Tecún	1530,47	35537513,4	23,22	384,91	8937610,20	384910,00	25,15	Muy Alta
A.1.1.2	Cima y ladera del Cerro Tzampual	1530,47	10345977,2	6,76	384,91	2601966,06	384906,22	25,15	Muy Alta
A.1.1.3	Ladera poco escarpada del Cerro Ma. Tecún	1462,01	13669793,5	9,35	343,41	3210841,90	343405,55	23,49	Alta
A.1.2.1	Altiplanicie María Tecún	1462,01	4561471,2	3,12	525,65	1640028,00	525650,00	35,95	Muy Alta
A.1.2.2	Altiplanicie Pajaj	1376,77	4460734,8	3,24	453,40	1469016,00	453400,00	32,93	Muy Alta
A.2.1.1	Escarpes del Río Argueta	1424,59	5000310,9	3,51	322,71	1132698,92	322706,24	22,65	Alta
A.2.2.1	Talún y cauce del Río Parracana	1387,02	6505123,8	4,69	416,21	1952024,90	416210,00	30,01	Muy Alta
B.1.1.1	Planicie Chuiquel	1352,71	10307650,2	7,62	306,72	2337193,24	306718,27	22,67	Alta
B.1.1.2	Planicie Ondulada Chijcajá	1359,54	5342992,2	3,93	268,26	1054267,35	268261,41	19,73	Moderada
B.1.1.3	Planicie Ondulada Cuchexic	1387,02	7295725,2	5,26	318,91	1677466,60	318910,00	22,99	Alta
B.1.1.4	Planicie Chacayá	1342,46	6067919,2	4,52	114,46	517375,28	114463,56	8,53	Muy Baja
B.1.2.1	Escarpes del Río Xibalbay	1368,08	19194162,4	14,03	239,93	3366286,22	239934,87	17,54	Moderada
B.1.2.2	Escarpes del Río Santa Rita	1445,08	5592459,6	3,87	69,75	269936,27	69750,97	4,83	Nula
B.1.3.1	Talud y cauce del Río Argueta	1445,08	11083763,6	7,67	153,13	1174524,12	153132,22	10,60	Baja
B.1.3.2	Talud y cauce del Río Chuiscalera	1342,46	9101878,8	6,78	209,78	1422308,40	209780,00	15,63	Moderada
B.1.3.3	Talud y cauce del Río Novillero	1387,02	5256805,8	3,79	425,33	1612011,13	425332,75	30,67	Muy Alta
B.1.3.4	Talud y cauce del Río Pamacha	1376,77	5149119,8	3,74	309,69	1158233,80	309688,18	22,49	Alta
B.1.3.5	Talud y cauce del Río Barreneché	1470,7	8544767	5,81	522,33	3034725,59	522327,98	35,52	Muy Alta
B.1.3.6	Talud y cauce del Río Las Flores	1410,93	6617261,7	4,69	324,30	1520967,00	324300,00	22,98	Alta
C.1.1.1	Colina del Cerro Saquilak	1342,46	3382999,2	2,52	17,15	43218,00	17150,00	1,28	Nula
C.1.1.2	Colina del Cerro San Marcos	1342,46	1812321	1,35	21,65	29231,24	21652,77	1,61	Nula
C.1.1.3	Colina del Cerro Chichimuch	1342,46	1664650,4	1,24	209,78	260126,43	209779,38	15,63	Moderada
C.1.1.4	Colina del Cerro de las Minas	1137,52	3003052,8	2,64	0,00	0,00	0,00	0,00	Nula
C.1.1.5	Colina del Cerro Xucujá	1410,93	1989411,3	1,41	303,30	427654,58	303301,12	21,50	Alta
C.1.2.1	Altiplanicie Ondulada Sololá	1274,3	5504976	4,32	311,26	1344654,38	311262,59	24,43	Alta
C.1.2.1	Altiplanicie El tablón	1342,46	9853656,4	7,34	388,45	2851215,18	388448,93	28,94	Muy Alta
D.1.1.1	Escarpes del Río Quiscab	1248,68	7542027,2	6,04	252,11	1522751,74	252111,22	20,19	Alta
D.1.2.1	Playa aluvial del Río Quiscab	1120,45	1837538	1,64	66,37	108843,73	66368,13	5,92	Muy Baja
	Total	38422,91	216226062,6	154,1	7663,86	46677176,26	7663862,38		

6.5.3 Balances hídricos de suelos para el escenario de capacidad de uso de la tierra

Los resultados obtenidos en el balance hídrico de suelos para las condiciones de capacidad de uso de la tierra se observa en el cuadro 27. La lamina de recarga potencial promedio es de 301.18 mm anuales para las diferentes áreas, donde el área de mayor aporte en volumen de recarga, es el área con vocación para de bosques de producción y/o protección. El área con mayor potencial de recarga es el área apta para la agricultura sin limitaciones con altura promedio de 2400 msnm donde predomina un suelo franco arenoso.

En comparación de los resultados de los balances hídricos de escenario de uso de la tierra para 1991, 2009 y el de capacidad de uso de la tierra existe una diferencia significativa en éste último escenario pues incrementa el área con mayor capacidad de recarga hídrica, siendo esta la categoría de muy alta capacidad de recarga hídrica que presenta la extensión con 93.9 km² lo cual representa el 61 % de área total de la subcuenca, causando un disminución en las categorías inferiores. La razón de esta distribución es el uso de la tierra que está a su capacidad; la capacidad de uso de la tierra es el uso ideal o el uso recomendado, en donde existe una distribución adecuada de los sistemas forestales, silvopastoriles, agroforestales y agrícolas, de acuerdo principalmente a los factores de pendiente, profundidad efectiva de cada unidad evaluada.

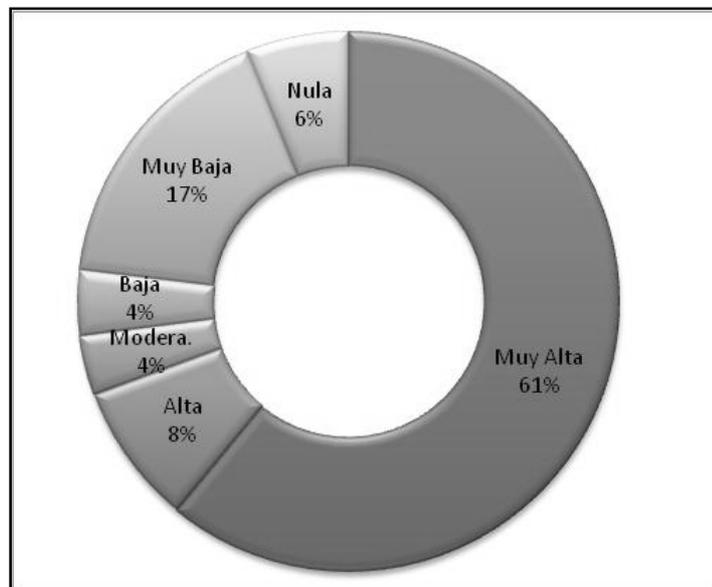


Figura 11 Porcentaje de área para las categorías de recarga hídrica potencial anual bajo las condiciones de uso de la tierra para 2009.

Cuadro 28 Resumen de los balances hídricos de suelos para las diferentes condiciones de capacidad de uso de la tierra.

Unidad	Descripción	Pp.	Pp.	(km ²)	Recarga hídrica natural (anual)			RH %	Categoría
		(mm)	(m ³)		mm	m ³	m ³ /km ²		
A.1.1.1	Ladera Escarpada del Cerro María Tecún	1530,47	35537513	23,22	384,91	8937610,20	384910,00	25,15	Muy Alta
A.1.1.2	Cima y ladera del Cerro Tzampual	1530,47	10345977	6,76	384,91	2601991,60	384910,00	25,15	Muy Alta
A.1.1.3	Ladera Poco escarpada del Cerro Ma. Tecún	1462,01	13669794	9,35	496,71	4644238,50	496710,00	33,97	Muy Alta
A.1.2.1	Altiplanicie María Tecún	1462,01	4561471,2	3,12	343,41	1071439,20	343410,00	23,49	Alta
A.1.2.2	Altiplanicie Pajaj	1376,77	4460734,8	3,24	453,40	1469016,00	453400,00	32,93	Muy Alta
A.2.1.1	Escarpes del Río Argueta	1424,59	5000310,9	3,51	322,71	1132712,10	322710,00	22,65	Alta
A.2.2.1	Talún y cauce del Río Parracana	1387,02	6505123,8	4,69	434,69	2038696,10	434690,00	31,34	Muy Alta
B.1.1.1	Planicie Chuiquel	1352,71	10307650	7,62	423,71	3228670,20	423710,00	31,32	Muy Alta
B.1.1.2	Planicie Ondulada Chijcajá	1359,54	5342992,2	3,93	363,34	1427926,20	363340,00	26,73	Muy Alta
B.1.1.3	Planicie Ondulada Cuchexic	1387,02	7295725,2	5,26	425,33	2237235,80	425330,00	30,67	Muy Alta
B.1.1.4	Planicie Chacayá	1342,46	6067919,2	4,52	114,46	517359,20	114460,00	8,53	Muy Baja
B.1.2.1	Escarpes del Río Xibalbay	1368,08	19194162	14,03	128,75	1806362,50	128750,00	9,41	Muy Baja
B.1.2.2	Escarpes del Río Santa Rita	1445,08	5592459,6	3,87	69,75	269932,50	69750,00	4,83	Nula
B.1.3.1	Talud y cauce del Río Argueta	1445,08	11083764	7,67	110,15	844850,50	110150,00	7,62	Muy Baja
B.1.3.2	Talud y cauce del Río Chuiscalera	1342,46	9101878,8	6,78	378,52	2566365,60	378520,00	28,20	Muy Alta
B.1.3.3	Talud y cauce del Río Novillero	1387,02	5256805,8	3,79	425,33	1612000,70	425330,00	30,67	Muy Alta
B.1.3.4	Talud y cauce del Río Pamacha	1376,77	5149119,8	3,74	309,69	1158240,60	309690,00	22,49	Alta
B.1.3.5	Talud y cauce del Río Barreneché	1470,7	8544767	5,81	534,48	3105328,80	534480,00	36,34	Muy Alta
B.1.3.6	Talud y cauce del Río Las Flores	1410,93	6617261,7	4,69	486,07	2279668,30	486070,00	34,45	Muy Alta
C.1.1.1	Colina del Cerro Saquilak	1342,46	3382999,2	2,52	27,46	69199,20	27460,00	2,05	Nula
C.1.1.2	Colina del Cerro San Marcos	1342,46	1812321	1,35	51,68	69768,00	51680,00	3,85	Nula
C.1.1.3	Colina del Cerro Chichimuch	1342,46	1664650,4	1,24	230,37	285658,80	230370,00	17,16	Moderada
C.1.1.4	Colina del Cerro de las Minas	1137,52	3003052,8	2,64	279,12	736876,80	279120,00	24,54	Alta

C.1.1.5	Colina del Cerro Xucujá	1410,93	1989411,3	1,41	450,27	634880,70	450270,00	31,91	Muy Alta
C.1.2.1	Altiplanicie Ondulada Sololá	1274,3	5504976	4,32	205,88	889401,60	205880,00	16,16	Moderada
C.1.2.1	Altiplanicie El tablón	1342,46	9853656,4	7,34	396,69	2911704,60	396690,00	29,55	Muy Alta
D.1.1.1	Escarpes del Río Quiscab	1248,68	7542027,2	6,04	170,60	1030424,00	170600,00	13,66	Baja
D.1.2.1	Playa aluvial del Río Quiscab	1120,45	1837538	1,64	30,51	50036,40	30510,00	2,72	Nula
	Total	38422,91	216226063	154,1	8432,90	49627594,70	8432900,00		

6.6 Identificación de áreas críticas de recarga hídrica

Para la identificación de las áreas críticas de recarga hídrica potencial, se tomó en cuenta las variables geológicas, infiltración básica, recarga hídrica y la pendiente, como se presenta en el cuadros 29, 30 y 31, para los usos de la tierra 1991, 2009 y capacidad de uso de la tierra, respectivamente.

Las áreas críticas de recarga hídrica potencial para 1991, se presentan en cimas y laderas escarpadas, debido a los materiales que dan origen al suelo, como rocas ígneas y metamórficas fracturadas y las pendientes pronunciadas. En las altiplanicies, planicies onduladas y taludes, la susceptibilidad es moderada y baja, ya que, la naturaleza de los materiales geológicos y la pendiente que presentan estas áreas favorece a la infiltración básica.

Cuadro 29 Identificación de áreas críticas de recarga hídrica para el uso de la tierra para 1991.

Unidad	Descripción	(km ²)	Código Asignado				Suma	Susceptibilidad
			Geo.	Infil. (Cm/h)	R H	Pend.		
A.1.1.1	Ladera Escarpada del Cerro María Tecún	23,22	1	2	4	4	11	Alta
A.1.1.2	Cima y ladera del Cerro Tzampual	6,76	1	2	4	4	11	Alta
A.1.1.3	Ladera Poco escarpada del Cerro María Tecún	9,35	1	2	4	3	10	Alta
A.1.2.1	Altiplanicie María Tecún	3,12	1	1	4	0	6	Moderada
A.1.2.2	Altiplanicie Pajaj	3,24	2	2	4	0	8	Moderada
A.2.1.1	Escarpes del Río Argueta	3,51	1	1	4	4	10	Alta

A.2.2.1	Talud y cauce del Río Parracana	4,69	1	2	4	1	8	Moderada
B.1.1.1	Planicie Chuiquel	7,62	2	2	4	0	8	Moderada
B.1.1.2	Planicie Ondulada Chijcajá	3,93	1	1	4	1	7	Moderada
B.1.1.3	Planicie Ondulada Cuchexic	5,26	1	2	4	2	9	Moderada
B.1.14	Planicie Chacayá	4,52	1	2	1	1	5	Baja
B.1.2.1	Escarpes del Río Xibalbay	14,03	1	1	3	4	9	Moderada
B.1.2.2	Escarpes del Río Santa Rita	3,87	1	1	1	3	6	Moderada
B.1.3.1	Talud y cauce del Río Argueta	7,67	1	1	1	1	4	Baja
B.1.3.2	Talud y cauce del Río Chuiscalera	6,78	1	2	4	1	8	Moderada
B.1.3.3	Talud y cauce del Río Novillero	3,79	1	2	4	0	7	Moderada
B.1.3.4	Talud y cauce del Río Pamacha	3,74	1	2	4	3	10	Alta
B.1.3.5	Talud y cauce del Río Barreneché	5,81	1	2	4	0	7	Moderada
B.1.3.6	Talud y cauce del Río Las Flores	4,69	1	2	4	0	7	Moderada
C.1.1.1	Colina del Cerro Saquilak	2,52	1	2	0	3	6	Moderada
C.1.1.2	Colina del Cerro San Marcos	1,35	1	2	0	3	6	Moderada
C.1.1.3	Colina del Cerro Chichimuch	1,24	1	2	4	3	10	Alta
C.1.1.4	Colina del Cerro de las Minas	2,64	1	1	0	3	5	Moderada
C.1.1.5	Colina del Cerro Xucujá	1,41	1	2	4	3	10	Alta
C.1.2.1	Altiplanicie Ondulada Sololá	4,32	1	2	4	1	8	Moderada
C.1.2.1	Altiplanicie El Tablón	7,34	1	1	4	0	6	Moderada
D.1.1.1	Escarpes del Río Quiscab	6,04	2	2	4	4	12	Alta
D.1.2.1	Playa aluvial del Río Quiscab	1,64	2	1	1	0	4	Baja
	Total	154,1						

Las áreas críticas de recarga hídrica potencial para el uso de la tierra para 2009, se presentan en cimas y laderas escarpadas, por la baja recarga hídrica que se da en dichas áreas y debido a las pendientes pronunciadas.

En las altiplanicies, planicies onduladas y taludes, la susceptibilidad es moderada y baja, pues los suelos con relieves más planos no favorecen la escorrentía del agua y permiten un mayor tiempo de contacto del agua con el suelo favoreciendo la infiltración, mientras que suelos de altas pendientes aumentan la velocidad de la escorrentía, por lo tanto se consideran críticas las áreas que tienen altas pendientes por el grado de degradación que pueden causar

Cuadro 30 Identificación de áreas críticas de recarga hídrica para el uso de la tierra 2009.

Unidad	Descripción	(km ²)	Código Asignado				Suma	Susceptibilidad
			Geología	Infil. (Cm/h)	RH	Pend.		
A.1.1.1	Ladera Escarpada del Cerro María Tecún	23,2					1	2
A.1.1.2	Cima y ladera del Cerro Tzampual	6,76	1	2	4	4	11	Alta
A.1.1.3	Ladera Poco escarpada del Cerro María Tecún	9,35	1	2	4	3	10	Alta
A.1.2.1	Altiplanicie María Tecún	3,12	1	1	4	0	6	Moderada
A.1.2.2	Altiplanicie Pajaj	3,24	2	2	4	0	8	Moderada
A.2.1.1	Escarpes del Río Argueta	3,51	1	1	4	4	10	Alta
A.2.2.1	Talud y cauce del Río Parracana	4,69	1	2	4	1	8	Moderada
B.1.1.1	Planicie Chiquel	7,62	2	2	4	0	8	Moderada
B.1.1.2	Planicie Ondulada Chijcajá	3,93	1	1	4	1	7	Moderada
B.1.1.3	Planicie Ondulada Cuchexic	5,26	1	2	4	2	9	Moderada
B.1.1.4	Planicie Chacayá	4,52	1	2	2	1	6	Moderada
B.1.2.1	Escarpes del Río Xibalbay	14	1	1	4	4	10	Alta
B.1.2.2	Escarpes del Río Santa Rita	3,87	1	1	1	3	6	Moderada
B.1.3.1	Talud y cauce del Río Argueta	7,67	1	1	3	1	6	Moderada
B.1.3.2	Talud y cauce del Río Chuiscalera	6,78	1	2	4	1	8	Moderada
B.1.3.3	Talud y cauce del Río Novillero	3,79	1	2	4	0	7	Moderada
B.1.3.4	Talud y cauce del Río Pamacha	3,74	1	2	4	3	10	Alta
B.1.3.5	Talud y cauce del Río Barrenehé	5,81	1	2	4	0	7	Moderada
B.1.3.6	Talud y cauce del Río Las Flores	4,69	1	2	4	0	7	Moderada
C.1.1.1	Colina del Cerro Saquilak	2,52	1	2	0	3	6	Moderada
C.1.1.2	Colina del Cerro San Marcos	1,35	1	2	0	3	6	Moderada
C.1.1.3	Colina del Cerro Chichimuch	1,24	1	2	4	3	10	Alta
C.1.1.4	Colina del Cerro de las Minas	2,64	1	1	0	3	5	Baja
C.1.1.5	Colina del Cerro Xucujá	1,41	1	2	4	3	10	Alta
C.1.2.1	Altiplanicie Ondulada Sololá	4,32	1	2	4	1	8	Moderada
C.1.2.1	Altiplanicie El Tablón	7,34	1	1	4	0	6	Moderada
D.1.1.1	Escarpes del Río Quiscab	6,04	2	2	4	4	12	Alta
D.1.2.1	Playa aluvial del Río Quiscab	1,64	2	1	1	0	4	Baja
		154						

Para el escenario ideal, el uso de la tierra a su capacidad, en la mayor parte de las unidades fisiográficas la recarga hídrica anual es alta y moderada, por lo tanto, disminuye la susceptibilidad para convertirse en áreas críticas. Por la cobertura que posee este uso ideal de la tierra, la infiltración se favorece positivamente, mientras mayor sea esa tasa de infiltración mayor será la oportunidad de las precipitaciones de infiltrar en el perfil del suelo, los valores más bajos de tasas de infiltración son para suelos de granulometría fina los cuales causan mayor escorrentía en las intensas lluvias.

Cuadro 31 Identificación de las áreas de recarga hídrica para la capacidad de uso de la tierra.

Unidad	Descripción	(km ²)	Código Asignado				Suma	Susceptibilidad
			Geo.	Infil. (Cm/h)	RH	Pend.		
A.1.1.1	Ladera Escarpada del Cerro María Tecún	23,2	1	2	4	4	11	Alta
A.1.1.2	Cima y ladera del Cerro Tzampual	6,76	1	2	4	4	11	Alta
A.1.1.3	Ladera Poco escarpada del Cerro María Tecún	9,35	1	2	4	3	10	Alta
A.1.2.1	Altiplanicie María Tecún	3,12	1	1	4	0	6	Moderada
A.1.2.2	Altiplanicie Pajaj	3,24	2	2	4	0	8	Moderada
A.2.1.1	Escarpes del Río Argueta	3,51	1	1	4	4	10	Alta
A.2.2.1	Talud y cauce del Río Parracana	4,69	1	2	4	1	8	Moderada
B.1.1.1	Planicie Chiquel	7,62	2	2	4	0	7	Moderada
B.1.1.2	Planicie Ondulada Chijcájá	3,93	1	1	4	1	7	Moderada
B.1.1.3	Planicie Ondulada Cuchexic	5,26	1	2	4	2	9	Moderada
B.1.1.4	Planicie Chacayá	4,52	1	2	2	1	6	Moderada
B.1.2.1	Escarpes del Río Xibalbay	14	1	1	2	4	8	Moderada
B.1.2.2	Escarpes del Río Santa Rita	3,87	1	1	1	3	6	Moderada
B.1.3.1	Talud y cauce del Río Argueta	7,67	1	1	2	1	5	Baja
B.1.3.2	Talud y cauce del Río Chuiscalera	6,78	1	2	4	1	8	Moderada
B.1.3.3	Talud y cauce del Río Novillero	3,79	1	2	4	0	8	Moderada
B.1.3.4	Talud y cauce del Río Pamacha	3,74	1	2	4	3	10	Alta
B.1.3.5	Talud y cauce del Río Barreneché	5,81	1	2	4	0	7	Moderada
B.1.3.6	Talud y cauce del Río Las Flores	4,69	1	2	4	0	7	Moderada
C.1.1.1	Colina del Cerro Saquilak	2,52	1	2	0	3	6	Moderada
C.1.1.2	Colina del Cerro San Marcos	1,35	1	2	1	3	7	Moderada
C.1.1.3	Colina del Cerro Chichimuch	1,24	1	2	4	3	10	Alta
C.1.1.4	Colina del Cerro de las Minas	2,64	1	1	4	3	9	Moderada
C.1.1.5	Colina del Cerro Xucujá	1,41	1	2	4	3	10	Alta
C.1.2.1	Altiplanicie Ondulada Sololá	4,32	1	2	4	1	8	Moderada
C.1.2.1	Altiplanicie El tablón	7,34	1	1	4	0	6	Moderada
D.1.1.1	Escarpes del Río Quiscab	6,04	2	2	3	4	11	Alta
D.1.2.1	Playa aluvial del Río Quiscab	1,64	2	1	0	0	3	Baja

Las áreas críticas de recarga hídrica potencial son las que poseen las categoría de susceptibilidad muy alta y alta. En las condiciones bajo capacidad de uso de la tierra la subcuenca presenta el 60.93 % del área como áreas críticas debido a la fuerte pendiente y a la mayor cobertura forestal.

En cuanto a los otros dos escenarios uso de la tierra de la tierra para 1991 y 2009 las áreas críticas son de categoría alta y tienen una descenso significativo en cuanto al % del total de la extensión, con el 35.87 % para ambos casos; continuando con la discusión de éstos dos escenarios una elevado aumento en cuanto a las áreas de categoría moderada debido a que en la localización de mayor cantidad de cultivos y poblados del área.

Cuadro 32 Comparación de áreas críticas de recarga hídrica potencial para los tres diferentes escenarios evaluados.

Unidad	Descripción	(km ²)	Área %	Susceptibilidad		
				Año 1991	Año 2009	CUT
A.1.1.1	Ladera Escarpada del Cerro María Tecún	23,22	15,07	Alta	Alta	Muy Alta
A.1.1.2	Cima y ladera del Cerro Tzampual	6,76	4,39	Alta	Alta	Muy Alta
A.1.1.3	Ladera Poco escarpada del Cerro María Tecún	9,35	6,07	Alta	Alta	Muy Alta
A.1.2.1	Altiplanicie María Tecún	3,12	2,02	Moderada	Moderada	Alta
A.1.2.2	Altiplanicie Pajaj	3,24	2,10	Moderada	Moderada	Muy Alta
A.2.1.1	Escarpes del Río Argueta	3,51	2,28	Alta	Alta	Alta
A.2.2.1	Talud y cauce del Río Parracana	4,69	3,04	Moderada	Moderada	Muy Alta
B.1.1.1	Planicie Chuiquel	7,62	4,94	Moderada	Moderada	Muy Alta
B.1.1.2	Planicie Ondulada Chijcajá	3,93	2,55	Moderada	Moderada	Muy Alta
B.1.1.3	Planicie Ondulada Cuchexic	5,26	3,41	Moderada	Moderada	Muy Alta
B.1.1.4	Planicie Chacayá	4,52	2,93	Baja	Moderada	Muy Baja
B.1.2.1	Escarpes del Río Xibalbay	14,03	9,10	Moderada	Alta	Muy Baja
B.1.2.2	Escarpes del Río Santa Rita	3,87	2,51	Moderada	Moderada	Nula
B.1.3.1	Talud y cauce del Río Argueta	7,67	4,98	Baja	Moderada	Muy Baja
B.1.3.2	Talud y cauce del Río Chuiscalera	6,78	4,40	Moderada	Moderada	Muy Alta
B.1.3.3	Talud y cauce del Río Novillero	3,79	2,46	Moderada	Moderada	Muy Alta
B.1.3.4	Talud y cauce del Río Pamacha	3,74	2,43	Alta	Alta	Alta
B.1.3.5	Talud y cauce del Río Barreneché	5,81	3,77	Moderada	Moderada	Muy Alta
B.1.3.6	Talud y cauce del Río Las Flores	4,69	3,04	Moderada	Moderada	Muy Alta
C.1.1.1	Colina del Cerro Saquilak	2,52	1,64	Moderada	Moderada	Nula
C.1.1.2	Colina del Cerro San Marcos	1,35	0,88	Moderada	Moderada	Nula
C.1.1.3	Colina del Cerro Chichimuch	1,24	0,80	Alta	Alta	Moderada
C.1.1.4	Colina del Cerro de las Minas	2,64	1,71	Moderada	Baja	Alta
C.1.1.5	Colina del Cerro Xucujá	1,41	0,91	Alta	Alta	Muy Alta
C.1.2.1	Altiplanicie Ondulada Sololá	4,32	2,80	Moderada	Moderada	Moderada
C.1.2.1	Altiplanicie El tablón	7,34	4,76	Moderada	Moderada	Muy Alta
D.1.1.1	Escarpes del Río Quiscab	6,04	3,92	Alta	Alta	Baja
D.1.2.1	Playa aluvial del Río Quiscab	1,64	1,06	Baja	Baja	Nula

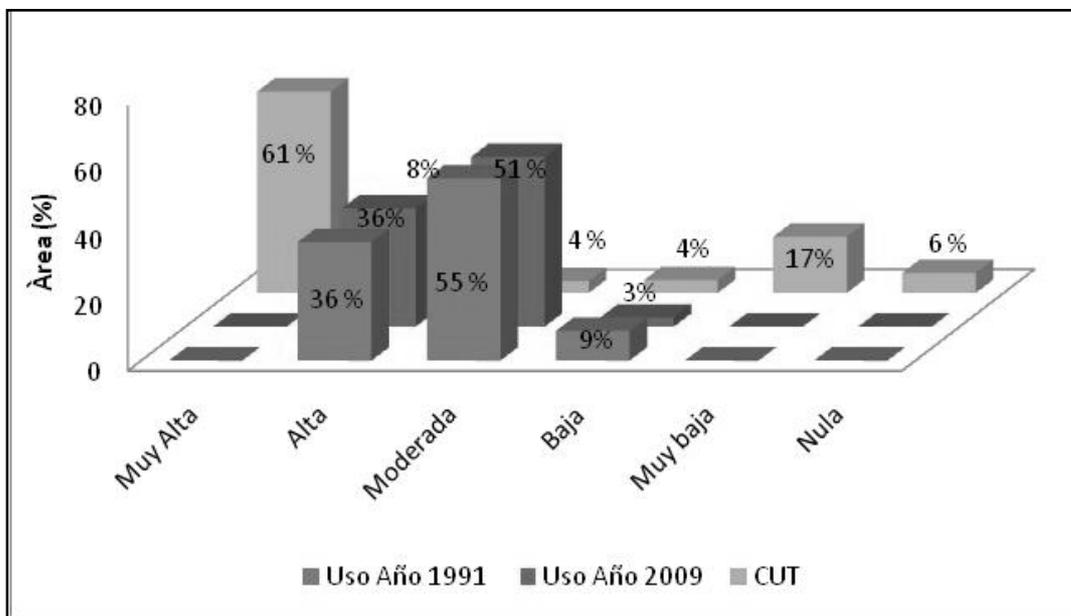


Figura 12. Comparación del porcentaje de extensión de áreas críticas de recarga hídrica potencial para los tres diferentes escenarios evaluados.

6.7 Estimación de los caudales máximos de escorrentía

6.7.1 Método racional

6.7.2 Coeficiente de escorrentía para el escenario de uso de la tierra para 1991

Bajo estas condiciones se consideran usos de la tierra como las hortalizas a las cuales se les asigno un valor de coeficientes de escurrimiento igual al de la agricultura sin limitaciones o agricultura limpia. El café es considerado como un cultivo con características de bosque, debido a su cobertura y a la sombra que generalmente utiliza, sin embargo debido a que es menos denso que un bosque se le coloca un valor ligeramente superior. Los centros poblados se les colocó un valor promedio en condiciones de techos impermeables, a las calles se les asigno el valor medio del rango de calles con adoquín. Los bosques se consideran en promedio como bosques heterogéneos con fuertes pendientes. En el cuadro 33 se muestra la ponderación de los valores de los coeficientes de escurrimientos en función del área dentro de la subcuenca, y al final se obtiene un coeficiente ponderado para la condición de uso de la tierra para 1991 de **0,41908188**.

Cuadro 33. Coeficientes de escurrimiento de las diferentes categorías de uso de tierra para 1991

Categoría de Uso	Coeficiente de escurrimiento	Área (km ²)	Área (%)	Coeficiente ponderado
Poblado Urbano	0,85	0,68	0,44	0,00375032
Poblado Rural	0,45	0,47	0,30	0,00137231
Cultivos Anuales	0,5	67,16	43,58	0,21788217
SAF Café	0,4	1,23	0,80	0,00319232
Bosque de Coníferas Denso	0,35	43,13	27,98	0,09794641
Bosque de Coníferas Poco Denso	0,35	5,79	3,76	0,01314885
Bosque de Coníferas Disperso	0,37	2,58	1,67	0,00619387
Bosque Mixto Denso	0,35	30,16	19,57	0,06849208
Bosque Mixto Poco Denso	0,35	1,17	0,76	0,00265702
Bosque Mixto Disperso	0,37	0,49	0,32	0,00117636
Playa Fluvial	0,4	1,26	0,82	0,00327018
Total		154,12	100,00	0,41908188

6.7.3 Coeficientes de escorrentía para el escenario de uso de la tierra para 2009

Bajo estas condiciones se continuó considerando usos de la tierra como las hortalizas a las cuales se les asignó un valor de coeficiente de escorrentía igual al de la agricultura sin limitaciones o agricultura limpia. En este escenario aparece la categoría de áreas pobladas rurales a las cuales se les asignó un valor ligeramente inferior al 0.50 propuesto para zonas urbanas ya que en el área rural las casas se encuentran distribuidas entre áreas de cultivos y que se considera que estas áreas pobladas poseen menos del 30% de área con impermeabilización provocada por adoquinado o pavimentación. Las superficies degradadas se consideran como superficies limpias y se les asignó un valor por debajo del asignado a la agricultura limpia debido a la capacidad de infiltración que se evidencia en el potencial de recarga de estas áreas.

En el cuadro 34 se observa la ponderación de los valores de coeficientes de escurrimiento en función del área dentro de la subcuenca del río Quiscab obteniendo un coeficiente ponderado para la condición de uso de la tierra para 2009 de **0,4233435**.

Cuadro 34. Coeficientes de escurrimiento para las diferentes categorías de uso de la tierra para 2009

Código	Categoría de Uso	Coeficiente de escurrimiento	Área (km ²)	Área (%)	Coeficiente ponderado
1.1	Poblado Urbano	0,85	0,58	0,38	0,00319881
1.2	Poblado Rural	0,45	2,19	1,42	0,00639437
2.1	Hortalizas	0,55	9,03	5,86	0,03222489
3.1	Cultivos Permanentes	0,4	0,19	0,12	0,00049312
3.1.1	SAF Café	0,4	3,26	2,12	0,00846094
4.1	Cultivos Anuales	0,5	55,07	35,73	0,17865949
5.1.1	Bosque de Coníferas Denso	0,35	38,45	24,95	0,08731832
5.1.2	Bosque de Coníferas Poco Denso	0,35	6,78	4,40	0,01539709
5.1.3	Bosque de Coníferas Disperso	0,37	1,24	0,80	0,0029769
5.2.1	Bosque Mixto Denso	0,35	27,48	17,83	0,06240592
5.2.2	Bosque Mixto Poco Denso	0,35	0,90	0,58	0,00204386
5.2.3	Bosque Mixto Disperso	0,37	6,02	3,91	0,01445237
6.1.1	Área Degradada	0,6	1,32	0,86	0,00513885
6.1.2	Área de Escasa Vegetación No Degradada	0,4	0,53	0,34	0,00137555
6.2.1	Playa Fluvial	0,4	1,08	0,70	0,00280301
	Total		154,12	100,00	0,4233435

6.7.4 Coeficientes de escorrentía para la capacidad de uso de la tierra

Las áreas con vocación agrícola se razonan con coeficientes de escorrentía para agricultura limpia con coeficientes para condiciones medias, mientras que los sistemas de agricultura con mejoras se consideran bajo sistema de manejo con prácticas de conservaciones de suelos, que mejoran las condiciones de absorción y retardan el escurrimiento. La agroforestería por ser un sistema de combinación de especies forestales con cultivos se considera valores medios de las dos coberturas. Los coeficientes de los bosques se consideran incluyendo factores de manejo forestal, por lo cual el escurrimiento se considera por encima de los bosques de protección con mayores densidades y sotobosques bien desarrollados. En el cuadro 35 se muestra la ponderación de los valores de coeficientes de escurrimientos en función del área dentro de la subcuenca del río Quiscab y al final se obtiene un coeficiente ponderado para la condición de capacidad de uso de la tierra de **0,35973268**.

Cuadro 35. Coeficientes de escurrimiento para las diferentes categorías de capacidad de uso de la tierra.

Categorías de uso	Coeficiente de escurrimiento	Área km ²	Área %	Coeficiente ponderado
Agricultura sin limitaciones	0,4	27,52	17,86	0,07142486
Agroforestería con cultivos anuales	0,4	3,3	2,14	0,00856475
Agricultura con mejoras	0,3	15,21	9,87	0,0296068
Agricultura con mejoras/Agroforestería con cultivos anuales	0,4	0,9	0,58	0,00233584
Agricultura con mejoras/Sistemas silvopastoriles	0,4	7,16	4,65	0,01858292
Agroforestería con cultivos permanentes/Forestal para producción	0,35	41,84	27,15	0,09501687
Forestal para producción/forestal para protección	0,35	36,1	23,42	0,08198157
Forestal para protección	0,3	7,88	5,11	0,0153387
S. Silvopastoriles/Agroforestería con cultivos permanentes	0,4	14,21	9,22	0,03688035
Totales		154,12	100,00	0,35973268

6.7.5 Caudales máximos de los tres escenarios evaluados

Los valores de intensidad de la lluvia como se menciona en la formula son considerados para una duración igual al tiempo de concentración de la subcuenca. El tiempo de concentración se utiliza debido a que lo que la formula estima, es un caudal máximo, o sea, el punto máximo de la crecida cuando en el punto de aforo de la cuenca en estudio se esté reflejando el escurrimiento del área más lejana.

Para calcular el tiempo de concentración de la cuenca se utilizó la formula de Kirpich, Bransby Williams y de Chow, para obtener un promedio de los tiempos obtenidos por las tres formulas.

Según Kirpich:

$$t_c = 0.0078 (L^{0.77} / S^{0.38})$$

Según Bransby Williams:

$$t_c = 21.3 (L / 1610) (1 / A^{0.1} S^{0.2})$$

Donde:

t_c = tiempo de concentración sobre la superficie natural (min)

L = Longitud del cauce principal (m)

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

Según Chow:

$$t_c = 0.01 (L / (S)^{0.5})^{0.64}$$

Donde:

t_c = tiempo de concentración (h)

L = Longitud del cauce principal (m)

S = pendiente media del cauce (%) (3)

´Pendiente del cauce principal Método analítico:

Scp: 10 %

Lc: 17.75 km.

Los tiempos de concentración obtenidos utilizando una pendiente del cauce principal del 10 % calculado por el método analítico, una longitud del cauce principal de 8.4 km y un área de 154.12 km², se obtiene los siguientes resultados: método de Kirpich: 35 min; Método de Bransby Williams: 112.71 min y por el método de Chow: 150 min, por lo que al realizar el promedio aritmético se obtiene un t_c promedio de 99.24 min.

Utilizando el tiempo de concentración de la subcuenca del río Quiscab se obtiene las intensidades de lluvia para este periodo de tiempo durante diferentes periodos de retorno. Para esto se utilizaron las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia elaborados por el INSIVUMEH para la estación Santiago Atitlán para el 2004.

Cuadro 36. Intensidad de lluvia en mm/h para los diferentes períodos de retorno.

Periodo de retorno (años)	Ecuación de intensidad de lluvia	Tiempo de concentración (min)	Intensidad (mm/h)
2	$i = 1280 / (t + 13)^{0.812}$	99,24	27,7
5	$i = 1001 / (t + 12)^{0.705}$	99,24	36,13
10	$i = 1190 / (t + 05)^{0.720}$	99,24	41,93
25	$i = 1020 / (t + 04)^{0.677}$	99,24	44,18
100	$i = 1008 / (t + 04)^{0.668}$	99,24	45,52

Posteriormente se realizó la estimación del caudal máximo de escorrentía, se utilizan estos valores para el cálculo de estos en los diferentes escenarios planteados. Los caudales máximos esperados para los diferentes escenarios, se muestran en el cuadro 42, en donde se resumen los cálculos obtenidos aplicando la fórmula del método racional ($Q_p = 0.278 CiA$), para una intensidad de lluvia uniforme durante el tiempo equivalente al tiempo de concentración de la subcuenca del río Quiscab.

Se observan las diferencias entre los tres escenarios, donde el escenario de uso a capacidad de la tierra muestra los valores más bajos de escorrentía máxima esperada para los diferentes periodos de retorno evaluados, los caudales van desde 426.94 hasta 701.59 m³/s, el escenario de uso de la tierra para 1991 muestra los valores de escorrentía esperados que van desde 497.37

m³/s hasta 817.34 m³/s. Los cambios que podemos ver entre los escenarios de uso de la tierra para 1991 y 2009 no son significativos al comparar el escenario de capacidad de uso de la tierra y uso de la tierra para el año 2009, para este último escenario se esperan caudales que están entre 502.43 hasta 825.66 m³/s.

Cuadro 37. Caudal máximo esperado para los períodos de retorno en cada escenario de uso de la tierra evaluado.

Escenario	Periodo de retorno (años)	Coefficiente de escurrimiento C	Intensidad de lluvia (mm/h)	Área de la cuenca (km ²)	Caudal Máximo (m ³ /s)
Capacidad de uso de la tierra	2	0,35973268	27,7	154,12	426,94
	5	0,35973268	36,13	154,12	556,87
	10	0,35973268	41,93	154,12	646,26
	25	0,35973268	44,18	154,12	680,94
	100	0,35973268	45,52	154,12	701,59
Uso de la tierra para 1991	2	0,41908188	27,7	154,12	497,37
	5	0,41908188	36,13	154,12	648,74
	10	0,41908188	41,93	154,12	752,88
	25	0,41908188	44,18	154,12	793,28
	100	0,41908188	45,52	154,12	817,34
Uso de la tierra para 2009	2	0,4233435	27,7	154,12	502,43
	5	0,4233435	36,13	154,12	655,34
	10	0,4233435	41,93	154,12	760,54
	25	0,4233435	44,18	154,12	801,35
	100	0,4233435	45,52	154,12	825,66

Para la comparación de los escenarios evaluados se concluye que entre el Uso de la tierra para 1991 y 2009 no se encuentra establecida una diferencia significativa entre los caudales máximos esperados para los períodos de 2, 5, 10, 25 y 100 años, se debe a que no existe un cambio a gran escala en cuanto al uso de la tierra que se encontró para 1991 y el que se presenta para 2009.

Por otra parte, se encontró que referente a los caudales máximos esperados en el uso de la tierra a su capacidad, disminuyen en comparación con los usos de la tierra para 1991 y 2009;

siendo los caudales máximos esperados 426.94, 556.87, 646.26, 680.94 y 701.59 m³/s para los períodos de retorno de 2,5,10 25 y 100 años respectivamente.

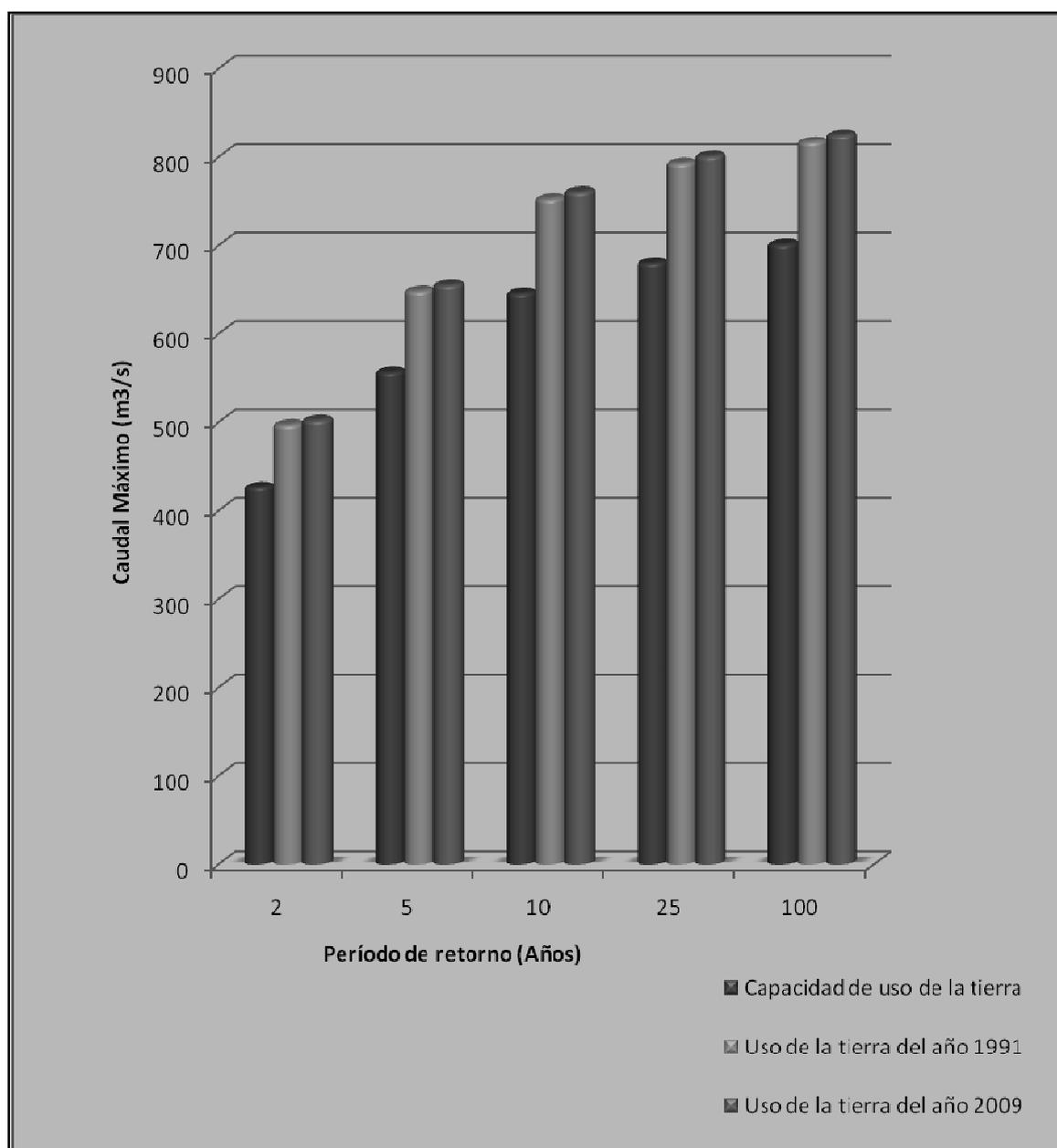


Figura 13 Comparación de los caudales máximos para diferentes períodos de retorno en los tres escenarios evaluados.

6.8 Escorrentía superficial observada

Para esta actividad se realizaron aforos en 12 puntos estratégicos de la subcuenca del río Quiscab. El método de aforo es el de sección-velocidad para lo cual se utilizó molinete y/o flotador para determinar la velocidad.

El período de estudio fue un año, iniciando en septiembre del 2007 y concluyendo en agosto de 2008; las mediciones se realizaron cada mes en cada uno de los puntos de muestreo, las fluctuaciones de éstas mediciones se muestran en la figura 24, donde se puede observar que la época lluviosa inicia en el mes de mayo y termina en el mes de octubre, el mes en donde el caudal fue mayor durante el período evaluado es el mes de junio, el aumento y disminución de los caudales está ligado a la época lluviosa y la época seca de éste lugar.

Los caudales de mayor valor que se presentan en la subcuenca son de 4.1349 y 4.1444 m^3/s , que pertenecen a los meses de julio y octubre respectivamente.

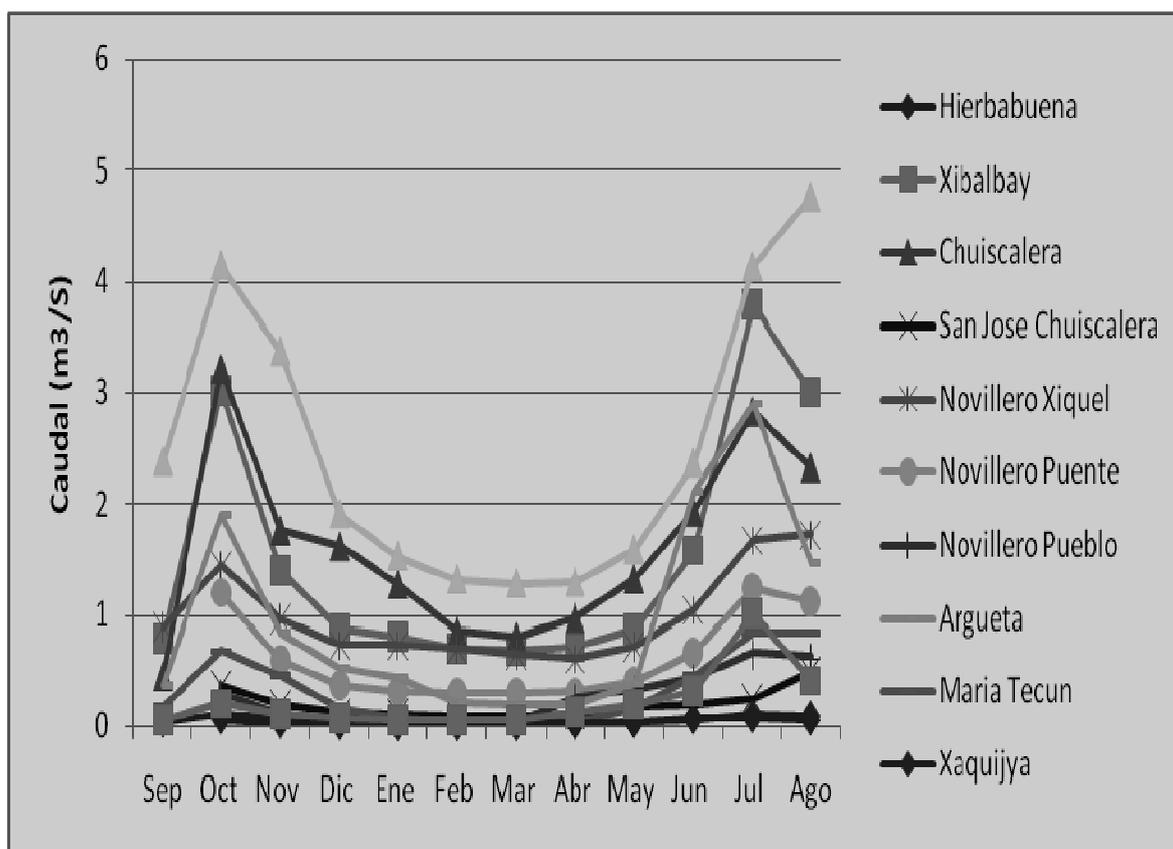


Figura 14 Caudales de los puntos de aforo medidos en el período de septiembre del 2007 al mes de agosto del 2008.

Cuadro 38 Caudal promedio mensual de los aforos realizados en los cauces de la subcuenca del río Quiscab (m^3/seg).

Año	Río \ Mes	Hierba buena	Xibalbay	Chuiscale ra	San José Chuiscale ra	Noville ro Xiquel	Noville ro Puente	Noville ro Pueblo	Argueta	Maria Tecun	Xaquij ya	Xibalb ay La Cuchilla	Quiscab
2007	Sep		0.7856	0.4478		0.889			0.3708	0.1710	0.0339	0.0556	2.3762
	Oct.	0.0644	3.0106	3.2082	0.3719	1.4459	1.1972	0.2946	1.9055	0.6772	0.1063	0.2068	4.1444
	Nov	0.0252	1.3951	1.7591	0.1893	0.9584	0.5884	0.0980	0.8331	0.4522	0.0752	0.1104	3.3719

	Dic	0.011 7	0.8746	1.6111	0.1176	0.723 9	0.366 3	0.053 1	0.528 6	0.15 73	0.050 5	0.075 1	1.9086
2008	Ene	0.004 0	0.8095	1.2695	0.1081	0.720 8	0.308 4	0.039 9	0.439 1	0.06 51	0.037 6	0.063 3	1.5297
	Feb	0.003 7	0.7025	0.8474	0.0864	0.689 0	0.298 6	0.038 4	0.216 0	0.03 97	0.035 2	0.061 4	1.3164
	Mar	0.003 1	0.6806	0.8006	0.0819	0.647 7	0.290 0	0.034 2	0.198 6	0.03 57	0.029 8	0.058 5	1.2810
	Abr	0.011 2	0.7110	0.9696	0.1080	0.605 9	0.304 7	0.257 9	0.194 6	0.04 05	0.020 5	0.123 4	1.2935
	Ma y	0.032 1	0.8772	1.3212	0.1777	0.718 9	0.401 9	0.329 7	0.385 5	0.16 58	0.032 7	0.192 2	1.5863
	Jun	0.077 0	1.5765	1.9280	0.1900	1.040 0	0.663 5	0.437 0	2.116 5	0.45 00	0.062 0	0.320 0	2.3635
	Jul	0.075 0	3.7833	2.8235	0.2478	1.669 5	1.245 5	0.656 5	2.893 8	0.83 65	0.098 0	1.014 8	4.1349
	Ago	0.053 0	2.9945	2.3175	0.4965	1.721 0	1.121 0	0.616 0	1.470 0	0.84 40	0.091 5	0.413 5	4.7680

6.9 Estimación de la cantidad del suelo perdido

6.9.1 Prueba de sedimentos

En los cuadros 38, 39 y 40 se muestran los resultados obtenidos del monitoreo de los principales cauces de la subcuenca del río Quiscab, donde se presentan los caudales y sedimentos promedios de los 12 puntos donde se realizaron los aforos y toma de muestras de agua para la determinación de los sedimentos en suspensión contenidos en el caudal de los cauces. El punto de aforo del río Hierbabuena presenta un promedio de arrastre de sedimentos de 517 ton/año, el río Xibalbay 41,112 ton/año, río Chuiscalera 42,321 ton/año, río Chuiscalera San José 2,980 ton/año, río Novillero Xiquel 25,419 ton/año, río Novillero puente 12,496 ton/año, río Novillero 5,623 ton/año, río Argueta 22,118 ton/año, río María Tecun 6,343 ton/año, río Xaquijya 778 ton/año, río Xibalbay la Cuchilla 5801 ton/año y el río Quiscab 110,398 ton/año.

Cuadro 39 Sedimento arrastrado por los principales cauces de la subcuenca del río Quiscab (Ton/año)

Río	Novillero Puente			Novillero Pueblo			Argueta			María Tecun			Xaquijya			
	Peso	gr/L	Caudal m³/seg	Ton/año	gr/L	Caudal m³/seg	Ton/año	gr/L	Caudal m³/seg	Ton/año	gr/L	Caudal m³/seg	Ton/año	gr/L	Caudal m³/seg	Ton/año
Fecha	gr/L	m³/seg	Ton/año	gr/L	m³/seg	Ton/año	gr/L	m³/seg	Ton/año	gr/L	m³/seg	Ton/año	gr/L	m³/seg	Ton/año	
Año 2007	02-nov	0.51	0.68	10904.52	0.70	0.12	2737.32	0.86	0.93	25276.73	0.60	0.54	10160.90	0.56	0.08	1483.45
	29-nov	0.59	0.50	9340.33	0.36	0.06	692.53	0.69	0.64	13861.02	0.62	0.32	6178.53	0.40	0.06	807.32
	19-dic	0.56	0.36	6428.30	0.40	0.05	668.56	0.64	0.52	10515.36	0.70	0.12	2560.72	0.36	0.05	544.94
Año 2008	05-ene	0.60	0.32	5960.30	0.42	0.04	529.80	0.70	0.51	11192.13	0.50	0.08	1308.74	0.38	0.04	479.35
	18-ene	0.61	0.31	5982.69	0.41	0.04	517.19	0.61	0.47	9041.37	0.50	0.06	977.62	0.39	0.04	455.06
	06-feb	0.68	0.30	6411.90	0.45	0.04	567.65	0.50	0.22	3421.66	0.51	0.04	643.33	0.39	0.04	442.77
	20-feb	0.65	0.30	6108.52	0.41	0.04	478.40	0.56	0.22	3796.93	0.52	0.04	655.95	0.37	0.04	408.39
	21-mar	0.64	0.29	5812.72	0.40	0.03	416.28	0.71	0.20	4388.55	0.49	0.03	525.39	0.36	0.03	283.82
	11-abr	0.64	0.30	5994.36	0.84	0.24	6278.19	0.60	0.19	3651.87	0.49	0.04	556.30	0.36	0.02	249.77
	25-abr	0.61	0.31	6021.17	0.85	0.28	7478.76	0.64	0.20	3955.88	0.55	0.05	780.52	0.36	0.02	215.71
	02-may	0.66	0.33	6889.35	0.90	0.33	9366.19	0.80	0.20	5020.53	0.55	0.05	919.27	0.36	0.02	238.41
	30-may	0.76	0.56	13517.59	0.95	0.38	11294.62	0.94	0.78	23033.26	0.67	0.41	8620.68	0.59	0.06	1060.56
	26-jun	0.80	0.67	16878.07	0.96	0.42	12715.32	0.90	2.10	59688.19	0.75	0.41	9791.93	0.64	0.06	1251.35
	02-jul	0.80	0.83	20813.76	0.92	0.43	12388.60	0.96	2.66	80469.78	0.79	0.48	11908.62	0.60	0.07	1343.43
	22-jul	0.96	1.30	39205.56	0.98	0.71	22035.46	0.99	3.21	100280.70	0.99	1.06	33000.22	0.63	0.09	1688.75
	04-ago	0.96	1.16	35027.67	0.89	0.51	14201.92	0.89	1.70	47629.77	0.91	0.88	25167.94	0.66	0.10	2081.38
	12-ago	0.91	1.09	31137.07	0.76	0.73	17400.30	0.70	1.24	27439.47	0.95	0.81	24296.91	0.62	0.08	1622.84
	Prom.	0.70	0.56	12496.17	0.68	0.26	5623.97	0.75	0.94	22118.56	0.65	0.32	6543.30	0.47	0.05	778.98

De acuerdo a los valores obtenidos, el punto que presenta un mayor arrastre de sedimentos es el río Quiscab con 110,398 ton/año, ya que es el punto de aforo o desembocadura del río al lago de Atitlán, y el punto que muestra un menor arrastre de sedimentos en la subcuenca del río Quiscab es el río Hierbabuena 517 ton/año, esto se debe a que el río es pequeño en cuanto a su longitud y su ancho y caudal son menores en comparación a los otros puntos que se localizan en la parte alta de la subcuenca.

Al unir los valores de arrastre de sedimentos del río Chuiscalera y Xibalbay suman un total de 83,434 Ton/año de sedimento arrastrado, estos dos cauces forman el último tramo del río Quiscab que tiene el máximo arrastre de sedimentos de 110,398 Ton/año, en el cual hay una diferencia de 26,964 Ton/año (24.42%), de sedimentos que el cauce principal del río Quiscab arrastra en su último tramo, el cual tiene un área aproximada de 1422 ha.

Cuadro 40 Sedimento arrastrado por los principales cauces de la subcuenca del río Quiscab (Ton/año).

Río		Xibalbay La Cuchilla			Quiscab		
		Peso	Caudal m ³ /seg	Ton/año	gr/L	Caudal m ³ /seg	Ton/año
Fecha	gr/L	gr/L					
Año 2007	02-nov	0.65	0.11	2316.32	1.36	4.02	172585.18
	29-nov	0.56	0.09	1571.75	1.20	2.68	101344.09
	19-dic	0.59	0.07	1321.04			
Año 2008	05-ene	0.61	0.06	1231.17			
	18-ene	0.59	0.06	1190.80	1.23	1.56	60356.12
	06-feb	0.60	0.06	1173.14	1.25	1.33	52270.92
	20-feb	0.65	0.06	1250.40	1.25	1.31	51521.94
	21-mar	0.64	0.06	1130.25	1.26	1.29	51059.94
	11-abr	0.70	0.08	1699.79	1.26	1.29	51377.82
	25-abr	0.72	0.17	3860.01	1.26	1.29	51417.56
	02-may	0.80	0.22	5600.79	1.30	1.32	54279.76
	30-may	0.86	0.22	6020.85	1.36	2.10	90195.48
	26-jun	0.89	0.33	9290.19	1.40	2.17	95806.37
	02-jul	0.80	0.26	6584.72	1.39	2.47	108141.04
	22-jul	0.89	1.69	47321.03	1.70	5.87	314858.58
	04-ago	0.80	0.61	15389.57	1.69	5.13	273460.96
	12-ago	0.80	0.22	5474.65	1.69	4.41	234768.18
	Prom.	0.71	0.26	5801.79	1.37	2.55	110398.65

Al realizar el análisis de la información de cuanto sedimento que se pierden por microcuenca, se determina que el punto de muestreo del río Quiscab pierde aproximadamente 77.60 Ton/ha/año de suelo, lo cual es muy alto para un área tan pequeña (1422 ha), ya que en este punto se esta tomando todo el sedimento que se pierde en la parte alta de la subcuenca. Por lo que el sedimento que pierde esta área es de 26,964 Ton/año, dando un valor de pérdida de suelo por hectárea de 18.95 Ton/ha/año, se logro determinar que al lago de Atitlán le ingresa un total de 110,398 Ton/año de sedimento perdido en toda el área dando una pérdida de sedimento por hectárea de 6.92 Ton/ha/año.

Los otros puntos de interés son las muestras que se tomaron en el río Novillero, para el primer punto de muestra que se tomo en el Aldea el Novillero presentó un arrastre de sedimentos de 5623 Ton/año, para el segundo punto que se localizó a 4 km de distancia aproximadamente su valor de arrastre de sedimentos aumento considerablemente ya que llevaba un 54.99 % más de sedimento (12,496 ton/año), y un tercer punto llamado Novillero Xiquel el cual se localiza a solo 2 km de distancia del punto 2, el arrastre de sedimentos fue de un 50.84 % (25,419 ton/año), más que el punto denominado Novillero Puente, para lo cual existe una alta pérdida de suelo en el área.

Cuadro 41 Resumen de los resultados obtenidos en el monitoreo del río Quiscab

Punto de aforo	Área de drenaje (ha)	Caudal anual promedio (m ³ /s)	Sedimentos en suspensión anual (g/L)	Sedimento total (Ton/año)	Sedimento perdido (Ton/ha/año)
Hierbabuena	186.20	0.0285	0.5753	517.06	2.78
Xibalbay	1390.40	1.5380	0.8476	41112.89	29.57
Chuiscalera	1006.10	1.5788	0.8500	42321.31	42.06
Chuiscalera San José	1073.00	0.1855	0.5094	2980.49	2.78
Novillero Xiquel	730.40	0.9643	0.8359	25419.17	34.80
Novillero Puente	1746.80	0.5642	0.7024	12496.17	7.15
Novillero Pueblo	2416.95	0.2614	0.6824	5623.97	2.33
Argueta	2785.25	0.9396	0.7465	22118.56	7.94
María Tecun	1053.95	0.3181	0.6524	6543.30	6.21
Xaquijya	803.30	0.0523	0.4724	778.98	0.97
Xibalbay La Cuchilla	1345.05	0.2574	0.7147	5801.79	4.31
Quiscab	1422.60	2.5491	1.3733	110398.65	77.60

Los puntos de monitoreo, que presentan mayores valores de sedimento perdido en Ton/ha/año son Xibalbay, Chuiscalera, Novillero Xiquel y Quiscab, con valores de 29.57, 42.06, 34.8 y 77.6, respectivamente.

En comparación a las áreas de drenaje para cada uno de los puntos, es relevante mencionar que el punto Chuiscalera tiene 16 % más de pérdida de suelo, en comparación con el punto de Xibalbay, teniendo éste último 616 hectáreas menos que el primero. Esto se debe a la diferencia entre los usos de la tierra en ambas áreas.

Por el contrario el punto de aforo del río Argueta es el que tiene el área de drenaje de mayor valor, con 2785.25 ha. Pero presenta un valor de sedimento perdido menor, 7.94 Ton/ha/año. Lo mismo sucede en el punto de Novillero pueblo, con 2416.95 ha. y únicamente 2.33 Ton/ha/año. Esto es debido, a la cobertura vegetal que presentan las áreas; siendo bosques, cultivos permanentes y anuales.

El punto de aforo Quiscab, presenta una pérdida de sedimentos de 77.6 Ton/ha/año, se debe a la acumulación de sedimentos casi la totalidad de la subcuenca.

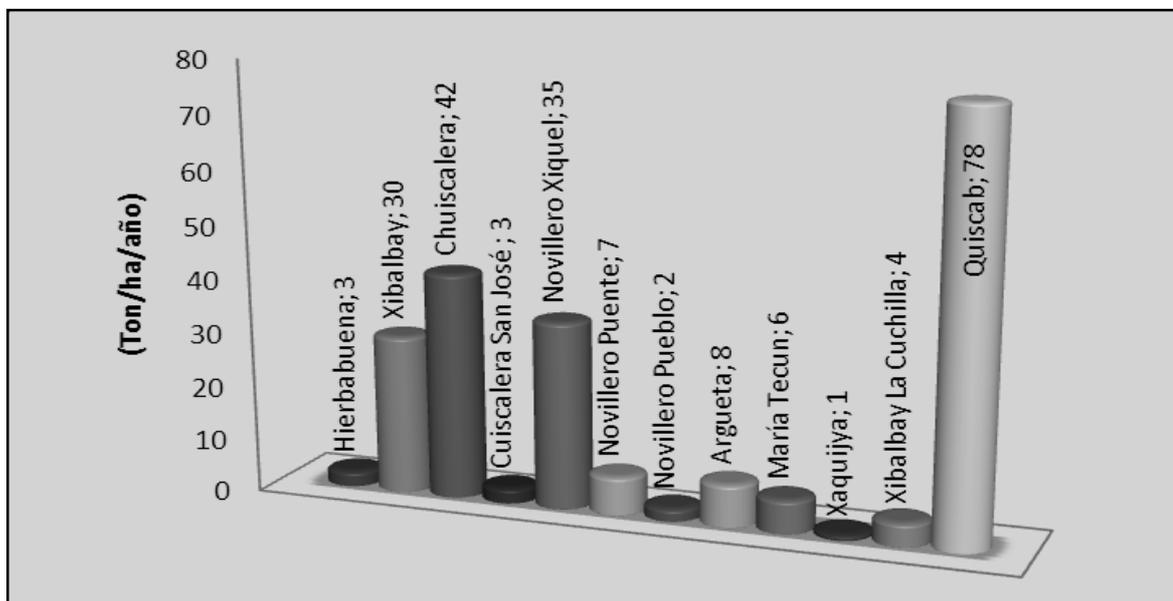


Figura 15 Suelo perdido en Ton/ha/año en cada uno de los puntos muestreo.

6.9.2 Lineamientos de manejo para minimizar el deterioro de la calidad de agua superficial

El deterioro de los suelos, es uno de los problemas que afronta la subcuenca del río Quiscab, como la mayoría de las cuencas de nuestro país. A causa de la pérdida de cobertura vegetal, el suelo se hace susceptible a la erosión provocando que pierda su potencial. Cuando se arrastra los horizontes superficiales del suelo se pierde la fertilidad natural de los mismos. Otro problema que predomina es el cambio de uso de la tierra y cobertura vegetal, debido a la inexistencia de un Plan de Ordenamiento Territorial que cubra el municipio.

La deforestación afecta a la subcuenca del río Quiscab. La extracción de madera de los bosques del área debido al cambio de uso de la tierra para el establecimiento de cultivos agrícolas. Así como la utilización de ésta para el abastecimiento de leña para consumo propio y también madera aserrada para la utilización en la construcción. Por ende la biodiversidad que se refugia en los bosques ha sido reducida grandemente.

Las líneas de acción para minimizar el deterioro de la calidad del agua superficial de la subcuenca del río Quiscab, se enuncian a través de dos programas. Enfocados al manejo de cobertura vegetal, con la finalidad de aumentar la recuperación y protección de bosques y disminuir la pérdida de partículas de suelo por medio de la escorrentía. Los programas son los siguientes: disminución de la degradación del suelo y la recuperación y protección de masas boscosas.

6.9.2.1 Programa para minimizar la degradación del suelo

Programa enfocado a:

- Disminuir la erosión laminar del suelo, capacitando al agricultor en técnicas de conservación de suelo.
- Disminuir la utilización de productos químicos para el manejo de los cultivos agrícolas y buscar alternativas económicamente y ambientalmente sostenibles.

6.9.2.2 Programa para la recuperación y protección de masas boscosas:

Programa enfocado a:

- Reforestar áreas degradadas que en la actualidad son zonas erosionadas y sin cobertura.
- Protección y prolijidad de los bosques naturales, cumpliendo las legislaciones existentes.
- Protección y conservación de bosque en zonas de recarga hídrica.
- Capacitación para el control de rosas agrícolas.

7 CONCLUSIONES

La subcuenca del río Quiscab, presenta una alta recarga hídrica; para las condiciones de uso de la tierra para 1991 existen mayor área que presenta la categoría de muy alta recarga hídrica en comparación a la del uso de la tierra del año 2009, esto debido a que la mayor parte de sus suelos presentan una textura franca-arenosa y una infiltración alta. Bajo las condiciones de capacidad de uso de la tierra se determinó que existe un aumento en cuanto al área de muy alta recarga hídrica, en comparación con los otros dos escenarios.

Una consideración muy importante es que las áreas de recarga potencial muy alta en condiciones de capacidad de uso de la tierra y alta en condiciones de uso de la tierra del año 1991 y 2009, presentan alta susceptibilidad, ya que allí mismo se localizan los bosques comunales de Totonicapán. La categoría con susceptibilidad moderada es la que ocupa la mayor extensión para los escenarios de uso de la tierra para 1991 y 2009 en la cual se localiza la mayor cantidad de cultivos y poblados del área. Dicha categoría tiene poca extensión bajo condiciones de capacidad de uso de la tierra por lo contrario el área de baja o nula susceptibilidad presentan un leve aumento bajo éstas condiciones de capacidad de uso.

Se presentaron las diferencias entre los tres escenarios: a) Uso de la tierra para 1991, b) Uso de la tierra para 2009 y c) Capacidad de uso de la tierra. En donde los valores mayores de escorrentía máxima esperada, se presentan en el uso de la tierra para 2009 debido al uso incorrecto de la tierra existente en este año. Por el contrario el escenario de capacidad de uso de la tierra muestra los valores más bajos de escorrentía máxima esperada para los diferentes periodos de retorno evaluados.

Se cuantificaron las partículas de suelo perdidas por el arrastre de la escorrentía superficial a través de la medición de la pérdida de suelo; se determinó que el punto de muestreo ubicado en el río Quiscab tienen el valor más alto en relación a su área de drenaje, siendo 77.60 Ton/ha/año, esto se debe a que en este punto se está captando todo el sedimento que se pierde en la parte alta de la subcuenca.

La información generada en este estudio, es de utilidad para las organizaciones encargadas del manejo de la cuenca del lago de Atitlán. En cuanto a contribuir a minimizar el deterioro de la calidad del agua superficial, las líneas de acción planificadas se agrupan en dos programas: a) Programa para la disminución de la degradación del suelo y b) Programa para la recuperación y protección de masas boscosas.

8 RECOMENDACIONES

Para complementar la información generada se exhorta a llevar a cabo en el área evaluada, estudios hidrológicos que permitan definir y caracterizar con mayor precisión los medios acuíferos de la zona. Esto incluye estudios geofísicos con el fin de determinar y delimitar las zonas de los acuíferos en su extensión y espesor.

Priorización de las acciones y proyectos orientados a la eliminación de las entradas de agroquímicos, conservación de suelos, aguas residuales, educación ambiental y sistemas de control, monitoreo e investigación que deberán ser ajustados a la magnitud de la crisis ambiental develada por el florecimiento de la cianobacteria en el lago, así mismo que tengan programas de capacitación sobre prácticas agrícolas y forestales, que sean de carácter integral para buscar la sostenibilidad en la utilización de los recursos que permita lograr una mitigación de la degradación. Con esto se estaría contribuyendo a favorecer la recarga hídrica y disminuir la rápida concentración de escorrentía que causan las crecidas de los ríos y crear dentro de las instituciones que protegen al lago, programas de reforestación intensiva de las áreas que presenten un alto potencial de riesgo de provocar movimientos en masa que puedan poner en riesgo vidas humanas.

Realizar un estudio para evaluar el impacto que provoca la gran cantidad de sedimentos que son arrastrados por el caudal del río hacia el lago de Atitlán para evitar su degradación que puede llegar a puntos críticos como se ha visto en otros escenarios similares, para mantener la cobertura boscosa existente en el área, principalmente en áreas críticas de recarga hídrica y en las áreas agrícolas, además de tratar de reducir las áreas de mayor susceptibilidad a erosionarse, con el uso de prácticas de conservación de suelos y recuperación de las áreas degradadas o que han sufrido un cambio de uso.

Promover mejores condiciones para mejorar la gobernabilidad del agua a través de la Política y Estrategia Nacional de Gestión Integrada del Agua, de la GIRH; enfocada en la planificación de la construcción de herramientas dirigidas a concretar las acciones definidas a partir de la planeación estratégica institucional así como ampliar el apoyo y trabajo de las necesidades del sector privado y social.

La subcuenca se ubica en un área protegida por lo que existe un Plan Maestro de la Reserva de Uso Múltiple La Cuenca del Lago de Atitlán -RUMCLA-, en el que se fundamenta la acción de saneamiento y en la que se tienen que coordinar los esfuerzos públicos y privados. Parte de las acciones se concentran en la construcción de plantas de tratamiento de desechos líquidos y sólidos en los municipios de la cuenca. La construcción de plantas de aguas residuales forma parte del Programa de Manejo de la Cuenca del Lago de Atitlán, que comprende la rehabilitación y ampliación de los sistemas de tratamiento de los diez municipios ubicados en la rivera del lago.

9 BIBLIOGRAFÍA

1. Aparicio Mijares, FJ. 2001. Fundamentos de hidrológica de superficie. México, Limusa. 303 p.
2. Asturias Hernández, RM. 2006. Impacto del cambio de uso del suelo en el comportamiento del ciclo hidrológico de las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal. Tesis Ing. Ag. Guatemala, USAC. 102 p.
3. Cabrera, CA. 1997. Determinación de políticas de explotación de las aguas subterráneas para las aldeas de San José Pacul y Pachalí del municipio de Santiago Sacatepéquez, Guatemala. Tesis Ing. Agr. Guatemala, USAC. 52 p.
4. CONAP (Consejo Nacional de Áreas Protegidas, GT). 2007. Plan de desarrollo sostenible de la reserva de uso múltiple cuenca del lago Atitlán, un modelo de conservación y desarrollo sostenible: 2007-2011. Guatemala. p. 20-41.
5. _____. 2011. Áreas protegidas: listado de áreas protegidas. Guatemala. Consultado 10 febrero del 2011. Disponible en http://conap.gob.gt/Members/admin/documentos-centro-de-documentacion/areas-protegidas/SIGAPPublico_Enero.xls/view?searchterm=listado_areas_protegidas.
6. Cruz S, JR De la. 1982. Clasificación de zonas de vida de Guatemala a nivel de reconocimiento. Guatemala, Instituto Nacional Forestal. 42 p.
7. Custodio, E; Llamas, MR. 2001. Hidrología subterránea. 2 ed. Barcelona, España, Omega. v. 1, s.p.
8. FAO, IT. 1976. A framework for land evaluation. Rome, Italia. 19-21 p. (Soils Bulletin no. 32).
9. _____. 1995. Forest resources assessment 1990; global synthesis. Rome, Italia. 15 p. (Forestry Paper no. 124).
10. Herrera Ibañez, IR. 1995. Manual de hidrología. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 223 p.
11. _____. 1998. Reconocimiento hidrogeológico de la cuenca del río Itzapa, departamento de Chimaltenango, Guatemala. Tesis MSc. Costa Rica, UNA. 104 p.
12. _____. 2002. Hidrogeología práctica. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 192 p.
13. IGN (Instituto Geográfico Nacional, GT). 1973a. Mapa geológico de república de Guatemala; hoja Sololá, no. 1960 II. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.

14. _____. 1973b. Mapa topográfico de república de Guatemala; hoja Chichicastenango, no. 1960 I. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.
15. _____. 1973c. Mapa topográfico de república de Guatemala; hoja Santa Catarina Ixtahuacan, no. 1960 III. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.
16. _____. 1973d. Mapa topográfico de república de Guatemala; hoja Sololá, no. 1960 II. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.
17. _____. 1973e. Mapa topográfico de república de Guatemala; hoja Totonicapán, no. 1960 IV. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.
18. INE (Instituto Nacional de Estadística, GT). 2003. Censos nacionales XI de población y VI de habitación 2002. Guatemala. 38 p.
19. Johnson, EE. 1975. El agua subterránea y los pozos. Minnessota, Estados Unidos, Johnson. 513 p.
20. Lerner, DN; Issar, AS; Simmers, I. 1990. Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge. Germany, Verlag Heinz Heise. v. 8, 345 p.
21. Lesser, JM. 2001. Décimo tercer curso internacional en contaminación de acuíferos: restauración de suelos y acuíferos con contaminantes orgánicos. México, UNAM. s.p.
22. Linsley, RA. 1988. Hidrología para ingenieros. 2 ed. México, McGraw-Hill. 386 p.
23. MAGA (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, GT). 1991. Plan maestro de riego y drenaje: hidrogeología-disponibilidad de agua subterránea. Guatemala. 72 p. (Proyecto PNUD/OSP/GUA/88/003).
24. _____. 2000. Mapas temáticos digitales de la república de Guatemala. Guatemala. Escala 1:250,000. 1 CD.
25. _____. 2001. Mapa fisiográfico - geomorfológico de la república de Guatemala, a escala 1:250,000 - memoria técnica- (en línea). Guatemala. Consultado 10 oct 2007. Disponible en <http://www.maga.gob.gt/sig/.....>
26. Muñoz Palacios, C. 1998. La conceptualización e identificación de zonas de recarga hídrica prioritarias a nivel nacional. Guatemala. 45 p. (Proyecto FAO-GCP/GUA/007/NET).
27. Nittler, J; Barahona, R. 1993. El manejo de cuencas en el proyecto de desarrollo agrícola de Guatemala. Guatemala, MAGA. 92 p. (Proyecto de Desarrollo Agrícola G de G/AID520-0274 USAID).
28. Orozco Orozco, EO. 2004. Potencial de recurso hídrico subterráneo y modelo matemático preliminar del sistema acuífero del valle aluvial del río Guacalate desde Antigua Guatemala hasta

- Alotenango, Sacatepéquez, Guatemala. Tesis MSc. Montes de Oca, San Pedro, Costa Rica, Universidad de Costa Rica, Escuela Centroamericana de Geología, Sistema de Estudios de Posgrado. 132 p.
29. Padilla Cámara, TA. 2003. Evaluación del potencial hídrico en la microcuenca del río Cantil, para el aprovechamiento de las aguas subterráneas en la finca Sabana Grande, El Rodeo, Escuintla, Guatemala. Tesis MSc. Costa Rica, UCR. 104 p.
30. Padilla Cámara, TA; Salguero Barahona, MR; Orozco y Orozco, E. 2003. Metodología para la determinación de áreas de recarga hídrica natural. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía / Instituto Nacional de Bosques. 106 p.
31. Ridder, N de. 1994. Primer curso nacional de drenaje agrícola y control de inundaciones a nivel de postgrado: hidrogeología de los diferentes tipos de zonas llanas. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 33 p.
32. Sandoval Illescas, JE. 1989. Principios de riego y drenaje. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 345 p.
33. Schosinsky, G. 2007. Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. Costa Rica, Escuela Centroamericana de Geología / Universidad de Costa Rica. 18 p.
34. Silva Medina, GA. 2003. Transporte de sedimentos en ríos. Colombia, Bogotá. Consultada 10 oct 2007. Disponible en <http://www.geocities.com/gsilvam/sedimentos.htm>
35. URL (Universidad Rafael Landívar, GT). 2004. Perfil ambiental de Guatemala informe sobre el estado del ambiente y bases para su evaluación sistemática. Guatemala, URL, Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas, Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente. 31 p.
36. Vargas, A. 2002. Manantiales de una parte del valle central de Costa Rica. Revista Geológica de América Central no. 27:39-52.

10 ANEXOS

10.1 Aspectos lineales

a. Perímetro de la subcuenca

Este parámetro se calculó por medio del programa Arc Gis 9.1. Dando como resultado que el perímetro de la subcuenca del río Quiscab corresponde a 60.25 km.

b. Clase de corrientes

Cuadro 42 Clase de corrientes de la subcuenca del río Quiscab

Clase de corrientes	No. De corrientes
Permanentes	11
Intermitentes	42
Efímeras	52

Fuente: Elaboración Módulo de Cuencas Hidrográficas 2007.

Corrientes permanentes: son los ríos Quiscab, Chuiscalera, Xibalbay, Novillero, Argueta, Xaquijya, María Tecún, Xibalbay la Cuchilla, Chuiscalera San José Chacayá, Pugualtuj y las Flores.

c. Orden de corrientes

De acuerdo al criterio del grado de concentración de la red de drenaje la subcuenca cumple con las características siguientes: 5 ordenes, 100 – 700 km².

Cuadro 43 Orden de corrientes

Orden de corriente U	No. De corrientes Nu	Longitud de corrientes Lu
1	77	110
2	21	47
3	6	11
4	3	9.5
5	1	5
	Ntc =108	La = 182.5

Fuente: Elaboración Propia

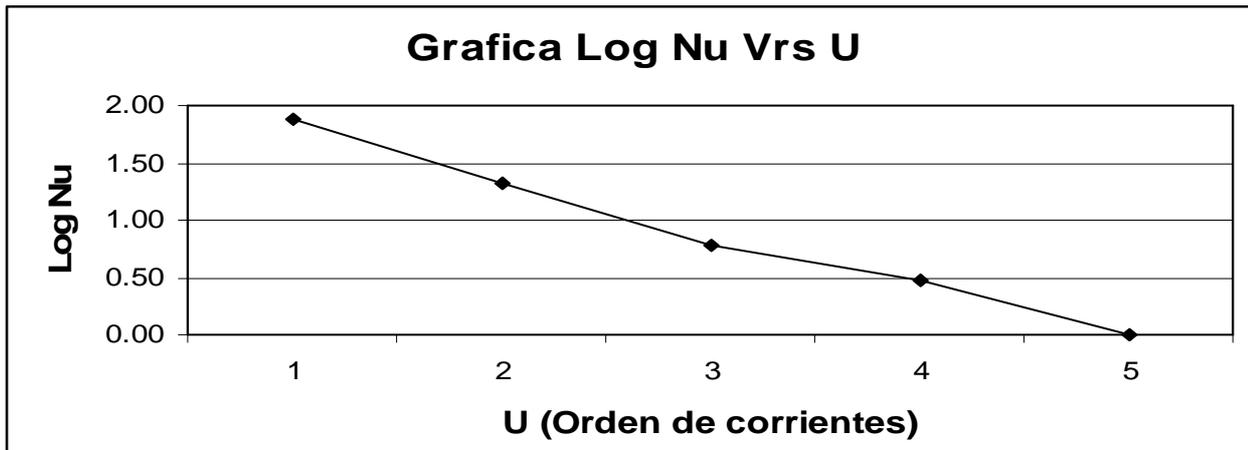


Figura 16. Gráfica Log Nu vrs. Número de corrientes.

d. Longitud media de corrientes (Lu)

$$Lu_1 = \frac{\sum Lu(i)}{N\bar{u}}$$

$$Lu_1 = 110 / 77 = 1.43$$

$$Lu_2 = 47 / 21 = 2.24$$

$$Lu_3 = 11 / 6 = 1.83$$

$$Lu_4 = 9.5 / 3 = 3.16$$

$$Lu_5 = 5 / 1 = 5$$

$$L\bar{u} = 182.5 / 108 = 1.67 \text{ km.}$$

Las longitudes medias de corrientes es un indicador de pendientes, dando a conocer que la subcuenca de estudio está comprendida por corrientes con longitudes cortas que reflejan pendientes muy escarpadas.

e. Radio de longitud medio (RL)

$$RL = Lu / L(u-1)$$

$$L = \frac{\sum [Lu / L(u-1)]}{n}$$

$$RL_1 = 5 / 9.5 = 0.52$$

$$RL_2 = 9.5 / 11 = 0.86$$

$$RL_3 = 11 / 47 = 0.23$$

$$RL_4 = 47 / 110 = 0.43$$

$$RL = (0.52+0.86+0.23+0.43) / 4 = 0.51 \text{ km}$$

El radio de longitud medio indica que las corrientes son cortas, por lo tanto el área de influencia de estas corrientes serán cortas.

f. Lc (longitud cause principal)

$$Lc = 17.75 \text{ km.}$$

g. Longitud acumulada de corrientes (La)

$$La = 182.5 \text{ km.}$$

10.1.1.1 Aspectos de superficie

a. Área de la subcuenca

$$Ak = 154.12 \text{ km}^2 \text{ (15,412 ha)}$$

b. Forma de la subcuenca

- Relación de forma

$$Rf = Ak / Lc^2$$

$$Rf = \frac{154.12 \text{ km}^2}{(17.75 \text{ km})^2} = 0.51$$

De acuerdo a este coeficiente de relación la subcuenca corresponde a una forma ovalada, indicando que tiene buen grado de retención de la precipitación, sin embargo es conveniente comparar este con la infiltración del suelo.

- Relación circular

$$Rc = Ak / Ac$$

$$Rc = \frac{154.12 \text{ km}^2}{288.87 \text{ km}^2} = 0.553$$

Este factor indica que la forma de la subcuenca respecto a la forma circular se asemeja solamente en un 55 %.

- Radio de elongación

$$Re = Dc / Lc$$

$$Dc = \sqrt{4Ak/\pi}$$

$$Dc = \sqrt{4 (154.12 \text{ km}^2) / \pi} = 14.258$$

$$Re = \frac{14.258}{17.75} = 0.803$$

Este factor indica que la subcuenca es de forma elongada en un 80 %.

c. Densidad de drenaje

$$D = La / Ak$$

$$D = \frac{182.50 \text{ km}}{154.12 \text{ km}^2} = 1.143 \text{ km/ km}^2$$

El área es moderadamente drenada con respuesta hidrológica muy lenta, con suelos resistentes a la erosión, con alta permeabilidad.

d. Frecuencia o densidad de corrientes (Fc)

$$Fc = \frac{Ntc}{Ak}$$

$$Fc = \frac{108}{154.12 \text{ km}^2} = 0.7 \text{ cauces/km}^2$$

Este factor indica que dentro de la subcuenca hay menos de una corriente por km², lo que muestra que el área tiene una baja eficiencia de drenaje.

10.1.1.1.2 Aspectos de relieve

a. Pendiente media de la subcuenca (Sc)

Método de Alvord

$$Sc = \frac{d * Ltc}{Ak}$$

$$Sc = \frac{0.1 \text{ km.} * 509.044 \text{ km.} * 100}{159.66} = 32 \%$$

La pendiente media de la subcuenca presenta un relieve pronunciado en un 32%.

b. Pendiente del canal o cauce principal Scp

Método analítico

$$Scp = \frac{\Delta H}{Lc} * 100 \%$$

$$Scp = \frac{3300 - 1580 \text{ m}}{17,750 \text{ km}} * 100 \% = 10 \%$$

Este factor indica que el relieve del cauce principal es suave, por lo que disminuye la velocidad de la corriente.

c. Elevación media de la subcuenca (Em) – Método de las intersecciones

Cuadro 44 Elevación media de la cuenca

Elevación (m)	Numero de intersecciones
1600	5
1700	9
1800	9
1900	11
2000	13
2100	15
2200	20
2300	92
2400	105
2500	70
2600	72
2700	74
2800	47
2900	33
3000	25
3100	21
3200	12
3300	5
Total	638

Fuente: Modulo de Cuencas Hidrograficas 2007.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{Em} = & [(1600*5) + (1700*9) + (1800*9) + (1900*11) + (2000*13) + (2100*15) + (2200*20) + \\
 & (2300*92) + (2400*105) + (2500*70) + (2600*72) + (2700*74) + (2800*47) + (2900*33) + (3000*25) \\
 & + (3100*21) + (3200*12) + (3300*5)] / 638 = \mathbf{2,523.20\ m}
 \end{aligned}$$

La elevación media de la subcuenca es de 2523.20 msnm, lo que indica que tiene un bajo grado de madurez, por ser una cuenca joven. También influye en que hay poca perdida por evaporación debido a su elevación.